

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**FERNANDO GABRIEL**

**USO DE RETRANSMISSORES PARA AUMENTO DE COBERTURA EM REDES  
LORAWAN: UMA ANÁLISE DA LITERATURA**

**TOLEDO**

**2023**

**FERNANDO GABRIEL**

**USO DE RETRANSMISSORES PARA AUMENTO DE COBERTURA EM REDES  
LORAWAN: UMA ANÁLISE DA LITERATURA**

**Deployment of relays to coverage increase in LoRaWAN networks: A  
literature analysis**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação do Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Ricieri Castro e Souza

**TOLEDO**  
**2023**



[4.0 Internacional](#)

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

**FERNANDO GABRIEL**

**USO DE RETRANSMISSORES PARA AUMENTO DE COBERTURA EM REDES  
LORAWAN: UMA ANÁLISE DA LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação do Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 12/dezembro/2023

---

Álvaro Ricieri Castro e Souza  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Edson Tavares de Camargo  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Luis Carlos Mathias  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**TOLEDO  
2023**



Dedico este trabalho a Deus, por ser essencial  
em minha vida, autor de meu destino, meu  
guia, socorro presente na hora da angústia.

Dedico também aos meus amados pais, cujo  
amor, sacrifício e apoio inabaláveis foram a luz  
em minha jornada acadêmica.

Por fim, dedico à memória do meu querido  
primo, Otávio Borba Vergentino, cuja luz ainda  
brilha em nossos corações.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre ter guiado os meus passos, me dando saúde, determinação e sabedoria, me dando forças para não desistir diante os obstáculos que encontro na minha vida, e por fazer de mim a Sua morada.

Agradeço a minha família: meu pai, Valentin Gabriel, minha mãe, Nilza Borba Gabriel, e minha irmã, Thaís Borba Gabriel. Agradeço por todo carinho e amor, pela educação e incentivo, por todo apoio moral e financeiro, por sempre acreditarem e confiarem em mim. Essa conquista também é de vocês. Possuo profunda gratidão pelos ensinamentos e pela criação que vocês me deram, fazendo com que eu me tornasse o homem que sou hoje, sempre com humildade e também empatia pelo próximo. São virtudes que eu valorizo muito e sei que são provenientes das minhas raízes. Apesar da distância, não há um dia sequer que eu não me lembre de vocês.

Agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Álvaro Ricieri Castro e Souza, que além de orientador, foi meu professor em três matérias durante minha graduação, provendo muito conhecimento, demonstrando preocupação e cuidado com seus alunos e tendo a minha completa admiração como professor e como pessoa. Obrigado pelos ensinamentos e pela orientação excepcional ao longo deste trabalho.

Agradeço a minha namorada, Jéssica Caroline Fuhr, que cruzou o meu caminho durante a minha trajetória acadêmica. Agradeço por sempre me motivar a ser uma pessoa melhor, por ter resgatado a minha alegria em um momento tão difícil, e por sempre torcer pelo meu sucesso. Sem você, acho que eu teria desistido do curso, por isso, meu mais profundo agradecimento.

Agradeço ao meu tio e padrinho, Ed Carlos Jesuíno, minha tia e madrinha, Vera Lúcia Borba Jesuíno, e meus primos, Eberti de Oliveira Jesuíno, Carlos Vinícius Borba Jesuíno, Mariana Borba Jesuíno. Vocês são minha segunda família e apesar da distância ter diminuído os momentos de convívio, sempre lembro de vocês com muita alegria e saudade. Obrigado tio e tia, por todo apoio moral, por terem ajudado na minha criação. Obrigado meus primos, vocês são como irmãos pra mim. Sou profundamente grato por ter parentes como vocês.

Agradeço também aos meus amigos de convívio, com os quais já passei inúmeros momentos de felicidade juntos, e aos amigos que fizeram parte da minha jornada acadêmica. Em especial: Jean Frantchesco Senatore Rodrigues Martins, Nathan Senhorin, Douglas Hoffmann, Vicente Felizari Júnior, Hélio Tsong Wong, Gabriel Cacilho Zilio, Natan Douglas Patrício, Vinicius Vital, César Donadon, Guilherme Almeida e Ronaldo Gabriel Schlogl.

Deus não move uma palha naquilo que o homem é capaz de fazer. Mas Deus move o céu inteiro naquilo que o homem é incapaz de resolver. (Lucas 18:27)

## RESUMO

A Internet das Coisas (IoT) é um paradigma que foca na interconectividade de dispositivos, em vez de usuários finais, sendo as redes de longo alcance e baixo consumo de energia, conhecidas como LPWANs (*Low Power Wide Area Networks*) uma das tecnologias mais importantes nesse processo. A tecnologia LoRaWAN se destaca entre as LPWANs devido à sua natureza de código aberto, baixo custo e facilidade de implantação. Embora essas tecnologias ofereçam longo alcance, muitos dispositivos finais que a utilizam podem ficar em áreas com cobertura limitada, intermitente ou até mesmo inexistente. Em uma rede LoRaWAN, esse problema seria resolvido com a instalação de mais *gateways* e a infraestrutura para conectá-los à infraestrutura de servidores, o que pode ser inviável. Como alternativa, podem ser usadas estações retransmissoras, que possuem funções simplificadas, são de menor custo e utilizam a mesma tecnologia de transmissão da rede em questão. Como impõe alterações na topologia de rede, adiciona um novo tipo de equipamento e uma dinâmica de comunicação até então não prevista. Deste modo, é necessário analisar o que se tem disponível na literatura sobre o assunto, tanto em termos de trabalhos acadêmicos quanto em normas técnicas, que foram publicadas no decorrer da execução deste trabalho. Assim, este trabalho tem como objetivo estudar o uso de retransmissores em redes LoRaWAN para o aumento a cobertura em áreas com infraestrutura de rede limitada. Como resultados, obtém-se uma análise dos dispositivos disponíveis em estudos acadêmicos e as principais características das normas técnicas, apresentando um comparativo das características, vantagens, desvantagens, casos de uso e outras métricas de interesse. O estudo visa contribuir para o entendimento das técnicas de retransmissão LoRaWAN e seu potencial para expandir a cobertura em áreas com baixa infraestrutura de rede, entregando uma fundamentação para aqueles que desejem propor novas técnicas ou iniciar a implantação de dispositivos retransmissores em LoRaWAN.

**Palavras-chave:** retransmissores; lorawan; internet das coisas.

## ABSTRACT

The Internet of Things (IoT) is a paradigm that focuses on the interconnectivity of devices, rather than end users, with long-range and low-power networks, being known as LPWANs (Low Power Wide Area Networks), one of the most important technologies in this process. The LoRaWAN technology stands out among LPWAN technologies due to the open source code, low cost and ease of deployment. Despite providing long range, many devices could be located in areas with limited, intermittent or even nonexistent coverage. In a LoRaWAN network, this problem can be solved with the installation of more gateways and the infrastructure to connect them to the servers infrastructure, which could be impracticable. An alternative is to use relay stations, which have simplified functions, have lower cost and use the same transmission technology from the considered network. As the relays impose changes in the network topology, adds a new kind of device and a communication dynamic that was previously unforeseen. Therefore, it is necessary to analyze which is available in the literature about the subject, both in terms of academic works and technical standards, which was published during the execution of this work. Therefore, this work aims to study the use of relay stations in LoRaWAN for coverage increase in areas with limited network infrastructure. As a result, it is obtained an analysis of the devices available in academic studies and the main features of the technical standards, presenting a comparison of features, advantages, disadvantages, use cases and other considerations of interest. This study aims to contribute to the understanding of the relaying techniques in LoRaWAN and its potential to expand the coverage in areas with low network infrastructure, providing a theoretical foundation for those who wants to develop new techniques or to start the deployment of LoRaWAN relay stations.

**Keywords:** relays; lorawan; internet of things.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 – Estimativa de cobertura de uma rede LoRaWAN com 12 gateways, para cobertura da área rural do município de Toledo, Paraná.</b>	<b>20</b>
<b>Figura 2 – Representação de um sinal modulado de acordo com a técnica CSS (<i>Chirp Spread Spectrum</i>).</b>	<b>23</b>
<b>Figura 3 – Comparação das diferentes larguras de banda</b>	<b>24</b>
<b>Figura 4 – LoRa™ Spreading Factors</b>	<b>26</b>
<b>Figura 5 – Divisão das camadas do protocolo LoRaWAN</b>	<b>26</b>
<b>Figura 6 – Arquitetura da rede LoRaWAN</b>	<b>27</b>
<b>Figura 7 – Funcionamento das janelas em classe A</b>	<b>29</b>
<b>Figura 8 – Funcionamento das janelas em classe B</b>	<b>29</b>
<b>Figura 9 – Funcionamento das janelas em classe C</b>	<b>30</b>
<b>Figura 10 – Comparativo das classes de dispositivos A, B e C em LoRaWAN</b>	<b>30</b>
<b>Figura 11 – Experimento de cobertura do gateway LoRaWAN da UTFPR Campus Toledo.</b>	<b>34</b>
<b>Figura 12 – Fluxograma do funcionamento do repetidor LoRaWAN</b>	<b>39</b>
<b>Figura 13 – Arduino Pro Mini e módulo LoRa™ RFM95</b>	<b>39</b>
<b>Figura 14 – Estrutura do primeiro experimento (sem retransmissor)</b>	<b>40</b>
<b>Figura 15 – Estrutura do segundo experimento (com retransmissor)</b>	<b>40</b>
<b>Figura 16 – Implementação do <i>LoRaWAN Range Extender</i></b>	<b>42</b>
<b>Figura 17 – Hardware do dispositivo repetidor <i>r-node</i></b>	<b>43</b>
<b>Figura 18 – Arquiteturas dos estudos de caso realizados pelo autor com diferentes frequências para simular ausência de alcance e uso de repetidores</b>	<b>44</b>
<b>Figura 19 – Sensibilidade e consumo de energia versus fator de espalhamento considerando ciclo de 1 segundo.</b>	<b>46</b>
<b>Figura 20 – Mapa com posição e distância entre equipamentos.</b>	<b>46</b>
<b>Figura 21 – Pacotes recebidos no <i>relay</i> para diferentes potências de transmissão do dispositivo final e fatores de espalhamento.</b>	<b>47</b>
<b>Figura 22 – Taxa de sucesso de retransmissão do pacote para diferentes potências de transmissão de dispositivo final e fator de espalhamento</b>	<b>48</b>

<b>Figura 23 – Centro da cidade de Toulouse e pontos de instalação dos nós, retransmissor e gateway</b>	49
<b>Figura 24 – Comparação da métrica DER entre comunicações de salto único e retransmissão.</b>	50
<b>Figura 25 – Energia total consumida pelo nó em P6</b>	51
<b>Figura 26 – Classificação dos dispositivos</b>	53
<b>Figura 27 – Operação do CAD para a) um canal e b) dois canais.</b>	59
<b>Figura 28 – Fluxo resumido de troca de mensagens entre dispositivo final, <i>relay</i> e servidor de rede.</b>	61
<b>Figura 29 – Fluxo de troca de mensagens entre dispositivo final, <i>relay</i> e servidor de rede usando OTAA.</b>	61
<b>Figura 30 – Fluxo de troca de mensagens entre dispositivo final, <i>relay</i> e servidor de rede em caso de reingresso ou ABP.</b>	62
<b>Figura 31 – Exemplo de encapsulamento de um quadro de <i>uplink</i> por parte do <i>relay</i>, considerando o padrão US915.</b>	63

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1 – Combinações de SF, largura de banda e tamanho máximo de carga útil para <i>uplink</i>.</b>	64
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### Siglas

ABP	Ativação por Personalização, ou <i>Activation by Personalization</i>
ACK	Reconhecimento, ou <i>Acknowledgement</i>
BW	Largura de Banda, ou <i>Bandwidth</i>
CAD	Detecção de Atividade de Canal, ou <i>Channel Activity Detection</i>
CAPEX	Gasto de Capital, ou <i>Capital Expenditure</i>
Chirp	<i>Compressed High Intensity Radar Pulse</i>
CR	Taxa de codificação, ou <i>Coding Rate</i>
CSS	Espalhamento Espectral de Chirp, ou <i>Chirp Spread Spectrum</i>
DR	Taxa de Dados, ou <i>Data Rate</i>
IoT	Internet das Coisas, ou <i>Internet of Things</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
LPWAN	Rede de Área Ampla de Baixa Potência, ou <i>Low Power Wide Area Network</i>
MAC	Controle de Acesso ao Meio, ou <i>Medium Access Control</i>
MIC	Código de Integridade de Mensagem, ou <i>Message Integrity Check</i>
OPEX	Gasto Operacional, ou <i>Operational Expenditure</i>
OTAA	<i>Over the Air Activation</i>
RF	Radiofrequênci, ou <i>radio-frequency</i>
RSSI	Indicador de Intensidade do Sinal Recebido, ou <i>Received Signal Strength Indicator</i>
RX	Receptor
SF	Fator de Espalhamento, ou <i>Spreading Factor</i>
SNR	Relação Sinal-Ruído, ou <i>Signal to Noise Ratio</i>

SINR	Relação Sinal-Interferência mais Ruído, ou <i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>
ToA	Tempo no Ar, ou <i>Time on Air</i>
TX	Transmissor
WOR	<i>Wake-On-Radio</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Latinas

$BW$	Largura de banda	$[m^2]$
$b_{red}$	Bits de redundância	Número puro
$CR$	Fator de codificação	Número puro
$d$	Distância entre transmissor e receptor	$[m]$
$d_0$	Distância de referência para cômputo da perda de percurso	$[m]$
$L(d)$	Perda de percurso, em função da distância	Número puro
$R_b$	Taxa de dados	$[bits/s]$
$SF$	Fator de espalhamento	Número puro
$T_s$	Tempo de símbolo	$[s]$

### Letras Gregas

$\alpha$	Coeficiente de perda de percurso	Número puro
----------	----------------------------------	-------------

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>16</b>
1.1	<b>Objetivo geral . . . . .</b>	<b>18</b>
1.2	<b>Objetivos específicos . . . . .</b>	<b>18</b>
1.3	<b>Justificativa . . . . .</b>	<b>18</b>
1.4	<b>Estrutura do trabalho . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .</b>	<b>22</b>
2.1	<b>Internet das Coisas e LPWAN . . . . .</b>	<b>22</b>
2.2	<b>LoRa™ . . . . .</b>	<b>22</b>
2.3	<b>LoRaWAN . . . . .</b>	<b>26</b>
2.3.1	Classes de dispositivos . . . . .	28
2.3.2	Segurança na comunicação LoRaWAN . . . . .	30
2.4	<b>Desafios de comunicação sem fio . . . . .</b>	<b>32</b>
2.4.1	Perda de percurso . . . . .	32
2.4.2	Obstáculos geográficos . . . . .	33
2.5	<b>Estações retransmissoras . . . . .</b>	<b>33</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .</b>	<b>36</b>
3.1	<b>Metodologia de busca e análise . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>38</b>
4.1	<b>Trabalhos acadêmicos sobre retransmissores LoRaWAN . . . . .</b>	<b>38</b>
4.1.1	Projeto de um Repetidor LoRaWAN de Baixo Custo e Baixo Consumo de Energia . . . . .	38
4.1.2	<i>LoRaWAN Range Extender for Industrial IoT</i> . . . . .	41
4.1.3	Repetidor para Redes LoRaWAN com Ênfase na Agricultura . . . . .	42
4.1.4	<i>Energy Versus Communication Range Trade-off in a LoRaWAN Relay Approach</i> . . . . .	44
4.1.5	<i>LoRaWAN Relaying: Push the Cell Boundaries</i> . . . . .	47
4.1.6	<i>LoRaWAN Mesh Networks: A Review and Classification of Multihop Communication</i> . . . . .	51
4.1.7	Sumarização dos resultados da literatura . . . . .	53
4.2	<b>Especificação de <i>Relay LoRaWAN</i> LoRa Alliance . . . . .</b>	<b>57</b>
4.2.1	Tipo de dispositivo e modo de funcionamento . . . . .	58

4.2.2	Detecção de atividade e economia de energia . . . . .	59
4.2.3	<i>Wake-On-Radio</i> . . . . .	60
4.2.4	Segurança . . . . .	62
4.2.5	Controle de utilização do <i>relay</i> . . . . .	65
<b>4.3</b>	<b>Relações entre os trabalhos acadêmicos e a norma . . . . .</b>	<b>65</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*) é uma área da tecnologia em plena evolução e com expectativas promissoras. Em 2020 o número de conexões IoT globais excedeu pela primeira vez o número de conexões tradicionais (*smartphones*, *laptops* e computadores). No ano de 2021, até o mês de setembro, 12,2 bilhões de dispositivos IoT estavam conectados. Estima-se ainda que, até o final do ano de 2022, tenha-se 14,4 bilhões de dispositivos IoT ativos e espera-se que em 2025 este número passe para 27 bilhões (HASAN, 2022).

A IoT trata da comunicação por rede de vários dispositivos eletrônicos presentes no nosso cotidiano como sensores, *smartphones*, *wearables* (dispositivos vestíveis), dispositivos de segurança, entre outros. Tais dispositivos podem ser empregados em tarefas como automação e/ou gerenciamento de processos (casas inteligentes e carros inteligentes, por exemplo), coleta de dados, predição de eventos, aprimoramento de processos, etc.

Para realizar suas tarefas de forma remota, os dispositivos IoT utilizam redes de comunicação sem fio de longas distâncias. Muitos dispositivos IoT demandam ainda um baixo consumo de energia, por conta da alimentação por bateria. Nesse contexto, destaca-se um tipo de rede de interesse, a LPWAN (*Low Power Wide Area Network*, ou Rede de Área Ampla de Baixa Potência) (CENTENARO *et al.*, 2016). As redes LPWAN são cada vez mais utilizadas devido ao seu grande potencial de enviar dados a uma baixa taxa de transmissão, viabilizando o uso e/ou aumentando a vida útil de baterias, em uma área ampla de cobertura, podendo chegar a algumas poucas dezenas de quilômetros (CAMARGO; SPANHOL; CASTRO E SOUZA, 2021).

Além dos requisitos acima, é necessário também uma comunicação segura para evitar a interceptação do sinal de comunicação por terceiros. Nesse cenário, destaca-se o protocolo LoRaWAN, que é uma tecnologia LPWAN baseada na modulação LoRa. Baseando-se num arranjo tipo estrela, similar a uma rede WiFi ou de telefonia celular, na rede LoRa os dispositivos finais (*end-devices*) são ligados a um concentrador de dados (*gateway*), que posteriormente transmite esses dados ao servidor de rede (*Network Server*) via Internet (SEMTECH CORPORATION, 2019). Também é possível ter comunicação no sentido de *downlink*, em que se segue o fluxo contrário, porém esse sentido é menos comum.

Um desafio para essa topologia é a cobertura de áreas amplas que enfrentam problemas com baixa potência de sinal. O dispositivo final, muitas vezes, pode estar em locais que causam atenuação no sinal, o que pode resultar em baixa taxa de entrega de pacotes (SILVA *et al.*, 2020). Subsolos de prédios, vegetação densa, caixas de metal, terrenos irregulares, densidade de usuários, entre outros, são obstáculos comuns para a propagação do sinal entre o *gateway* e o dispositivo final.

Uma solução para melhorar a cobertura de sinal para os dispositivos finais seria a instalação de mais *gateways*. Existem alguns problemas ao utilizar essa alternativa como solução. O ganho de cobertura por antena instalada pode não compensar o custo de instalação/manutenção do *gateway*, visto que este é um dos elementos mais caros da infraestrutura de comu-

nicação (KHIRALLAH; THOMPSON; RASHVAND, 2011). Adicionar *gateways* também pode ser inviável quando existe uma impossibilidade na infraestrutura da rede, o que é comum nas localidades de alguns dispositivos IoT, por exemplo em áreas rurais ou remotas. Para esses tipos de problemas na cobertura de sinal, é sempre interessante uma solução viável e eficaz, que pode ser atingida com o uso de um dispositivo de menor complexidade, um retransmissor de sinal (SOUZA, 2018).

Retransmissores, ou estações retransmissoras, são dispositivos com funcionalidades reduzidas em relação a uma estação central de um sistema de comunicação (no caso da rede LoRaWAN, um *gateway*), sendo um equipamento mais barato e de instalação mais simples do que uma estação completa. O retransmissor, como o nome diz, recebe o sinal de um dispositivo e o reenvia em direção a seu destino, reduzindo a distância percorrida pelo sinal do dispositivo fonte e, por consequência, ajudando no processo de transmissão ao reduzir os efeitos de perda de percurso. Como o retransmissor envia e recebe na faixa de espectro da própria rede, não é necessário que possua outras infraestruturas de rede, sendo necessário apenas que o retransmissor esteja na área de cobertura do *gateway*. Com a instalação na proximidade de áreas com problemas de cobertura, as estações retransmissoras são capazes de melhorar a cobertura, aumentar a vazão de dados e melhorar os indicadores de qualidade de serviço (SOUZA, 2018).

Existem estudos e protótipos de retransmissores LoRaWAN realizados pela comunidade acadêmica. Possuem como ideia principal a adição de saltos entre o *gateway* e os *end-devices* a fim de melhorar o alcance e qualidade da comunicação. Na maioria dos protótipos o repetidor deve ser instalado entre o *gateway* e dispositivos finais, possui um baixo custo e não necessita de uma grande infraestrutura de rede. Os retransmissores LoRaWAN existentes podem também levar em consideração outros conceitos de operação, tais como: i) que sejam dispositivos de baixo consumo de energia; e ii) que trabalhem de forma autônoma, sem a necessidade de estarem diretamente conectados à rede elétrica, possibilitando o uso em locais mais remotos que possuem uma cobertura de sinal muito baixa.

No trabalho de Maziero *et al.* (2018), um retransmissor LoRaWAN de baixo custo e com baixo consumo energético foi desenvolvido. Totalmente transparente para a rede LoRaWAN e feito para suportar dispositivos de classe A, o repetidor foi testado pelos autores que comprovaram uma melhora significativa na entrega de pacotes entre *gateway* e *end-devices*. O trabalho ainda traz alguns conceitos sobre o protocolo LoRaWAN e modulação LoRa™, porém, procura destacar o desenvolvimento do dispositivo.

O trabalho realizado por Magro *et al.* (2022) faz uma análise geral do uso de retransmissores de mensagens LoRaWAN. Os autores apresentam conceitos importantes, analisam propostas já existentes e também dissertam sobre as diversas técnicas e viabilidades para o desenvolvimento deste tipo de dispositivo. Os autores também discutem a possibilidade de se utilizar um retransmissor para ambos os sentidos (*uplink* e *downlink*) ou retransmissores dedicados a cada direção, tendo ao menos fornecimento de energia elétrica para o dispositivo, e a possibilidade de mais de um retransmissor na comunicação entre dispositivos finais e *gateway*.

Além dos trabalhos acadêmicos, foi publicado um padrão desenvolvido pela LoRa Alliance especificando retransmissores em redes LoRaWAN (LoRa Alliance, 2022b). Lançado no final de 2022, já após o início do planejamento deste trabalho, o padrão trata de diversos aspectos físicos e operacionais para a implementação de retransmissores em redes LoRaWAN. Com a especificação, podem ser disponibilizados *chipsets* compatíveis com a operação de retransmissão, como é o caso do modelo Semtech SX 1262 (EJK, 2023). Assim, o estudo desta norma é fundamental para entender em que pontos existem convergências e divergências entre a comunidade acadêmica e os produtos comerciais, e quais cenários podem ser atendidos pelos retransmissores.

Busca-se então, com este trabalho, analisar as propostas de retransmissores LoRaWAN existentes tanto na comunidade acadêmica quanto nos padrões comerciais, que possuem como intuito o aumento da cobertura de sinal entre *gateway* e dispositivos finais. Procura-se, ainda, revisar os principais conceitos e técnicas que envolvem a retransmissão de sinais em redes LoRaWAN, destacando suas respectivas vantagens, desvantagens e possibilidades de melhorias.

### **1.1 Objetivo geral**

Investigar e estudar as técnicas de retransmissão de sinais em redes LoRaWAN no contexto de áreas com baixa ou nenhuma infraestrutura de rede instalada.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Estudar as camadas de rádio e acesso nos sistemas LoRa™ e LoRaWAN;
- Revisar a literatura para busca de técnicas de retransmissão em redes LoRaWAN;
- Analisar a viabilidade das técnicas no contexto de cobertura em áreas com baixa ou nenhuma infraestrutura de conexão com a Internet;
- Selecionar métricas de interesse para a avaliação das técnicas escolhidas;
- Comparar as técnicas escolhidas, buscando vantagens, desvantagens e pontos de melhoria;
- Analisar as soluções presentes em normas técnicas propostas e comparar com os caminhos vistos na literatura.

### **1.3 Justificativa**

Estações retransmissoras (ou *relay stations*) são uma das maneiras de se obter uma melhor cobertura de rede com menor custo de operação e de investimento (KHIRALLAH; THOMP-

SON; RASHVAND, 2011). Podendo variar de estações simples como amplificadores, que pouco são notados pelos demais dispositivos da rede e apenas adicionam energia ao sinal transmitido, até estações quase completas, que são percebidas pelos demais dispositivos e fazem todo o processo de codificação e decodificação de mensagem, as estações retransmissoras podem ser aplicadas em diversos cenários, desde aqueles com quase nenhuma infraestrutura até em cenários que uma estação completa poderia ser instalada (SOUZA, 2018).

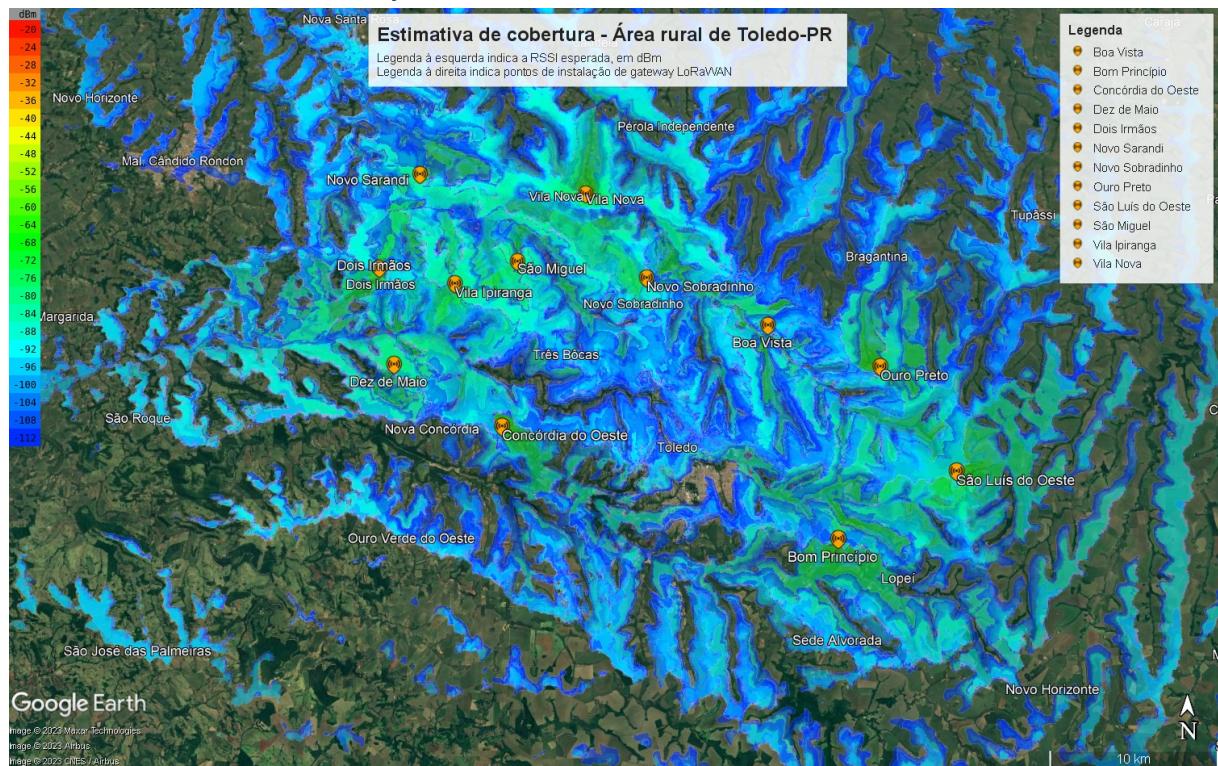
Um dos cenários de interesse é justamente no caso de pouca infraestrutura, em especial quando existe apenas infraestrutura de energia elétrica e instalação, mas sem disponibilidade de conexão com a Internet. Com isso, se essa determinada área não é coberta pela tecnologia de comunicação analisada, como é o caso da rede LoRaWAN nesse trabalho, não seria possível instalar uma estação receptora comum - no caso da rede LoRaWAN, um *gateway*. Em determinados casos, não existe na proximidade um ponto em que uma estação comum possa ser instalada para que essa área possa ser coberta. Em outros casos, os custos de instalação e operação podem ser limitadores para a instalação de uma estação completa, inviabilizando a cobertura dessas áreas.

Para mostrar um cenário desse problema, é possível ver o caso da cidade de Toledo, Paraná. A área urbana de Toledo possui uma rede LoRaWAN com seis *gateways* instalados, em um projeto integrado com a prefeitura municipal para projetos como rastreamento de veículos de coleta seletiva (SILVA *et al.*, 2020; CAMARGO; SPANHOL; CASTRO E SOUZA, 2021) e monitoramento de parâmetros ambientais (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2020). Mesmo com vários dispositivos, resultados preliminares (ainda não publicados) indicam que existem áreas da cidade em que a cobertura é intermitente ou mesmo inexistente, de modo que a instalação e localização de *gateways* é investigada em trabalho de conclusão de curso por outro estudante envolvido no projeto.

Diante do andamento do projeto, a Prefeitura Municipal de Toledo, PR, solicitou estudos sobre a possibilidade de uso da rede LoRaWAN para a cobertura da área rural do município, disponibilizando alguns pontos em que havia disponibilidade de energia elétrica e conexão com a Internet, fundamentais para a instalação de um *gateway* LoRaWAN completo. Foi simulada a cobertura estimada, utilizando a ferramenta CloudRF, instalando as antenas a 30 metros de altura, com os dados de 12 desses pontos sendo reunidos na Figura 1. Mesmo em um ambiente com poucas obstruções artificiais e com boa altura de instalação, muitas regiões ficaram sem cobertura, enquanto regiões mais distantes ainda apresentavam RSSI (Indicador de Intensidade do Sinal Recebido, ou *Received Signal Strength Indicator*) acima do nível de ruído de fundo, que é próximo de -120 dBm (SELLER, 2020).

Um exemplo de área em que as estações retransmissoras podem ser empregadas é a região sem cobertura próxima a Três Bocas, mesmo com a proximidade de vários *gateways*. Por ser uma região de vale, com presença de cursos de água, o relevo é um fator que atrapalha o processo de comunicação, de modo que um receptor precisaria ser instalado bem próximo para prover cobertura. Como nessa área não existe um prédio público com infraestrutura de conexão

**Figura 1 – Estimativa de cobertura de uma rede LoRaWAN com 12 gateways, para cobertura da área rural do município de Toledo, Paraná.**



**Fonte: Próprio autor (2023).**

com a Internet, seria necessário instalar essa conectividade ou contratar algum plano de dados, caso algum dos dois seja possível, somado ao custo de aquisição do equipamento completo. Já com uma estação retransmissora, espera-se um custo de aquisição menor, e a necessidade apenas de alimentação energética - no caso dessa região, essa infraestrutura existe.

Considerando o tipo mais comum de dispositivo em redes LoRaWAN, classe A (CAMARGO; SPANHOL; CASTRO E SOUZA, 2021), a transmissão em *downlink* ocorre apenas após a transmissão em *uplink*, e com espaços de tempo fixados para tal. Como as estações retransmissoras aumentam o tempo do pacote no ar, ao adicionar saltos extras, pode ser que o transmissor abra as janelas de *downlink* antes do momento correto, e seja incapaz de receber essas mensagens. Um dos métodos de ativação de dispositivos em LoRaWAN depende dessas mensagens de *downlink*, e pode ser inviabilizado em algumas situações. É necessário investigar também o impacto do aumento de tráfego, possibilidade de mais colisões, entre outros parâmetros, para que se possa decidir se estações retransmissoras são realmente uma solução viável no caso de redes LoRaWAN.

Com isso, este trabalho busca analisar a literatura em busca de soluções existentes para o uso de estações retransmissoras em redes LoRaWAN, com destaque para os casos em que a infraestrutura de conexão à Internet seja inexistente, inviabilizando a instalação de novos gateways. Serão levantadas características, resultados obtidos, técnicas que apresentaram su-

cesso e também as que foram apontadas como problemáticas (caso existam). Como durante a proposta deste trabalho surgiu uma padronização sobre *relays* em LoRaWAN (LoRa Alliance, 2022b), o padrão também será analisado e comparado com as soluções da literatura. A comparação busca entender os pontos de concordância e discordância, dado que implementações deverão seguir o padrão especificado.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

Este trabalho é estruturado do seguinte modo. No capítulo 2 são apresentados os conceitos fundamentais do trabalho, incluindo LoRa™, LoRaWAN, conceitos de propagação de sinal sem fio e sobre retransmissores. No capítulo 3 são apresentados alguns pontos de relevância na investigação desse trabalho, tais como os mecanismos de busca utilizados para encontrar os trabalhos relacionados ao tema e as métricas de interesse que foram consideradas. No Capítulo 4 são apresentados os trabalhos analisados, com as comparações, análises e apontamentos relevantes. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas e os trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este Capítulo tem como objetivo explicar alguns conceitos e tecnologias importantes para o trabalho, como LoRa™, LoRaWAN e retransmissores.

### 2.1 Internet das Coisas e LPWAN

A Internet das Coisas (IoT) é um paradigma que se refere a uma rede interconectada de dispositivos, em vez de uma rede focada principalmente na conectividade de usuários finais. Esse paradigma permite a comunicação entre dispositivos bem como a comunicação entre dispositivos e seres humanos (PUTERA; LIN, 2015).

Uma parte significativa das aplicações de IoT envolve dispositivos sensores que coletam informações específicas, que são posteriormente transmitidas pela Internet, seja por meio de conexões com fio ou sem fio. Esses dispositivos incluem, por exemplo, sensores projetados para promover a economia de energia em edifícios, detecção de abalos sísmicos, controle inteligente de semáforos, monitoramento de incêndios e várias outras aplicações (STANKOVIC, 2014).

As tecnologias ZigBee e Bluetooth, por um longo período, foram capazes de atender aos requisitos para a implementação de redes IoT. No entanto, com o surgimento do conceito de cidades inteligentes e a implantação de sensores em áreas extensas, o alcance de transmissão de dados tornou-se um fator cada vez mais crítico. Para solucionar essa necessidade, foram desenvolvidas as redes de ampla área e baixa potência (LPWAN, *Low-Power Wide Area Networks*), que é uma tecnologia conhecida por seu longo alcance e baixo consumo energético (CENTENARO *et al.*, 2016).

As LPWANs são opções interessantes para tecnologias IoT que necessitam de comunicação de longa distância e também para as quais os dispositivos são mantidos por bateria, principalmente nos casos em que se deseja pouca manutenção nos dispositivos (HERNANDEZ *et al.*, 2017). Outro ponto a ser destacado é que essas redes diferem do paradigma tradicional das conexões de redes de computadores e sistemas celulares, que possuem maior enfoque em altas taxas de dados e baixas latências. Em vez disso, os principais critérios de desempenho estabelecidos para esses sistemas são eficiência energética, escalabilidade e cobertura (MIKHAYLOV; PETAJAEJAERVI; HAENNINEN, 2016). Essas redes oferecem uma infraestrutura de rede fácil de implementar, garantem a transferência segura de dados e geralmente possuem baixo consumo de energia.

### 2.2 LoRa™

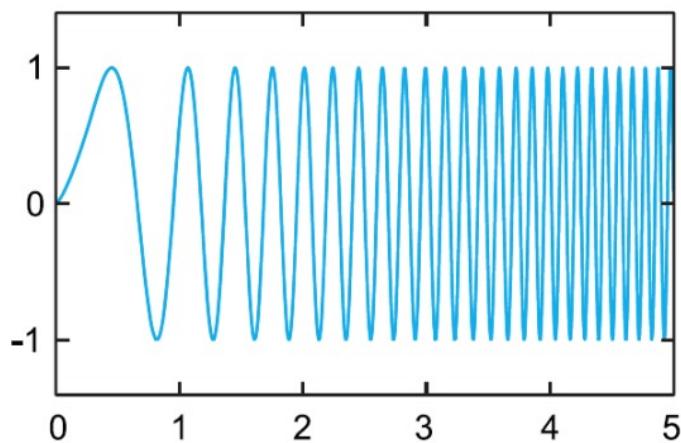
O LoRa™ (*Long Range*) é uma forma de comunicação sem fio patenteada pela Semtech Corporation que se classifica na categoria LPWAN, proporcionando um alcance extenso e um

consumo de energia reduzido (SEMTECH CORPORATION, 2019). Sendo uma tecnologia de camada física, LoRa™ possui como papel principal a modulação do sinal, e para isso, utiliza a modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS), que é uma técnica de espalhamento espectral.

Existem várias características relevantes nas técnicas de espalhamento espectral, incluindo sua capacidade de lidar com ruído e interferência de banda estreita, bem como a possibilidade de suportar múltiplos usuários simultâneos, dependendo de como o espalhamento é implementado (HAYKIN; MOHER, 2008). Essas características tornam a técnica de espelhamento espectral interessante diante a condições adversas de comunicação, permitindo uma transmissão mais confiável e resiliente em ambientes com interferências e ruídos. Além disso, a modulação CSS possibilita a construção de receptores de menor custo e menor complexidade do que o de outras técnicas, mas mantendo as propriedades de interesse para comunicação robusta (SEMTECH CORPORATION, 2015).

O CSS funciona utilizando um sinal senoidal chamado *Chirp (Compressed High Intensity Radar Pulse)*, sinal este que possui amplitude fixa e que varia a frequência e a banda ocupada. Assim podemos descrever esse sinal como um sinal cuja frequência varia ao longo do tempo, aumentando (*upchirp*) e diminuindo (*downchirp*), de acordo com as características do sinal de informação transmitido (SEMTECH CORPORATION, 2019). Existem duas formas de variação de frequência: o *upchirp*, que representa a transição de uma frequência baixa para alta, e o *downchirp*, que indica a mudança de uma frequência alta para baixa. Observa-se que, com base nessa definição, que a Figura 2 contém um sinal correspondente a um *upchirp*, uma vez que a variação do sinal ocorre de forma mais rápida à medida que o tempo avança.

**Figura 2 – Representação de um sinal modulado de acordo com a técnica CSS (*Chirp Spread Spectrum*).**



Fonte: Semtech Corporation (2019).

A técnica de espalhamento espectral da modulação LoRa™ pode ser especificada por três parâmetros: a largura de banda (*BW*), que pode ser de 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz, o fator de espalhamento (*SF*), que vai de 7 a 12, e a taxa de codificação *CR*, que vai de 1 a 4.

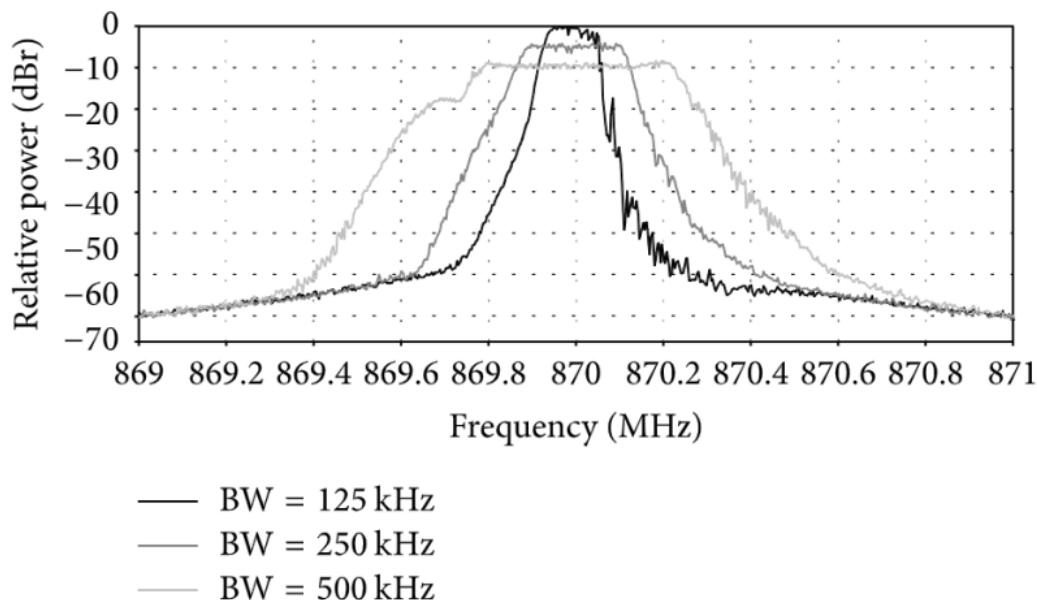
Esses parâmetros devem ser explicados para compreender o tempo de permanência do pacote no ar durante a transmissão (*Time on Air*) e a taxa de dados do sistema.

A largura de banda (BW, *Bandwidth*), representa a diferença entre as frequências máxima e mínima ocupadas por um sinal durante o processo de transmissão. No caso da tecnologia LoRa™, as especificações de largura de banda são diferentes entre o *uplink*, que se refere à transmissão do dispositivo final para o *gateway*, e o *downlink*, que se refere à transmissão do *gateway* para o dispositivo final. Os valores de largura de banda para os canais são os seguintes:

- *Uplink*: 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz;
- *Downlink*: Apenas 500 kHz.

Quanto maior for a largura de banda, maior será a taxa de dados do sistema, enquanto a área de cobertura será menor (SEMTECH CORPORATION, 2019). A comparação com diferentes larguras de bandas é mostrada na Figura 3.

**Figura 3 – Comparação das diferentes larguras de banda**



**Fonte:** Staniec, Kowal e Peppas (2018).

O Fator de Espalhamento (SF, *Spreading Factor*) representa o intervalo de tempo necessário para a modulação completar uma varredura total do espectro. Quanto maior o SF, mais lenta é a varredura da largura de banda utilizada, resultando em um tempo prolongado de ocupação do ar pelo pacote de dados. A informação a ser transmitida é codificada por uma sequência de *chips* que possuem um período menor do que o período de símbolo do sistema, e em seguida, é modulada em um sinal de *chirp*. O tamanho dessa sequência de *chips* é determinado pelo fator de espalhamento, onde um sistema com fator de espalhamento *SF* utiliza uma

sequência de *chips* de tamanho  $2^{SF}$  para codificar um símbolo de informação, sendo que cada símbolo modula  $SF$  bits de informação. Levando em consideração que um *chip* é transmitido por segundo por Hertz, é possível calcular o tempo de duração de um símbolo de informação,  $T_s$  através da seguinte equação:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad [\text{s}]. \quad (1)$$

A Equação (1) representa o tempo necessário para a transmissão de um símbolo. Assim, conclui-se que quanto maior o SF, maior será o tempo necessário para a transmissão de um símbolo, o que impacta negativamente na taxa de dados. Por outro lado, um SF menor reduz o alcance da rede (SEMTECH CORPORATION, 2019). Os valores padronizados de SF para a tecnologia LoRa™ são 7, 8, 9, 10, 11 e 12.

Outra característica importante na modulação LoRa™ é a taxa de codificação (CR, *Coding Rate*). Esse fator é utilizado como uma técnica de correção de erros que realiza uma codificação da informação a ser transmitida, adicionando bits redundantes no pacote a ser transmitido. Isso acaba melhorando a robustez do sinal transmitido em detrimento da capacidade e também fornece recursos de recuperação contra a corrupção de bits, permitindo que o destinatário seja capaz de se recuperar de alguns erros, evitando a necessidade da retransmissão do pacote. Em LoRa™, são adicionados de 1 a até 4 bits de redundância ( $b_{red}$ ) a cada 4 bits de informação. Dessa forma, a taxa de código CR é definido pela Equação (2):

$$CR = \frac{4}{4 + b_{red}} \quad (2)$$

Utilizando os fatores mencionados nas Equações (1) e (2), é possível calcular a taxa de dados efetiva de um canal específico em bits por segundo,  $R_b$ , da seguinte maneira:

$$R_b = \frac{SF * BW * CR}{2^{SF}} \quad [\text{bits/s}]. \quad (3)$$

O Tempo no Ar (ToA, *Time on Air*) pode ser definido como a duração de um quadro, medido do seu primeiro símbolo até o último, sendo dado como a soma dos tempos de preâmbulo e da porção de dados (MIKHAYLOV; PETAJAEJAERVI; HAENNINEN, 2016). O padrão LoRa™ permite especificações regionais sobre os canais utilizados e outros parâmetros, e entre eles se encontra o tamanho máximo do campo de dados de aplicação, para que seja possível limitar o ToA máximo dos quadros (LoRa Alliance, 2021). Quanto mais rápido o transmissor puder enviar o quadro, menor será o ToA do quadro enviado. Observando a Equação (3), tem-se que quanto maior for a largura de banda, menor será o ToA. O mesmo vale para a taxa de codificação, mas esta será maior quando os bits redundantes estiverem em menor quantidade, como mostrado na Equação (2). Já para os valores de SF, como existe um fator exponencial no denominador, quanto maior o SF, maior será o ToA, apesar de que SFs mais altos auxiliam em transmissões de maiores distâncias (SEMTECH CORPORATION, 2019).

Uma relação entre SFs e seus respectivos valores de *Bit Rate*, *Range* (alcance) e ToA para a transmissão *uplink* a 125 KHz de um quadro de 11 *bytes*, é mostrada na Figura 4.

**Figura 4 – LoRa™ Spreading Factors**

Spreading Factor (For UL at 125 KHz)	Bit Rate	Range (Depends on Terrain)	Time on Air for an 11-byte payload
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	103 ms
SF7	5470 bps	2 km	61 ms

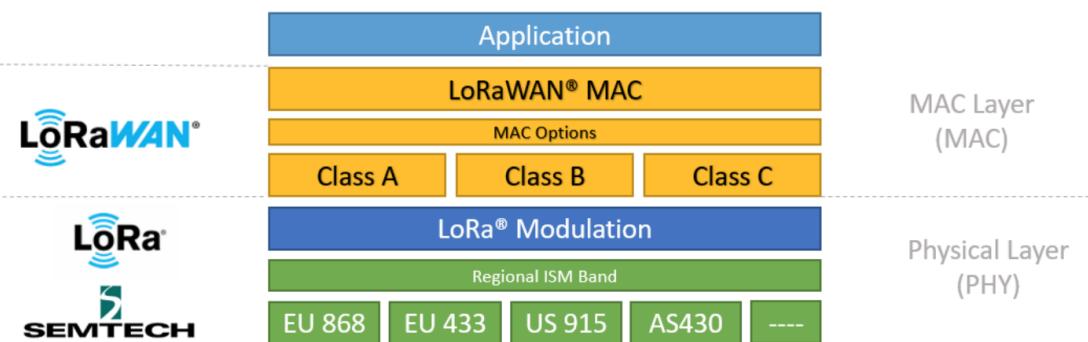
Fonte: Semtech Corporation (2019).

## 2.3 LoRaWAN

LoRa™ é uma implementação de camada física que é independente das implementações de camadas superiores, podendo ser utilizada com outros tipos de arquiteturas de rede (SEMTECH CORPORATION, 2015). Para as camadas seguintes, em especial a camada de enlace, um dos protocolos mais comumente adotados é o LoRaWAN (LoRa Alliance, 2020; SEMTECH CORPORATION, 2019; CAMARGO; SPANHOL; CASTRO E SOUZA, 2021).

O LoRaWAN é um conjunto de protocolos abertos desenvolvido pela LoRa Alliance (LoRa Alliance, 2020). Enquanto o LoRa™ faz as tratativas necessárias da camada física (modulação, demodulação, etc) e está estreitamente relacionado ao *hardware* envolvido no processo de transmissão e recebimento das mensagens, o LoRaWAN descreve os procedimentos de camada de enlace e está relacionado às etapas envolvidas neste processo, realizando a monitoragem, processamento e configuração dos quadros comunicados. A estrutura do protocolo LoRaWAN pode ser visto na Figura 5.

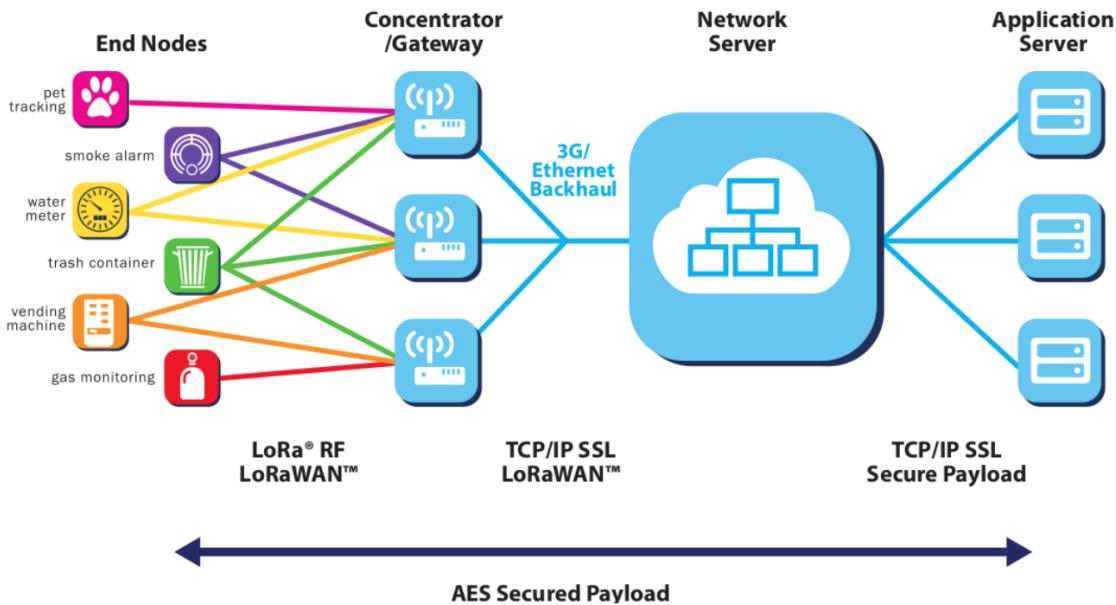
**Figura 5 – Divisão das camadas do protocolo LoRaWAN**



Fonte: Semtech Corporation (2019).

Redes LoRaWAN se baseiam em topologia de rede do tipo estrela, ou estrela de estrelas. A arquitetura de uma rede LoRaWAN inclui quatro categorias de dispositivos como mostra a Figura 6.

**Figura 6 – Arquitetura da rede LoRaWAN**



**Fonte:** LoRa Alliance (2015).

A primeira categoria são os *end nodes*, *end devices* ou dispositivos finais. Eles são os dispositivos sensores e/ou atuadores responsáveis por coletar informações, que possuem conectividade com a rede LoRaWAN com a inserção dos equipamentos necessários, como módulos de comunicação. Esses módulos possuem identificadores únicos para garantir segurança na ativação, administração e transmissão de dados (SEMTECH CORPORATION, 2019).

A segunda são os *gateways*, ou pontos de acesso. Eles são responsáveis por receber as transmissões vindas dos dispositivos finais, em direção de *uplink*, para entregá-las ao servidor de rede. São também responsáveis por transmitir dados para os dispositivos finais, em sentido de *downlink*, quando recebem os dados do servidor de rede (SEMTECH CORPORATION, 2019). No processo de recepção, o quadro de um dispositivo final é recebido por todos os *gateways* que estiverem na área de alcance, porém somente aqueles ligados ao servidor de rede entregará esse dado. Isso acontece pois o quadro LoRaWAN não contém um endereço de *gateway* entre os componentes do cabeçalho (LoRa Alliance, 2020), não sendo papel do *gateway* avaliar quais dispositivos transmitem até ele. Por fim, os *gateways* fornecem outras informações sobre os quadros recebidos e a rede, como fator de espalhamento, RSSI (Indicador de Intensidade do Sinal Recebido), SINR (Relação Sinal-Ruído mais Interferência e canal utilizado, entre outros (SEMTECH CORPORATION, 2019; WERNER, 2018; CAMARGO; SPANHOL; CASTRO E SOUZA, 2021).

A terceira categoria de dispositivo são os servidores de rede, ou *network servers*. Conforme descrito em (SEMTECH CORPORATION, 2019), é o servidor de rede que gerencia a

rede, e a topologia de estrela de estrelas se forma por conta dessa estrutura. Os dispositivos finais podem se conectar em diversos *gateways* (formando topologias estrela) e os *gateways* se conectam no servidor de rede, unindo várias estrelas em uma. Se um mesmo quadro é recebido por vários *gateways*, é o servidor de rede que selecionará apenas uma das cópias (SEMTECH CORPORATION, 2019). Entre suas funções estão a checagem de endereçamento dos dispositivos finais, checagem do quadro, encaminhamento dos quadros para os servidores de aplicação corretos, encaminhamento dos dados de aplicação para os dispositivos finais, ativação dos dispositivos finais, a depender do protocolo de ativação e estabelecimento de canal seguro para comunicação entre os dispositivos finais e o servidor de aplicação (SEMTECH CORPORATION, 2019).

Por fim, os servidores de aplicação, ou *application servers*, são responsáveis por tratar as informações obtidas pelos dispositivos finais da rede, além de gerar dados para os mesmos, se necessário. Além disso, é tarefa sua disponibilizar serviços para usuários (consumidores de serviços). Um servidor de rede pode estar conectado a vários servidores de aplicação (diversidade de serviços em uma mesma área), e um servidor de aplicação pode estar conectado a vários servidores de rede (um serviço que é prestado em várias áreas diferentes) (LoRa Alliance, 2017b).

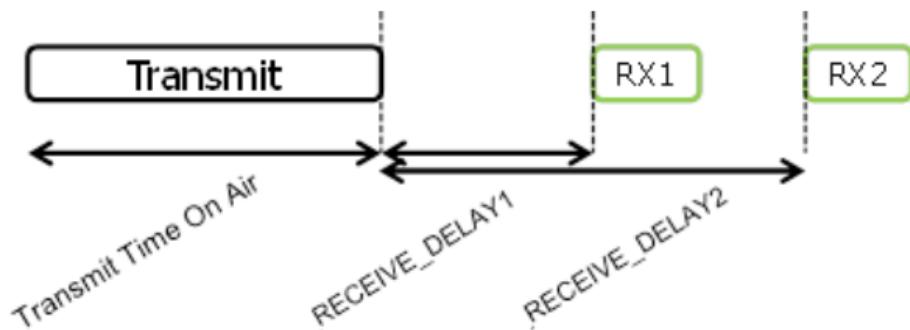
Em termos de protocolo de múltiplo acesso, LoRaWAN implementa a técnica ALOHA (LoRa Alliance, 2020), na qual os dispositivos (tanto finais quanto *gateways*) transmitem dados sem divisão de canal ou técnica de escuta ao meio, como em outros sistemas clássicos de telefonia celular ou WiFi (FOROUZAN, 2008). Um dos principais problemas com o protocolo ALOHA é sua ineficiência conforme mais dispositivos concorrem pelo acesso ao meio, mas a modulação LoRa auxilia nesse processo com a modulação CSS e os fatores de espalhamento. Em uma mesma largura de banda, fatores de espalhamento diferentes são ortogonais, de modo que quadros com SFs diferentes não colidem mesmo sendo transmitidos no mesmo canal ao mesmo tempo. Nos casos em que se usa o mesmo SF no mesmo canal ao mesmo tempo, se um dos sinais estiver 6 dB acima do outro, ainda sobreviverá à colisão (SEMTECH CORPORATION, 2019). As combinações de SF e BW ortogonais podem ser encontradas em Champion e Sornin (European Patent 2 975 814 B1, Sep. 2014).

### 2.3.1 Classes de dispositivos

Os dispositivos finais são categorizados em três classes distintas, conhecidas como classe A, B e C. Essas classes apresentam diferenças no modo de transmissão e recepção, sendo que apenas a classe A é obrigatória nos dispositivos (LoRa Alliance, 2020). Nos dispositivos de classe A, as janelas de *downlink* são abertas somente após o dispositivo final transmitir um quadro para o *gateway*, em dois momentos distintos, com o dispositivo se mantendo em inatividade nos demais momentos (LoRa Alliance, 2020), como mostrado na Figura 7. Com isso, o dispositivo possui uma grande eficiência energética, porém se o servidor de aplicação precisar

enviar dados para um dado dispositivo final, dependerá de uma transmissão inicial por parte deste dispositivo (MAZIERO, 2020). Esse comportamento pode gerar uma grande latência para a comunicação em *downlink*, o que pode ser um problema para dispositivos como atuadores.

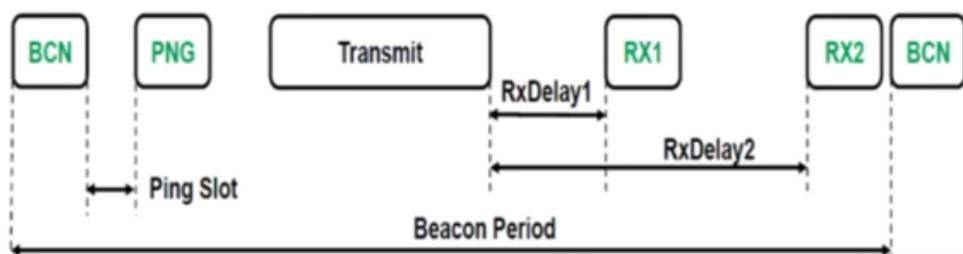
**Figura 7 – Funcionamento das janelas em classe A**



Fonte: LoRa Alliance (2017a).

Os dispositivos classe B tentam resolver a questão da latência da comunicação *downlink*. Além das janelas de recepção existentes nos dispositivos finais da classe A, os gateways periodicamente enviam mensagens para sincronização de relógio dos dispositivos finais e para agendar abertura de janelas de recepção além das janelas que seriam abertas após uma transmissão em classe A (LoRa Alliance, 2020). Essas mensagens são conhecidas como *beacon*, e dão nome à classe, enquanto as janelas abertas para *downlink* são chamadas de *ping slots* (SEMTECH CORPORATION, 2019). A Figura 8 ilustra o funcionamento de um dispositivo final classe B. Como os dispositivos finais precisam escutar periodicamente as mensagens de *beacon*, haverá mais aberturas de janelas e maior consumo energético, porém a latência de *downlink* pode ser reduzida (MAZIERO, 2020).

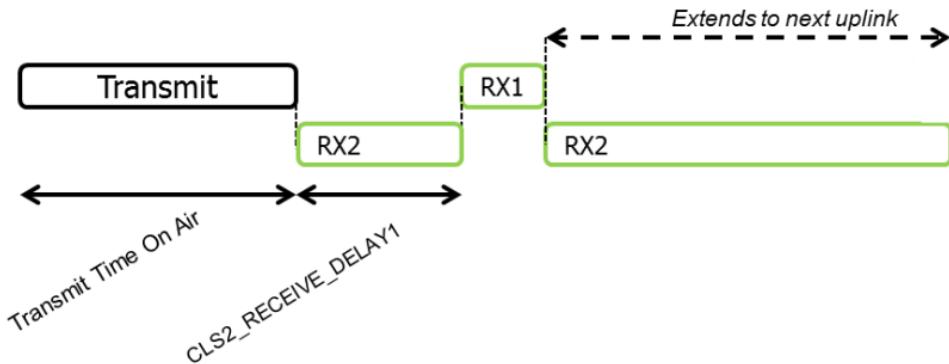
**Figura 8 – Funcionamento das janelas em classe B**



Fonte: Andrade (2019).

Por fim, nos dispositivos classe C, a janela de recepção fica aberta praticamente todo o tempo, com exceção dos momentos em que o dispositivo final está transmitindo. Isso resulta em uma latência mínima no *downlink*, porém compromete a eficiência energética ao forçar o dispositivo a se manter ativo por muito mais tempo (SEMTECH CORPORATION, 2019), de modo que esses dispositivos costumam não depender de baterias para alimentação. A Figura 9 ilustra a operação dessa classe.

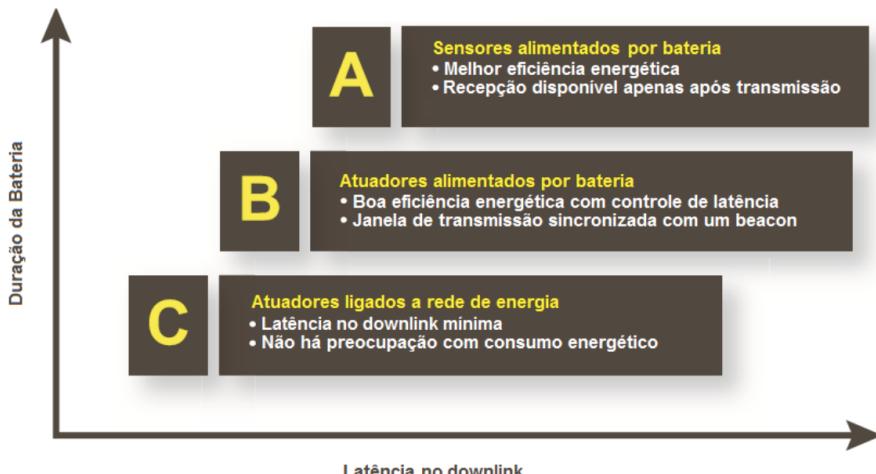
**Figura 9 – Funcionamento das janelas em classe C**



Fonte: LoRa Alliance (2017a).

Com as diferentes classes, o protocolo LoRaWAN pode atender a diferentes perfis de aplicação, em que os desenvolvedores podem balancear as necessidades energéticas e operacionais. A Figura 10 resume a discussão desta subseção.

**Figura 10 – Comparativo das classes de dispositivos A, B e C em LoRaWAN**



Fonte: Maziero (2020).

### 2.3.2 Segurança na comunicação LoRaWAN

A nomenclatura e estrutura dessa subseção segue a definição da norma LoRaWAN 1.0.3 (LoRa Alliance, 2018). Os padrões modificam os nomes de alguns campos, e na versão 1.1 ocorrem mudanças mais drásticas. A versão 1.0.3 é a atualmente utilizada pelo grupo de pesquisa, e por isso é a considerada.

LoRaWAN implementa encriptação da carga útil (*payload*) de aplicação ou comandos MAC, enviados no campo *Frame Payload* (FRMPayload), além de um código de integridade de mensagem (MIC, *Message Integrity Check*). Para o processo de encriptação, o dispositivo final utiliza duas chaves de sessão, considerando a utilização de padrões LoRaWAN da série 1.0:

- AppSKey, ou Chave de Sessão de Aplicação, que é utilizada para encriptar os dados de aplicação, e é conhecida apenas no servidor de aplicação;
- NwkSKey, ou Chave de Sessão de Rede, que é utilizada para encriptar os dados de comandos MAC, e é conhecida apenas no servidor de rede. Essa chave também é usada para o cômputo do MIC;

A abordagem de duas chaves de sessão distintas faz com que os dados de aplicação sejam secretos entre o dispositivo final e a devida aplicação, enquanto os comandos MAC, que são referentes a configurações de rede, sejam secretos entre o dispositivo final e o servidor de rede.

Além das duas chaves de sessão, existe uma terceira chave, AppKey, ou chave raiz de aplicação, que é uma chave AES de 128 bits única para cada dispositivo final, sendo armazenada também no servidor de rede. Essa chave não é alterada durante a vida do dispositivo, e é utilizada no processo de cômputo das chaves de sessão.

Para obter as chaves de sessão de aplicação e de sessão de rede, os padrões LoRaWAN disponibilizam dois métodos: Ativação Por Personalização (ABP, *Activation By Personalization*) e Ativação pelo Ar (OTAA, *Over The Air Activation*). No ABP, as chaves AppSKey e NwkSKey são geradas nos devidos servidores e configuradas diretamente no dispositivo final, não sendo alteradas até que uma nova configuração seja feita pelo desenvolvedor. Nesse caso, a chave raiz AppKey não precisa ser configurada no dispositivo final.

Já no OTAA, as chaves são derivadas a partir de parâmetros trocados entre o dispositivo final e um servidor de ingresso (*join server*), que pode ser o próprio servidor de rede ou outro dispositivo devidamente configurado (e que tenha a AppKey). O pedido para entrar na rede é feito por meio de uma mensagem *Join-request*, não encriptada, que contém dois parâmetros pré-configurados no dispositivo final e no servidor de ingresso/rede:

- AppEUI, ou Identificador de Aplicação, que identifica unicamente a entidade que processará o ingresso do dispositivo, caso use OTAA;
- DevEUI, ou Identificador de Dispositivo, que é um identificador único do dispositivo final, normalmente fornecido pelo fabricante.

Além desses dois parâmetros, é enviado também um DevNonce (número nunca usado do dispositivo final), que entrará no cálculo das chaves. Todos esses valores tem sua integridade protegida pelo MIC, lembrando que AppKey é pré-configurada.

No servidor de ingresso, define-se o AppNonce (equivalente ao DevNonce) e derivam-se AppSKey e NwkSKey. O servidor de ingresso responde então com uma mensagem *Join-accept*, contendo AppNonce e outros parâmetros da rede, encriptados por AppKey. Isso impede que outros dispositivos escutem a mensagem e derivem AppSKey e NwkSKey. Ao receber a mensagem, o dispositivo final calcula as duas chaves, e pode encriptar a carga útil. A chave AppSKey é repassada para o servidor de aplicação, enquanto a chave NwkSKey

é repassada para o servidor de rede, caso o servidor de ingresso e o de rede não sejam os mesmos. Note que o servidor de rede é capaz de calcular AppSKey, mas deve descartá-la ou garantir de algum modo que essa chave não é visível. Nos padrões LoRaWAN versão 1.1 (LoRa Alliance, 2017a), mudanças foram propostas para que esse caso não aconteça, com AppKey sendo separada em duas chaves, AppKey e NwkKey (chave raiz de rede), e cada uma sendo usada para derivar as respectivas chaves de sessão.

## 2.4 Desafios de comunicação sem fio

Existem diversos fatores que tornam a comunicação sem fio desafiadora, como perda de percurso, propagação multipercorso, inexistência de linha de visada (LoS, *Line of sight*), mobilidade dos transmissores, principalmente em altas velocidades, obstrução por construções (obstáculos artificiais) e obstrução geográfica (obstáculos naturais) (HAYKIN; MOHER, 2008). Esses fatores podem ter seus efeitos atenuados com o uso de estações retransmissoras (*relays*) de diferentes maneiras (SOUZA; AMAZONAS; ABRÃO, 2016), mas dado que o interesse deste trabalho está em locais com pouca infraestrutura e em redes de longo alcance, destacam-se dois efeitos: a perda de percurso e o efeito de obstáculos geográficos.

### 2.4.1 Perda de percurso

A perda de percurso é um fenômeno caracterizado pela perda de potência do sinal transmitido conforme o mesmo se propaga pelo meio de comunicação. É um efeito presente tanto em sistemas com fio quanto sem fio, porém no último o efeito é normalmente mais significativo (HAYKIN; MOHER, 2008), podendo ser significativo para sistemas de comunicação de longa distância e dispositivos com baixa disponibilidade energética, dois cenários em que as redes LPWAN se enquadram. Uma equação simplificada da perda de percurso em função da distância,  $L(d)$ , é dada por (DOHLER; LI, 2010):

$$L(d) = L(d_0) \left( \frac{d}{d_0} \right)^\alpha \quad (4)$$

em que  $L(d_0)$  é a perda de percurso em uma distância de referência  $d_0$ ,  $d$  é a distância entre transmissor e receptor, em metros, e  $\alpha$  é o coeficiente de perda de percurso.<sup>1</sup>

A definição do coeficiente de perda de percurso depende do ambiente em que os dispositivos estão localizados. No melhor cenário, chamado de campo aberto, os dispositivos estão localizados em ambientes sem obstruções, por exemplo ambiente rural. Nesse caso, normal-

---

<sup>1</sup> Existem outros fatores que determinam a perda de percurso, como frequência do sinal, altura das antenas de transmissor e receptor, fatores constantes, entre outros, mas para a discussão deste trabalho, podem ser omitidas.

mente se define  $\alpha = 2$ , ou seja, a potência é reduzida pelo quadrado da distância. Já em ambientes altamente construídos, do tipo metropolitanos, pode se ter até  $\alpha = 6$ , de modo que a área coberta tende a ser muito menor que em campo aberto (DOHLER; LI, 2010).

Reducir os efeitos da perda de percurso envolve a utilização de mais infraestrutura de rede. Algumas possibilidades são a redução da área de cobertura de cada antena, com instalação de mais antenas, utilização de estações retransmissoras, adoção de diferentes frequências, como no sistema 5G, entre outras.

#### 2.4.2 Obstáculos geográficos

No caso dos obstáculos geográficos, podem ser citados exemplos como dispositivos localizados em vales, atrás de morros, em baixadas, ou seja, os casos em que a linha de visada entre os dispositivos transmissor e receptor é afetada pelo relevo, de modo que na maioria das vezes (ou até mesmo sempre, a depender do relevo) a comunicação entre os dispositivos não terá sucesso, sendo necessário reposicionar o transmissor ou receptor, quando possível.

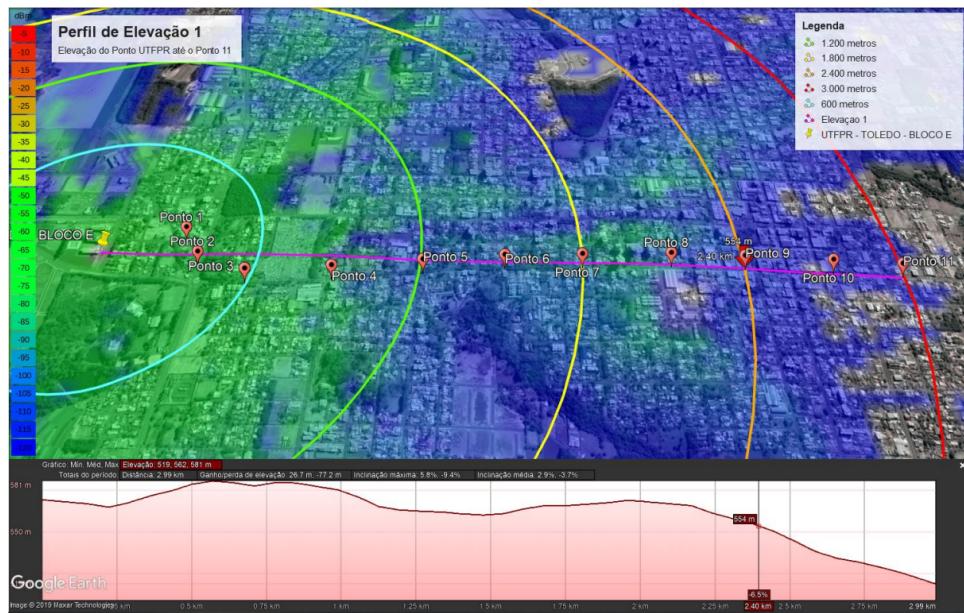
Um exemplo desse efeito pode ser visto em (ROSSATO, 2019), que avaliou a implantação do primeiro *gateway* LoRaWAN no campus Toledo da UTFPR. A Figura 11 mostra o percurso de um teste de recepção de pacotes gerados num percurso pela Avenida Maripá, com distância máxima de 3 quilômetros do *gateway* do campus, junto com o perfil de relevo do caminho percorrido. Na análise dos resultados, Jonas mostra que a partir do ponto 8 nenhum pacote é recebido, apesar da distância de 2 quilômetros não ser um problema para uma rede LoRaWAN. O principal fator apontado foi o perfil de relevo, que mostrava uma queda acentuada a partir desse ponto. Em outros resultados no mesmo trabalho, percebe-se que a SINR no ponto 5 cai bastante, indicando que a potência do sinal caiu significativamente em relação aos pontos ao redor, indicando que não é efeito apenas da perda de percurso. Alguns dos resultados em (SILVA *et al.*, 2020) também mostram o impacto dos obstáculos de relevo na quantidade de pacotes recebidos.

Para reduzir os efeitos desse problema, a instalação planejada de antenas é um fator fundamental. Além de estações completas, podem ser usadas também estações retransmissoras, que podem ser colocadas em locais previamente escolhidos para auxiliar a antena principal no processo de encaminhamento de pacotes.

### 2.5 Estações retransmissoras

Estações retransmissoras (ou *relay stations*), também conhecidas como repetidores, são dispositivos que emulam o comportamento de estações centrais, como as estações radio-base em redes celulares, porém com menos funcionalidades, menor custo e menor área de cobertura (WERNER *et al.*, 2008). Apesar de menos funcionalidades e cobertura, seu menor custo, aliado

**Figura 11 – Experimento de cobertura do gateway LoRaWAN da UTFPR Campus Toledo.**



**Fonte:** (ROSSATO, 2019).

ao fato de depender apenas de recursos do próprio sistema de comunicação, tornam sua instalação e operação mais simples, podendo ser empregadas, por exemplo, em áreas com pouca cobertura ou alta densidade de usuários (SOUZA, 2018).

Os retransmissores são instalados na área de cobertura da estação principal, para que consigam se comunicar com a infraestrutura de rede (SOUZA, 2018) - por exemplo, numa rede LoRaWAN, uma estação retransmissora deveria ser instalada na área de cobertura de um *gateway*. O posicionamento exato pode ser sujeito a otimização, mas quanto mais perto dos dispositivos finais, melhor será para esses dispositivos, pois a condição de canal será geralmente boa, ao custo do canal entre o retransmissor e a estação central (SOUZA, 2013). No caso em que o retransmissor seja alimentado por uma fonte externa, tal fato não será um problema.

O uso de retransmissores pode ser útil para melhoria de cobertura, vazão, eficiência energética ou outros requisitos de qualidade de serviço. Por exemplo, considerando o problema com perda de percurso discutido na Subseção 2.4.1, considere que uma estação retransmissora é instalada na metade do caminho entre um dispositivo final e a estação central. Considerando a Equação (4), com expoente de perda de percurso  $\alpha = 2$ , o sinal chegará ao retransmissor 4 vezes menos atenuado do que na estação central. Ao ser retransmitido, se usada a mesma potência do dispositivo final, o sinal também chegará 4 vezes menos atenuado (em ambos os casos, descartando outros efeitos de canal), mesmo sendo o caso em que o expoente de perda de percurso é o menos agressivo – em ambientes urbanos, o ganho seria ainda maior. Isso pode resultar em menos erros de detecção, um sinal atingindo o limiar de detecção ou, no caso de LoRaWAN, poder usar um SF mais curto e reduzir o tempo dos dados no ar, o que pode resultar em economia de energia (MAZIERO, 2020).

Existem diferentes classificações para retransmissores, com características e funcionalidades específicas. As que serão levantadas para esse trabalho são em relação à transparência ou não, sobre regeneração ou não dos dados e sobre a quantidade de saltos adicionados no processo de comunicação. Outras classificações podem ser consultadas em (SOUZA, 2018).

A transparência do retransmissor se refere ao transmissor perceber a existência da estação retransmissora como uma estação central, enviando os dados para ela ao invés de direcionar os dados para a estação central real. No caso de retransmissores transparentes, os dispositivos não percebem a sua existência como estação central, de modo que o processo de envio é feito como se o transmissor estivesse conversando direto com o receptor sem nenhum intermediário (SOUZA, 2018). O retransmissor pode fazer processamentos no sinal recebido, e até mesmo operar em modo regenerativo, mas todo o processo de comunicação é coordenado pela estação central, como se o retransmissor não existisse. Em retransmissores não-transparentes, a estação retransmissora é vista como um equipamento ativo da rede, coordenando uma área de transmissão. Por exemplo, se fosse o caso de uma rede celular, a estação retransmissora poderia coordenar a modulação escolhida, quais canais seriam usados, entre outras configurações.

Em relação à regeneração do sinal recebido, os retransmissores regeneradores possuem como característica detectar o sinal recebido, transformando-o em uma cadeia de bits<sup>2</sup>. Esse tipo de retransmissor recebe o sinal de um transmissor, detecta e interpreta a informação contida nele e, em seguida, recodifica os dados antes de enviá-los adiante (SOUZA, 2018). A vantagem desse modelo está no fato de eliminar ruídos e interferências do sinal original, além de adaptar os parâmetros de transmissão no segundo salto, porém com a possibilidade de adicionar erros de detecção, introdução de atraso pelo processo de detecção e a complexidade computacional da detecção.

No caso dos retransmissores não regenerativos, ou amplificadores, o sinal recebido é amplificado pelo retransmissor, em um processo analógico. Essa amplificação é feita para compensar os efeitos de perda de percurso e demais efeitos sofridos pelo sinal até o retransmissor, porém tem como efeito colateral a amplificação de outros sinais interferentes que tenham sido recebidos ao mesmo tempo e também do ruído no receptor do retransmissor, de modo que a SINR do primeiro salto não poderá ser melhorada no segundo salto (SOUZA, 2018).

Quanto às topologias de retransmissão, existem duas configurações principais, topologias com um salto extra e topologias de vários saltos. Na topologia com um salto extra, um único retransmissor é adicionado ao caminho direto entre o transmissor e o receptor. Isso pode ser o suficiente para superar limitações de distância ou atenuação do sinal. Já nas topologias de vários saltos, múltiplos retransmissores são usados em uma cadeia sequencial, onde cada retransmissor recebe e retransmite o sinal para o próximo retransmissor até que ele alcance o destino final (SOUZA, 2018).

---

<sup>2</sup> A detecção, nesse ponto, se refere a alguma camada de rede. Não necessariamente a estação retransmissora consegue entender toda a carga de dados.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para realizar o estudo sobre as técnicas de retransmissão em redes LoRaWAN, incluindo os tópicos de interesse para seleção de trabalhos acadêmicos e as métricas de interesse a serem analisadas nos estudos.

#### 3.1 Metodologia de busca e análise

Buscou-se na literatura trabalhos científicos que apresentem soluções para o problema estudado, de modo que algumas palavras-chave serão exploradas. Para encontrar material relevante sobre estações retransmissoras e seus sinônimos, a busca deverá envolver ao menos as seguintes palavras:

- Estações retransmissoras, ou *relay stations*;
- Retransmissores, ou *relays*;
- Repetidores, ou *repeaters*;
- Amplificadores, ou *amplifiers*;

A pesquisa deverá encontrar ao menos uma das quatro expressões anteriores juntamente com as palavras “LoRa” ou “LoRaWAN”.

Para selecionar os estudos em bibliotecas digitais, foram definidos alguns mecanismos de busca que se enquadram à área e cobertura de pesquisas acadêmicas. Dessa maneira, os mecanismos de busca utilizados são listados a seguir:

- Scielo Scientific Electronic Library Online;
- IEEE Xplore Digital Library;
- Google Acadêmico .

Dado que um dos objetivos do trabalho é a análise de viabilidade no contexto de baixa ou nenhuma infraestrutura de conexão com a Internet, são priorizados trabalhos que atendam a esse critério. Caso outros trabalhos despertem interesse, serão também mencionados, porém após os trabalhos que se encaixam no cenário desejado. Fora esse critério, a ordem de apresentação dos trabalhos analisados não reflete ordem qualitativa.

Em termos de métricas de desempenho e de viabilidade, descrevem-se as seguintes como métricas de interesse:

- Análise de pacotes/quadros perdidos ou recebidos: comparação do ganho na taxa de entrega de pacotes com a adoção das estações retransmissoras, além de como foi montado o cenário de teste;

- Ganho de cobertura, mostrando áreas que antes não eram cobertas e que, posteriormente, foram cobertas;
- Qualidade do sinal recebido: é esperado que a qualidade do sinal aumente, em termos de RSSI e SNR. Se o artigo apresentar esses resultados, devem ser listados;
- Viabilidade de uso de *uplink* e *downlink*: apesar de grande parte das aplicações usarem sensoriamento, com baixa taxa de dados, deve ser verificado se alguma restrição é feita para a operação nos dois sentidos, em especial no *downlink*;
- Custo dos equipamentos: soluções que apresentem equipamentos de baixo custo, ou que possam ser montadas com *hardwares* diversos, serão mais interessantes do que soluções com *hardwares* “fechados” e de custo mais elevado;
- Impacto no ciclo de trabalho, *duty cycle*: as normas LoRaWAN são bastante rígidas em questões do ciclo de trabalho, que pode ser visto como o tempo de atividade dos dispositivos (seja final, seja o retransmissor). Soluções que apresentem técnicas para reduzir o ciclo de trabalho são de interesse;
- Consumo energético: essa métrica será anotada, caso apresentada, pois não foi descrita no escopo do trabalho como parte dos objetivos. Porém, como é um dos pontos de interesse no uso de estações retransmissoras, será notado;
- Possibilidade de manutenção da encriptação de pacotes, e o impacto desse processo;

Os estudos serão comparados entre si e, posteriormente, com a norma da LoRa Alliance (LoRa Alliance, 2022b). Como a norma não apresenta resultados numéricos nem simulações, o que se busca nessa comparação são as estratégias adotadas e verificar potenciais para trabalhos futuros.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Trabalhos acadêmicos sobre retransmissores LoRaWAN

Os retransmissores LoRaWAN são dispositivos intermediários que ajudam a estender a cobertura de uma rede LoRaWAN. Eles recebem sinais de dispositivos finais (como sensores ou atuadores) que estão fora do alcance direto do *gateway* LoRaWAN e os retransmitem para o *gateway* e/ou vice-versa. Dessa forma, os retransmissores ajudam a superar os obstáculos físicos e estender a cobertura da rede. Esse tipo de retransmissor, bem como estudos e protótipos sobre o mesmo, ainda estão emergindo no mercado e na comunidade acadêmica. A seguir serão descritos os primeiros estudos analisados nesse trabalho.

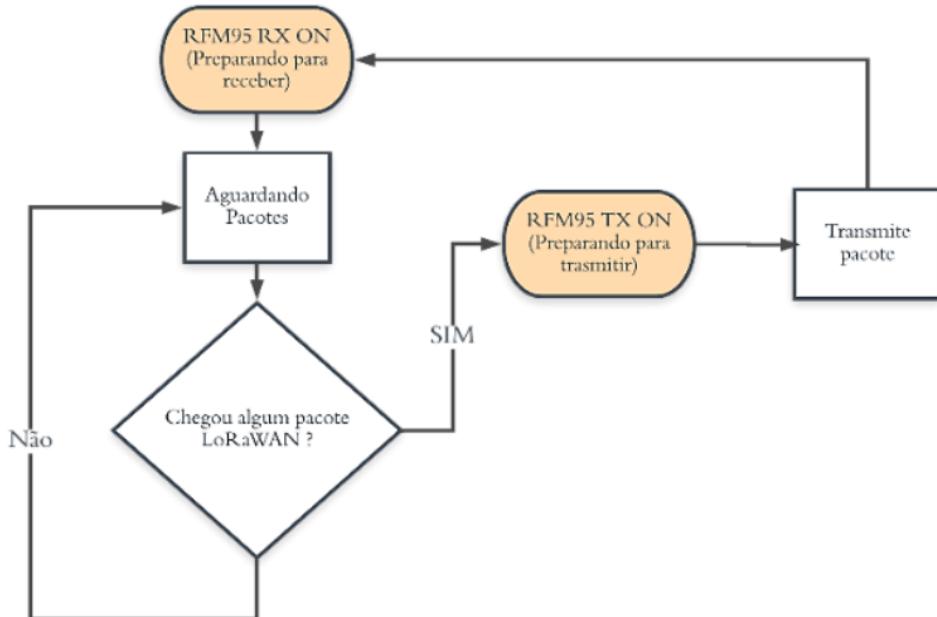
#### 4.1.1 Projeto de um Repetidor LoRaWAN de Baixo Custo e Baixo Consumo de Energia

O estudo "Projeto de um Repetidor LoRaWAN de Baixo Custo e Baixo Consumo de Energia", de Maziero *et al.* (2018), apresenta a metodologia e os resultados de um projeto de desenvolvimento de um repetidor (ou retransmissor) LoRaWAN. A metodologia do projeto considera dois principais conceitos: baixo custo e autonomia energética. O repetidor foi projetado para ser conectado a locais remotos com baixa cobertura de sinal, sem a necessidade de uma conexão direta com a rede elétrica e sem a adição de um novo *gateway* na rede. Para isso, foi utilizado o microcontrolador ATmega328P na placa Arduino Pro Mini como processador principal, alimentado por 5V e trabalhando a 16MHz. O módulo de comunicação escolhido foi o RFM95, que incorpora o modem de espalhamento espectral LoRa (SX1276) e opera na frequência de 915MHz. Não foram mencionados detalhes de bibliotecas utilizadas na implementação do *software* do retransmissor.

Por padrão o módulo RFM95 opera no modo de recebimento de quadros. Quando algum quadro LoRaWAN é detectado, o módulo RFM95 imediatamente altera seu modo para transmitir o pacote. Após o pacote ter sido transmitido, o módulo volta para o modo de recebimento de pacotes. O fluxograma do funcionamento do repetidor LoRaWAN desenvolvido pelos autores é mostrado na Figura 12. Os componentes foram selecionados visando a redução de custos e consumo de energia, e podem ser vistos na Figura 13.

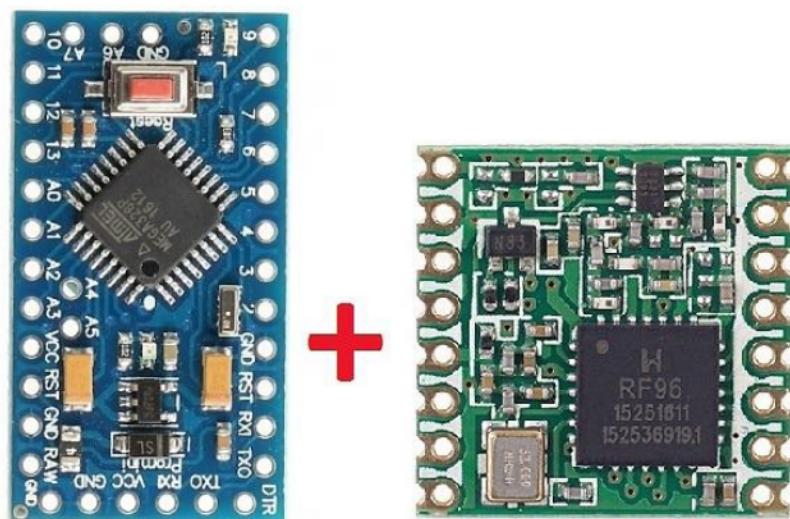
O repetidor LoRaWAN desenvolvido pelos autores é do tipo transparente, regenerativo, de um salto, suporta dispositivos Classe A e opera somente em um canal de frequência. O estudo também avaliou o consumo de energia do repetidor, mostrando que durante o pico de transmissão, o consumo é de 110mA a 3,3V por um curto período de tempo, enquanto na maior parte do tempo em que o repetidor aguarda pacotes LoRaWAN, o consumo cai para 70mA. Os autores sugerem que o repetidor seja alimentado por fontes alternativas, como um mini painel fotovoltaico, facilitando sua instalação em locais remotos e de difícil acesso.

**Figura 12 – Fluxograma do funcionamento do repetidor LoRaWAN**



Fonte: Maziero *et al.* (2018).

**Figura 13 – Arduino Pro Mini e módulo LoRa™ RFM95**



Fonte: Maziero *et al.* (2018).

Ao todo foram realizados dois experimentos pelos autores para avaliar a eficácia do repetidor LoRaWAN. No primeiro experimento, sem a presença do repetidor, a taxa de entrega de pacotes foi de 91%, enquanto no segundo experimento, com o repetidor inserido na rede, a taxa de entrega aumentou para 99%. As estruturas dos experimentos podem ser vistos nas Figuras 14 e 15.

**Figura 14 – Estrutura do primeiro experimento (sem retransmissor)**



Fonte: Maziero et al. (2018).

**Figura 15 – Estrutura do segundo experimento (com retransmissor)**



Fonte: Maziero et al. (2018).

Nos primeiros testes, o dispositivo funcionou sem qualquer inteligência de *software* agregado, porém tendo acesso ao *MAC header* e *Frame counter*, que são parte do quadro LoRaWAN, onde se encontram informações úteis do dispositivo final, como informação de direção dos pacotes (*uplink/downlink*), ID (identificador único do dispositivo final na rede LoRa), contador de pacotes (contador sequencial que serve para verificar se houve perdas de pacotes), *payload* criptografado, tamanho do *payload*, RSSI e SNR. Estas variáveis podem ser utilizadas para implementar filtros de pacotes, assim, possibilita melhorias na gestão dos pacotes a serem retransmitidos. (MAZIERO et al., 2018)

Esses resultados indicam uma melhora significativa na taxa de entrega de pacotes quando o repetidor é utilizado e conclui-se que o repetidor LoRaWAN desenvolvido pelos autores mostrou-se eficiente em sua proposta, melhorando a potência do sinal e aumentando a taxa de entrega de pacotes.

#### 4.1.2 LoRaWAN Range Extender for Industrial IoT

Sisinni et al. realizaram o estudo *LoRaWAN Range Extender for Industrial IoT* em 2020 (SISINNI *et al.*, 2020). Este estudo descreve a proposta de um "*Range Extender*" (extensor de cobertura) para redes LoRaWAN. Os autores abordam a necessidade de estender o alcance das redes LoRaWAN para dispositivos mais distantes dos *gateways*, apontando que, sem considerar o uso de *relays*, as técnicas disponíveis para aumento de cobertura utilizam SFs longos, que aumentam o tempo do quadro no ar e podem resultar em colisões e/ou desvios de relógio, ou utilizam a adição de novos *gateways*, que resulta em aumento de custo de equipamentos e infraestrutura de rede. Para lidar com os desafios de cobertura, os autores propõem o uso de um "*frame relay*", ou nó auxiliar, que realiza retransmissão em nome da fonte.

Esse dispositivo, chamado de e-Node pelos autores, atua como um equipamento transparente e regenerador para as mensagens transmitidas, utilizando maiores taxas de dados, preservando a compatibilidade total com as especificações LoRaWAN. Em termos de funcionalidades e limitações, o e-Node, a grosso modo, funciona como um repetidor para as mensagens que precisam percorrer distâncias maiores, recebendo essas mensagens e as reenviando, aumentando o alcance da rede. Ele opera apenas na camada de enlace (camada LoRaWAN, sem acesso aos dados de aplicação) e opera tanto em *uplink* quanto em *downlink*. A interconexão mostrada no experimento de prova de conceito utiliza conexão Ethernet entre os e-Nodes instalados e o dispositivo que fará o trabalho dos servidores de rede e aplicação.

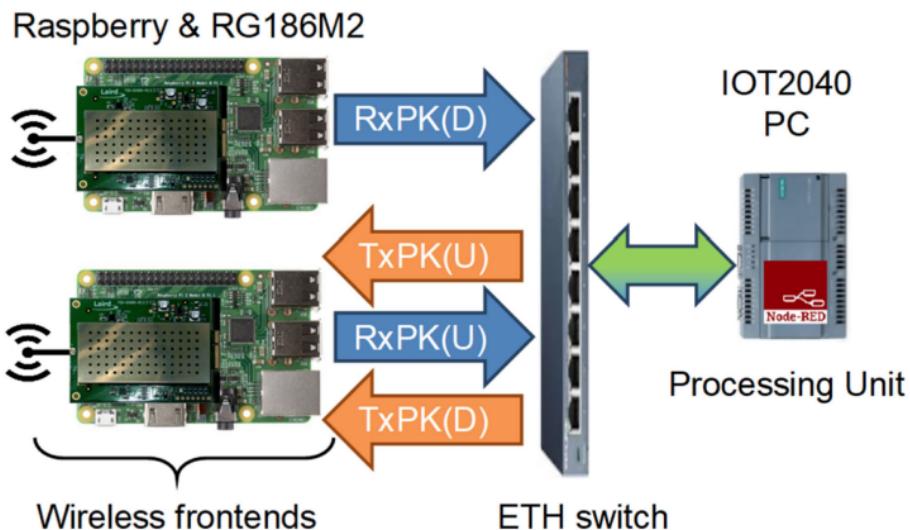
Falando sobre a construção do protótipo (e-Node), os autores utilizaram basicamente três componentes:

- Chipset SX1301-SX1257 da Semtech: Este é o componente principal do e-Node, sendo responsável pela transmissão e recepção em ambos os sentidos, fazendo parte dos *gateways* modificados;
- Gateways sem fio modificados: Em resumo, foram utilizados alguns *gateways* modificados para atuarem como *frontends* sem fio. Esses *gateways* são baseados no cartão Laird RG186-M2, que hospeda o *chipset* de radiofrequência (RF), e cada um deles é complementado por um Raspberry Pi 2 que executa o *software* "basic packet forwarder" da Semtech;
- Unidades de processamento: Os *frontends* sem fio são conectados a uma unidade de processamento que executa fluxos Node-RED para gerenciar as mensagens de *uplink* e *downlink*. Existem duas unidades de processamento consideradas no projeto: Um computador pessoal com processador AMD Athlon X2 5600, 4 GB de RAM e executando uma distribuição Linux Debian 9; e um IOT2040 da Siemens, com processador Intel Quark x1020 com economia de energia, 1 GB de RAM, 2 portas Ethernet, 2 interfaces RS232/485 e um RTC (relógio de tempo real). O sistema operacional é o Yocto

Linux. Esses equipamentos são os componentes atuando como servidores de rede e aplicação;

A Figura 16 é uma representação dos autores da implementação do protótipo proposto pelo estudo. Os *wireless frontends* são os extensores de cobertura, e o IoT2040 o responsável pelo processamento das mensagens recebidas dos dispositivos finais. Ao menos na prova de conceito dos autores, a conexão entre os e-Nodes e a infraestrutura da rede LoRaWAN é feita por uma outra tecnologia de rede.

**Figura 16 – Implementação do *LoRaWAN Range Extender***



**Fonte:** Sisinni et al. (2020).

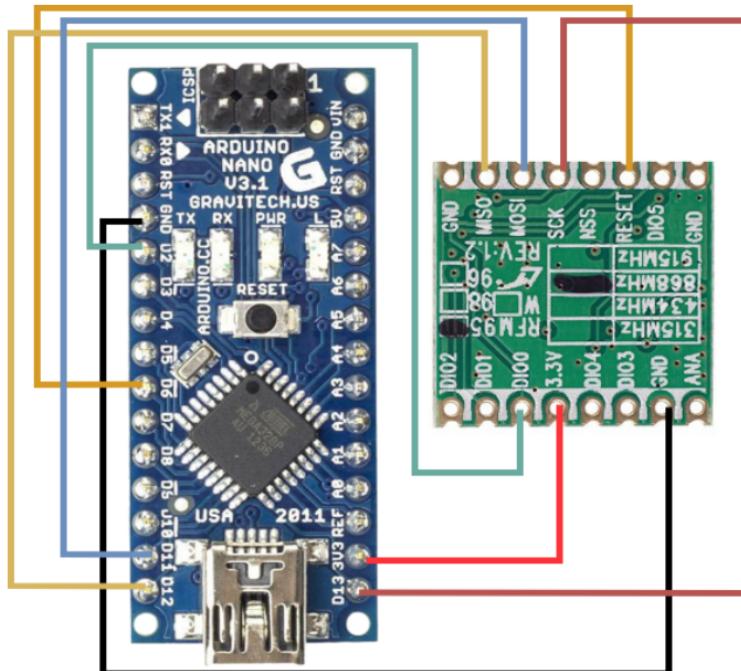
Com a implementação, experimentos e testes, os autores concluíram o estudo apresentando os resultados e mencionando que apesar da alta complexidade do projeto, houve uma melhoria significativa no alcance de rede em comparação com configurações tradicionais demonstrando a usabilidade do e-Node, mesmo para as taxas de dados mais altas do LoRaWAN, típicas de aplicações IoT. Além disso, os autores mostram a viabilidade do uso do e-Node para comunicação em *downlink* dos dispositivos classe A na segunda janela para SF 7, 8 e 9 (nesse último, ao menos para o tamanho de mensagem testado).

#### 4.1.3 Repetidor para Redes LoRaWAN com Ênfase na Agricultura

Na dissertação de mestrado de Samuel Zottis Dal Magro (MAGRO, 2022), de 2022, foi desenvolvido um repetidor LoRaWAN transparente de baixo custo denominado *r-node* e que pode realizar retransmissão tanto de mensagens de *uplink* como de *downlink*. Segundo o autor, o dispositivo deve ser incorporado na rede entre os dispositivos finais e o *gateway*, na qual os dispositivos finais estão sem comunicação com o *gateway*, sendo inserido então para que as mensagens possam chegar até o destino.

Para o desenvolvimento do repetidor foram utilizados um Arduino Nano juntamente com o módulo LoRa™ RMF95, além de um fio de 7,8 centímetros para realizar a função de antena, utilizando a frequência de 915MHz. Em relação à fonte de energia, o autor cita que os dispositivos repetidores serão alimentados por fonte externa, então o consumo de energia não é um problema. A Figura 17 mostra o *hardware* do dispositivo repetidor.

**Figura 17 – Hardware do dispositivo repetidor *r-node***

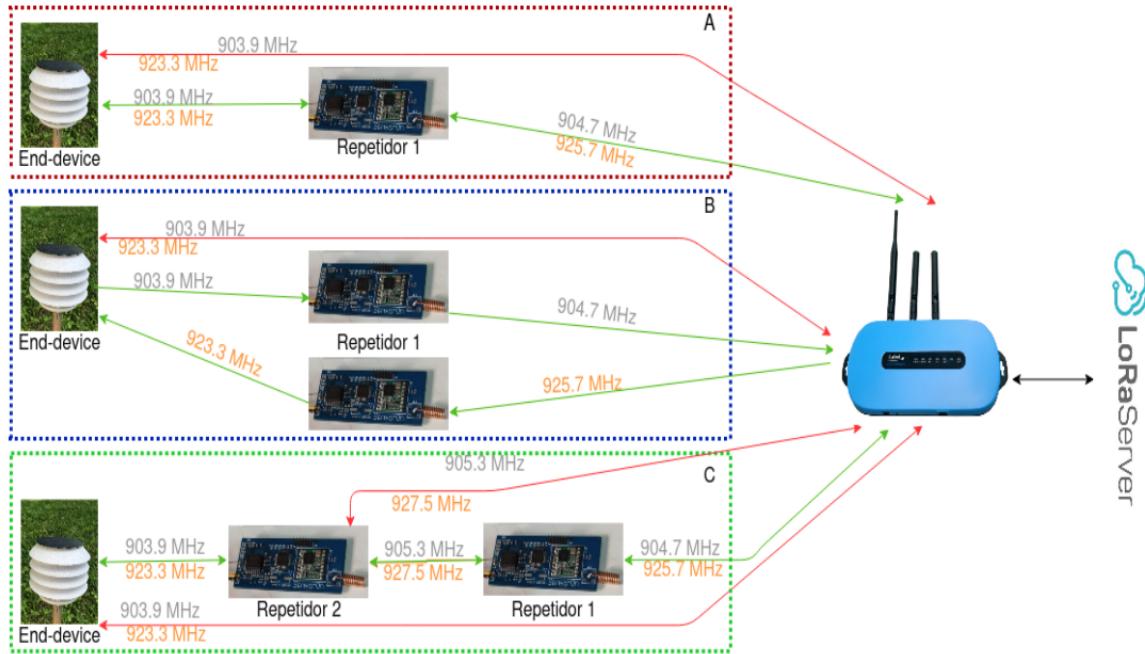


**Fonte: Magro (2022).**

O autor ainda aborda diferentes arquiteturas e configurações do dispositivo repetidor para seus estudos de caso. A primeira é buscando comprovar se o *r-node* foi capaz de retransmitir mensagens LoRaWAN, com o retransmissor operando tanto *uplink* quanto *downlink*. Outra arquitetura seria com dois repetidores, um responsável somente para mensagens *uplink* e outro somente para mensagens *downlink*. E uma terceira arquitetura que seria com dois repetidores verificando a possibilidade de múltiplos saltos. Os retransmissores são do tipo transparente, e apesar de não ser mencionado diretamente no texto, ocorre decodificação (regeneração) do quadro, pois há armazenamento de mensagem para transmissão. Na Figura 18, são apresentadas as três configurações de rede que foram utilizadas pelo autor durante a realização dos estudos de caso.

Segundo o autor, na Figura 18, as frequências alaranjadas são correspondentes às frequências de *downlink* e as escritas em cinza de *uplink*. Linhas vermelhas representam conexão inexistente e linhas verdes, conexões estáveis e de alta qualidade. O retângulo vermelho (A) representa uma rede LoRaWAN com um repetidor, o azul (B) é uma rede com dois repetidores, mas cada um responsável pelo envio de um tipo de mensagem (*uplink* ou *downlink*) e o retângulo verde (C) representa a rede com dois repetidores realizando mais de um salto. Em

**Figura 18 – Arquiteturas dos estudos de caso realizados pelo autor com diferentes frequências para simular ausência de alcance e uso de repetidores**



**Fonte:** Magro (2022).

todos os casos o *link* direto entre dispositivo final e *gateway* não existe, de modo que o *r-node* é fundamental para o funcionamento da rede.

A principal métrica de comparação dos dois primeiros modelos de *r-node* foi a perda de pacotes, que foi reduzida no cenário em que havia um *r-node* para cada sentido de transmissão. Um dos pontos levantados pelo autor para esse resultado foi a colisão de alguns quadros no retransmissor quando operando ambos os sentidos no mesmo equipamento. Para a terceira configuração, com dois retransmissores em série, buscou-se mostrar o sucesso de entrega em distância aumentada, sem mencionar uma taxa de perda de pacote.

Por fim, Magro conclui que por meio de seu estudo mostrou-se viável a possibilidade de inserir dois dispositivos repetidores (*r-node*) de baixo custo em uma rede LoRaWAN, possibilitando retransmitir tanto mensagens *uplink* como mensagens *downlink* por meio de vários saltos aumentando ainda mais o alcance da rede.

#### 4.1.4 Energy Versus Communication Range Trade-off in a LoRaWAN Relay Approach

O artigo publicado por Tran Van Lic, Manh Thao Nguyen, Fabien Ferrero e Le Huy Trinh (LIC *et al.*, 2022), aborda a utilização de retransmissores em redes LoRaWAN com baixo consumo de energia considerando um modelo de ciclo de trabalho de recepção (*Rx duty cycled mode*). O estudo analisa e compara o compromisso (*trade-off*) entre o consumo de energia do *relay* e a sensibilidade de recepção. A validação dos experimentos é realizada em ambientes

externos, utilizando frequência de 868MHz, para avaliar o desempenho dos nós e dos retransmissores.

O artigo traz uma seção sobre o princípio do *duty cycle* do *relay* no modo de recepção, onde os autores consideram que o objetivo principal em uma configuração de retransmissor LoRaWAN é reduzir ao máximo o consumo de energia. O transceptor SX1262 da LoRa Modem Basics®, que consome de 5 a 10 mA quando está com a recepção habilitada, é considerado para realização dos experimentos. Uma solução simples para reduzir o consumo de energia, segundo os autores, é configurar o *duty cycle* do modo de recepção do retransmissor para ativá-lo somente durante um curto período de tempo em um determinado intervalo, o que reduz o seu consumo de energia por não ter que ficar capturando a atividade do canal o tempo todo. Para os dispositivos finais, porém, resta uma sobrecarga por conta de transmitir continuamente durante o intervalo entre detecções, para garantir que o *relay* esteja em modo de recepção. Essa característica mostra um sistema não-transparente, dado que o dispositivo final sabe da existência do *relay*. Segundo o estudo, em muitos experimentos utiliza-se um período de *wake-up* (préâmbulo) de um segundo e vários parâmetros podem ser escolhidos para otimizar a relação entre o consumo de energia e a sensibilidade do receptor, como largura de banda e fator de espalhamento.

Foram conduzidos testes em laboratório a fim de obter as métricas de sensibilidade e consumo de energia relacionados ao fator de espalhamento durante o *duty cycle* de Rx com um período de *wake-up* de 1 segundo. É utilizado um terminal sem fio baseado em um transceptor LoRa SX162, que possui antena integrada, e um microcontrolador STM32L4. Os resultados são apresentados conforme mostrado na Figura 19. O consumo médio de energia e a sensibilidade mínima do *relay*, no experimento, são considerados para SF7, SF9, SF12. Observa-se que a energia necessária para o dispositivo final enviar um quadro com préâmbulo de um segundo depende significativamente do SF. Devido ao préâmbulo longo, a energia de um pacote com SF7 e SF9 é muito semelhante, enquanto o SF12 praticamente dobra a energia necessária no dispositivo final em relação ao SF7. Apesar da excelente sensibilidade do SF12, que é de -135 dBm em relação à de -123 dBm do SF7, o consumo de energia no dispositivo final e no retransmissor é muito alto para o terminal alimentado por bateria, por isso, os autores consideram apenas SF7 e SF9 na partes seguintes do artigo.

Para avaliar a faixa de comunicação do retransmissor foi realizado um experimento baseado em um dispositivo final classe A e um retransmissor configurado com diferentes parâmetros. Visto que a sensibilidade do *relay* pode ser amplamente afetada pelo ruído externo de RF, o experimento foi conduzido em um ambiente real. Os autores utilizaram um *gateway* LoRaWAN com antena omnidirecional de 10dBi, que fica no topo de um edifício. O dispositivo final foi colocado em um ponto cego, a uma distância superior a 8km, sem linha de visada com o *gateway* devido a um morro de 75m de altura. O *relay*, para possibilitar a transmissão de pacotes do dispositivo final para o *gateway*, foi instalado em um árvore no topo do morro. Além disso, o

**Figura 19 – Sensibilidade e consumo de energia versus fator de espalhamento considerando ciclo de 1 segundo.**

Spreading Factor	Energy for Tx with 1s preamble ( $\mu W.H$ )	Relay Measured Sensitivity (dBm)	Relay Average current (uA)
<b>SF7</b>	91.3	-123	56
<b>SF9</b>	105	-129	145
<b>SF12</b>	183	-135	1200

Fonte: Lic et al. (2022).

*relay* foi configurado para alternar periodicamente entre operação com SF7 e SF9 na recepção. O posicionamento e a distância entre os dispositivos podem ser observados na Figura 20.

**Figura 20 – Mapa com posição e distância entre equipamentos.**

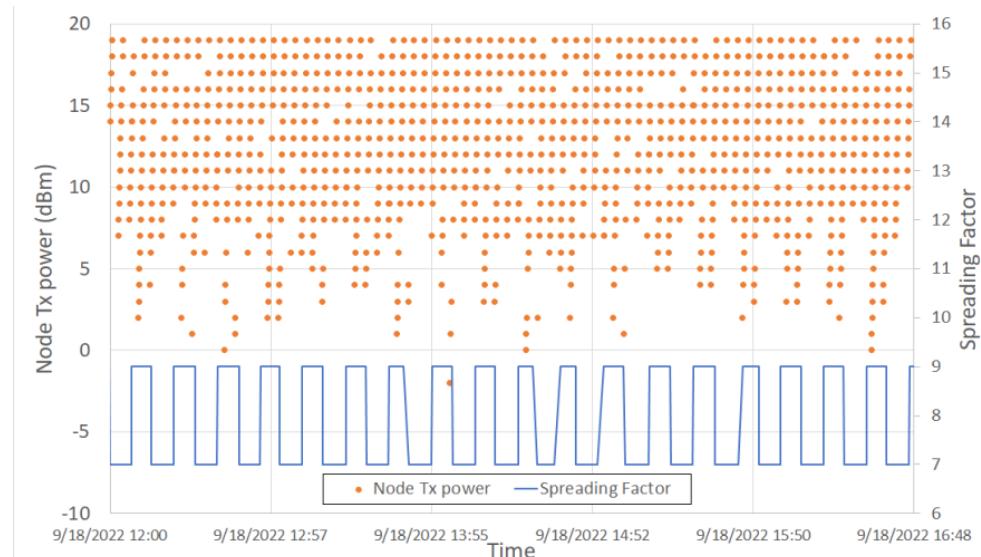


Fonte: Lic et al. (2022).

O dispositivo final foi configurado para enviar um pacote a cada 5s alternadamente nos modos SF7 e SF9, e alterar sequencialmente sua potência de saída de -10 dBm para 19 dBm, conforme mostra a Figura 21. Nessa figura, cada ponto laranja indica um quadro recebido, e sua posição indica o tempo e potência de transmissão, enquanto o gráfico de SF indica o fator utilizado no momento. A comunicação entre o dispositivo final e o *relay* usou a frequência de 866,6 MHz e foi verificada observando-se a transmissão para o *gateway* usando um dos oito

canais LoRaWAN. Esse experimento conduzido pelos autores foi executado durante 12 horas e mais de 2500 pacotes foram coletados pelo *gateway*. A taxa de sucesso do pacote é calculada comparando o número de pacotes recebidos com o número de pacotes transmitidos do nó e é mostrada na Figura 22 para as diferentes potências de transmissão do dispositivo final e fator de espalhamento. Como resultado do experimento, mostrou-se que o SF9 melhorou a sensibilidade do *relay* em uma proporção de 5-6 dB para transmissões de baixa potência (ou seja, obteve os mesmos resultados do SF7 com 5-6 dB a menos de consumo), com a ressalva de que o desempenho para potências de transmissão superiores a 10 dBm são muito semelhantes, com uma taxa de sucesso de pacotes superior a 80%.

**Figura 21 – Pacotes recebidos no *relay* para diferentes potências de transmissão do dispositivo final e fatores de espalhamento.**



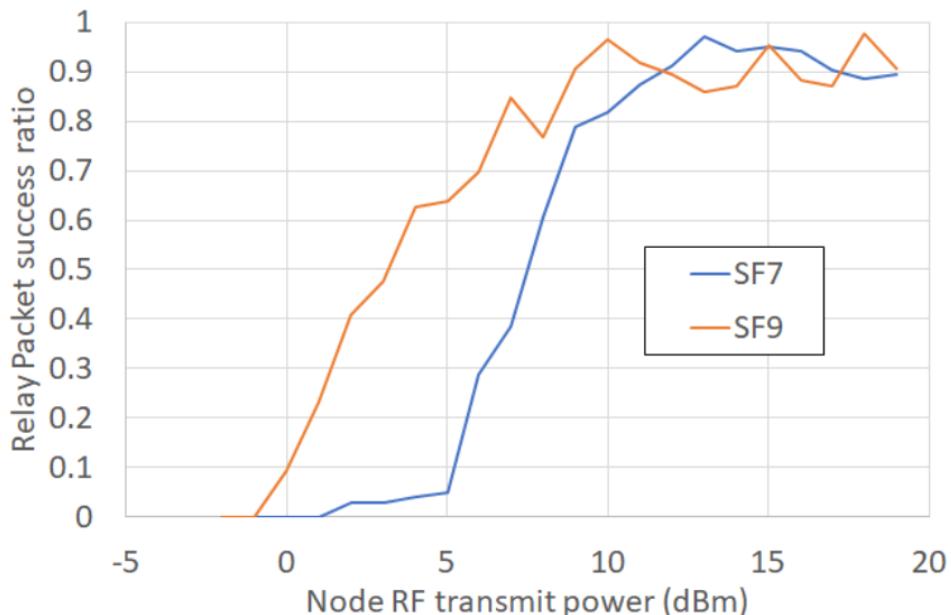
**Fonte: Lic et al. (2022).**

Os autores concluem o estudo afirmando que foi considerada uma abordagem de retransmissão LoRaWAN para ampliar a área de cobertura da rede, onde a medição com um terminal LoRaWAN real foi realizada em um cenário externo, e que a depender dos requisitos de sensibilidade, os SF7 a SF9 podem oferecer a melhor compensação de acordo com os resultados obtidos no estudo produzido por eles.

#### 4.1.5 LoRaWAN Relaying: Push the Cell Boundaries

O trabalho apresentado por Edouard Lumet et al. (LUMET et al., 2021) visa resolver um problema observado em ambientes com alguma restrição de cobertura, onde a taxa de extração dados (DER, *Data Extraction Ratio*) pode ser muito menor do que o esperado, mesmo quando a distância da transmissão a se realizar é pequena. A DER é basicamente uma similar taxa de entrega de pacotes, sendo definida como a razão entre quadros recebidos e o número de quadros enviados. Para isso, os autores apresentam um experimento com um retransmissor

**Figura 22 – Taxa de sucesso de retransmissão do pacote para diferentes potências de transmissão de dispositivo final e fator de espalhamento**



Fonte: Lic et al. (2022).

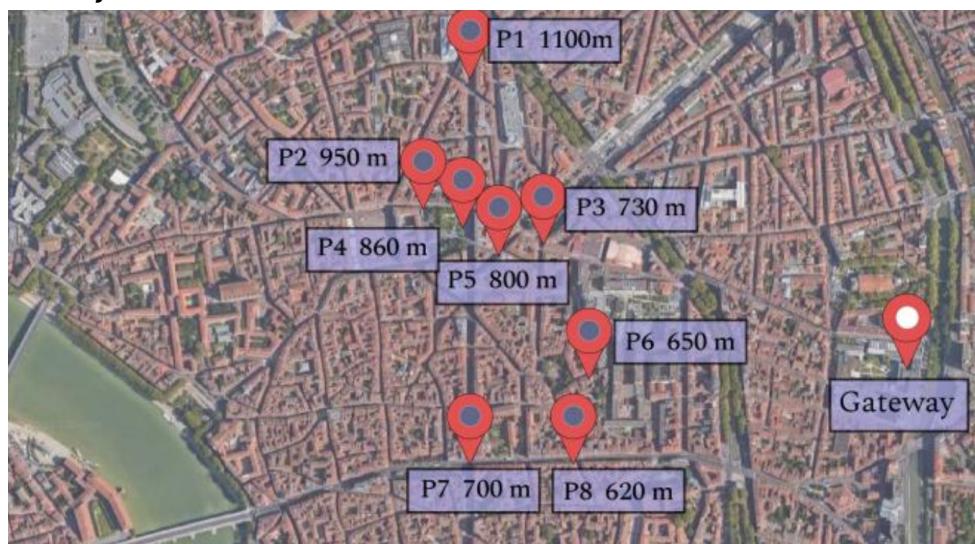
alimentado por energia, demonstrando como a retransmissão pode evitar obstáculos de maneira eficiente e conectar nós isolados, economizando energia e sem gerar sobrecarga em termos de complexidade de implementação.

Para descobrir casos em que a retransmissão LoRa melhora de fato a cobertura da rede ou a DER em comparação com comunicações de salto único, os autores criaram um experimento em duas etapas. Primeiramente, é estudada a cobertura de uma rede LoRa comum usando SF7 e é identificado um local para o retransmissor, dadas as propriedades do ambiente. A outra etapa se refere à adição do *relay* no local definido e o estudo da cobertura de rede, em particular nos locais onde a DER é baixa ou em locais não cobertos pelo *gateway*. Ao utilizar o *relay*, os autores presumiram configurá-lo com SF7 como fator de espalhamento, pretendendo melhorar o consumo de energia e a DER. A fim de comparar os modelos de salto único (comunicação direta) e de 2 saltos (usando o *relay*), os autores também mediram a DER do modelo de um salto com SF8 e SF12. Medindo a DER com o SF8, é possível saber se a retransmissão é mais eficaz que um *link* de salto único com um consumo de energia equivalente (dado que com SF8 o pacote passa mais tempo no ar, e gasta mais energia para ser transmitido). Já o salto único com SF12 é um *benchmark*, pois permite medir o alcance máximo da rede devido à sua robustez, lembrando que muitas configurações regionais não preveem o uso de SF12. Assim, a abordagem analítica definida no estudo é aplicada em um ambiente restrito para comparar o desempenho da retransmissão em termos de confiabilidade, alcance da rede e consumo de energia.

O teste do protocolo, definido no estudo, é realizado no centro da cidade de Toulouse, na França. Os pontos de instalação dos equipamentos, a distância deste em relação ao *gateway*,

bem como a visão da área urbana em questão, são mostrados na Figura 23. Como a área é considerada densa, com pequenos edifícios e ruas estreitas, acredita-se que o local seria interessante para apontar o efeito de sombreamento. Ruas longas, retas e estreitas, são conhecidas por beneficiar a propagação de sinal, podendo ajudar e alargar a cobertura da rede, mas também estão sujeitas a sombras. Por essa razão, os autores colocaram o *relay* primeiramente no local do ponto 7 (P7), onde fica uma avenida principal, que é reta. Como segundo cenário, os autores consideraram então a localização P8, pois a DER com SF7 se mostrou maior e também devido a região ser mais aberta.

**Figura 23 – Centro da cidade de Toulouse e pontos de instalação dos nós, retransmissor e gateway**



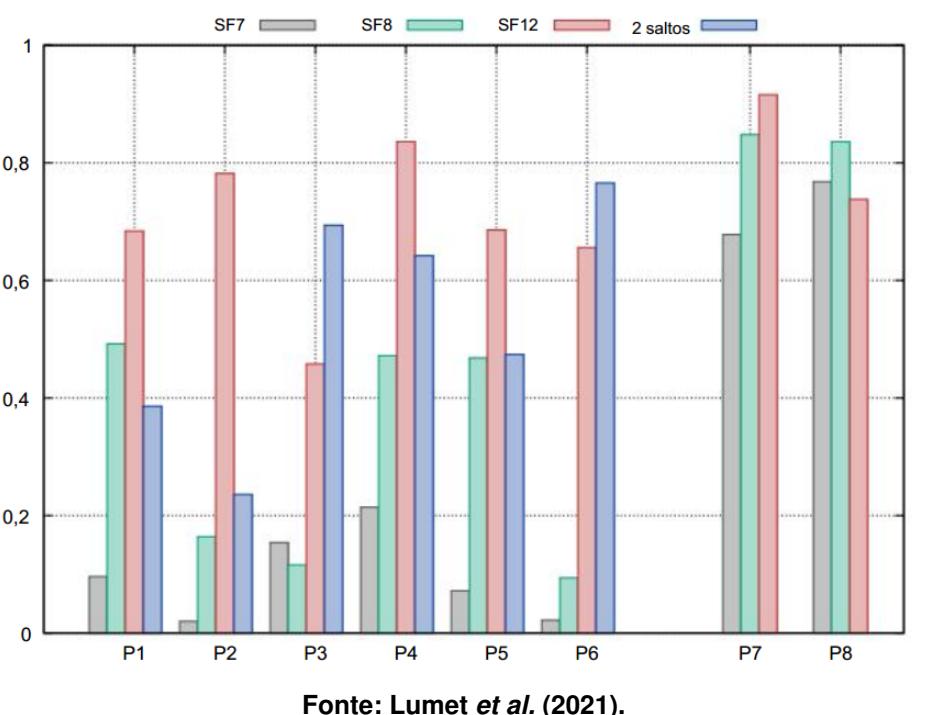
Fonte: Lumet et al. (2021).

A realização do experimento contou com um conjunto de teste composto por um kit Mikrotik wAP LoRa8 com antena omnidirecional de 6,5 dBi, um Raspberry Pi 3 B+ e duas placas de expansão Pycom equipadas com módulos LoPy4. No Raspberry Pi, foram instalados os servidores de rede e aplicação da Chirpstack, além de um banco de dados de série temporal para registrar os quadros gerados. A visualização dos dados foi habilitada pelo software Grafana, que possibilita a observação em tempo real dos pacotes recebidos. A linguagem de programação para as placas Pycom foi MicroPython, que é um Python mais leve com bibliotecas incorporadas para microcontroladores. A principal vantagem do MicroPython, segundo o artigo, é o baixo consumo de memória, mas como tem como desvantagem a limitação de possibilidades de programação, por conta da menor disponibilidade de bibliotecas. Por esse motivo, os experimentos foram baseados no protocolo de retransmissão LoRa-LoRaWAN, pois a função de decodificar quadros LoRaWAN não está disponível nas placas Pycom. A frequência utilizada no experimento foi de 868 MHz.

A Figura 24 mostra a comparação da DER entre os *links* de comunicação de salto único e de retransmissão. Os *relays* correspondem aos pontos P7 e P8, enquanto os dispositivos finais correspondem aos pontos P1 a P6. Observa-se uma má qualidade do *link* de um salto

considerando os primeiros seis locais de medição, onde o DER máximo alcançado, utilizando SF7 de salto único para os pontos P1 a P6, é igual a 0,214, sendo a maioria deles abaixo de 0,10. Comparando os resultados das configurações SF7 e SF8 de salto único e SF7 de 2 saltos, os autores observaram uma melhoria significativa do DER nos pontos P2, P3, P4 e P6, onde os pacotes transmitidos com SF7 de 2 saltos (retransmitidos) mostraram uma DER até 8 vezes melhor que a comunicação SF8 de salto único (P6), como mostra a Figura 24. O ponto P6 é um relevante exemplo de desempenho do *link* onde pode ser aplicado o uso de retransmissão. Os autores ressaltam que P6 corresponde a uma lixeira inteligente localizada em uma praça aberta, mas que a praça é cercada por edifícios.

**Figura 24 – Comparação da métrica DER entre comunicações de salto único e retransmissão.**



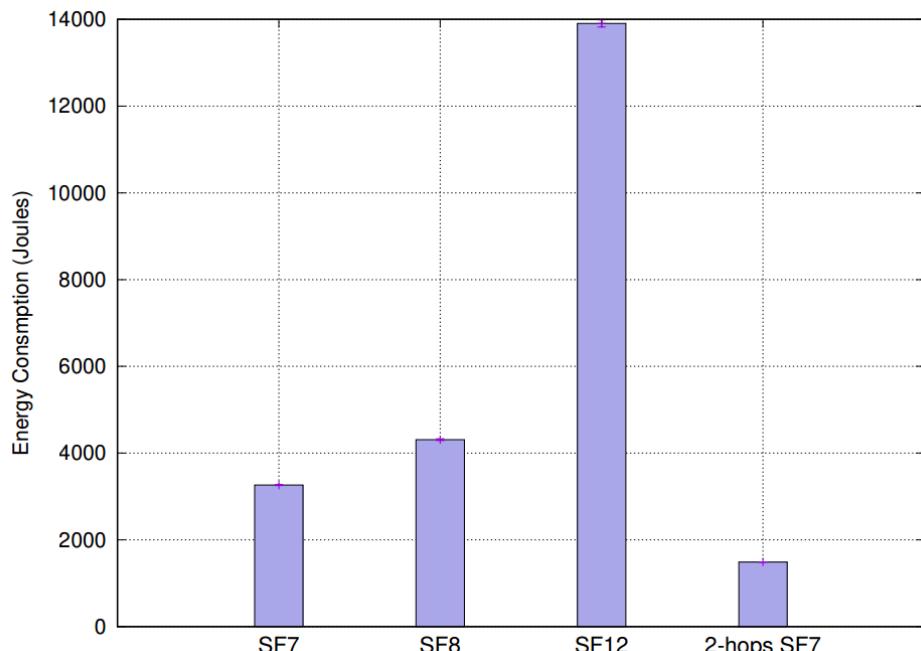
**Fonte:** Lumet et al. (2021).

No ponto P1, que não houve ganho com o *relay*, a distância entre o dispositivo final e o retransmissor é um fator impactante, considerando que o dispositivo final utiliza antenas de baixo ganho. Por esta razão, a DER é pior com retransmissão do que configurado com SF8 de salto único. Outra conclusão é que a distância de P1 para qualquer um dos dois retransmissores é muito grande, similar à distância para o próprio *gateway*.

A métrica DER também está ligada ao consumo de energia, pois cada quadro perdido deve ser retransmitido posteriormente, caso se deseje confiabilidade do sistema. No experimento, foi considerado pelos autores, uma nova tentativa de entrega para cada quadro perdido e comparou-se o consumo de energia pelo cálculo do tempo de transmissão e retransmissão, segundo o SF e a DER. Vale ressaltar que o tempo no ar do sinal depende da combinação de tamanho da carga útil, SF, largura de banda e taxa de codificação. Desse modo, os autores fixaram o tamanho da carga útil, a largura de banda e a taxa de codificação, permitindo calcular o tempo no ar variando apenas o SF. O objetivo dessa medição é determinar se uma comu-

nicação SF7 de 2 saltos consumiria menos energia do que uma comunicação de salto único com um SF equivalente em termos de tempo no ar e DER. É calculado então, no experimento, quanta energia é consumida para cada nó na rede. Os autores utilizaram, para essa medição e cálculo, características elétricas dadas pelo módulo LoPy e pelo simulador LoRaSim. Nessa abordagem, foi simulado uma amostra da emissão de 500000 quadros. Os autores ressaltam que cada mensagem tinha sua probabilidade de ser transmitida corretamente, de acordo com seu respectivo DER. Se não obtivesse sucesso, o dispositivo final tentaria reenviar o quadro, levando em conta as duas abordagens: maior SF e retransmissão utilizando o *relay* para 2 saltos. Também foi levado em consideração a energia utilizada pelo *relay* em ouvir e enviar os dados. É somada, então, a energia gasta em cada transmissão e retransmissão, obtendo-se o gasto total de energia na comunicação, conforme mostrado pela Figura 25, apenas para o P6.

**Figura 25 – Energia total consumida pelo nó em P6**



**Fonte:** Lumet *et al.* (2021).

De acordo com os resultados obtidos em (LUMET *et al.*, 2021) o experimento realizado evidenciou uma significativa melhora no DER ao considerar a retransmissão em comparação com o SF8 de salto único, demonstrando a relevância de um protocolo de retransmissão de 2 saltos. Os autores ainda chamam a atenção para a melhora significativa do consumo de energia em comparação com o *link* com SF12 de salto único.

#### 4.1.6 LoRaWAN Mesh Networks: A Review and Classification of Multihop Communication

O artigo de (COTRIM; KLEINSCHMIDT, 2020) traz um tutorial contendo diferentes protocolos de roteamento, soluções de retransmissão e propostas analíticas, teóricas e práticas

existentes na literatura, além de fornecer uma revisão e classificação de propostas de múltiplos saltos e também de salto único para LoRaWAN.

O estudo aborda diferentes tipos de dispositivos, incluindo o dispositivo retransmissor LoRaWAN. No caso, será dado foco às partes que incluem o mesmo. Os autores afirmam que em 2018 surgem os primeiros trabalhos que apresentam soluções utilizando retransmissores LoRaWAN, e analisam sete diferentes estudos sobre propostas de retransmissão:

- *Enhanced flexible LoRaWAN node for industrial IoT* (SISINNI et al., 2018): Descreve o *e-node*, dispositivo já citado nesta dissertação, um retransmissor transparente desenvolvido usando um *gateway* multicanal e sem restrição de energia;
- *A LoRaWAN range extender for Industrial IoT* (SISINNI et al., 2020): Estudo analisado neste trabalho, na subseção 4.1.2;
- *Increased flexibility in long-range IoT deployments with transparent and light-weight 2-hop LoRa approach* (DIOP; PHAM, 2019): Segundo (COTRIM; KLEINSCHMIDT, 2020), nesse trabalho foi proposto o uso de um retransmissor LoRaWAN simples para áreas rurais, onde é proposto um encaminhador de mensagens simples com mecanismos de sincronização. É demonstrado que o consumo de energia diminui com a adição do retransmissor e que ocorre um aumento na área de cobertura e na confiabilidade de entrega dos dados;
- *A LoRaWAN Based multihop solution for regional microgrid* (ZHOU et al., 2019): Nesse estudo é criado um dispositivo intermediário híbrido para realizar o ingresso de dispositivos remotos por meio de ABP, mas usando validação por OTAA a partir do dispositivo criado. Este mecanismo evita que nós remotos façam OTAA, diminuindo o número de mensagens na rede, apesar de não mencionar mecanismos de encaminhamento de mensagem (COTRIM; KLEINSCHMIDT, 2020);
- *OODC: An Opportunistic and On-Demand Forwarding Mechanism for LPWA Networks* (TANJUNG et al., 2020): Propõe-se uma técnica de múltiplos saltos em três mecanismos principais: encaminhamento, transmissão e codificação de rede. O *relay* fará a transmissão somente dos pacotes provenientes dos dispositivos finais que enviam seus pacotes para o *gateway* sem sucesso. Os resultados da simulação apresentaram uma taxa de entrega de pacotes próxima à transmissão direcionada ou de múltiplos saltos simples. No entanto, o mecanismo proposto requer menos transmissões (COTRIM; KLEINSCHMIDT, 2020);
- *Reliability Improvement of LoRa with ARQ and Relay Node* (CHOI; LEE; LEE, 2020): Esse trabalho propõe a utilização de um mecanismo ARQ (*Automatic Repeat Request*) e retransmissores para melhorar a confiabilidade em redes LoRa. Os *relays* escolhem um nó mais próximo ao *gateway* para transmitir os dados com base no RSSI coletado.

É implementado um cenário de teste real e apresentado resultado para confiabilidade de entrega dos pacotes;

- Exploring Multi-Hop LoRa for Green Smart Cities (ASLAM *et al.*, 2020): Por fim, (COTRIM; KLEINSCHMIDT, 2020) citam esse estudo que analisa duas arquiteturas de múltiplos saltos para LoRaWAN em cidades inteligentes. Na primeira, um dispositivo final funciona como retransmissor; já na segunda, chamada estrela-de-estrelas, um grupo de dispositivos remotos formam um *cluster* enviando dados para um *gateway* de *cluster*, que atua como um retransmissor enviando os dados para um *gateway* central. Um protótipo é implementado em ambas arquiteturas. Os resultados se resumem a uma diminuição no consumo de energia para dois ou três saltos em comparação com a comunicação de salto único.

Após descrever alguns trabalhos que envolvem dispositivos retransmissores LoRaWAN, é realizada, pelos autores, uma classificação de todos os tipos de dispositivos estudados, inclusive os retransmissores, em termos de rádio (canal único ou multicanal), energia (restrito ou irrestrito), inteligência (inteligente ou não inteligente), que se refere a algum recurso inteligente (mecanismo de sincronização por exemplo), e detalhes que é definido por (COTRIM; KLEINSCHMIDT, 2020) como “encaminhar pacotes” ou “criar novo pacote LoRaWAN”. A Figura 26 mostra a classificação completa realizada pelos autores.

**Figura 26 – Classificação dos dispositivos**

Device	Radio	Energy	Smart	Details
End-device	- Single-Channel	- Constrained - Non-Constrained	- Non-Smart	- Create new LoRaWAN packet
Relay-Device	- Single-Channel - Multi-Channel	- Constrained - Non-Constrained	- Smart - Non-Smart	- Forward packets - Create new LoRaWAN packet
Router-Device	- Single-Channel - Multi-Channel	- Constrained - Non-Constrained	- Smart	- Implement a routing protocol - Create new LoRaWAN packet
Main Gateway	- Multi-Channel	- Non-Constrained	- Smart - Non-Smart	- Connected to the Internet - Split networks
Relay-Gateway	- Multi-Channel	- Non-Constrained	- Smart - Non-Smart	- Forward packets - Not connected to the Internet
Router-Gateway	- Multi-Channel	- Non-Constrained	- Smart	- Implement a routing protocol - Not connected to the Internet

**Fonte: Cotrim e Kleinschmidt (2020).**

#### 4.1.7 Sumarização dos resultados da literatura

A análise dos resultados obtidos, nos estudos selecionados, proporciona uma visão abrangente das estratégias adotadas, dos componentes de *hardware* empregados e das métricas avaliadas. Cada pesquisa apresenta sua própria abordagem no contexto da retransmissão LoRaWAN, explorando aspectos importantes para aumentar a cobertura da rede, otimizar o consumo de energia e aprimorar a robustez da comunicação em redes de longo alcance. Esta

subseção resume as observações obtidas com este trabalho oferecendo uma análise geral e comparativa dos estudos selecionados, acerca da utilização de retransmissores em LoRaWAN. Como o trabalho de Cotrim e Kleinschmidt (2020) traz uma revisão sistemática, não será resumido nessa subseção.

Os estudos da literatura anteriormente revisados incluem:

1. “Projeto de um Repetidor LoRaWAN de Baixo Custo e Baixo Consumo de Energia” - (MAZIERO *et al.*, 2018):
  - Componentes de *hardware*: Utilizou um Arduino Pro Mini com microcontrolador ATmega328P e módulo de comunicação RFM95 (baseado em um SX1276 da Semtech).
  - Custo médio aproximado para implementação: ~R\$ 100,00 (R\$ 29,90 Black-Board Pro Mini - 5V/16MHz (RoboCore, 2023a); R\$ 72,96 Módulo LoRa 915Mhz SX1276 RF Wireless + Antena (UsinalInfo, 2023));
  - Complexidade de implementação: Baixa/simples
  - *Uplink/downlink*: Focou exclusivamente *uplink*, não explorando o *downlink*.
  - Técnica de retransmissão: Repetidor totalmente transparente, de um salto, suportando dispositivos da classe A operando no canal de frequência de 915MHz. Modo de recebimento de mensagens padrão do módulo RFM95, com alteração imediata para o modo de transmissão ao detectar os quadros LoRaWAN.
  - Métricas avaliadas: Taxa de entrega dos pacotes e consumo energético
  - Cenário do experimento: Foi utilizado o padrão australiano com frequência de 916,8 MHz, fator de espalhamento SF10, potência de transmissão de 14 dBm, tamanho do pacote de 27 bytes com envios periódicos a cada 15 segundos.
  - Principais resultados: Obteve um aumento significativo na taxa de entrega dos pacotes, de 91% sem o repetidor para 99% com o repetidor, enquanto consumia 110mA no pico de transmissão e 70mA enquanto aguardava o recebimento de novas mensagens.
2. “LoRaWAN Range Extender for Industrial IoT” - (SISINNI *et al.*, 2020)
  - Componentes de *hardware*: 2 interfaces sem fio (*wireless frontends*), cada uma composta por um módulo RG186 da Laird Connectivity conectado a uma Raspberry Pi 2, e uma unidade de processamento (Foram testados como unidade de processamento um computador de uso pessoal e o IOT2040 da Siemens).

- Custo médio para implementação: ~US\$ 1150 (US\$ 91,55 RG186-M2 Laird Connectivity a unidade (DigiKey, 2023a); US\$ 35,00 Raspberry Pi 2 Model B a unidade (CanaKit, 2023); US\$ 900,00 IOT2040 da Siemens (Mercado Livre, 2023) ou PC com desempenho semelhante;)
- Complexidade de implementação: Alta/complexa
- *Uplink/downlink*: Explorou a extensão de alcance tanto para *uplink* quanto para *downlink*.
- Técnica de retransmissão: Retransmissor transparente-regenerativo de longo alcance utilizando taxa de dados mais altas preservando total compatibilidade com especificações LoRaWAN.
- Métricas avaliadas: Alcance da rede, mas também traz algumas medições de SNR e RSSI.
- Cenário do experimento: Dispositivos finais foram posicionados em quatro locais diferentes, dentro de um laboratório industrial. O *e-node* foi colocado a 10 metros do laboratório, enquanto o *gateway* RG186 estava a aproximadamente 100 metros do *e-node*. Foram utilizados SF7, SF8, SF9 como fatores de espaçamento, e carga útil de 84 bytes. Experimentos realizados ao longe de duas semanas, enviando 100 mensagens, para cada cenário, com um intervalo de um minuto.
- Principais resultados: O uso do *e-node* apresentou melhorias no alcance da rede LoRaWAN, especialmente para taxas de dados mais altas, permitindo a cobertura do sinal em áreas anteriormente não cobertas. Houve um aumento no SNR em até 16 dB e no RSSI quando o retransmissor foi utilizado, mesmo em distâncias similares entre o dispositivo final e o *e-node* ou o *gateway*.

### 3. “Repetidor para Redes LoRaWAN com Ênfase na Agricultura” - (MAGRO, 2022)

- Componentes de *hardware*: Arduino Nano com um módulo LoRa RMF95 e uma antena de fio de 7,8cm.
- Custo médio para implementação: ~R\$ 110 (R\$ 35,90 Placa Nano V3 + Cabo USB para Arduino (RoboCore, 2023b); R\$ 72,96 Módulo LoRa RMF95 915Mhz SX1276 RF Wireless + Antena (UsinaInfo, 2023);)
- Complexidade de implementação: Mediana
- *Uplink/downlink*: Testou e explorou cenários de *downlink* e *uplink*.
- Técnica de retransmissão: Repetidores transparentes de salto único, múltiplos saltos ou um dispositivo separado para cada sentido de retransmissão.
- Métricas avaliadas: Redução da perda de pacotes e eficiência de transmissão.

- Cenário do experimento: Foram realizados testes com 2 cenários de repetidores de um salto: um *r-node* individual para *uplink* e *downlink*; e dois *r-nodes* em paralelo, onde cada um fica responsável por um sentido de transmissão. Foi utilizada frequência de 915 MHz e SF9.
  - Principais resultados: O experimento com o retransmissor único teve dois cenários: com 3 e com 2 dispositivos finais. No primeiro, foram enviadas 580 mensagens de (*uplink*) onde 27 destas foram perdidas, totalizando 4,65% de perda. Para *downlink*, 18 mensagens foram enviadas pelo *gateway*, onde somente 1 foi perdida, totalizando 3,7% de perda. No cenário com 2 dispositivos finais, a taxa de perda para *uplink* se manteve praticamente a mesma do cenário anterior (4,25% de 587 mensagens), mas as mensagens de *downlink* apresentaram uma maior taxa de perda de pacotes, onde o retransmissor conseguiu enviar somente 4 das 10 mensagens recebidas. No cenário com dois *r-nodes* separados, houve o envio de 592 mensagens (*uplink*), onde 21 pacotes foram perdidos, representando 3,54% de perda. Para *downlink* foram enviados 12 mensagens a partir do *gateway*, onde apenas 1 pacote foi perdido.
4. “Energy Versus Communication Range Trade-off in a LoRaWAN Relay Approach” - (LIC *et al.*, 2022)
- Componentes de *hardware*: Terminal sem fio com antena integrada baseado em um transceptor SX1262 LoRa e microcontrolador STM32L4.
  - Custo médio para implementação: Como não é especificado pelos autores os componentes que compõem o terminal sem fio, não foi possível mensurar um custo médio de implementação.
  - Complexidade de implementação: Mediana
  - *Uplink/downlink*: Somente *uplink*
  - Técnica de retransmissão: Retransmissor regenerativo, não transparente, alterações no fator de espalhamento (SF) somado a um *duty cycle* de Rx de 1 segundo.
  - Métricas avaliadas: Consumo de energia, sensibilidade de recepção, taxa de sucesso de entrega dos pacotes
  - Cenário do experimento: O experimento foi executado durante 12 horas e mais de 2500 pacotes foram coletados pelo *gateway*. O *gateway* fica a 7,7 km do *relay*, enquanto o *relay* fica a 1,2 km do dispositivo final. A comunicação entre o dispositivo final e o *relay* utiliza frequência de 866,6 MHz e transmite para o *gateway* usando um dos oito canais LoRaWAN. O *relay* alterna periodicamente entre SF7 e SF9 na recepção, e o dispositivo final foi configurado para

enviar um pacote a cada 5 segundos alternadamente entre os modos SF7 e SF9, e alternar sequencialmente sua potência de saída de -10 para 19dBm.

- Principais resultados: SF9 demonstrou uma melhora na sensibilidade do *relay* em uma proporção de 5-6 dB. O desempenho para potências de transmissão superiores a 10 dBm são muito semelhantes. Apesar de melhor sensibilidade, SF12 resulta em maior consumo de energia.

## 5. “LoRaWAN Relaying: Push the Cell Boundaries” - (LUMET *et al.*, 2021)

- Componentes de *hardware*: Raspberry Pi 3 B+ e duas placas de expansão Pycom equipadas com módulos LoPy4.
- Custo médio para implementação: ~R\$ 1800 (R\$ 399,99 Raspberry Pi 3 - Model B+ Anatel a unidade (RoboCore, 2023c); R\$ 702,35 Módulo Pycom LoPy4 a unidade (SmartCore, 2023);)
- Complexidade de implementação: Mediana
- *Uplink/downlink*: Somente *uplink*
- Técnica de retransmissão: Retransmissão regenerativa, aparentemente transparente, otimização de SF.
- Métricas avaliadas: Consumo de energia, DER, sensibilidade de recepção, local de implantação.
- Cenário do experimento: O primeiro teste avaliou a cobertura de rede de salto único a fim de identificar um bom local para instalação dos retransmissores. O segundo teste é feito com o retransmissor já instalado utilizando SF7, SF8 e SF12 tanto para as transmissões diretas de salto único (dispositivo final para *gateway*) quanto para transmissões passando pelo retransmissor (2 saltos). A frequência utilizada para todos os testes foi de 868 MHz seguindo o padrão europeu (EU).
- Principais resultados: No teste de salto único com SF7, o DER mostrou uma qualidade ruim. Em uma segunda análise, é evidenciado uma melhoria significativa do DER usando comunicação SF7 de 2 saltos em comparação com comunicações SF8 de salto único. Além disso, com o experimento observa-se uma melhora significativa no consumo de energia. Verificou-se uma economia de energia notável, onde é consumido aproximadamente metade e 34% da energia usada em SF7 e SF8 de salto único, respectivamente.

## 4.2 Especificação de *Relay* LoRaWAN LoRa Alliance

Durante a realização deste estudo, foi divulgado por parte da LoRa Alliance® a sua especificação oficial para dispositivos *relays* LoRaWAN, o padrão LoRaWAN® *Relay Specification*

TS011-1.0.0 (LoRa Alliance, 2022b). Esse padrão descreve o mecanismo de retransmissão que deve ser usado para transportar quadros LoRaWAN bidirecionalmente entre um dispositivo final e um *gateway*/servidor de rede por meio de uma retransmissão, e representa um marco relevante dentro do campo das tecnologias LoRaWAN. A divulgação desta nova especificação coincide diretamente com o período de pesquisa desta dissertação.

A especificação oferece a capacidade de criar extensores de rede LoRaWAN de baixo custo e alimentados por bateria, especialmente úteis em situações onde mesmo o *link-budget* (soma de todos os ganhos e perdas entre o transmissor e o receptor, incluindo antenas, canal, etc) do LoRaWAN (de até 158 dBm) permite a comunicação entre dispositivo final e *gateway* e também em locais em que não há infraestrutura alguma, nem mesmo elétrica (EIJK, 2023). Nesse mesmo documento da Semtech, justifica-se a adoção de retransmissores mesmo em casos em que a instalação de mais *gateways* é possível, visando a redução das despesas de capital (CAPEX, *Capital Expenditure*) e operação (OPEX, *Operational Expenditure*).

#### 4.2.1 Tipo de dispositivo e modo de funcionamento

O modo de funcionamento de um *relay* LoRaWAN apresenta características específicas e representa uma parte crucial na compreensão deste recurso de aumento da área de cobertura. A norma especifica que o *relay* LoRaWAN é, tecnicamente, um dispositivo final classe A, que possui seu próprio identificador exclusivo de dispositivo, DevEUI, e chaves-raiz (*root keys*, no caso, AppKey) que possibilitam sua conexão a uma rede LoRaWAN específica. O principal objetivo do *relay* é ouvir outros dispositivos finais que buscam transmitir seus quadros de *uplink* para o mesmo servidor de rede ao qual o *relay* já está conectado, e possivelmente receber quadros de *downlink*, caso necessário.

Sendo assim, um *relay* utiliza a mesma arquitetura de *hardware* de um dispositivo final (LoRa Alliance, 2022b), e o mesmo circuito de rádio LoRa de canal único que qualquer outro dispositivo final LoRaWAN (EIJK, 2023). O *relay* LoRaWAN é capaz de suportar até 16 dispositivos finais diferentes, estabelecendo sua capacidade de capturar e retransmitir dados de múltiplos dispositivos na rede. O *relay* deve suportar comunicação bidirecional, i.e., *uplink* e *downlink*. Além disso, como mencionado em (EIJK, 2023), é possível adicionar a funcionalidade de *relay* a qualquer dispositivo final LoRaWAN, mas que essa adição de funcionalidade requer atenção à previsão de vida útil da bateria, pois é necessária energia adicional para suportar a função do *relay*. O padrão especifica justamente as adições necessárias para a funcionalidade de *relay*. Exemplos de rádios que suportam a função de *relay* incluem as famílias SX126X e a LR11XX da Semtech (EIJK, 2023).

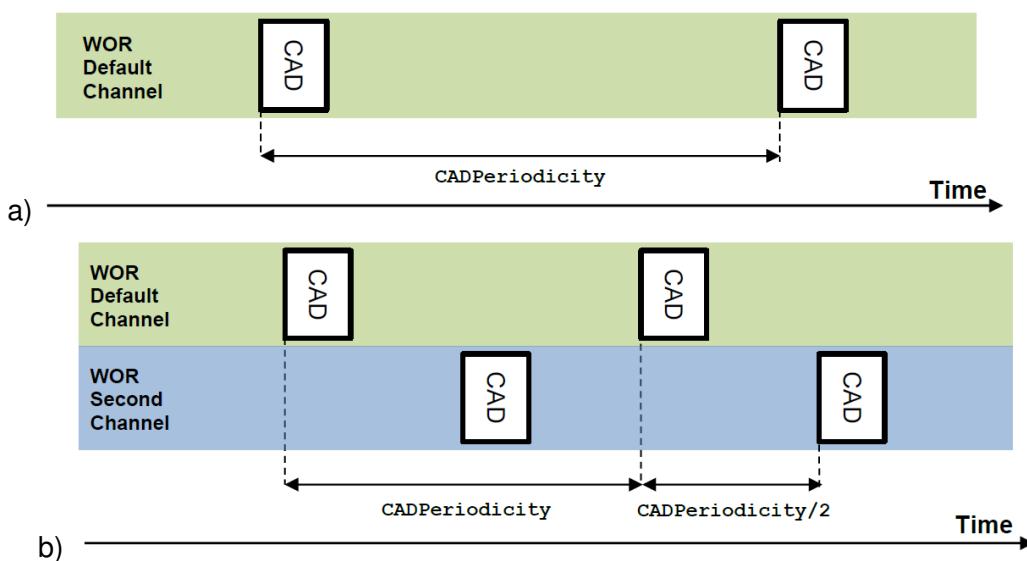
Nas subseções a seguir, serão apresentadas as principais adições trazidas pela norma TS011-1.0.0 de 2022 para a operacionalização dos *relays* em LoRaWAN.

#### 4.2.2 Detecção de atividade e economia de energia

Em LoRaWAN, a grande maioria dos dispositivos é do tipo classe A, de modo que mantém janelas de recepção abertas por tempo determinados e apenas após transmissões. Isso se dá, entre outros fatores, por economia de energia. Porém, no caso de um *relay*, seria necessário manter a escuta ativa por muito mais tempo, ou mesmo o tempo todo. A maioria dos dispositivos finais LoRaWAN envia dados de *uplink* de forma pouco frequente, de maneira aleatória ou baseada em eventos. Isso dificulta a criação de um protocolo capaz de permitir que os *relays* capturem o tráfego dos dispositivos sem precisar estar ligado o tempo todo. Com isso, a tendência é que a maior parte do gasto energético de um *relay* não seja por conta das retransmissões dos *uplinks* ou *downlinks*, e sim da necessidade de ouvir a atividade em busca de quadros transmitidos (Eijk, 2023).

Para enfrentar esse desafio, descreve-se uma estratégia em que o *relay* escuta apenas por um curto período de tempo, de aproximadamente 3 a 6 milissegundos por segundo, em um canal pré-determinado, a fim de prolongar sua vida útil sem comprometer a funcionalidade de retransmissão. Nesse período de escuta, o *relay* deve escanear o meio de comunicação e tentar identificar a presença de símbolos de preâmbulo, que indicam atividade de um transmissor. Esse procedimento é feito em um modo de baixo consumo energético, e é denominado Detecção de Atividade de Canal (CAD, *Channel Activity Detection*). Caso o *relay* perceba atividade durante o CAD, alternará para o modo de recepção. Caso contrário, entrará em modo de repouso até a próxima janela CAD. O *relay* pode ter até dois canais pré-definidos para o CAD, e, nesse caso, alterna entre eles a cada 500 ms (metade da periodicidade). A Figura 27 exemplifica a operação do CAD para um e dois canais.

**Figura 27 – Operação do CAD para a) um canal e b) dois canais.**



**Fonte: LoRa Alliance (2022b).**

Como os dispositivos não sabem o momento em que a janela CAD será aberta, é necessário definir um procedimento para sincronização com o *relay*. Esse processo, além de outras tarefas, é realizado com a funcionalidade de *Wake-On-Radio* (WOR). Sem ele, um dispositivo pode enviar um quadro inteiro enquanto o *relay* está em repouso, ou já enviando outras partes do quadro que não o preâmbulo, e não ser detectado pelo CAD.

#### 4.2.3 Wake-On-Radio

Para a tarefa de acordar o *relay*, o dispositivo final envia um quadro chamado *Wake-On-Radio* (WOR). Esse quadro envia também informações de rádio sobre o próximo quadro LoRaWAN que será enviado pelo dispositivo final (LoRa Alliance, 2022b). Com esse procedimento, percebe-se que o dispositivo final sabe da presença do *relay* e se comunicaativamente com ele. Não é necessário que o *gateway* realize o envio de quadros WOR, pois envios do *gateway* acontecem apenas em resposta a um envio do dispositivo final.

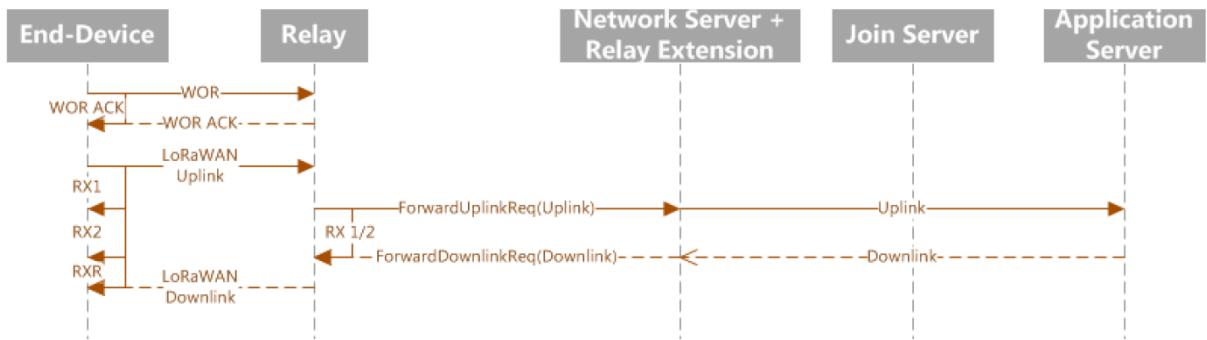
Uma das principais características do quadro WOR é o tamanho do preâmbulo, que deve ter duração máxima de 1 segundo. Com isso, o primeiro envio de um WOR por parte de um dispositivo final deve ser capaz de atingir a janela CAD do *relay*, mesmo sem qualquer informação de sincronização. Isso permite os longos períodos de inatividade do *relay*, e consequentemente a economia de energia. Posteriormente, o dispositivo final será sincronizado com a janela do *relay* e poderá usar preâmbulos mais curtos.

Se for detectada atividade de rádio no período CAD, o *relay* tentará demodular a mensagem e verificar se é um quadro WOR válido. Caso a recepção seja bem sucedida, o *relay* pode responder com uma confirmação, chamada WOR ACK (quadro de confirmação/reconhecimento). O WOR ACK, além de possuir como objetivo informar o dispositivo final que seu quadro WOR foi recebido com sucesso, contém informações sobre o *relay* que possibilitam ao dispositivo final sincronizar-se e reduzir significativamente o comprimento do quadro WOR subsequente. Com esse processo estabelecido, o dispositivo final estará pronto para enviar seu *uplink* LoRaWAN, que será recebido pelo *relay* e então encaminhado para o *gateway*/servidor de rede, usando seu próprio *link* LoRaWAN. A Figura 28 resume esse processo.

Vale destacar, como notado na Figura 28, que foi criada uma nova janela de recepção LoRa, denominada RXR, para dispositivos finais que se conectem a um *relay*, permitindo a recepção de *downlinks*, mas sem alterar as janelas RX1 e RX2 existentes nas normas anteriores do LoRaWAN. Além das mensagens de *downlink* de aplicação, essa nova janela garante que o procedimento de ingresso na rede por OTAA seja utilizado, dado que o dispositivo final precisa receber parâmetros do servidor de ativação ou de rede para derivar as chaves de sessão de rede e aplicação, NwkSKey e AppSKey, respectivamente.

Por conta da possibilidade de uso de OTAA, existem dois tipos de quadros WOR que um dispositivo final pode enviar a um *relay*. O primeiro é o *WOR Relay Join-Request*, que um dispositivo final envia antes de uma mensagem *Join-request*, para ingressar em uma rede Lo-

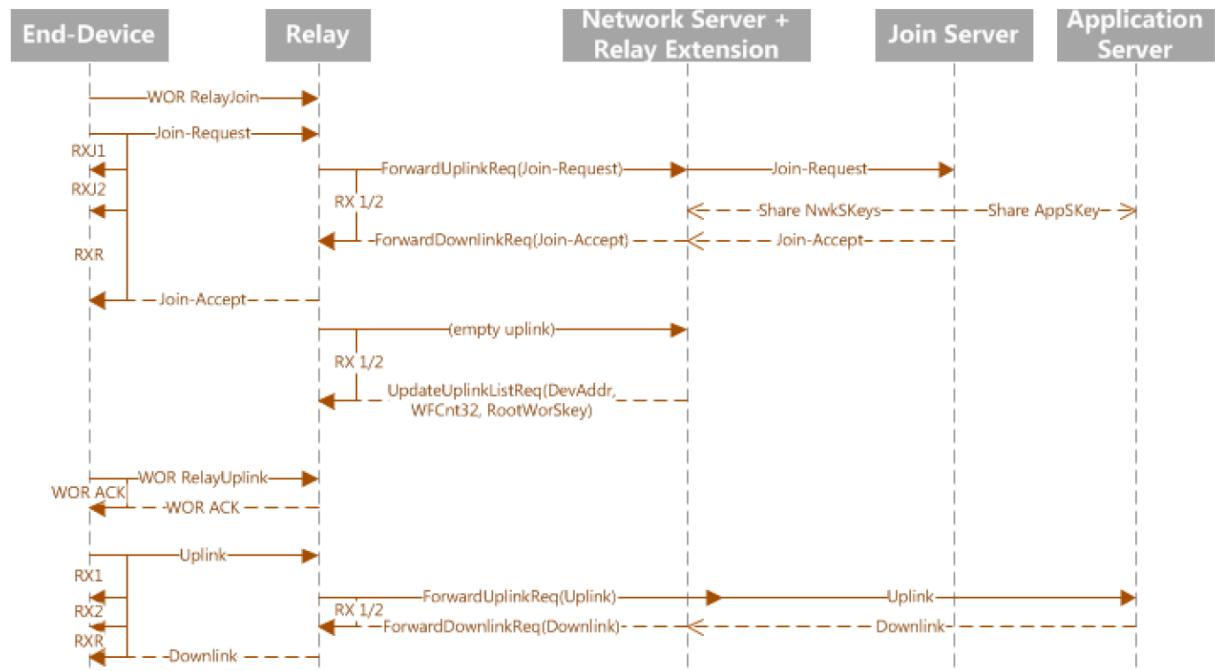
**Figura 28 – Fluxo resumido de troca de mensagens entre dispositivo final, relay e servidor de rede.**



Fonte: LoRa Alliance (2022b).

RaWAN. O segundo é o *WOR Uplink Class A*, enviado pelo dispositivo final quando deseja enviar um *uplink* para o servidor de aplicação. A Figura 29 mostra um exemplo de fluxo de mensagens em que o ingresso por OTAA é utilizado, enquanto a Figura 30 mostra o fluxo quando o dispositivo final já ingressou na rede (diretamente ou por outro *relay*) ou está usando ABP.

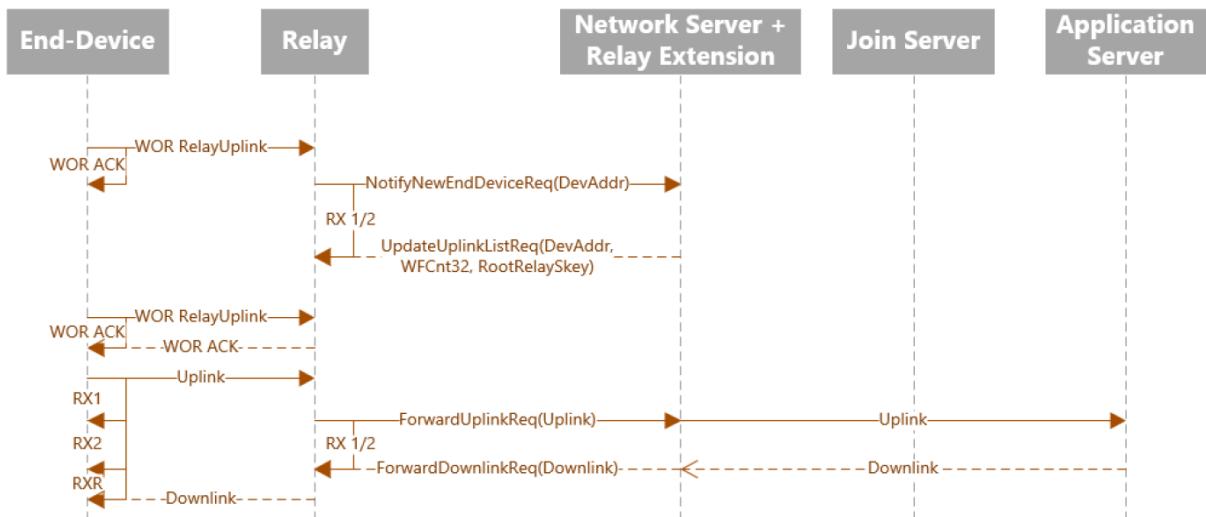
**Figura 29 – Fluxo de troca de mensagens entre dispositivo final, relay e servidor de rede usando OTAA.**



Fonte: LoRa Alliance (2022b).

Sobre os parâmetros físicos do CAD e do WOR, variam de acordo com o equipamento utilizado e normas regionais. Considerando o *chipset* Semtech SX1262, um dos que são compatíveis com CAD, os estudos publicados em (SEMTECH, 2019) mostram que o número de símbolos de preâmbulo que devem ser detectados pelo CAD para se decidir por atividade no

**Figura 30 – Fluxo de troca de mensagens entre dispositivo final, relay e servidor de rede em caso de reingresso ou ABP.**



**Fonte:** LoRa Alliance (2022b).

meio de comunicação são 2 ou 4, a depender das configurações de fator de espalhamento e largura de banda. Sobre os parâmetros de canal, o documento de parâmetros regionais da LoRa Alliance (LoRa Alliance, 2022a) define o canal padrão do WOR para o Brasil (que usa o canal AU915) na frequência de 916,7 MHz, e para o WOR ACK na frequência de 918,3 MHz. Já o canal secundário é definido nas frequências 919,9 MHz (WOR) e 921,5 (WOR ACK). A transmissão utiliza SF 10, com largura de banda de 500 kHz.

#### 4.2.4 Segurança

O *relay* e cada um dos dispositivos finais ligados a ele possuem identificadores únicos (DevEUI) e chaves raiz (AppKey) individuais. Essas chaves são usadas para derivar chaves de sessão, permitindo comunicação segura com o servidor de rede LoRaWAN e o servidor de aplicação associado ao dispositivo final. Como a carga útil dos dispositivos finais é encriptada pelas suas chaves de sessão, não há possibilidade do *relay* ter acesso à carga útil. Por outro lado, o *relay* também não será capaz de checar a integridade do quadro recebido, pois não tem acesso à chave de sessão de rede definida entre o dispositivo final e o servidor de rede (LoRa Alliance, 2022b).

Como as chaves de sessão são diferentes, não é possível utilizá-las para encriptar ou autenticar as mensagens WOR e WOR ACK, afinal não seria possível reverter o processo. Como solução para essa questão, a norma introduz uma nova chave raiz, *Root Relay Session Key* (RootRelaySKey, ou Chave Raiz de Sessão para Retransmissão). Essa chave é utilizada tanto pelo dispositivo final quanto pelo *relay* para derivar duas novas chaves de sessão, WorsIntKey e WosEncKey, usadas para encriptação e integridade dos quadros WOR,

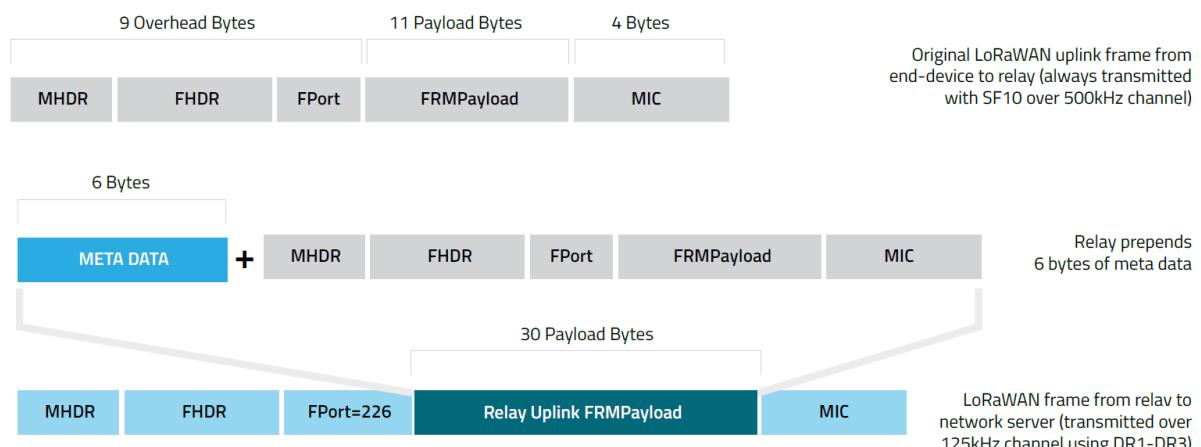
respectivamente. Depois que o dispositivo final receber o *Join-accept* do servidor de ingresso, ele poderá derivar *RootRelaySKey* a partir de sua chave de sessão de rede, *NwkSKey*. Já o *relay*, como não possui a chave de sessão de rede do dispositivo móvel, receberá uma cópia de *RootRelaySKey* diretamente do servidor de rede através de um comando MAC específico. Esse recebimento pode ser visto na mensagem *UpdateUplinkListReq* nas Figuras 29 e 30.

Ao receber quadros de *uplink* do dispositivo final direcionadas ao *gateway* (seja um *uplink* de aplicação/MAC ou um *Join-request*), o *relay* encaminhará para o servidor de rede. Os dados encaminhados fazem parte da carga útil de camada física (*PHYPayload*), ou seja, descartam-se apenas os cabeçalhos de camada física, sem alterar a estrutura dos dados da carga útil. Além da carga útil, o *relay* insere metadados sobre seu canal com o dispositivo final, totalizando 6 bytes, que incluem:

- RSSI do quadro recebido;
- SNR do quadro recebido;
- Frequência do canal utilizado;
- Taxa de dados (combinação de SF e largura de banda);
- Canal WOR utilizado.

Assim, o quadro de *uplink* original do dispositivo final é encapsulado na carga útil de um novo quadro LoRaWAN do *relay* para o servidor de rede, precedido pelos 6 bytes de sobrecarga de metadados. Além dessa carga útil, o novo quadro terá também novos cabeçalhos, de modo que o quadro enviado pelo *relay* será maior que o recebido. A Figura 31 ilustra esse processo.

**Figura 31 – Exemplo de encapsulamento de um quadro de *uplink* por parte do *relay*, considerando o padrão US915.**



**Fonte: Eijk (2023).**

**Tabela 1 – Combinações de SF, largura de banda e tamanho máximo de carga útil para *uplink*.**

Taxa de dados (DR)	SF	Largura de banda (kHz)	Carga útil máxima (bytes)
0	10	125	19
1	9	125	61
2	8	125	133
3	7	125	230
4	8	500	230

**Fonte:** Autoria própria (2023).

Assim, é necessário que a taxa de dados do *relay* em direção ao *gateway* seja maior que a taxa de dados entre *relay* e dispositivo móvel, e apenas algumas combinações de taxa nos dois *links* viabilizarão o processo de retransmissão. No caso mostrado na Figura 31, o uso de SF 10 e largura de banda de 500 kHz resulta em um total de 24 bytes. Com os 6 bytes de metadados, a carga útil mínima que deve ser suportada é de 30 bytes. De acordo com o documento de parâmetros regionais (LoRa Alliance, 2022a) para o modelo US915 (na norma, o nome é US902-928), a Tabela 1 apresenta as combinações de SF, largura de banda e tamanho máximo de carga útil para *uplink*<sup>1</sup>. Com base nesses dados, se o *relay* estiver usando SF 10 com largura de banda de 125 kHz, não será capaz de encaminhar os dados do dispositivo móvel.

Tanto a encriptação da carga útil transmitida pelo *relay* quanto o cálculo do código de integridade (MIC) desse novo quadro utilizarão a chave de sessão de rede do *relay*, NwkSKey. O quadro será enviado para uma porta específica, que indica o processo de retransmissão (FPORT 226) (LoRa Alliance, 2022b). No servidor de rede, a chave NwkSKey do *relay* será usada para que seja possível verificar a integridade do quadro e obter os metadados. O quadro encapsulado do dispositivo final, por outro lado, permanece encriptado pela chave de sessão desse dispositivo, e será encaminhado para o devido servidor de aplicação.

A manutenção de taxa de dados suficiente no *link relay* - servidor de rede é de responsabilidade do operador de rede, que deve providenciar boa instalação do *relay*, por exemplo (EIJK, 2023). Para auxiliar no processo, um dos campos presentes no quadro WOR ACK recebido pelo dispositivo final são informações sobre a taxa de dados (DR) que *relay* utilizará para o envio dos dados da carga útil para o servidor de rede - assim, o dispositivo final pode se adequar antes de enviar um quadro de *uplink*.

Para o envio de dados no sentido de *downlink*, o servidor de rede também utilizará a porta 226, e fará a encriptação e cálculo de integridade usando a chave de sessão de rede do *relay*. Não há menção se haverá algum outro processo de encriptação da carga útil, pois caso contrário o *relay* poderá ler os dados de aplicação do *downlink*. A norma define que a porção de dados a ser transmitida do *relay* para o dispositivo final em *downlink* é o PHYPayload, similar ao que acontece no *uplink*, e que a taxa de dados entre dispositivo final e servidor de

<sup>1</sup> As combinações DR5 e DR6 não usam modulação LoRa, e foram omitidas para simplificar a tabela. De acordo com o requisito de carga útil, poderiam ser usadas.

rede será o mínimo entre as taxas do servidor para o *relay* e do *relay* para o dispositivo final (LoRa Alliance, 2022b).

#### 4.2.5 Controle de utilização do *relay*

Para evitar que o *relay* utilize muita energia e sobrecarregue a rede, a norma define um sistema de limitação de encaminhamento em *uplink*. O sistema é baseado em uma quantidade de requisições que podem ser atendidas e quantas novas requisições são disponibilizadas a cada hora pelo *relay*, até se chegar ao tamanho máximo de requisições disponíveis, definido em configuração. As requisições que fazem parte da limitação são:

1. *Join-request*, com valores-padrão de 8 requisições disponíveis no máximo e 4 adicionadas por hora;
2. Detecção de novos dispositivos (por exemplo, usando ABP), com valores-padrão de 8 requisições disponíveis no máximo e 4 adicionadas por hora;
3. *Uplinks* de um determinado dispositivo reconhecido, sem um limite configurado, mas sujeito ao limite global;
4. *Uplinks* de todos os dispositivos reconhecidos, com valores-padrão de 16 requisições disponíveis no máximo e 8 adicionadas por hora;
5. *Uplinks* em geral, com valores-padrão de 16 requisições disponíveis no máximo e 8 adicionadas por hora;

Caso o número disponível máximo tenha sido atingido, e uma nova adição esteja disponível, a adição será descartada. Um *Join-request* gasta uma unidade do primeiro e último itens, o *uplink* de um dispositivo conhecido gasta uma unidade do terceiro, quarto e quinto itens, enquanto um *uplink* de dispositivo desconhecido gasta uma unidade do segundo e quinto itens. Caso algum dos grupos chegue em 0, a requisição não será atendida.

É possível configurar o sistema para ignorar os limites (tornando a adição “ilimitada”) ou personalizar os valores. Para dispositivos alimentados por bateria, o uso dos limites se torna uma tática interessante. Por fim, é possível fazer filtragem das requisições de *Join-request*.

### 4.3 Relações entre os trabalhos acadêmicos e a norma

Após uma análise dos estudos da literatura, essa seção visa identificar e discutir os principais pontos de convergência, divergência e lacunas em relação às diretrizes estabelecidas pela norma de *relay* LoRaWAN (LoRa Alliance, 2022b). Esse comparativo permite uma visão abrangente das abordagens adotadas pelos estudos em comparação com os parâmetros, mé-

tricas e recomendações delineadas pela norma, no que se refere à implementação e operação de um retransmissor LoRaWAN.

A maior parte dos estudos, assim como a norma, citam como motivação principal do uso de repetidores o alto custo e a inviabilidade, em muitas das vezes, da instalação de novos *gateways* para alcançar dispositivos finais isolados na rede LoRaWAN. A norma oferece a possibilidade de criação de extensores de rede LoRaWAN de baixo custo e alimentados por bateria. Entretanto, observou-se que a consideração sobre o uso de baterias é notavelmente ausente na maioria dos estudos e seus experimentos, exceto em Lic *et al.* (2022). Esse aspecto pode representar uma dependência significativa de infraestrutura elétrica para o funcionamento dos repetidores propostos pelos estudos, embora o trabalho de Maziero *et al.* (2018) tenha indicado um consumo médio de 70mA, o que sugere viabilizar o uso de bateria ou painéis fotovoltaicos, embora não tenham sido empregados nos testes realizados. A norma considera *relays* que possuam rádio com a função CAD, e isso pode ser o diferencial para a economia de energia e a viabilização do uso de bateria, ainda mais pelo fato do *relay* executar essa função somente de 3ms a 6ms a cada segundo, em busca de atividade no meio de comunicação.

Ao abordar os custos, alguns trabalhos propuseram repetidores com baixo custo e valores acessíveis, como Maziero *et al.* (2018) e Magro *et al.* (2022), com média de custo em torno de R\$ 100 (estimando os custos a partir de fontes atuais). Por outro lado, foram identificados estudos que apresentaram custos substanciais, como o de Sisinni *et al.* (2020) (aproximadamente US\$ 1150) e Lumet *et al.* (2021)(aproximadamente R\$ 1800). Apesar do custo elevado, o trabalho de Sisinni *et al.* (2020) conta com uma implementação menos comum, atingindo taxa de dados mais elevadas e o uso de componentes menos convencionais com um caráter industrial. A norma especifica que os rádios das famílias SX126X e LR11XX da Semtech são compatíveis com a função de *relay*, sendo o rádio SX1262, por exemplo, de baixo custo, com preço em torno de US\$ 7,99 (DigiKey, 2023b).

Uma discrepância foi observada em relação à capacidade de suporte para *uplink* e *downlink*. Enquanto a norma especifica que o *relay* deve ter suporte aos dois sentidos de transmissão e apresenta como solução para *downlink* a criação da janela RXR, três dos cinco estudos analisados focaram exclusivamente em retransmissões no sentido *uplink*, não explorando o *downlink*. A atenção ao *downlink* foi evidenciada somente nos estudos de (SISINNI *et al.*, 2020) e (MAGRO *et al.*, 2022). Contudo, o trabalho de (SISINNI *et al.*, 2020) é considerado complexo e caro, enquanto o de Magro *et al.* (2022) até obteve resultados notáveis para *downlink*, mas somente ao utilizar dois repetidores em sequência ou dois repetidores em paralelo, com cada um tratando de um sentido de transmissão separadamente. Com uma terceira janela, se facilita também a operação da ativação por OTAA, que é mais recomendada que a ativação por ABP.

Além disso, a maioria dos trabalhos apresenta retransmissores transparentes, ao passo que a norma estabelece que o *relay* não deve ser transparente. O uso de *relays* não transparentes visa o estabelecimento da janela extra para o dispositivo final, RXR, redução de consumo energético de *relays* e dispositivos finais com as mensagens WOR e a funcionalidade CAD e

até mesmo a encriptação do *link* dos dispositivos com o *relay* para troca das mensagens WOR. Essa diferença pode explicar por que nenhum trabalho realizou uma abordagem em que o dispositivo final estabelece uma pré-comunicação com o *relay* antes da transmissão dos pacotes de dados, a fim dos dispositivos (*relay* e dispositivo final) se sincronizarem e obterem dados um do outro, facilitando a configuração dos parâmetros de transmissão do dispositivo final e, consequentemente, a retransmissão. Esse tipo de procedimento está alinhado com o conceito de *Wake-On-Radio*, conforme especificado na norma da LoRa Alliance®.

Outro ponto relevante é que alguns trabalhos só alcançaram resultados satisfatórios em suas métricas quando utilizaram fatores de espalhamento menores, como SF7 e SF8. Por exemplo, o estudo de Lic *et al.* (2022) considerou inicialmente o uso do SF12, mas nos testes de laboratório, este se mostrou problemático, apresentando o dobro de consumo de energia em comparação a SF7 e SF9, que mostraram consumos de energéticos muito semelhantes. A norma estabelece o uso de SF10 para a comunicação entre *relay* e dispositivo final, ao menos nas mensagens WOR, o que se alinha às investigações de sensibilidade e consumo de energia. A importância da análise feita em Lic *et al.* (2022) pode ser vista também na otimização do parâmetro de número de símbolos de preâmbulo detectados na fase CAD, conduzidos pela Semtech em Semtech (2019).

No estudo de Lic *et al.* (2022) é considerado um intervalo de 1 segundo entre ativações do modo de transmissão do *relay*, que dura pouco tempo, semelhante à norma. Porém, o estudo difere ao não apresentar um modo de otimizar o consumo de energia do dispositivo móvel após estabelecer comunicação com o *relay*, que é a sincronização proposta pela norma com as mensagens WOR e WOR ACK. Sem esse mecanismo, todas as vezes o dispositivo final precisará usar um preâmbulo longo para não correr o risco de transmitir no período em que o retransmissor não está escutando.

É interessante observar que nenhum dos estudos revisados explorou ou explicou a questão da segurança dos pacotes a serem retransmitidos em seus experimentos. O trabalho de Magro (2022) até realiza explicações de conceitos de segurança LoRaWAN em sua revisão bibliográfica, mas não faz menção de como o dispositivo implementado em seu trabalho trata dessa questão. Em Lumet *et al.* (2021), comenta-se que o dispositivo não possui bibliotecas para o processo de decriptação, e não fica claro se é utilizado retransmissão em nível LoRa ou LoRaWAN. Contrariamente, a norma estabelecida pela LoRa Alliance® especifica os protocolos e mecanismos de segurança a serem implementados no *relay* para proteger a integridade, autenticidade e confidencialidade dos dados transmitidos, inclusive criando novas chaves para o *link* entre o dispositivo final e o *relay*.

Por outro lado, um aspecto que é apenas mencionado na norma, mas estudado em Lumet *et al.* (2021), é o posicionamento dos retransmissores. Nesse estudo, foi considerada uma métrica equivalente a perda de pacotes para escolher os pontos de instalação. Já pensando na norma, como um bom *link* entre *relay* e *gateway* é fundamental para a taxa de dados, especialmente no *uplink* por conta do encapsulamento de quadro, um balanceamento entre a

proximidade com os dispositivos com maior perda e a distância (e obstáculos) até o *gateway* pode ser uma estratégia mais indicada.

## 5 CONCLUSÃO

A análise dos estudos acadêmicos revelou um ganho promissor de qualidade nas comunicações LoRaWAN em diversos aspectos com o uso de estações retransmissoras, demonstrando a eficácia do retransmissor. Os estudos, ao explorarem os potenciais benefícios e aplicações da tecnologia de *relay*, já indicavam a relevância deste componente para aprimorar a cobertura e a capacidade de redes LoRaWAN.

A concretização dessa relevância foi observada pela formalização da norma de *relay* LoRaWAN pela LoRa Alliance®. A existência da norma, estabelecida por uma entidade padronizadora, não só valida os achados e a importância destacada nos trabalhos da literatura, mas também evidencia a relevância deste dispositivo a tal ponto que o próprio órgão padronizador reconheceu a sua necessidade e destinou tempo e recursos financeiros para criar sua especificação oficial.

Ao consolidar diretrizes para a implementação e operação do retransmissor LoRaWAN, a LoRa Alliance® não só valida a importância dos estudos precedentes, mas também estabelece um ponto de referência para todos que utilizam estas redes, orientando futuras inovações e impulsionando o progresso contínuo neste campo em rápida evolução.

Dessa forma, este trabalho não apenas destaca a importância de um retransmissor para o aumento de cobertura em redes LoRaWAN, mas também contribui com informações e análises de estudos anteriormente realizados sobre o assunto, descrição e revisão da mais recente especificação de *relays* LoRaWAN da LoRa Alliance®, comparando métricas e técnicas que foram utilizadas, e podendo servir como um ponto de partida a quem queira realizar a implementação de um retransmissor LoRaWAN.

### 5.1 Trabalhos futuros

Considerando a amplitude do campo de estudo abordado neste trabalho, existem várias áreas que poderiam ser exploradas para futuras investigações e aprimoramentos. Uma oportunidade é a implementação de um protótipo de uma rede com retransmissores LoRaWAN, seguindo as diretrizes destacadas da norma da LoRa Alliance®. Isso permitiria validar os ganhos esperados e verificar o desempenho real em diferentes cenários de aplicação.

Além disso, uma análise mais aprofundada dos parâmetros configuráveis nos retransmissores, como taxa de dados e quantidade de requisições que podem ser atendidas a cada momento, pode fornecer percepções cruciais sobre como otimizar o desempenho da rede LoRaWAN. Outro ponto relevante é explorar o posicionamento ideal e a quantidade de *relays* em diferentes topologias para otimizar a cobertura, eficiência e qualidade do serviço. Investigar como o número e disposição dos retransmissores afetam a comunicação pode fornecer orientações práticas para implementações reais.

Comparar dispositivos prontos para retransmissão LoRaWAN com dispositivos comuns adaptados para essa função pode oferecer uma compreensão mais ampla das vantagens e desvantagens de ambas as abordagens. Essa comparação pode incluir aspectos como custo, desempenho e complexidade de implementação, proporcionando observações valiosas para futuras decisões de design e implementação. Por fim, a utilização de ferramentas de simulação, como por exemplo NS-3, representa uma oportunidade para avaliar o desempenho da rede LoRaWAN em diferentes cenários sem a necessidade da implementação física. Tais simulações podem permitir análises detalhadas de diversos parâmetros e configurações, oferecendo uma perspectiva valiosa para planejar e otimizar as operações da rede.

Assim, explorando essas áreas de pesquisa, pode-se contribuir significativamente para avançar o conhecimento sobre o uso de retransmissores LoRaWAN, além de oferecer orientações práticas e estratégicas para implementações futuras, bem como aprimorar a eficiência e qualidade de redes LoRaWAN já existentes.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, L. M. S. **O ABC do LoRa**. 2019. Disponível em: <https://jualabs.wordpress.com/2019/05/27/o-abc-do-lora/>. Acesso em: 3 de jun. de 2023.
- ASLAM, M. S. *et al.* Exploring multi-hop lora for green smart cities. **IEEE Network**, v. 34, n. 2, p. 225–231, 2020.
- CAMARGO, E. T. d.; SPANHOL, F. A.; CASTRO E SOUZA, A. R. Deployment of a LoRaWAN network and evaluation of tracking devices in the context of smart cities. **International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology**, p. 1–24, 2021.
- CanaKit. **Raspberry Pi 2 Model B**. 2023. <https://www.canakit.com/raspberry-pi-2.html?cid=usd&src=raspberrypi>. Acesso em: 09 dez. 2023.
- CENTENARO, M. *et al.* Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. **IEEE Wireless Communications**, v. 23, n. 5, p. 60–67, 2016.
- CHAMPION, L.; SORNIN, N. **Chirp Signal Processor**. European Patent 2 975 814 B1, Sep. 2014.
- CHOI, R.; LEE, S.; LEE, S. Reliability improvement of LoRa with ARQ and relay node. **Symmetry**, v. 12, n. 4, 2020. ISSN 2073-8994. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/4/552>.
- COTRIM, J. R.; KLEINSCHMIDT, J. H. LoRaWAN mesh networks: A review and classification of multihop communication. **Sensors**, v. 20, n. 15, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/15/4273>.
- DigiKey. **RG186-M2**. 2023. <https://www.digikey.com.br/en/products/detail/RG186-M2/776-RG186-M2-ND/16682362>. Acesso em: 09 dez. 2023.
- DigiKey. **SX1262IMLRT Semtech**. 2023. <https://www.digikey.com.br/en/products/detail/semtech-corporation/SX1262IMLRT/8564369>. Acesso em: 09 dez. 2023.
- DIOP, M.; PHAM, C. Increased flexibility in long-range IoT deployments with transparent and light-weight 2-hop LoRa approach. In: **2019 Wireless Days (WD)**. Manchester, Reino Unido: IEEE, 2019. p. 1–6.
- DOHLER, M.; LI, Y. **Cooperative Communications: Hardware, Channel & PHY**. West Sussex, Reino Unido: Wiley, 2010.
- EIJK, P. van. **LoRa Basics Modem Relay: A Low-Cost Battery Powered Network Extender**. Publicado online, 2023.
- FOROUZAN, B. A. **Comunicação de dados e redes de computadores**. 4. ed. São Paulo, SP: McGraw-Hill, 2008.
- HASAN, M. **State of IoT 2022: Number of connected IoT devices growing 18% to 14.4 billion globally**. 2022. IoT Analytics. Disponível em: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>. Acesso em: 7 dez. 2022.
- HAYKIN, S.; MOHER, M. **Sistemas Modernos de Comunicações Wireless**. Porto Alegre, RS: Bookman, 2008. ISBN 9788560031993.

- HERNANDEZ, D. M. *et al.* Energy and coverage study of LPWAN schemes for industry 4.0. In: **2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)**. Donostia, San Sebastian, Espanha: IEEE, 2017. p. 1–6.
- KHIRALLAH, C.; THOMPSON, J.; RASHVAND, H. Energy and cost impacts of relay and femtocell deployments in long-term-evolution advanced. **IET Communications**, Institution of Engineering and Technology, v. 5, p. 2617–2628(11), dez. 2011. ISSN 1751-8628.
- LIC, T. V. *et al.* Energy versus communication range trade-off in a LoRaWAN relay approach. In: **2022 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA)**. Guangzhou, China: IEEE, 2022. p. 1–3.
- LoRa Alliance. **LoRaWAN™ What is it? A technical overview of LoRa™and LoRaWAN™**. San Ramon, California, EUA, 2015. 20 p. Disponível em: [https://lora-alliance.org/resource\\_hub/what-is-lorawan/](https://lora-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan/).
- LoRa Alliance. **LoRaWAN™ Specification 1.1**. Beaverton, Oregon, EUA, 2017. 101 p. Disponível em: [https://lora-alliance.org/resource\\_hub/lorawan-specification-v1-1/](https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-1/).
- LoRa Alliance. **LoRaWAN™ Backend Interfaces 1.0 Specification**. Beaverton, Oregon, EUA, 2017. 75 p. Disponível em: [https://lora-alliance.org/resource\\_hub/lorawan-back-end-interfaces-v1-0/](https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-back-end-interfaces-v1-0/).
- LoRa Alliance. **LoRaWAN™ 1.0.3 Specification**. Beaverton, Oregon, EUA, 2018.
- LoRa Alliance. **LoRaWAN™ L2 1.0.4 specification**. Fremont, California, EUA, 2020. 90 p. Disponível em: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification>.
- LoRa Alliance. **RP002-1.0.3 LoRaWAN™ Regional Parameters**. Fremont, California, EUA, 2021. 94 p. Disponível em: [https://lora-alliance.org/resource\\_hub/rp2-1-0-3-lorawan-regional-parameters/](https://lora-alliance.org/resource_hub/rp2-1-0-3-lorawan-regional-parameters/).
- LoRa Alliance. **LoRaWAN™ Regional Parameters RP002-1.0.4**. Freemont, Califórnia, EUA, 2022.
- LoRa Alliance. **LoRaWAN™ Relay Specification TS011-1.0.0**. Freemont, Califórnia, EUA, 2022.
- LUMET, E. *et al.* Lorawan relaying: Push the cell boundaries. **Proceeding of the 24th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM '21)**, 2021.
- MAGRO, S. Z. *et al.* Dispositivo para retransmissão de mensagens LoRaWAN. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, v. 14, n. 2, p. 47–55, jul. 2022. Disponível em: <http://seer.upf.br/index.php/rbca/article/view/13368>.
- MAGRO, S. Z. D. **Repetidor para redes LoRaWAN com ênfase na agricultura**. 2022. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2022.
- MAZIERO, L. **Projeto de um nó LoRaWAN híbrido com repetidor embutido de baixo custo e baixo consumo de energia**. 2020. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020.
- MAZIERO, L. *et al.* Projeto de um repetidor lorawan de baixo custo e baixo consumo de energia. In: **Anais SEPOC 2018**. Santa Maria, RS, Brasil: UFSM, 2018.

Mercado Livre. **Industrial IoT Gateway IoT2040 Siemens**. 2023. [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2608211287-6es7-647-0aa00-1ya2-industrial-iot-gateway-iot2040-siemens-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2608211287-6es7-647-0aa00-1ya2-industrial-iot-gateway-iot2040-siemens-_JM). Acesso em: 09 dez. 2023.

MIKHAYLOV, K.; PETAEJAEJAERVI, J.; HAENNINEN, T. Analysis of capacity and scalability of the LoRa low power wide area network technology. In: **European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference**. Oulu, Finlândia: IEEE, 2016. p. 1–6.

PUTERA, C. A. L.; LIN, F. J. Incorporating OMA lightweight M2M protocol in IoT/M2M standard architecture. In: **2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)**. Milão, Itália: IEEE, 2015. p. 559–564.

RoboCore. **BlackBoard Pro Mini - 5V/16MHz**. 2023. <https://www.robocore.net/placa-arduino-arduino-blackboard-pro-mini-5v-16mhz>. Acesso em: 09 dez. 2023.

RoboCore. **Placa Nano V3 + Cabo USB para Arduino**. 2023. <https://www.robocore.net/placa-arduino/placa-nano-v3-com-cabo-usb-para-arduino>. Acesso em: 09 dez. 2023.

RoboCore. **Raspberry Pi 3 - Model B+ Anatel**. 2023. <https://www.robocore.net/placa-arduino/placa-nano-v3-com-cabo-usb-para-arduino>. Acesso em: 09 dez. 2023.

ROSSATO, J. **Implantação e avaliação de uma rede LoRaWAN na UTFPR - Câmpus Toledo**. 2019. 75 p. Monografia (Tecnólogo em Sistemas para Internet), UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), Toledo, Brasil.

SELLER, O. **Predicting LoRaWAN Capacity**. Camarillo, California, EUA, 2020. Disponível em: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/predicting-lorawan-capacity>. Acesso em: 01 jun. 2023.

SEMTECH. **Application Note: SX126x CAD Performance Evaluation**. Camarillo, Califórnia, EUA, 2019.

SEMTECH CORPORATION. **AN1200.22: LoRa™ modulation basics**. Camarillo, California, Estados Unidos, 2015. 26 p.

SEMTECH CORPORATION. **LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview**. Camarillo, California, EUA, 2019. Disponível em: [https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa\\_and\\_LoRaWAN-A\\_Tech\\_Overview-Downloadable.pdf](https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf). Acesso em: 15 mar. 2023.

SILVA, M. d. et al. Avaliação de dispositivos de rastreamento em uma rede LoRaWAN no contexto de cidades inteligentes. In: **Anais do IV Workshop de Computação Urbana**. Porto Alegre, Brasil: SBC, 2020. p. 1–14. ISSN 2595-2706. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/courb/article/view/12349>.

SISINNI, E. et al. Enhanced flexible LoRaWAN node for industrial IoT. In: **2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)**. Imperia, Itália: IEEE, 2018. p. 1–4.

SISINNI, E. et al. LoRaWAN range extender for industrial IoT. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 16, n. 8, p. 5607–5616, 2020.

SmartCore. **Módulo Pycom LoPy4**. 2023. <https://loja.smartcore.com.br/modulo-pycom-lopy4-integra-lora-sigfox-wifi-e-bluetooth-no-mesmo-item>. Acesso em: 09 dez. 2023.

- SOUZA, A. R. Castro e. **EFICIÊNCIAS ENERGÉTICA E ESPECTRAL EM REDES SEM FIO MACRO-CELULARES: CARACTERIZAÇÃO, OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE COMPROMISSO.** 2013. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2013.
- SOUZA, A. R. Castro e. **Eficiência energética e espectral em sistemas de comunicação sem fio: diversidade cooperativa, espacial e em frequência.** maio 2018. 222 p. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, maio 2018.
- SOUZA, A. R. Castro e; AMAZONAS, J. R. de A.; ABRÃO, T. Energy-efficiency maximisation for cooperative and non-cooperative OFDMA cellular networks—a survey. **Transactions on Emerging Telecommunications Technologies**, v. 27, n. 2, p. 216–248, 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ett.2850>.
- STANIEC, K.; KOWAL, M.; PEPPAS, K. Lora performance under variable interference and heavy-multipath conditions. **Wirel. Commun. Mob. Comput.**, John Wiley and Sons Ltd., GBR, v. 2018, jan 2018. ISSN 1530-8669. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/6931083>.
- STANKOVIC, J. A. Research directions for the internet of things. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 1, n. 1, p. 3–9, 2014.
- TANJUNG, D. *et al.* OODC: An opportunistic and on-demand forwarding mechanism for LPWA networks. In: **2020 International Conference on Information Networking (ICOIN)**. Barcelona, Espanha: IEEE, 2020. p. 301–306.
- UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **ACORDO DE COOPERAÇÃO TÉCNICA Nº 001/2020**. 2020. Disponível no processo SEI 23064.000768/2020-96.
- UsinalInfo. **Módulo LoRa 915Mhz SX1276 RF Wireless + Antena**. 2023. <https://www.usinainfo.com.br/lora/modulo-lora-915mhz-sx1276-rf-wireless-antena-5666.html>. Acesso em: 09 dez. 2023.
- WERNER, M. *et al.* Cost assessment and optimization methods for multi-node radio access networks. In: **VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference**. Marina Bay, Singapura: IEEE, 2008. p. 2601–2605.
- WERNER, T. **Uso da tecnologia LoRaWAN para o monitoramento de dados ambientais**. 2018. 62 p. Monografia (Engenheiro de Telecomunicações), IFSC (Instituto Federal de Santa Catarina), São José, Brasil.
- ZHOU, W. *et al.* LoRa-hybrid: A LoRaWAN based multihop solution for regional microgrid. In: **2019 IEEE 4th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)**. Singapura: IEEE, 2019. p. 650–654.