

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO LUÍS VERDEGAY DE BARROS

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES SEM FIO DE
BAIXO CONSUMO ENERGÉTICO POR MEIO DE
SIMULADORES DE EVENTOS DISCRETOS**

CURITIBA

2023

JOÃO LUÍS VERDEGAY DE BARROS

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES SEM FIO DE BAIXO
CONSUMO ENERGÉTICO POR MEIO DE SIMULADORES DE
EVENTOS DISCRETOS**

**Performance Analysis of Low Power Wireless Networks Using Discrete
Events Simulators**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de “Mestre em Engenharia
Elétrica” do Programa de Pós-Graduação em
Sistemas de Energia da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná.

Orientador: Guilherme de Santi Peron

Coorientador: Marcos Eduardo Pivaro Monteiro

**CURITIBA
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.



JOAO LUIS VERDEGAY DE BARROS

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES SEM FIO DE BAIXO CONSUMO ENERGÉTICO POR MEIO DE
SIMULADORES DE EVENTOS DISCRETOS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Automação E Sistemas De Energia.

Data de aprovação: 07 de Julho de 2023

Dr. Guilherme De Santi Peron, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Marcelo Eduardo Pellenz, Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Pucpr)

Dr. Ohara Kerusauskas Rayel, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 07/07/2023.

Dedico este projeto de pesquisa à Deus, provedor de todo conhecimento, oportunidades e Senhor da minha vida, bem como aos meus filhos Ane e João António, cuja a existência é inspiração para tudo.

AGRADECIMENTOS

Nesses anos de estudo algumas pessoas foram fundamentais para a conclusão desse trabalho. Dentre elas todos professores do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia (PPGSE), com ênfase aos Professores Guilherme Moritz e Ohara Kerusauskas Rayel por sua dedicação e leveza na condução de suas aulas. Em especial gostaria de agradecer ao meus orientadores Guilherme de Santi Peron e Marcos Eduardo Pivaro Monteiro por muitas vezes me orientarem em seus momentos de descanso, por todo suporte para superar limites que eu acreditava ter, por seu profissionalismo, companheirismo e por sua amizade, o que tornou esta experiência além de enriquecedora em conhecimento, estimulante e por muitas vezes divertida. Agradeço também a minha esposa Adriana e meus filhos Ane e João pela compreensão de que foi preciso por muitas vezes sacrificar convívio, passeios, planos e tudo mais para que eu pudesse dedicar tempo à esta pesquisa. Também quero agradecer aos meus amigos de longa data os professores da Universidade Federal Tecnológica do Paraná (UTFPR), o professor Dr. Flávio de Almeida e Silva e o professor Dr. Francisco Antônio Fernandes Reinaldo, pela motivação em relação a área acadêmica. Por fim gostaria também de agradecer aos amigos e companheiros de trabalho André Makowski e Rodrigo Biermayr, assim como agradecer a minha sobrinha e colega de profissão e Giovana Casatte, por seu incentivo e apoio.

“Onde o mundo deixa de ser palco de nossas esperanças e desejos pessoais, onde o enfrentamos como seres livres admirando, perguntando, observando, aí entramos no reino da arte e da ciência.”(Albert Einstein).

RESUMO

BARROS, João. **Análise de Desempenho de Redes Sem Fio de Baixo Consumo Energético Por Meio de Simuladores de Eventos Discretos**. 2023. 63 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Energia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

A Internet das Coisas (IoT) tem sido um tema de grande relevância tanto no meio acadêmico quanto na indústria. As possibilidades de aplicação são amplas, abrangendo áreas como cidades inteligentes, automação residencial, edifícios inteligentes, agricultura, medição automatizada, logística, automação industrial. Essa diversidade de aplicações resultou no desenvolvimento de diversas soluções tecnológicas, especialmente para viabilizar comunicações Máquina-a-Máquina (M2M), com destaque para as redes de longa distância. Nesse contexto, dois protocolos amplamente utilizados para comunicações de baixa potência e ampla área de cobertura (LPWA) são o LoRaWAN, do inglês *Long Range Wide Area Network*, e o 6TiSCH. Ao passo que LoRaWAN utiliza a camada física definida pelo LoRa, o 6TiSCH baseia-se no IEEE 802.15.4e que introduz o modo TSCH, do inglês *Time-Slotted Channel Hopping*, como um novo modo de operação da camada MAC junto do IEEE 802.15.4g que também possui definições das camadas MAC e física (PHY). Enquanto o LoRaWAN é um protocolo bem conhecido e difundido, o 6TiSCH oferece conectividade IPv6 para LPWAN e é utilizado em padrões importantes, como o Wireless Smart Ubiquitous Network (Wi-SUN). O objetivo deste trabalho é avaliar a escalabilidade de cada protocolo, considerando diferentes aspectos, como a taxa de perda de pacotes (PER), o atraso e o número máximo de nós por área quadrada. Ainda, para o 6TiSCH são avaliadas as perdas de pacote causadas pelas falhas na transmissão mais comuns, como fila cheia e limite de retransmissões. Para alcançar tais resultados, foram realizadas simulações computacionais utilizando simuladores de código aberto. Os resultados obtidos demonstram que a melhor escalabilidade depende dos cenários considerados. Nos cenários com múltiplos *gateways* que exigem baixa latência ou baixas taxas de transmissão de pacotes, o LoRaWAN apresenta melhores resultados. No entanto, em cenários com altas taxas de transmissão de pacotes e onde a latência não é uma preocupação significativa, o 6TiSCH é mais adequado. Além disso, mesmo no melhor caso, a latência associada à tecnologia LoRaWAN pode ser consideravelmente menor do que a associada ao 6TiSCH. Por fim, especificamente para o 6TiSCH, observa-se que o aumento no número máximo de retransmissões exerce uma influência significativamente maior na escalabilidade do sistema em comparação com o aumento do tamanho da fila de transmissão, o qual também acarreta um maior consumo de memória nos dispositivos.

Palavras-chave: 6TiSCH; 6LoWPAN; LoRaWAN; Baixa Potência em área ampla.

(X) Não autorizo a disponibilização de endereço de correio eletrônico para contato.

(✓) Autorizo a disponibilização do seguinte correio eletrônico para contato: barros.joao.luis@gmail.com

ABSTRACT

BARROS, João. **Performance Analysis of Low Power Wireless Networks Using Discrete Events Simulators**. 2023. 63 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Energia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2023. Título original: Análise de Desempenho de Redes Sem Fio de Baixo Consumo Energético Por Meio de Simuladores de Eventos Discretos

The Internet of Things (IoT) has been a highly relevant topic in both academia and industry in recent years. There are many possible applications, in fields as smart cities, home automation, smart buildings, agriculture, automated metering, logistic, industrial automation. Such a wide range of applications has led to the development of various technological solutions, particularly to enable Machine-to-Machine (M2M) communications, which we highlight those for wide area networks. In that sense, two widely used protocols for Low-Power Wide-Area Networks(LPWAN) communications are: Long Range Wide Area Network (LoRaWAN), and 6TiSCH. LoRaWAN uses the physical layer defined by LoRa, whereas 6TiSCH is based on IEEE 802.15.4e which introduces TSCH (Time-Slotted Channel Hopping) mode as a new operating mode of the MAC layer alongside IEEE 802.15.4g which also has MAC and physical (PHY) layer definitions. While LoRaWAN is a well-known and widespread protocol, 6TiSCH offers IPv6 connectivity for LPWAN and it is used in important standards such as Wireless Smart Ubiquitous Network (Wi-SUN). The objective of this study is to assess the scalability of each protocol, considering various aspects such as packet loss rate (PER), delay, and the maximum number of nodes per square area. Additionally, for 6TiSCH, we evaluate packet losses caused by common transmission failures, such as full queues and the limit of additional transmission attempts. To achieve these results, computer simulations were conducted using open-source simulators. The obtained results demonstrate that the best scalability depends on which scenarios are considered. In scenarios with multiple gateways requiring low latency or low packet transmission rates, LoRaWAN shows better results. However, in scenarios with high packet transmission rates and where latency is not a significant concern, 6TiSCH is more suitable. Furthermore, even in the best case, the latency associated with LoRaWAN technology can be considerably lower than that associated with 6TiSCH. Moreover, specifically regarding 6TiSCH, we observe that the increase in the maximum number of transmission attempts has a significantly greater impact on the system scalability compared to an increase in the transmission queue size, leading to higher memory consumption in the devices.

Keywords: 6TiSCH; 6LoWPAN; LoRaWAN; Low-Power Wide-Area.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | – Aplicações de IoT | 15 |
| Figura 2 | – Fluxo de tempo do TSCH | 20 |
| Figura 3 | – <i>Slotframe</i> estrutura cíclica com $\mathcal{T} = 6$ e $\mathcal{C} = 8$ repetido 3 vezes no tempo. | 21 |
| Figura 4 | – Exemplo de modelo de sistema para \mathcal{N} e $\beta \in \{1, 2, 4\}$ | 29 |
| Figura 5 | – PER em função de \mathcal{N} para os protocolos LoRaWAN e 6TiSCH para $\mathcal{R} = 2$ e $\beta = 1$ | 39 |
| Figura 6 | – PER em função dos pacotes por minuto (N/t) para os protocolos LoRaWAN e 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km and $\beta = 1$ | 40 |
| Figura 7 | – PER em função de \mathcal{N} para os protocolos LoRaWAN e 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e diferentes valores de \mathcal{R} e β | 42 |
| Figura 8 | – PER em função de \mathcal{N} para os protocolos LoRaWAN e 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e $\mathcal{R} = 2$ e diferentes valores de \mathcal{Q} e β | 43 |
| Figura 9 | – PER em função de \mathcal{N} os protocolos LoRaWAN e 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km, $\mathcal{R} = 2$, e $\beta = 2$, assumindo $\mathcal{C} \in \{8, 16, 64\}$ para LoRaWAN e $\mathcal{C} \in \{8, 16, 50\}$ para 6TiSCH | 44 |
| Figura 10 | – CDF em função da PER para os protocolos LoRaWAN e 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km, $\mathcal{R} = 2$, $\mathcal{C} = 8$, $\beta = 2$, e $\mathcal{N} \in \{100, 300, 600\}$ | 45 |
| Figura 11 | – Latência em função de \mathcal{N} para diferentes valores de \mathcal{R} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km | 47 |
| Figura 12 | – PER em função da latência para diferentes valores de \mathcal{R} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km | 48 |
| Figura 13 | – PER em função de \mathcal{N} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e $\mathcal{R} = 2$ e diferentes valores de \mathcal{Q} | 50 |
| Figura 14 | – PER em função de \mathcal{N} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e $\mathcal{R} = 200$ e diferentes valores de \mathcal{Q} | 51 |
| Figura 15 | – PER causada por excesso no número de retransmissões em função de \mathcal{N} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e $\mathcal{R} = 2$ e diferentes valores de \mathcal{Q} e \mathcal{T} | 52 |
| Figura 16 | – PER causada por fila cheia em função de \mathcal{N} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e $\mathcal{Q} = 10$ e diferentes valores de \mathcal{R} e \mathcal{T} | 53 |
| Figura 17 | – Latência em função de \mathcal{N} para diferentes valores de \mathcal{R} e \mathcal{Q} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e $\mathcal{T} = 101$ | 54 |
| Figura 18 | – Latência em função de \mathcal{N} para diferentes valores de \mathcal{R} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e $\mathcal{T} = 606$ | 55 |

LISTA DE TABELAS

| | | | |
|----------|---|---|----|
| Tabela 1 | – | 6TiSCH - Conversão RSSI para PER | 33 |
| Tabela 2 | – | Sensibilidade LoRaWAN | 35 |
| Tabela 3 | – | LoRaWAN - Conversão RSSI para PER | 35 |
| Tabela 4 | – | 6TiSCH and LoRaWAN | 36 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|---|
| ADR | <i>Adaptive Data Rate</i> |
| CCA | Clear Channel Assessment |
| CDF | <i>Cumulative Distribution Function</i> |
| CoAP | <i>Constrained Application Protocol</i> |
| CoCoA | CoAP Simple Congestion Control/Advanced |
| CSS | <i>Chirp Spread Spectrum</i> |
| DeTAS | <i>Decentralized Traffic-Aware Scheduling Technique</i> |
| DiGS | <i>Distributed Graph routing and autonomous Scheduling</i> |
| DODAG | <i>Destination-Oriented Directed Acyclic Graph</i> |
| ETSI | <i>European Telecommunications Standard Institute</i> |
| FCC | <i>Federal Communications Commission</i> |
| FSK | <i>Frequency-Shift Keying</i> |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| IETF | <i>Internet Engineering Task Force</i> |
| IIot | Industrial Internet of Things |
| IoT | <i>Internet of Things</i> |
| ISM | <i>Industrial, Scientific and Medic</i> |
| IWSN | <i>Industrial Wireless Sensors network</i> |
| LoRa | <i>Long Range</i> |
| LoRaWAN | <i>Long Range Wide Area Network</i> |
| LPWA | <i>Low-Power Wide-Area</i> |
| LPWAN | <i>Low-Power Wide-Area Network</i> |
| M2M | <i>Machine-to-Machine</i> |
| MAC | <i>Medium Access Control</i> |
| MSF | <i>Minimal Scheduling Function</i> |
| NB-IoT | <i>Narrowband IoT</i> |
| OF0 | <i>Objective Function Zero</i> |
| OSCORE | Object Security for Constrained RESTful Environments |
| PDR | <i>Packet Delivery Rate</i> |
| PER | <i>Packet Error Rate</i> |
| QoS | <i>Quality of Service</i> |
| REST | REStitRepresentational State Transfer |
| RPL | <i>IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks</i> |
| RSSI | <i>Received Signal Strength Indicator</i> |
| SCHC | <i>Static Context Header Compression and Fragmentation</i> |
| SCHC | Static Context Header Compression |
| SDOs | <i>Standards Development Organizations</i> |
| SF | <i>Spreading Factor</i> |
| SIGs | <i>Special Interest Groups</i> |
| SNR | <i>Signal-to-Noise Ratio</i> |
| TDMA | <i>Time-Division Multiple Access</i> |

Wi-SUN

Wireless Smart Ubiquitous Network

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------------|---|
| \mathcal{T} | Número de intervalos de tempo |
| \mathcal{C} | Número de canais |
| \mathcal{N} | Número de nós |
| β | Número de pontos de acesso/ <i>gateways</i> |
| \mathcal{S} | Espaçamento de canais |
| \mathcal{P}_t | Potência máxima de transmissão |
| \mathcal{P}_{friss} | Potência recebida |
| d | Distância do enlace |
| λ | Comprimento de onda |
| \mathcal{G}_t | Ganho associado às antenas de transmissão |
| \mathcal{G}_r | Ganho associado à antena de recepção |
| \mathcal{R} | Número de retransmissões |
| \mathcal{Q} | Tamanho da fila |
| BW | Largura de banda |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 MOTIVAÇÃO | 17 |
| 1.2 OBJETIVOS | 18 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 18 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 18 |
| 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 18 |
| 2 PROTOCOLOS LPWA | 19 |
| 2.1 PRELIMINARES | 19 |
| 2.1.1 6TiSCH | 19 |
| 2.1.2 LoraWAN | 21 |
| 2.2 TRABALHOS RELACIONADOS | 22 |
| 2.2.1 6TiSCH | 23 |
| 2.2.2 LoRaWAN | 24 |
| 2.2.3 Comparação de Protocolos | 27 |
| 3 DESENVOLVIMENTO | 29 |
| 3.1 MODELO DE SISTEMA | 29 |
| 3.2 SIMULADORES | 30 |
| 3.2.1 6TiSCH Simulator | 31 |
| 3.2.2 LoRaSim | 31 |
| 3.3 SIMULAÇÃO | 31 |
| 4 RESULTADOS | 37 |
| 4.1 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TECNOLOGIAS LORAWAN E 6TiSCH | 37 |
| 4.2 ANÁLISE ESPECÍFICA DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS EM REDES 6TiSCH | 48 |
| 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS | 56 |
| REFERÊNCIAS | 58 |

1 INTRODUÇÃO

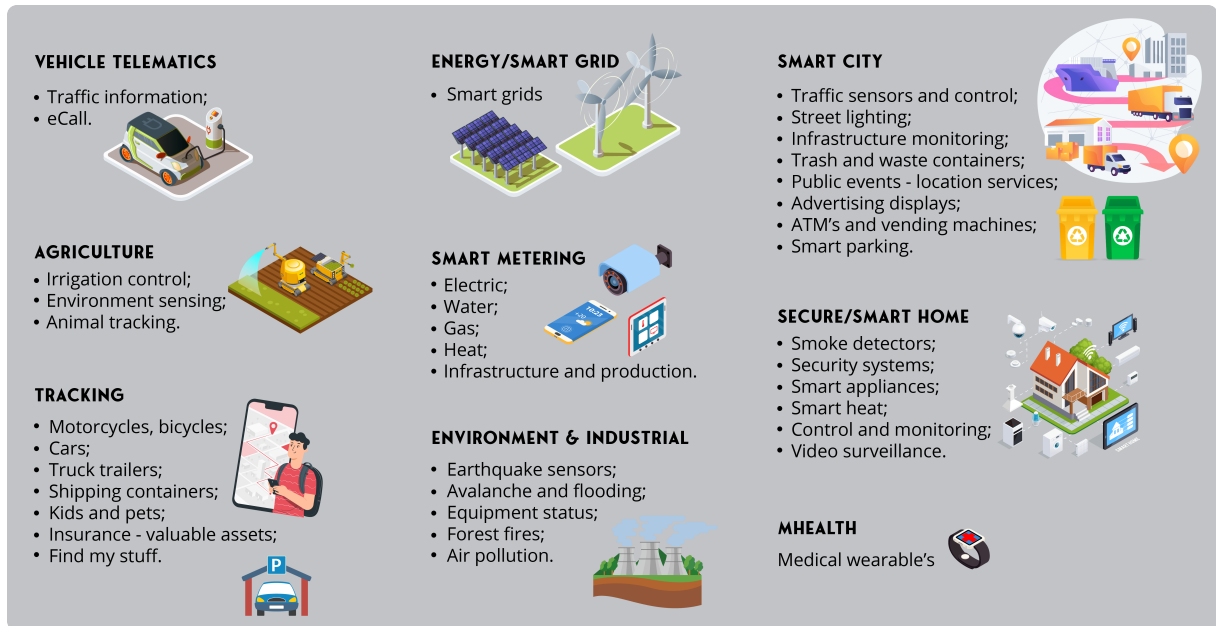
O propósito do paradigma da Internet das Coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT) é permitir que qualquer dispositivo esteja conectado à Internet. Embora tal conceito possa soar como uma simples ligação entre pequenos dispositivos, esta tecnologia tem o potencial de mudar a interação humana entre cada objeto relevante redor das vidas das pessoas. As coisas podem sentir, comunicar-se entre si, interagir com humanos e tomar decisões para os proteger, além de melhorar e revolucionar a sua forma de viver. Problemas como a poluição ambiental, crise de energia, gerenciamento de tráfego, esgotamento de recursos e muitos outros poderiam ser resolvidos com o auxílio da IoT (RAZA et al., 2017). Espera-se que, em termos de receita, o mercado de IoT alcance uma surpreendente marca de 4,3 trilhões de dólares em 2024 (BERTHELSEN; MORRISH, 2015).

No entanto, a conexão entre máquinas, bem como suas funcionalidades decorrentes, não pode ser fornecida satisfatoriamente por tecnologias já consolidadas com foco em usuários humanos, como o caso das redes celulares (LEI et al., 2013). Assim, a comunicação Máquina-a-Máquina, do inglês *Machine-to-Machine* (M2M) está diretamente relacionada à evolução da IoT. Neste contexto, espera-se que haja 34,7 bilhões de dispositivos conectados até 2028 (ERICSSON, 2023). Este crescimento levou ao desenvolvimento de uma série de novas tecnologias visando diferentes aplicações M2M, como *Bluetooth* e *Zigbee* (FADLULLAH et al., 2011), em que muitos deles são direcionados para comunicações de curto alcance, onde os nós são separados por poucos ou dezenas de metros.

Porém, muitos cenários relevantes de IoT se estendem por grandes áreas, como cidades e fazendas. A fim de lidar com os requisitos de tais aplicações envolvendo IoT, muitas tecnologias de baixa potência para área ampla, do inglês *Low-Power Wide-Area*, (LPWA) foram criadas, permitindo superar distâncias de até dezenas de quilômetros entre dispositivos (PETAJARVI et al., 2015). Estas redes permitem que dispositivos de baixo consumo energético, por exemplo aqueles alimentados por bateria, se comuniquem entre longas distâncias com uma baixa taxa de transmissão de dados. Estima-se que dos 30 bilhões de dispositivos conectados em 2025, um terço estará conectado através de LPWAN (NOKIA, 2016). As técnicas usadas em LPWAN visam fornecer um equilíbrio entre diferentes recursos como custos de implantação, taxa de dados, uso de largura de banda e duração da bateria (XIONG et al., 2015), o que é aceitável para aplicações M2M que não exigem latência muito baixa e altas taxas de dados (MORRISH, 2013).

Para esses dispositivos, existe uma ampla gama de aplicações possíveis como na indústria, na agricultura, no sensoriamento remoto, em redes inteligentes, em cidades inteligentes, entre outras, como exemplificado na Figura 1.

Figura 1 – Aplicações de IoT



Fonte: Adaptado de (NOKIA, 2016)

Neste sentido, dispositivos IoT conectados por LPWAN podem ser facilmente reorganizados a fim de cobrir grandes áreas, sentir e interagir com o ambiente. Devido a sua taxa, sua potência e suas restrições de latência, espera-se que as LPWAN não sejam projetadas para lidar com todas as soluções relacionadas à IoT. Ao comparar com as redes celulares tradicionais, que são tecnologias móveis já difundidas, a LPWAN difere no sentido de que requer muito menos custo de infraestrutura, além de suportar dispositivos de baixa potência. Desta forma, as redes celulares tradicionais não podem alcançar a mesma eficiência energética como podem as LPWAN (RAZA et al., 2017).

Vários protocolos LPWAN concorrentes foram propostos por distintas organizações e renomados grupos, onde cada um utiliza diferentes abordagens para alcançar os requisitos LPWAN. Exemplos de tais grupos são: o Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, do inglês *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE)¹, o Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações, do

¹Disponível em <https://www.ieee.org/>.

inglês *European Telecommunications Standard Institute* (ETSI)² e a Força-Tarefa de Engenharia da Internet, do inglês *Internet Engineering Task Force*, (IETF)³, que são denominadas organizações de desenvolvimento de padrões, do inglês *Standards Development Organizations* (SDOs); e a Aliança DASH7 (*DASH7 Alliance*)⁴ e a Aliança LoRa™ (*LoRa™ Alliance*)⁵, que são denominados grupos de interesse especial, do inglês *Special Interest Groups* (SIGs), formados por alianças industriais.

Das muitas tecnologias disponíveis para aplicações LPWAN, duas das mais importantes são: o *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN) (SORNIN et al., 2015), que é suportada e promovida pela *LoRa™ Alliance* e usa a topologia em estrela; e o 6TiSCH que utiliza o padrões IEEE 802.15.4e e IEEE 802.15.4g, que é apoiado pela IETF e permite o uso da topologia em malha, do inglês *mesh*. É importante notar que cada protocolo tem sua própria relevância: enquanto o LoRaWAN é uma tecnologia bem conhecida e difundida utilizada em soluções amadoras e profissionais, o 6TiSCH oferece conectividade IPv6 para LPWAN e é utilizado em padrões importantes como a Rede Sem Fio Inteligente Ubíqua, do inglês *Wireless Smart Ubiquitous Network* (Wi-SUN), sendo este um tópico de pesquisa muito ativo (MONTENEGRO et al., 2007; WINTER et al., 2012; SHELBY et al., 2014; DUJOVNE et al., 2014; DUY et al., 2017; THUBERT et al., 2018; VUČINIČ et al., 2018a; VUČINIČ et al., 2018b; SELANDER et al., 2019; VILAJOSANA et al., 2019).

Como as redes LPWA cobrem grandes áreas, cada nó é potencialmente forçado a compartilhar o meio de comunicação com um grande número de dispositivos de comunicação. Mesmo que haja uma série de alternativas para minimizar os efeitos resultantes deste compartilhamento, como o uso de combinações ortogonais da frequência central, fator de espalhamento do inglês *Spreading Factor* (SF) e outros, há um limite relacionado ao número máximo de nós em uma determinada área, sem que a comunicação seja muito prejudicada em termos de erros de transmissão.

Neste trabalho, são avaliadas algumas métricas de desempenho das tecnologias LoRaWAN e 6TiSCH, por meio do simulador LoRaSim (BOR et al., 2016), que é usado para simular a rede LoRaWAN e o simulador 6TiSCH Simulator (MUNICIO et al., 2019), que é utilizado para simular a rede 6TiSCH. Ambos simuladores são de código aberto.

Em um primeiro cenário, os protocolos LoRaWAN e 6TiSCH são comparados

²Disponível em <https://www.etsi.org/>.

³Disponível em <https://www.ietf.org/>.

⁴Disponível em <http://www.dash7-alliance.org/>.

⁵Disponível em <https://www.lora-alliance.org/>.

em termos de taxa de erro de pacote, do inglês *Packet Error Rate* (PER) e latência. Tal escolha é motivada pelo fato de ambas as tecnologias poderem ser utilizadas em grandes áreas, portanto, são adequados para LPWAN, oferecendo diferentes soluções e arquiteturas para lidar com comunicações de sensores em grandes distâncias, enquanto utilizam pouca energia. Mais especificamente, enquanto o LoRaWAN usa uma variação da topologia em estrela e uma alta resiliência técnica de modulação, o 6TiSCH suporta a topologia de malha, do inglês *mesh*, e um mecanismo de sincronização. Os resultados apresentados demonstram que LoRaWAN supera 6TiSCH se for permitido utilizar vários *gateways*, enquanto o 6TiSCH tem mais flexibilidade quanto aos parâmetros usados para otimizar a rede. Em termos de latência, a tecnologia LoRaWAN é consideravelmente melhor do que a tecnologia 6TiSCH.

Em um segundo cenário, apenas o protocolo 6TiSCH é levado em conta. Neste caso, alguns parâmetros da rede como número máximo de retransmissões, do inglês *retries*, tamanho da fila, do inglês *queue size*, e comprimento do *slotframe*, do inglês *frame length*, são estudados, permitindo-se avaliar a PER, as perdas de pacote causadas pelas falhas na transmissão mais comuns, como fila cheia e limite de retransmissões, bem como a latência. Os resultados revelam que o incremento no número máximo de retransmissões apresenta um impacto significativamente maior na redução da PER quando comparado ao efeito decorrente do aumento do tamanho da fila, sendo este último ainda inferior em relação ao impacto originado pelo aumento do comprimento do *slotframe*. Por outro lado, em relação às falhas causadas por fila cheia e limite de retransmissões, observa-se uma inversão da influência do aumento do comprimento do *slotframe*.

1.1 MOTIVAÇÃO

A maioria dos trabalhos na literatura dedicaram um grande esforço em analisar ou evoluir LoRaWAN, 6TiSCH ou alguma tecnologia de rede relacionada. No entanto, nenhum deles, até onde observado, faz uma comparação numérica significativa e avaliação de LoRaWAN e 6TiSCH no mesmo cenário e sob o mesmo tráfego e condições do canal, o que constitui uma lacuna relevante na literatura. Ademais, outra carência na literatura é o mapeamento das principais causas dos erros de transmissão. Este trabalho também propõe este estudo especificamente para o 6TiSCH, a fim de que otimizações possam ser realizadas ao projetar um sistema.

As principais contribuições deste trabalho são apresentar resultados valiosos que possam auxiliar o projetista do sistema a decidir entre as duas tecnologias para um

determinado emprego com requisitos particulares, e também, em um cenário em que seja recomendada utilização do protocolo 6TiSCH, fornecer subsídios para a melhor escolha dos parâmetros de projeto.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo avaliar métricas de desempenho em protocolos de baixo consumo energético para área ampla, LoRaWAN e 6TiSCH, em redes com muitos nós por meio de simulador.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Simular cenários de tráfego em redes LoRaWAN e 6TiSCH;
- Avaliar os impactos na comunicação em LPWAN com diferentes quantidades de dispositivos conectados;
- Investigar os efeitos que podem gerar falhas de comunicação nas redes;
- Comparar, em termos de taxa de erro de pacote e latência, a variação de parâmetros em redes LoRaWAN e 6TiSCH e, quando for o caso, visar parâmetros equivalentes;
- Comparar as principais causas de erros de transmissão em redes 6TiSCH.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 detalha os protocolos de rede LPWA abordados, 6TiSCH e LoRAWAN, bem como apresenta os principais trabalhos relacionados. Já o Capítulo 3 apresenta o modelo do sistema proposto. O Capítulo 4, por sua vez, mostra os resultados obtidos por meio da análise comparativa dos dados das simulações. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais e as propostas de trabalhos futuros.

2 PROTOCOLOS LPWA

Neste capítulo, são observadas as principais características e diferenças das tecnologias comparadas neste estudo, bem como são apresentados trabalhos relacionados com o objetivo de introduzir temas de interesse comuns relacionados a LoRaWAN e 6TiSCH. Adicionalmente são apresentados outros estudos comparativos em que as tecnologias abordadas neste estudo são temas de pesquisa.

2.1 PRELIMINARES

Nesta seção, são apresentadas algumas das principais características relacionadas à ambas tecnologias avaliadas neste estudo, como aprimorações, arquitetura, topologia e recursos, com o objetivo de uma breve introdução de como tais tecnologias operam, organizam-se e se diferem.

2.1.1 6TiSCH

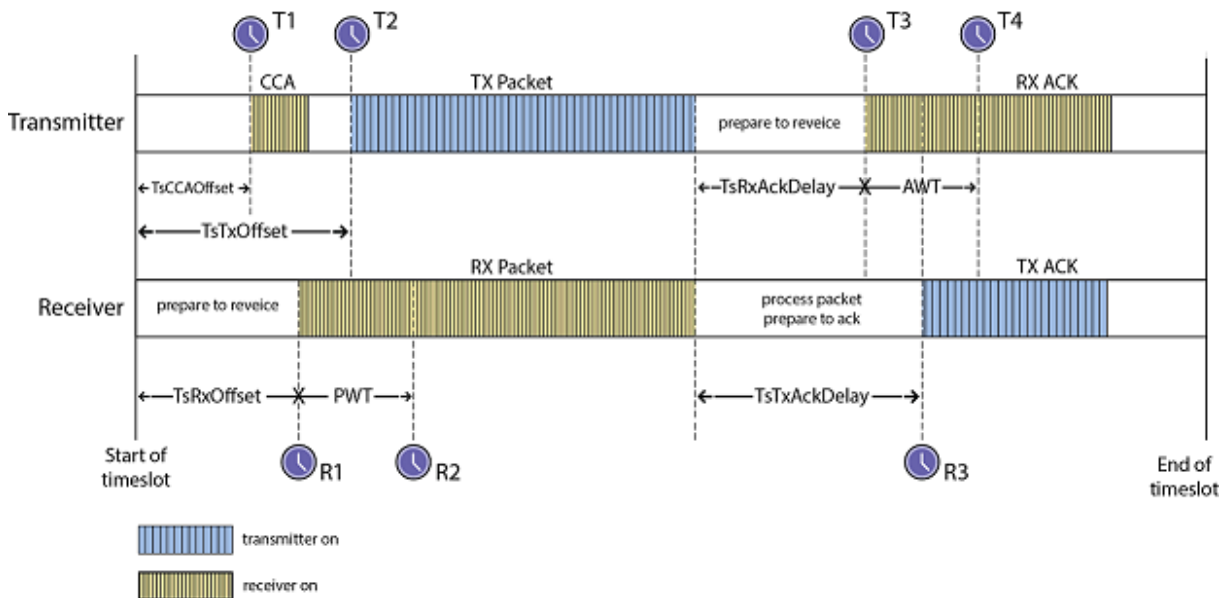
O grupo de trabalho 6TiSCH visa padronizar o IEEE802.15.4 *Time-Slotted Channel Hopping* (TSCH) com IPv6. Em seu trabalho de padronização, muitos dos desafios relacionados a trazer o IPv6 para dispositivos de baixa capacidade foram solucionados, como 6LoWPAN Neighbor Discovery, encapsulamento IP-in-IP e compressão de cabeçalho (VILAJOSANA et al., 2019). Na arquitetura 6TiSCH, a camada de enlace IEEE802.15.4 TSCH é a base do conjunto de protocolos IETF 6TiSCH (DUJOVNE et al., 2014). Alguns mecanismos são fornecidos por este conjunto de protocolos, como políticas relacionadas ao agendamento, procedimentos de conexão segura, inicialização mínima, e comunicação de múltiplos saltos por meio de uma topologia em malha.

Além disso, várias funcionalidades de rede foram implementadas, como compressão de cabeçalho contextual e sem estado (MONTENEGRO et al., 2007), fragmentação, descoberta de vizinho (THUBERT; NORDMARK, 2018) e protocolo de roteamento para redes IPV6 de baixa potência com perdas, do inglês *IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks* (RPL) (WINTER et al., 2012). O RPL utiliza uma função objetiva para otimizar as rotas ponto-a-multiponto, ao otimizar a comunicação entre os nós e o nó raiz da rede e ponto-a-multiponto para que o nó raiz seja

capaz de alcançar cada nó.

Já na camada de aplicação, o 6TiSCH fornece o protocolo de aplicação restrita, do inglês *Constrained Application Protocol* (CoAP) (SHELBY et al., 2014) e o protocolo de segurança de objetos para ambientes RESTful restritos, do inglês *Object Security for Constrained RESTful Environments* (OSCORE) (SELANDER et al., 2019), em que “RESTful” se refere à arquitetura de transferência representacional, do inglês *Representational State Transfer* (REST), para permitir uma interação segura de baixa sobrecarga. Com um conjunto tão robusto construído em torno do IETF 6TiSCH, ele permite o desempenho industrial de um protocolo baseado no padrão IEEE802.15.4 TSCH para utilizar o IPv6 em aparelhos de baixo custo.

Figura 2 – Fluxo de tempo do TSCH



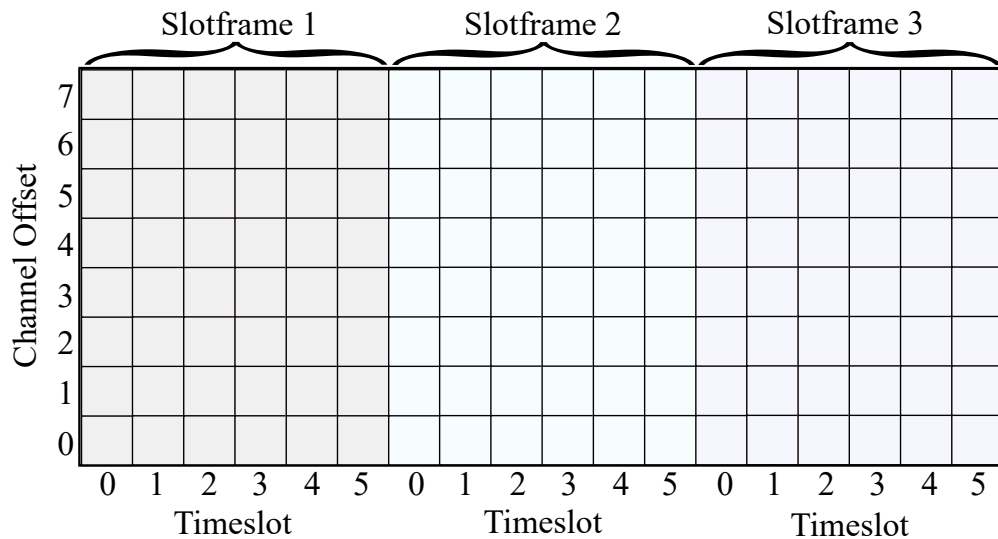
Fonte: Adaptado de (VILAJOSANA et al., 2019)

Por sua vez, o protocolo TSCH é baseado no acesso múltiplo por divisão de tempo, do inglês *Time-Division Multiple Access*, (TDMA) com salto de canal e robustez contra interferência e desvanecimento devido a múltiplos percursos. A parte mais importante de TSCH é o sincronismo, uma vez que um nó de transmissão sabe exatamente quando deve ligar o transmissor de rádio, enquanto o nó de recepção sabe com precisão o instante para ligar o receptor. Esse sincronismo, contribui para uma economia significativa no consumo de energia e adicionalmente torna desnecessário o uso do protocolo de avaliação de canal livre, do inglês *Clear Channel Assessment* (CCA). Nesta abordagem não haverá nós de escuta consumindo energia em modo ocioso enquanto aguardam a chegada de pacotes.

A Figura 2 descreve este fluxo onde T1 representa o CCA (opcional), R1 por sua vez representa receptor ativo (RX-ON), T2 representa o transmissor ativo (TX-ON) e R2 representa o receptor ainda ativo. Já T3 representa o *Acknowledgement* e T4 representa o tempo de espera para *Acknowledgement* (*guard-time* ACK RX-ON).

Cada intervalo de tempo deve ser amplo o suficiente para acomodar o quadro seguido por um *acknowledgement*. Além disto, um grupo de \mathcal{T} intervalos de tempo, chamado de *slotframe*, repete no tempo. Tal comportamento é ilustrado na Figura 3, em que há $\mathcal{C} = 8$ canais e cada *slotframe* tem $\mathcal{T} = 6$ intervalos de tempo.

Figura 3 – *Slotframe* estrutura cíclica com $\mathcal{T} = 6$ e $\mathcal{C} = 8$ repetido 3 vezes no tempo.



Fonte: Autoria própria.

Pela figura, é possível observar que, como cada intervalo de tempo tem \mathcal{C} canais disponíveis, pode haver até \mathcal{C} comunicações sem colisão por intervalo de tempo. Para realizar uma comunicação entre dois nós, a rede TSCH deve atribuir a eles uma ligação, do inglês *link*, representada em cada célula de tabela na figura, o que significa reservar um *offset* de canal e um intervalo de tempo a fim de que a comunicação ocorra.

2.1.2 LoraWAN

A tecnologia LoRaWAN utiliza a técnica de modulação de espectro de propagação de longo alcance (LoRa), do inglês *Long Range*, que é uma técnica proprietária de propriedade da Semtech (SEMTECH, 2013). Este método é baseado em espectro de propagação *chirp*, do inglês *Chirp Spread Spectrum* (CSS), mas ele também integra correção de erro direta usando códigos *Hamming*. A ideia é usar uma banda larga para

lidar com a interferência, o que leva a uma sensibilidade de 19,5 dB abaixo do piso de ruído e permite a comunicação em longas distâncias (BOR et al., 2016).

Embora a tecnologia LoRa não faça qualquer restrição de topologia em virtude dos protocolos usados nas camadas superiores, LoRaWAN é normalmente implementada com a topologia de rede em estrela. O protocolo LoRaWAN define diferentes classes de dispositivos finais para atender vários requisitos relacionados a alcance, taxa de bits e qualidade de canal. A classe A é suportada por todos os dispositivos e demonstra maior eficiência energética pois o *downlink* somente é habilitado após uma transmissão. A classe A contempla dispositivos bi-direcionais como sensores alimentados a bateria. A classe B possui dispositivos com latência de *downlink* controlada e intervalo controlado por balizamento. Esta classe contempla dispositivos bi-direcionais programados como atuadores alimentados à bateria. Por fim a classe C contempla dispositivos bi-direcionais como atuadores elétricos. Os dispositivos desta classe em geral contam com receptores constantemente ativados e ociosos na maior parte do tempo. Os receptores são desativados somente no momento da transmissão, neste caso não há latência de comunicação de *downlink*. Ademais, é um protocolo robusto para desvanecimento causado por múltiplos percursos e efeito Doppler e é orientado para dispositivos de baixa potência (SEMTECH, 2019a).

Em relação à potência de transmissão, ela pode ser ajustada de -4 dBm a 20 dBm. Mesmo que transceptores LoRa típicos possam operar entre 137 MHz e 1020 MHz, normalmente opera-se em bandas sem licença para evitar custos relacionados ao licenciamento do espectro¹. Outra característica importante do LoRa é que a transmissão ortogonal pode ser alcançada usando diferentes taxas de *chirp*, determinadas pelo SF, que pode ser selecionado entre 7 e 12. Quanto maior o SF melhor a sensibilidade, o que significa maior alcance de transmissão, mas também significa que o tempo de antena necessário para enviar um pacote é maior, o que afeta o consumo de potência e a probabilidade de colisão.

2.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção, são abordados alguns trabalhos relacionados às tecnologias 6TiSCH e LoRaWAN. A seção está dividida em três partes. Primeiramente são analisados

¹Bandas sem licença variam de país para país. Para a LoRaWAN, os Estados Unidos usam frequências que variam de 902 MHz a 928 MHz, enquanto a União Europeia utiliza frequências entre 863 MHz e 870 MHz.

os trabalhos que abordam apenas 6TiSCH. Em seguida, discute-se alguns trabalhos relacionados com LoRaWAN. Por fim, encerra-se a seção com trabalhos que comparam diferentes protocolos IoT.

2.2.1 6TiSCH

As limitações de uma rede de grande escala usando IPv6 sobre IEEE 802.15.4e TSCH são estudadas em (KIM et al., 2017), em que é proposto um esquema de reforço com relação ao gerenciamento de configuração e agendamento. No entanto, neste trabalho não foram realizados testes de tráfego para avaliar o esquema da proposta. Em (ACCETTURA et al., 2015), os autores introduzem a primeira implementação de 6TiSCH para automação industrial utilizando a pilha do protocolo OpenWSN, em que as questões relativas à escalabilidade devido às redes de múltiplos saltos densas e de baixo consumo energético são delineadas. No entanto, tal estudo se concentra na questão da automação e não faz qualquer comparação com outros protocolos LPWAN, além de utilizar a banda de 2,4GHz. Os resultados mostram que uma técnica descentralizada de agendamento sensível ao tráfego, do inglês *Decentralized Traffic-Aware Scheduling Technique* (DeTAS) pode evitar problemas relacionados ao congestionamento de filas além de reduzir a taxa de perda de pacote. Os autores em (SHI et al., 2019) propõem uma descentralização no gerenciamento da rede na tecnologia WirelessHART, que compartilha semelhanças com o 6TiSCH em alguns aspectos, com a primeira solução para roteamento de grafos distribuídos e agendamento autônomo, do inglês *Distributed Graph routing and autonomous Scheduling* (DiGS), que permite aos dispositivos calcularem suas próprias rotas de grafo e agendamento de transmissão. As simulações e os testes em um ambiente controlado mostram que a solução pode melhorar a confiabilidade, latência e eficiência energética da rede.

Uma abordagem para redes de sensores sem fio industriais, do inglês *Industrial Wireless Sensors Network* (IWSN), é apresentada em (BELLO et al., 2019). Nele, os autores discutem os principais requisitos para a escalabilidade de rede em termos de IWSN e Indústria 4.0, que compreendem estratégias *ad-hoc* de agrupamento de gerenciamento de recursos, ou seja, atribuição de *slot* e frequência. Este estudo se concentra em IWSN e não compara resultados com outros protocolos LPWAN. Em (HOSNI; THÉOLEYRE, 2017), é proposto um algoritmo de distribuição para agendamento de transmissões, que é dividido em blocos, para minimizar o atraso de ponta a ponta para 6TiSCH. Nesta abordagem é garantida a entrega do pacote antes do final do *slotframe*, não importando o comprimento

da rota. O esquema é analisado experimentalmente para validar a confiabilidade e baixa latência em um cenário distribuído.

Ademais, em (WATTEYNE C. ADJIH, 2015) é apresentada uma abordagem empírica para registrar a atividade de conexão em uma rede TSCH com 350 nós em um ambiente de escritório, em cada uma das 16 frequências a 2,4 GHz. É mostrado que a qualidade de cada enlace depende muito da frequência de comunicação. Os autores em (KHARB, 2018) realizam a análise em termos de duração de bateria, latência, número de enlaces interferentes, colisões e confiabilidade em quatro diferentes topologias TSCH: estrela, linear, malha e uma topologia hierárquica-híbrida proposta, com foco na melhoria da escalabilidade e suporte à diferenciação de tráfego. No entanto, ambos os estudos se concentram na banda de 2,4 GHz, o que limita o máximo intervalo de salto único, e também não comparam os resultados com outros protocolos de redes LPWA, onde é mais comum o uso de bandas inferiores a GHz.

No estudo realizado em (HAJ-HASSAN et al., 2023) um protocolo autônomo de autenticação mútua e estabelecimento de chave para IIoT é proposto em junção com 6TiSCH para avaliar o desempenho deste modelo quando usado em conjunto com um protocolo industrial real. Os resultados obtidos demonstraram a eficiência em termos de latência, consumo de energia e comunicação, mesmo se usado com dispositivos restritos ou até mesmo se implementado com topologias de rede variadas, porém nenhuma comparação direta com outras tecnologias como LoRaWAN foram estudadas.

Uma investigação sobre as estratégias de controle de congestionamento CoAP para redes IoT baseadas em 6TiSCH é apresentada em (RIGHETTI et al., 2023). Neste estudo, por meio de simulações, são verificados como se adequam os algoritmos de controle de congestionamento CoAP à arquitetura 6TiSCH e como o desempenho dos algoritmos é influenciado pela função de escalonamento, do inglês *Scheduling Function*, utilizada para comunicação dos nós. Adicionalmente é proposto no estudo uma versão otimizada do CoCoA, o 6CoCoA, adaptada de forma específica para redes 6TiSCH, que segundo o estudo, durante congestionamentos de rede é capaz de fornecer uma melhoria na taxa de entrega de transação e uma reduz o atraso de transação ponta-a-ponta.

2.2.2 LoRaWAN

Para a tecnologia LoRaWAN, uma estrutura de geometria estocástica para modelar o desempenho de um único *gateway* de rede LoRa é fornecida em (GEORGIU;

RAZA, 2017). É mostrado que, à medida que o número de dispositivos cresce, a probabilidade de cobertura diminui exponencialmente. A análise considera a modulação CSS, limitações regulatórias em ciclo de serviço de rádio e o protocolo ALOHA na camada de controle de acesso ao meio, do inglês *Medium Access Control* (MAC). Em (MAHMOOD et al., 2019), os autores analisam o impacto da interferência sobre o mesmo fator de espalhamento (SF) e diferentes SFs em um sistema LoRa de célula única. Os resultados mostram que em um canal de frequência LoRa, apenas um número limitado de dispositivos consegue transmitir com sucesso devido à colisão de pacotes. A fim de melhorar esta probabilidade, os dispositivos deveriam gastar energia em múltiplas retransmissões ou replicações de mensagem.

Em (HAUBRO et al., 2020) é descrito uma implementação de TSCH-over-LoRa, como solução IPv6 multi-hop de longo alcance que propõe combinar as características de longo alcance de LoRa juntamente com TSCH. O TSCH-over-LoRa visa habilitar em dispositivos LoRa uma topologia de rede mesh IPv6, de forma que seja possível a operação de longo alcance para redes sem fio industriais TSCH/6TiSCH, bem como o emprego de protocolos RPL, UDP e CoAP entre outros.

O trabalho apresentado em (SISINNI et al., 2023) descreve um método de teste para avaliar a latência da arquitetura SCHC-over-LoRaWAN em situações do mundo real, em que SCHC refere-se a compressão de cabeçalho de contexto estático, do inglês *Static Context Header Compression*. A proposta inclui um mapeamento e avaliação dos fluxos de dados marcados e métricas relacionadas são aplicadas. A estratégia proposta foi testada em diferentes casos de uso envolvendo *gateways* LoRaWAN implantados em todo o mundo. Por meio da medição da latência ponta-a-ponta dos dados IPv6 em amostras dos casos de uso, a praticabilidade da abordagem proposta foi testada, obtendo um atraso inferior a 1s. O resultado de maior relevância no entanto, é a constatação de que a metodologia de teste apresentada permite uma comparação do comportamento do IPv6 com o SCHC-over-LoRaWAN, o que permite a otimização de parâmetros durante a implantação e designação de componentes de infraestrutura e software.

Além disso, em (HAXHIBEQIRI et al., 2019), é proposto um mecanismo de sincronização e agendamento por uma rede central para evitar colisão na camada MAC, que pode comprometer a escalabilidade. No artigo, é mostrado que para redes de múltiplos canais não saturados, a taxa de entrega de pacotes, do inglês *Packet Delivery Rate* (PDR) pode aumentar de 7% para 30% quando comparadas com redes LoRaWAN dessincronizadas, dependendo do fator de espalhamento. Por sua vez, para redes saturadas

o aumento na PDR é ainda maior. Em (REYNDERS et al., 2018), os autores apresentam uma nova camada MAC para melhorar confiabilidade e escalabilidade agendando a transmissão do nó em duas etapas. No primeiro passo, baseado nas potências de transmissão e nos SFs permitidos em cada canal, primeiramente um *gateway* agenda os nós que transmitem. Depois, baseando-se na informação de agendamento no primeiro passo, os nós determinam seus parâmetros, como potência de transmissão e SF. Os resultados da simulação, que foi realizada no NS-3, mostram que o modelo proposto pode reduzir a taxa de erro de pacote em quase 20%. Já em (WU et al., 2020), é introduzido um mecanismo de fila distribuída no protocolo MAC. Os resultados mostram economia de energia e latência de aproximadamente 50% em comparação com um MAC puro em ALOHA. No entanto, ambos os estudos não se concentram na especificação atual da tecnologia LoRaWAN, e também não se comparam com outros protocolos LPWAN.

Os autores em (ABEELE et al., 2017) discutem um modelo de desempenho LoRa criado a partir de extensas simulações de taxa de erro de bit em banda base. Combinando este modelo com o protocolo MAC do LoRaWAN, os autores analisam múltiplos canais, fator de múltiplo espalhamento, múltiplos *gateways* e redes bidirecionais com milhares de dispositivos. Utilizando o simulador NS-3, uma investigação de escalabilidade mostra que o tráfego descendente, do inglês *downstream* afeta negativamente a taxa de entrega de tráfego ascendente, do inglês *upstream*. Em (M. Ortiz et al., 2020), os autores ainda analisam o desempenho de LoRa mas em ambiente de mobilidade urbana, utilizando automóveis como dispositivos LoRa em movimento. Algumas métricas, como taxa de entrega de pacotes, tempo de interceptação de pacotes e indicador de intensidade do sinal recebido, são avaliadas tanto em termos de resultados experimentais quanto em simulação NS-3. Os resultados mostram que as métricas simuladas são consistentes com experimentos reais. Ainda, ao aumentar a densidade dos *gateways*, pode haver uma minimização, mas não eliminação, destes efeitos devido aos rigorosos requisitos de ciclo de trabalho. Em (HOELLER et al., 2018) é proposto um esquema de replicação de mensagens e o uso de *gateways* com várias antenas de recepção, como meio de fornecer tempo e diversidade espacial, respectivamente. Os resultados mostram que as redes LoRa são sensíveis em relação às densidades de usuários e tráfego, mas o desempenho pode ser aprimorado tanto pela replicação de mensagens quanto por múltiplas antenas. Embora ambos os estudos ofereçam informações interessantes sobre as limitações da tecnologia LoRaWAN, o foco principal de tais estudos não era a comparação com outros protocolos LPWAN.

2.2.3 Comparação de Protocolos

Em (IQBAL et al., 2020), os autores apresentam um levantamento sobre algumas tecnologias LPWAN, como o LoRa, o IoT de banda estreita, do inglês *Narrowband IoT* (NB-IoT) e o Sigfox. Neste trabalho são abordadas as características de cada um dos protocolos, vantagens e desvantagens, arquitetura do sistema de rede, visão geral da estrutura e principais aplicações. Além disso, é mostrado que o LoRa e o Sigfox superam o NB-IoT em termos de duração da bateria, utilização eficiente de energia, capacidade e custo. Por outro lado, o NB-IoT é o melhor se a latência e qualidade de serviço, do inglês *Quality of Service* (QoS), são levados em conta. Anteriormente, em (AYOUB et al., 2019) uma visão geral dos protocolos LoRaWAN, DASH7 e NB-IoT é apresentada com o foco nas características de mobilidade. Cada arquitetura padrão é explicada, bem como os parâmetros mais importantes são comparados. Ademais, são relatados alguns mecanismos de mobilidade, que podem ser abordados como fornecer conectividade ótima em redes IP e como garantir a entrega de informações sob demanda enquanto os dispositivos se movimentam em redes IoT. Por fim, alguns aplicativos para cada protocolo são listados. Enquanto tais estudos provêm percepções interessantes sobre vários protocolos LPWAN, nenhuma comparação foi realizada em relação 6TiSCH.

Uma leve camada de adaptação IPv6 para LPWANs é proposta em (GOMEZ et al., 2020), chamada de compressão e fragmentação de cabeçalho de contexto estático, do inglês *Static Context Header Compression and Fragmentation* (SCHC). O trabalho se concentra em LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT e IEEE 802.15.4w. Os autores discutem alguns recursos de comunicação, por exemplo LoRaWAN e Sigfox são mais restritos em termos de taxas de mensagens, tamanho máximo da carga útil do quadro e fragmentação do pacote. Como o SCHC tem uma abordagem flexível, pode ser implementado em qualquer uma dessas tecnologias. Embora esse estudo lide com uma visão geral de vários protocolos LPWAN, o trabalho tem como objetivo propor a camada de adaptação do SCHC. Não foi realizada nenhuma comparação em termos de PER e latência. Por fim, os autores em (MORIN et al., 2017) investigaram o tempo de vida do dispositivo para tecnologias IoT. Em seu cenário de restrição de energia, é mostrado que o BLE fornece o melhor tempo de vida em todos os casos, seguido pelo 802.15.4, LoRa e Sigfox que têm desempenho semelhante para tamanhos de dados muito pequenos, enquanto o primeiro supera o último em intensidade de tráfego muito baixa. No entanto, tal estudo se concentra apenas na duração da bateria.

O Capítulo 3, a seguir, descreve o modelo de sistema utilizado bem como o detalha

as características dos simuladores e do conjunto de simulações realizadas.

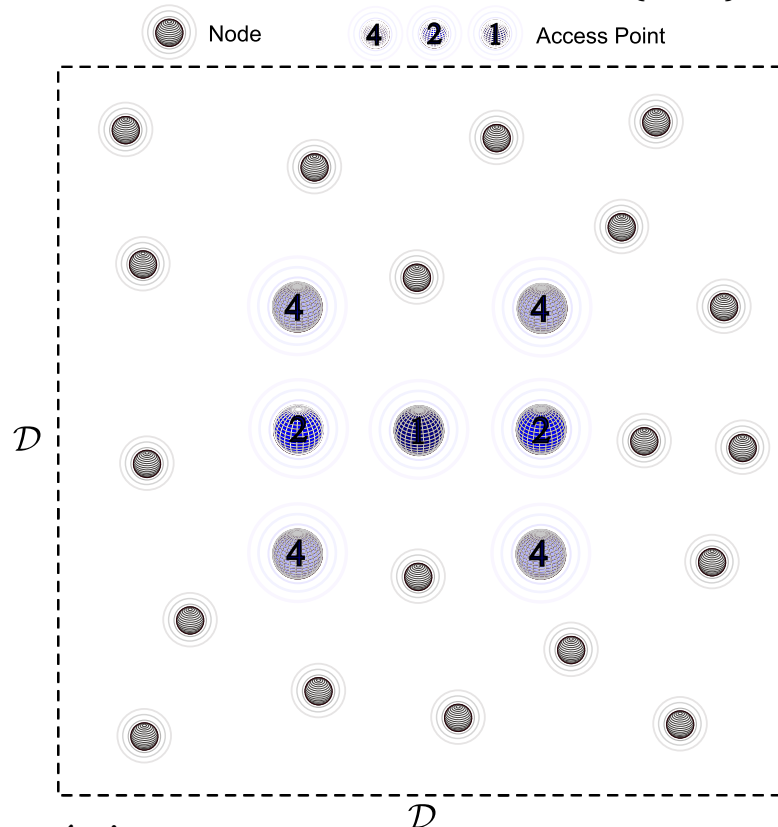
3 DESENVOLVIMENTO

3.1 MODELO DE SISTEMA

Neste trabalho, assume-se que existem \mathcal{N} nós uniformemente distribuídos em uma área quadrada com dimensões $\mathcal{D} \times \mathcal{D}$ km² com o objetivo de transmitir mensagens para $\beta \in \{1, 2, 4\}$ pontos de acesso, do inglês *Access Point* (AP), conforme ilustrado na Figura 4. A colocação dos pontos de acessos segue a implementação padrão do LoRaSim (BOR et al., 2016) e assim:

- Para $\beta = 1$, o AP é colocado no centro da área disponível;
- Para $\beta = 2$, as posições dos AP são igualmente espaçadas no plano horizontal, seguindo a mesma posição que $\beta = 1$ no plano vertical;
- Para $\beta = 4$, os AP são igualmente espaçados tanto no plano horizontal como no plano vertical.

Figura 4 – Exemplo de modelo de sistema para \mathcal{N} e $\beta \in \{1, 2, 4\}$.



Fonte: Autoria própria.

Todos os nós operam na banda médica científica e industrial, do inglês *Industrial, Scientific and Medic* (ISM), sem licença de 915 MHz e assume-se um espaçamento de canais de $\mathcal{S} = 200$ kHz, que é um parâmetro comum para LoRaWAN, com canais *uplink* de 125 kHz, bem como como para 802.15.4g, utilizando o modo de operação 1 para a banda de frequência ISM (902-928MHz) dos EUA (IEEE, 2012), que também utiliza um espaçamento de canais de 200 kHz. A fim de manter uma comparação justa entre ambas as tecnologias em termos de largura de banda total ocupada, o estudo concentra-se principalmente no caso de $\mathcal{C} = 8$ canais disponíveis¹, que está associado ao número mínimo de canais que os *gateways* LoRaWAN comerciais podem ouvir. A potência máxima de transmissão² utilizada é definida em $\mathcal{P}_t = 14$ dBm. A potência recebida \mathcal{P}_{friiss} em dBm, utilizando o modelo de Friis levando-se em conta a propagação no espaço livre, é definida como (GOLDSMITH, 2005)

$$\mathcal{P}_{friiss} = \mathcal{P}_t + \mathcal{G}_t + \mathcal{G}_r + 10 \log \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \right), \quad (1)$$

em que d é a distância do enlace em metros, λ é o comprimento de onda, \mathcal{G}_t e \mathcal{G}_r são os ganhos associados às antenas de transmissão e recepção, respectivamente, em dBi, os quais são assumidos como unitários neste trabalho.

Seguindo a abordagem de (MUNICIO et al., 2019), é utilizado o modelo de propagação *Pister-Hack* (LE et al., 2009) a fim levar em conta as variações de larga escala no ambiente de propagação. Este modelo é utilizado para ambos os protocolos LPWAN para obter o indicador da força do sinal recebido, do inglês *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), que é calculado pela subtração de uma variável uniforme, variando de 0 a 40 dB, do resultado do modelo *Friis* em (1). Assim, em um caso hipotético de $\mathcal{P}_{friiss} = -90$ dBm, o RSSI final variará entre -90 dBm e -130 dBm. É importante notar que isto é semelhante ao que é feito em (MUNICIO et al., 2019; BRUN-LAGUNA et al., 2016).

3.2 SIMULADORES

Devido à complexidade do 6TiSCH, dois simuladores de código aberto distintos são utilizados para avaliar as redes 6TiSCH e LoRaWAN, respectivamente, o simulador

¹Resultados adicionais com um número maior de canais também são apresentados como uma análise complementar.

² $\mathcal{P}_t = 14$ dBm é a típica potência máxima de transmissão para muitos microcontroladores como CC1352R (TEXAS INSTRUMENTS, 2020), que também representa a potência máxima de saída permitida pelo ETSI.

6TiSCH Simulator (MUNICIO et al., 2019) e o simulador LoRaSim (BOR et al., 2016).

3.2.1 6TiSCH Simulator

O 6TiSCH Simulator foi desenvolvido na linguagem Python pelo grupo de trabalho 6TiSCH e, embora existam outros simuladores que visam realizar operações semelhantes, acredita-se que este fornece os resultados mais fiéis (DUY et al., 2017; VUČINIČ et al., 2018a; VUČINIČ et al., 2018b). O 6TiSCH Simulator (MUNICIO et al., 2019) é um simulador de eventos discreto concebido especificamente para o 6TiSCH e centrado na simulação do comportamento da camada de controle de acesso ao meio (MAC). Este simulador permite ao grupo de trabalho 6TiSCH efetuar uma comparação válida entre vários parâmetros de configuração, assim como do que está para ser padronizado.

3.2.2 LoRaSim

Quanto ao simulador LoRaWAN, o LoRaSim é um simulador usado para estudos de escalabilidade da tecnologia LoRa e foi também desenvolvido na linguagem Python. O LoraSim foi criado à partir de experimentos e estabelece modelos comportamentais de comunicação que são usados como parâmetros das simulações (BOR et al., 2016). Escolheu-se o LoRaSim para este estudo devido à sua utilização generalizada e arquitetura simples e direta, o que permite fácil adaptação, verificação e simulação de redes LoRaWAN (CUI; JOE, 2020; SALLUM et al., 2020; FRANCISCO et al., 2021).

3.3 SIMULAÇÃO

Neste trabalho, o 6TiSCH Simulator é configurado para usar a função de agendamento mínima, do inglês *Minimal Scheduling Function* (MSF)³ para realizar o agendamento da comunicação. O MSF é responsável tanto pela operação de conexão como pelo agendamento da comunicação entre os nós da rede. Além disso, o MSF é otimizado para aplicações com um tráfego upstream consistente, que flui dos nós em direção ao nó raiz do Gráfico Acíclico Orientado ao Destino, do inglês *Destination-Oriented*

³O MSF é uma função de agendamento distribuído que monitora a utilização do enlace e adapta o número de células conforme necessário. Na prática, isso significa que as transmissões de dois pares disjuntos de nós podem interferir entre si. Para lidar com esse problema, MSF monitora a PER de cada célula e realoca a célula se for maior que a PER médio de outras células com o mesmo vizinho (MUNICIO et al., 2019).

Directed Acyclic Graph (DODAG) (CHANG et al., 2020). Quanto à função objetivo do RPL, utiliza-se a implementação por padrão da Função Objetiva Zero, do inglês *Objective Function Zero* (OF0), do 6TiSCH Simulator (THUBERT, 2012), que foi testado e validado pelo grupo de trabalho 6TiSCH e fornece resultados confiáveis.

Para a tecnologia 6TiSCH, assume-se que existe uma única raiz (ponto de acesso) na rede, colocada no centro da área disponível e que os pacotes de aplicação são enviados apenas após a formação da rede utilizando o protocolo RPL. Tal rede utiliza uma abordagem de múltiplos saltos para transportar o pacote para o seu destino pretendido. Além disso, assume-se que a comunicação 6TiSCH utiliza o modo de operação 1 802.15.4g para a banda de frequência ISM dos EUA (902-928MHz), o que significa uma taxa de transmissão de 50 kbps e uma modulação filtrada de *2-Frequency-Shift Keying*, (FSK), modulação por chaveamento de frequência, (IEEE, 2012).

Ao lidar com sinais interferentes⁴ como ruído, o RSSI é convertido para a taxa de erro do pacote (PER) utilizando a Tabela 1 para determinar se a transmissão foi realizada com sucesso. Tal conversão do RSSI para PER foi obtida a partir dos resultados apresentados em (PRANDO et al., 2019, Fig. 3), de tal forma que o nível de sensibilidade, ou seja, $-106,37$ dBm, resulta em uma $PER = 1,0$, que diminui à medida que a RSSI aumenta acima do nível de sensibilidade. Como mostrado em (PRANDO et al., 2019), a sensibilidade obtida das experiências pode variar em relação à mencionada nos *datasheets*, por exemplo, $-2,63$ dB de diferença para 802.15.4g com 50 kbps. No entanto, foi decidido por utilizar os resultados apresentados em (PRANDO et al., 2019), uma vez que este contém dados tanto para as tecnologias IEEE 802.15.4g como para LoRa. É importante ressaltar que com ou sem interferência, a PER é determinada utilizando a tabela 1 (MUNICIO et al., 2019; BRUN-LAGUNA et al., 2016), o que significa que o RSSI calculado utilizando o modelo de propagação Pister-Hack⁵ e assumindo os sinais interferentes como ruído determinarão se um determinado pacote será perdido ou não. Neste trabalho, assume-se também que os nós 6TiSCH estão autorizados a retransmitir uma mensagem \mathcal{R} vezes em caso de perda de um pacote de uma única operação. Embora este comportamento permita a retransmissão em caso de perda de pacotes em salto único, de modo algum garante um reconhecimento de pacote ponto-a-ponta, em uma comunicação de saltos múltiplos. Além disso, utiliza-se o tamanho de fila definido por \mathcal{Q} .

⁴Um sinal interferente é originado de qualquer outra tentativa de comunicação que utilize o mesmo enlace.

⁵O Modelo de Pister-Hack Baseia-se na equação de transmissão de Friis e adiciona à esta equação, uma medida de como a intensidade do sinal diminui com a distância, e também, um efeito de sombreamento, que é uma variação aleatória na força do sinal causado por obstáculos no ambiente.

Tabela 1 – 6TiSCH - Conversão RSSI para PER

| RSSI (dBm) | PER |
|------------------------|--------|
| Nível de Sensibilidade | 1,0 |
| +1 | 0,8 |
| +2 | 0,4 |
| +3 | 0,15 |
| +4 | 0,03 |
| +5 | 0,006 |
| +6 | 0,0015 |
| +7 | 0 |

Fonte: Obtido a partir de (PRANDO et al., 2019).

Quanto às comunicações LoRaWAN, as simulações utilizam a taxa de dados adaptativa, do inglês *Adaptive Data Rate* (ADR) e, assim, otimizam o tempo de antena, a potência e a taxa de dados. Tal comportamento se baseia na otimização do fator de espelhamento e da potência de transmissão, de modo a garantir que um *gateway* receba as mensagens transmitidas, minimizando simultaneamente o tempo de antena e a potência consumida pelos dispositivos. Embora existam alternativas, como a seleção de um SF aleatório a uma potência de transmissão fixa, as simulações preliminares demonstraram que a ADR proporciona os melhores resultados e, por isso, neste trabalho, não se considera outras alternativas. Na análise preliminar utilizando a ADR, observa-se que o SF foi distribuído para um *gateway* LoRaWAN de tal forma que para $SF \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$ obteve-se, os percentuais em que cada SF foi selecionado, que são respectivamente, 87,62%, 5,42%, 4,18%, 2,53%, 0,25% e 0,00%. Para quatro *gateways*, quase todos os pacotes tiveram um $SF = 7$.

A rede LoRaWAN é composta por β *gateways* com \mathcal{C} canais de escuta. Cabe ressaltar que o número de canais que cada *gateway* é capaz de ouvir está relacionado com o *hardware* utilizado, aumentando o custo à medida que o número de canais aumenta. Além disso, uma vez que existem 6 SF disponíveis e como assume-se que o SF é ortogonal, ter um grande número de canais de escuta não significa necessariamente que o *gateway* será capaz de operar simultaneamente em todas as combinações de canais e SF, caso contrário seria necessário uma grande quantidade de demoduladores LoRa simultâneos. Assume-se também nós LoRaWAN Classe A, que são os mais comum em implantações reais além de permitir a utilização de mensagens confirmadas e não confirmadas.

Devido às taxas de dados relativamente baixas em combinação com as restrições do ciclo de trabalho, assumimos que não há reconhecimentos de ponta a ponta para

ambas as tecnologias, o que resulta na tecnologia LoRaWAN não tendo condições para retransmissão de mensagens

Ademais, devido às taxas de dados relativamente baixas em combinação com restrições do ciclo de trabalho, do inglês *duty cycle* (RAZA et al., 2016), assume-se que não há *acknowledgement* de ponta-a-ponta para ambas as tecnologias, resultando em simulações onde não é permitido que o LoRAWAN retransmita os pacotes perdidos. Destaca-se também que operar em um modo confirmado consome rapidamente os recursos do *downlink*, que são mais limitados quando comparados aos recursos de *uplink*, e pode até comprometer o desempenho do *uplink* (POP et al., 2017). Para ser considerada como perdida, uma mensagem transmitida não deve ser recebida por todos os APs disponíveis, que são chamados de *gateways* na pilha do protocolo LoRaWAN. Assim, as mensagens são enviadas diretamente do nó para os *gateways*. O comportamento da colisão da comunicação LoRaWAN segue uma abordagem semelhante à apresentada em (BOR et al., 2016), de tal forma que todas as seguintes condições devem ser satisfeitas para se ter uma colisão de uma determinada mensagem:

- Sobreposição da recepção: a recepção do pacote deve se sobrepor a um ou mais pacotes;
- Frequência da portadora: a frequência da portadora deve se sobrepor a um ou mais pacotes;
- Fator de espalhamento: assume-se que os SF no LoRaWAN são ortogonais, de tal forma que qualquer pacote que colida deve ter o mesmo SF;
- Potência: o LoRa exhibe o efeito de captura em que, quando dois sinais são recebidos simultaneamente, o sinal mais fraco é suprimido pelo sinal mais forte. Assume-se que é necessária uma diferença de 3 dB entre os pacotes recebidos para que o sinal mais forte seja capturado, o que é um valor razoável (LIAO et al., 2017).

Para a comunicação LoRaWAN, a sensibilidade varia com o fator de propagação, como se pode ver na Tabela 2. Os valores para SF = 7 e SF = 12 foram obtidos de (PRANDO et al., 2019), e os valores restantes foram obtidos por meio de interpolação linear simples entre os valores máximo e mínimo⁶. Para todos os pacotes não colidentes, a PER é obtida semelhantemente ao realizado para o 6TiSCH, de modo que a conversão

⁶Tal abordagem de interpolação linear é muito semelhante àquela vista em *datasheets*, como mostrado em (SEMTECH, 2019b, Table 1).

RSSI para PER foi obtida a partir dos resultados apresentados em (PRANDO et al., 2019, Fig. 5). Considera-se também uma taxa de codificação fixa de 4/6, utilizada para calcular o tempo de antena, a fim de manter-se próxima da sensibilidade obtida em (PRANDO et al., 2019). Assim, para um dado SF, a PER final dos pacotes não colidentes é calculada utilizando a Tabela 2 para ajustar o RSSI mínimo na Tabela 3. Como exemplo, para $SF = 11$, os valores RSSI na Tabela 3 variam entre $-125,82$, com a $PER = 1$, e $-120,82$, com a $PER = 0$.

Tabela 2 – Sensibilidade LoRaWAN

| SF | 125 kHz (dBm) |
|----|---------------|
| 7 | -114,97 |
| 8 | -117,68 |
| 9 | -120,39 |
| 10 | -123,11 |
| 11 | -125,82 |
| 12 | -128,53 |

Fonte: Adaptado de (PRANDO et al., 2019).

Tabela 3 – LoRaWAN - Conversão RSSI para PER

| RSSI (dBm) | PER |
|------------------------|--------|
| Nível de Sensibilidade | 1,0000 |
| +1 | 0,85 |
| +2 | 0,30 |
| +3 | 0,035 |
| +4 | 0,003 |
| +5 | 0 |

Fonte: Adaptado de (PRANDO et al., 2019).

Na Tabela 4 são resumidas as principais características de ambos os protocolos. A topologia e o alcance típico indicam que, enquanto a tecnologia LoRaWAN é capaz de alcançar distâncias mais longas com um único salto, a tecnologia 6TiSCH é capaz de superar esse problema por meio da utilização de múltiplos saltos. Porém, embora seja flexível, a utilização de múltiplos saltos aumenta a latência e exige que existam múltiplos nós disponíveis para retransmitir os dados. Da perspectiva da taxa de bits⁷ e do ciclo de

⁷A taxa de bits para o protocolo LoRaWAN varia de acordo com o SF e a largura de banda, do inglês *bandwidth*, BW (SEMTECH, 2019a), a qual, para a modulação LoRa, chega ao seu máximo de 27 kbps usando $SF = 7$ e $BW = 500$ kHz. Já para o 6TiSCH, com a alteração em IEEE 802.15.4g, a taxa de bit para as faixas inferiores a GHz variam entre 50 kbps e 800 kbps (IEEE, 2012), de forma que as taxas de bit são significativamente maiores do que o LoRaWAN.

trabalho⁸, o 6TiSCH é mais adequado sempre que for necessário transmitir grandes fluxos de dados. No entanto, o protocolo MAC TSCH requer sincronização, de modo que manter a sincronização em longos períodos sem transmitir quaisquer dados úteis possa não ser desejado. Desta forma, pode-se concluir que o protocolo LoRaWAN é adequado para pequenos pacotes de dados enviados apenas algumas vezes por dia, enquanto o protocolo 6TiSCH é mais desejável sempre que seja necessário que o dispositivo envie atualizações frequentes. No entanto, notando que ambas as tecnologias são abrangidas pela família LPWAN, em muitos casos qualquer uma das duas tecnologias pode ser utilizada, tais como em cidades inteligentes, contadores inteligentes, agricultura inteligente, entre outras.

Tabela 4 – Características do 6TiSCH e do LoRaWAN

| Característica | 6TiSCH | LoRaWAN |
|---|---|---|
| Topologia | Malha | Estrela |
| Alcance típico | Centenas a milhares de metros por salto | Dezenas de quilômetros (SEMTECH, 2019a) |
| Taxa de bit típica | 50-800 kbps | 980-21900 bps |
| Protocolo MAC | TSCH | ALOHA |
| Limitações típicas de ciclo de trabalho | Reduzidas devido ao salto de canal | 1% |

Fonte: Autoria própria.

Por fim, especificamente para o cenário de comparação entre os protocolos 6TiSCH e LoRAWAN, é importante ressaltar que é muito difícil, se de fato possível, definir uma configuração completamente justa ao considerar ambas tecnologias que foram concebidas com metodologias e objetivos diversos. Além disso, há situações em que apenas uma das tecnologias é aplicável e, portanto, uma comparação não faria sentido. No entanto, os melhores esforços foram direcionados para a definição de um cenário razoável que pudesse conduzir a uma visão útil sobre a comparação entre elas. É importante ressaltar que não há estudos que façam uma comparação direta entre as duas tecnologias de forma justa e realista.

⁸A restrição de ciclo de trabalho é ditada por corpos regulatórios em cada região. No Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações não restringe ciclo de trabalho para dispositivos LoRaWAN (ANATEL, 2017), mas por exemplo, o ciclo de trabalho é de 1% na União Europeia para dispositivos LoRaWAN (CASTELLS-RUFAS et al., 2018). Enquanto ambos protocolos sofrem por tais restrições, o 6TiSCH tem a habilidade de reduzir tais efeitos utilizando o salto de canais, do inglês *channel hopping*, com um alto número de canais.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados numéricos a fim de determinar a escalabilidade de cada tecnologia de comunicação, bem como métricas de desempenho dos protocolos abordados. Este capítulo está dividido em duas seções. Na Seção 4.1, são apresentados os resultados obtidos pela comparação entre os protocolos LoRaWAN e 6TiSCH em termos de taxa de erro de pacote e latência. Já na Seção 4.2, são apresentados os resultados de simulações especificamente para o protocolo 6TiSCH para as métricas de taxa de erro de pacote, análise de tipos de erros e latência quando são variados os parâmetros como tamanho da fila, número de tentativas de transmissão e número de canais.

4.1 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TECNOLOGIAS LORAWAN E 6TISCH

Para a comunicação 6TiSCH assume-se $\mathcal{T} = 101$, que é o padrão em 6TiSCH (VILAJOSANA et al., 2017), com uma duração de cada intervalo, do inglês *slot*, de 0,04 s, o que resulta em um *slotframe* com 4,04 s. Isto significa que os *slotframes* irão se repetir aproximadamente a cada 4 s. Tal duração de intervalo foi escolhida de modo a permitir que cada *slot* acomodasse o tamanho máximo do pacote de IEEE 802.15.4, ou seja, 127 bytes, seguido de um *acknowledgement*, a 50 kbps. Note que a duração do intervalo tem impacto direto na latência para a comunicação 6TiSCH. No caso de LoRaWAN, assume-se que a ADR é utilizada para otimizar a potência e a atribuição do SF. Para ambas as tecnologias, admite-se um tamanho de palavra útil, do inglês *payload*, de 20 bytes. Este comprimento de pacote contribui para a redução do tempo de antena, atenuando assim, as restrições do ciclo de trabalho. Para o 6TiSCH, isso significa que apenas uma fração da duração do intervalo será utilizada para transmitir cada mensagem. A menos que seja afirmado o contrário, assume-se também $\mathcal{C} = 8$ para ambas as tecnologias, de modo a manter uma comparação justa em termos de utilização total da BW do canal. Além disso, para o 6TiSCH o tamanho da fila de transmissão é definido para $\mathcal{Q} = 10$.

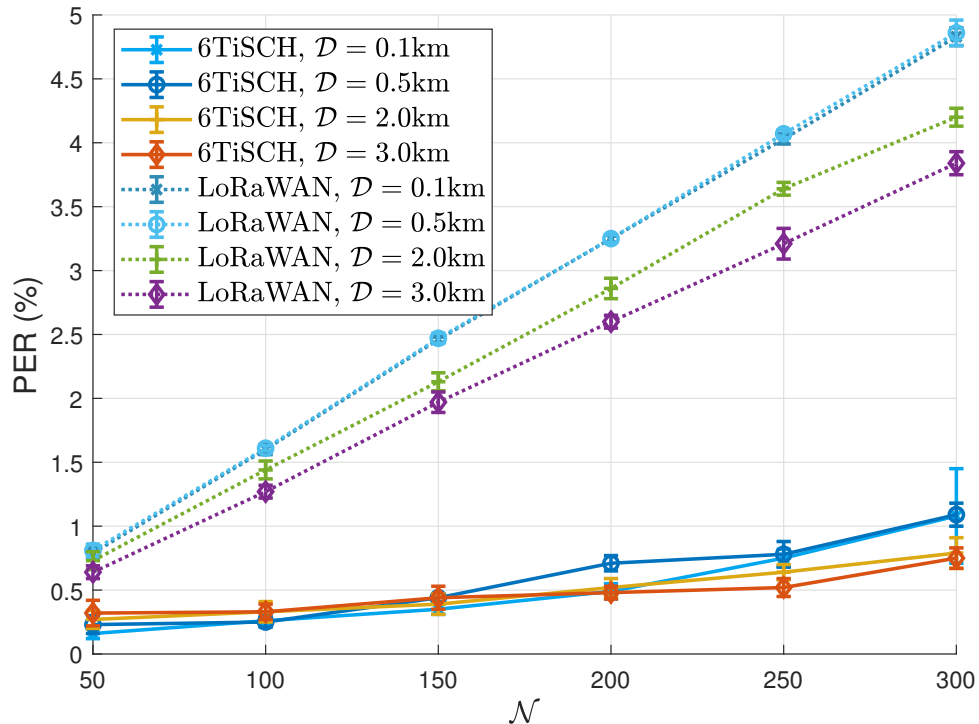
Cada resultado nesta seção foi obtido por meio da média de dezenas de simulações, cada uma com as suas próprias posições de nós geradas uniformemente e aleatoriamente na área disponível e com um tempo total de simulação de 24240 segundos, o que se traduz em 6000 *slotframes* para a tecnologia 6TiSCH. Para a simulação do 6TiSCH, há uma período de preparação em que a simulação aguarda todos os nós se juntarem à rede,

o que significa que os 24240 segundos em tempo de simulação só são contados após esse período. Além disso, é traçado também o intervalo de confiança de 95,5%, a fim de se ter uma melhor percepção dos resultados obtidos. A menos que seja indicado contrário, a taxa de transmissão de pacotes por nó segue a distribuição de Poisson com um pacote a cada $t = 1$ minuto em média. Tal atualização é semelhante à utilizada em (PALATTELLA et al., 2016) e corresponde a situações como a verificada nas redes *WirelessHART*.

Na Figura 5 é apresentada a PER em função do número de nós, \mathcal{N} , para as tecnologias de comunicação LoRaWAN e 6TiSCH, com $\mathcal{T} = 101$, $\mathcal{R} = 2$, e $\beta = 1$. Utilizando a tecnologia LoRaWAN, até à distância de 3,0 km, não há perdas de pacotes causadas pela perda de percurso devido à sua alta sensibilidade e, portanto, todas as perdas mostradas nesta figura resultaram da colisão de pacotes. Os resultados mostram que, enquanto o RSSI estiver 5 dB acima do nível de sensibilidade, LoRaWAN tem melhor desempenho em áreas maiores. Tal resultado reflete o comportamento da ADR: enquanto se tenta minimizar o consumo de energia e o tempo de antena e de forma mais importante, se obter uma comunicação livre de erros (0% de PER) de acordo com a Tabela 3, o SF é melhor distribuído para longas distâncias, significando que há menos colisões. Além disso, não foi observada diferença entre os resultados obtidos para $\mathcal{D} = 0,5$ km e $\mathcal{D} = 0,1$ km, que ocorre pelo fato de que, para ambas as áreas, todas as transmissões foram realizadas utilizando SF = 7.

Em relação aos resultados do protocolo 6TiSCH na Figura 5, para $\mathcal{N} = 50$, uma área menor resulta em um desempenho melhor. Conforme \mathcal{N} aumenta, tal comportamento muda de forma que, para $\mathcal{N} = 300$, $\mathcal{D} = 3$ km representa melhor performance. Tais resultados são justificados pela topologia em malha e o comportamento da colisão. Para $\mathcal{N} = 50$, uma área mais ampla significa que a probabilidade de ter um nó pai com alta relação sinal-ruído, do inglês *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) é mais baixa, o que aumenta a PER. A mesma observação se aplica também para para $\mathcal{N} = 300$, porém neste caso a probabilidade de colisão também aumenta significativamente para pequenas áreas devido ao alto número de nós, de tal forma que o melhor resultado foi obtido para $\mathcal{D} = 3,0$ km. Ainda, ao comparar os resultados do LoRaWAN e do 6TiSCH nesta figura, para todas as distâncias 6TiSCH apresenta um desempenho melhor, por exemplo, para $\mathcal{D} = 3,0$ km e $\mathcal{N} = 300$, a PER é cerca cinco vezes melhor ao se utilizar o protocolo 6TiSCH. Também pôde ser observado nos resultados das simulações que, mesmo para pequenas áreas como para $\mathcal{D} = 0,1$ km, o número médio de saltos para a comunicação em malha do 6TiSCH usando OF0 é maior que um. Mais precisamente, considerando $\mathcal{N} = 150$ e para $\mathcal{D} = 0,1$ km e $\mathcal{D} = 3,0$ km, o número médio de saltos são, respectivamente, 2,2 e 2,5. Por fim, foi

Figura 5 – PER em função de \mathcal{N} para os protocolos LoRaWAN e 6TiSCH para $\mathcal{R} = 2$ e $\beta = 1$



Fonte: Autoria própria.

verificado que, enquanto a principal causa de perda de pacotes na comunicação LoRaWAN é devido à colisão, para 6TiSCH, enquanto as colisões ainda acontecem, também existem perdas de pacotes devido à saturação nas filas de transmissão.

Na Figura 6 é apresentada a PER em função do total de pacotes por minuto (N/t), com o intuito de investigar como a taxa de transmissão de pacotes influencia os resultados obtidos para as tecnologias de comunicação LoRaWAN e 6TiSCH. Considera-se na Figura 6 que t representa o tempo, com $\mathcal{T} = 101$, $\mathcal{R} = 2$, e $\beta = 1$.

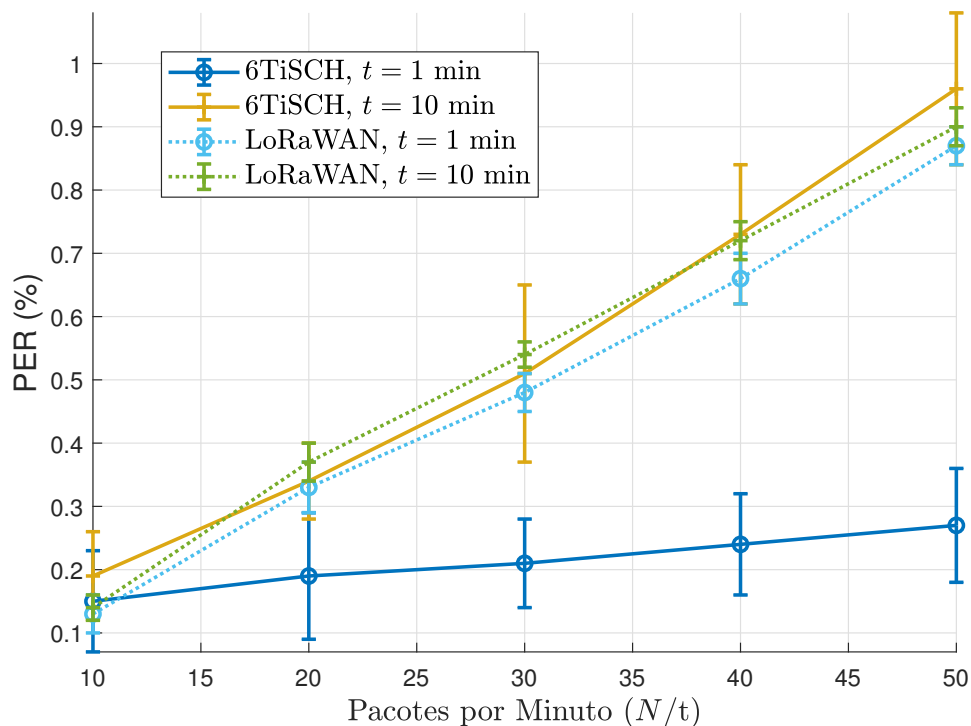
Para $t = 1$ min $N/t \in \{10, 20, 30, 40, 50\}$ corresponde a $\mathcal{N} \in \{10, 20, 30, 40, 50\}$. Já para $t = 10$ min, $N/t \in \{10, 20, 30, 40, 50\}$ corresponde a $\mathcal{N} \in \{100, 200, 300, 400, 500\}$. Nos resultados apresentados pode ser visto que, para um dado valor de N/t , há um impacto mínimo no desempenho para o protocolo LoRaWAN conforme \mathcal{N} e t aumentam proporcionalmente. Por exemplo, para $N/t = 30$ com $\mathcal{N} = 30$ e com $t = 1$ min, tem-se um PER = 0,48%. Já para $N/t = 30$ com $\mathcal{N} = 300$ e com $t = 10$ min tem-se um PER = 0,54%. A diferença representa um aumento de aproximadamente 12% e tal resultado pode ser justificado pelo fato de a rede LoRaWAN utilizar topologia em estrela, em que cada nó

não depende de seus vizinhos para transmitir mensagens e manter a rede. Assim como para a tecnologia 6TiSCH, existe um queda significativa de desempenho quando \mathcal{N} e t aumentam proporcionalmente.

A mesma análise da Figura 6 pode ser feita para 6TiSCH, onde para $N/t = 30$, $\mathcal{N} = 30$ com $t = 1$ min tem-se uma $PER = 0,21\%$. Já para, $N/t = 30$, $\mathcal{N} = 300$ com $t = 10$ min tem-se uma $PER = 0,51\%$, resultando no que representa um aumento de aproximadamente 143%. Tal resultado deve-se ao fato de tanto o número de pacotes necessários para manter a topologia em malha como o número médio de saltos aumentar com o tamanho da rede.

Como exemplo, para um valor fixo de $N/t = 30$ com $\mathcal{N} = 300$ tem-se 65% mais pacotes de aplicação sendo transmitidos na rede quando comparado com $\mathcal{N} = 30$ devido ao aumento do número médio saltos para atingir o nó raiz. Tal comportamento contribui para quedas de pacotes devido a colisões e filas cheias aumentando a PER total.

Figura 6 – PER em função dos pacotes por minuto (N/t) para os protocolos LoRaWAN e 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km and $\beta = 1$



Fonte: Autoria própria.

Para se ter uma impressão do aumento do desempenho de ambas as tecnologias devido a diferentes configurações, na Figura 7 é apresentada a PER em função de \mathcal{N} com

$\mathcal{D} = 2$ km para diferentes valores de β e \mathcal{R} . Para a tecnologia LoRaWAN, utilizar um único *gateway* representa uma PER elevada à medida que o número de nós aumenta. No entanto, o aumento de β melhora significativamente o desempenho da rede, de tal forma que, $\mathcal{N} = 600$ e $\beta = 2$ resulta em um desempenho cerca de 2 vezes melhor do que o obtido com $\beta = 1$, enquanto que o aumento de 2 para 4 resulta num desempenho cerca de 4 vezes melhor. Tal comportamento é explicado principalmente devido ao esquema ADR, que otimiza a transmissão para o *gateway* com a SNR mais elevada. Contudo, é importante notar que os *gateways* requerem hardware mais caros, bem como um enlace comunicação de alta velocidade para transmitir a informação obtida para o servidor da rede. Ademais, o aumento do número de pontos de acesso para 6TiSCH não foi investigado devido ao fato de que cada nó necessitaria estar em dois ou mais DODAG, que por sua vez significa uma demanda de *hardware* mais complexa para cada nó da rede, a fim de transmitir de maneira eficaz as mensagens para o destino pretendido.

Para a tecnologia 6TiSCH, o parâmetro \mathcal{R} é variado e apresenta resultados para $\mathcal{R} \in \{0, 2, 5\}$. Os resultados são significativamente piores para $\mathcal{R} = 0$, ou seja, onde não há retransmissões, quando comparados com $\mathcal{R} = 2$ e $\mathcal{R} = 5$, onde há respectivamente 2 e 5 retransmissões. Isto indica que 6TiSCH é muito dependente do procedimento de retransmissão para funcionar corretamente, particularmente à medida que \mathcal{N} aumenta.

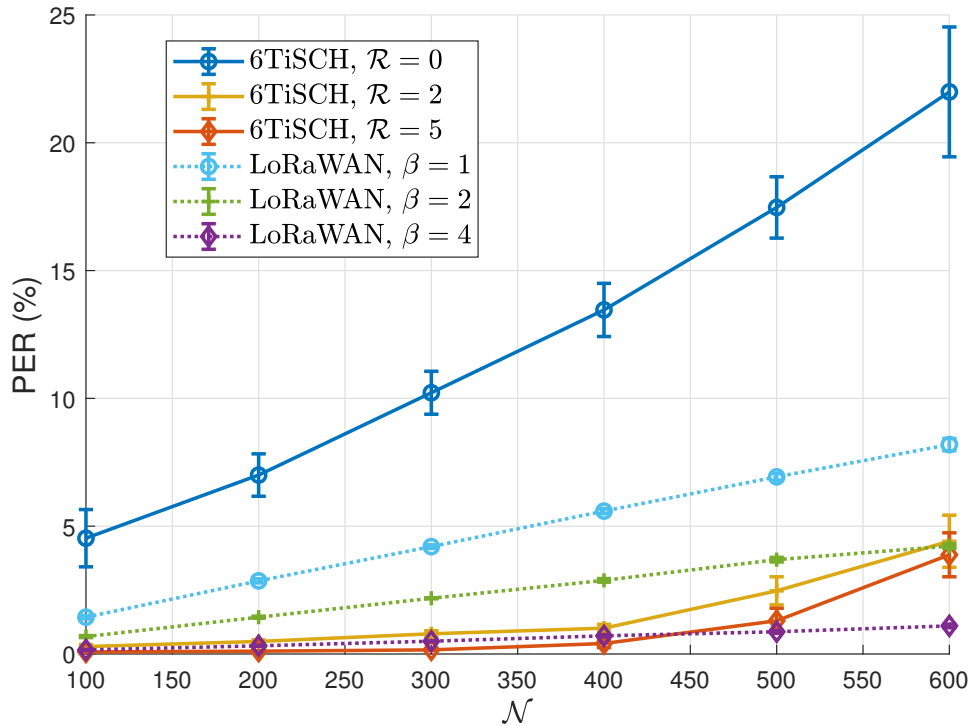
Para um cenário com $\mathcal{N} = 400$, aumentar \mathcal{R} de 0 para 2 resulta numa PER 13 vezes menor, enquanto que alterar \mathcal{R} de 2 para 5 significa uma PER 2,5 vezes menor. Isto indica que aumentar \mathcal{R} indefinidamente pode não ser sempre a melhor abordagem para diminuir a PER. Os resultados ainda demonstram que, até $\mathcal{N} = 400$, o 6TiSCH com $\mathcal{R} = 5$ obtém resultados ligeiramente melhores que o LoRaWAN com $\beta = 4$. Porém, à medida que o número de nós aumenta, LoRaWAN supera 6TiSCH para tal configuração.

Em um cenário onde $\mathcal{N} = 500$ com $\mathcal{R} = 2$ e $\beta = 2$, o 6TiSCH obtém resultados próximos dos vistos para LoRaWAN, demonstrando que existem cenários plausíveis em que ambas as tecnologias são aproximadamente equivalentes.

Para este conjunto de cenários variados, tais resultados indicam que a tecnologia LoRaWAN escala melhor se não houver limitações associadas ao número de *gateways* instalados.

A fim de avaliar melhor quais as configurações de 6TiSCH que podem demonstrar melhores resultados à medida que a rede ganha escala, na Figura 8 é apresentada a PER em função de \mathcal{N} com $\mathcal{D} = 2$ km para diferentes valores de \mathcal{T} e \mathcal{Q} . Tais escolhas foram motivadas para lidar com as perdas de pacotes devido a filas de transmissão cheias e

Figura 7 – PER em função de \mathcal{N} para os protocolos LoRaWAN e 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e diferentes valores de \mathcal{R} e β

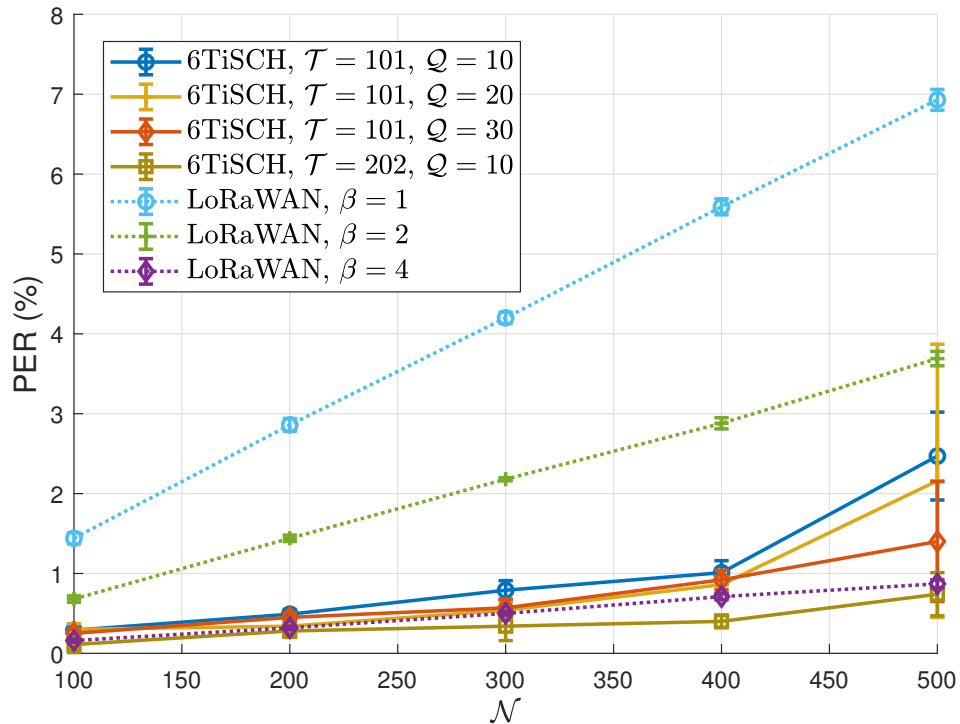


Fonte: Autoria própria.

perdas devido a colisões. À título de comparação, também são traçados mais uma vez os resultados para diferentes valores de β para o protocolo LoRaWAN. Dos resultados apresentados, pode-se ver que o aumento do tamanho da fila resultou em menos quedas de pacotes à medida que \mathcal{N} aumenta, com o custo de memória extra necessário para manter filas maiores. No entanto, o aumento do *slotframe* teve um maior impacto nos resultados, com o custo de uma maior latência. Para $\mathcal{N} = 300$, enquanto o aumento do tamanho da fila Q de 10 para 20 resultou numa diminuição da PER de 32%, o aumento do comprimento do *slotframe* \mathcal{T} de 101 para 202 resultou numa diminuição na PER de 57%. Além disso, o aumento do comprimento da *slotframe* nesta figura resultou em menos perdas de pacotes devido a colisões e mais quedas de pacotes devido a filas saturadas, com uma PER mais baixa como saldo. Para $\mathcal{N} = 400$, enquanto $\mathcal{T} = 101$ resultou em 76% e 24% das perdas devido, respectivamente, a colisões e filas saturadas, para $\mathcal{T} = 202$, as colisões motivaram 16% das perdas, enquanto que as filas saturadas foram a razão dos 84% restantes. Este é um resultado razoável, pois embora um \mathcal{T} mais elevado não aumente necessariamente o número de células atribuídas por um determinado nó, representa um conjunto maior de células disponíveis para alocação de intervalos, minimizando a interferência entre dois

pares de nós distintos. Tais resultados demonstram que, se uma maior latência for permitida, o aumento do comprimento do *slotframe* poderá ser uma melhor abordagem para diminuir a PER ao invés de aumentar o tamanho da fila.

Figura 8 – PER em função de \mathcal{N} para os protocolos LoRaWAN e 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e $\mathcal{R} = 2$ e diferentes valores de \mathcal{Q} e β

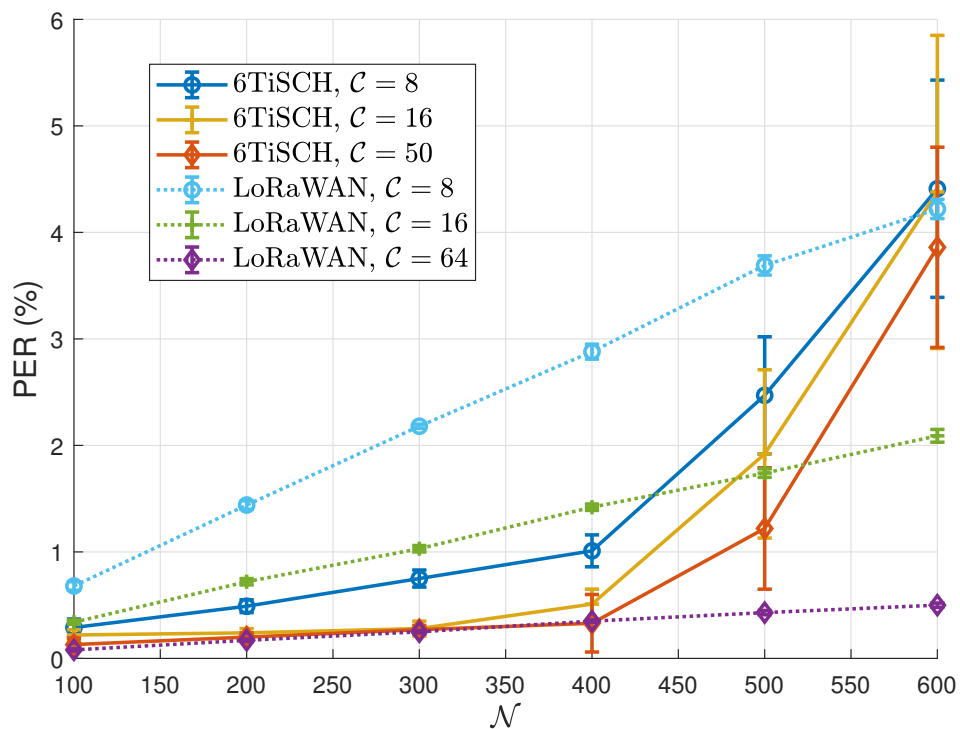


Fonte: Autoria própria.

Para avaliar a influência do número de canais, na Figura 9 compara-se a PER em função de \mathcal{N} com $\mathcal{R} = 2$, $\beta = 2$, e para vários valores de \mathcal{C} . Para a tecnologia LoRaWAN, assume-se que $\mathcal{C} \in \{8, 16, 64\}$, que está de acordo com o *hardware* disponível para os *gateways* em relação à quantidade de canais que cada *gateway* pode escutar simultaneamente. Para o 6TiSCH, foi escolhido $\mathcal{C} \in \{8, 16, 50\}$ para que se possam ser comparados parcialmente os resultados com LoRaWAN, mas também incluindo a exigência de 50 canais de salto para cumprir com as restrições regulamentares, tais como as impostas pela FCC §15.247 (CASTELLS-RUFAS et al., 2018), da Comissão Federal de Comunicações, do inglês *Federal Communications Commission* (FCC). A partir dos resultados apresentados, pode-se ver que o aumento do número de canais diminui a PER de tal forma que há menos colisões. Também pode ser visualizado que até $\mathcal{N} = 400$, ambas as tecnologias têm aproximadamente os mesmos resultados com $\mathcal{C} = 50$ e $\mathcal{C} = 64$ para, respectivamente, 6TiSCH e LoRaWAN. Ademais, o 6TiSCH tem melhores resultados até

$\mathcal{N} = 400$, em que o tamanho da fila de transmissão começa a ficar muito pequena para retransmitir as mensagens na rede em malha, resultando em um aumento significativo da PER. É importante notar que o LoRaWAN não tem tais problemas de retransmissão, uma vez que opera numa topologia estrela. Por outro lado, embora a utilização de 64 canais para o LoRaWAN resulte em um aumento de custos associado ao hardware de *gateway*, não há custo extra de aumentar \mathcal{C} para 6TiSCH.

Figura 9 – PER em função de \mathcal{N} os protocolos LoRaWAN e 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km, $\mathcal{R} = 2$, e $\beta = 2$, assumindo $\mathcal{C} \in \{8, 16, 64\}$ para LoRaWAN e $\mathcal{C} \in \{8, 16, 50\}$ para 6TiSCH

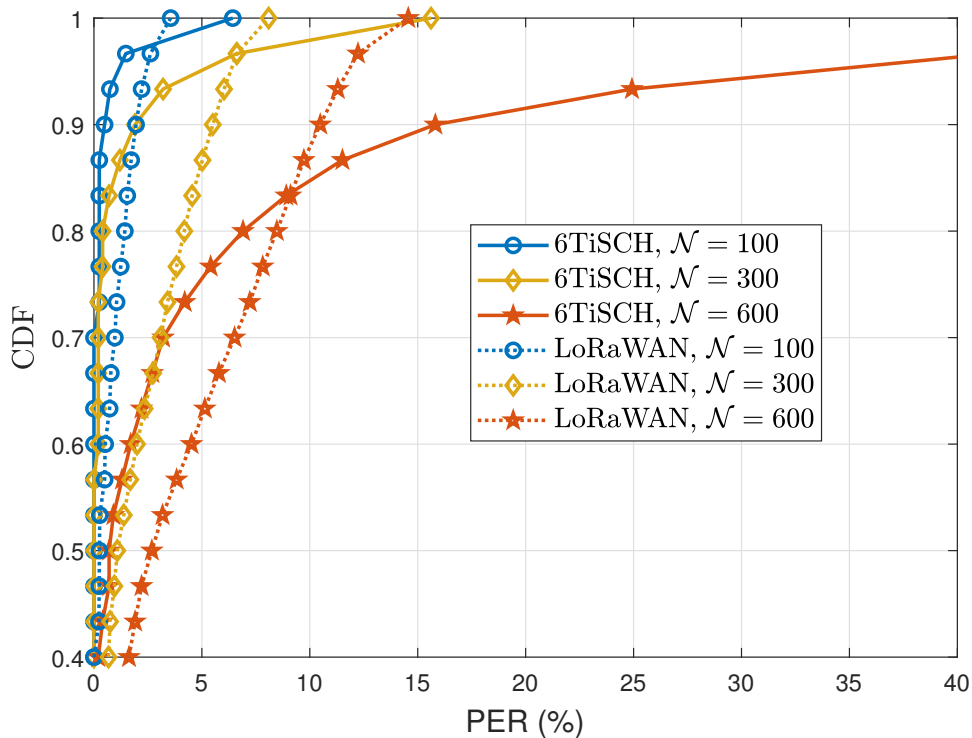


Fonte: Autoria própria.

Como a PER média não mostra o desempenho de cada nó individualmente, na Figura 10 é avaliada a PER em termos da função de distribuição cumulativa, do inglês *Cumulative Distribution Function* (CDF) para as tecnologias de comunicação LoRaWAN e 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km, $\mathcal{R} = 2$, $\mathcal{C} = 8$, $\beta = 2$, e $\mathcal{N} \in \{100, 300, 600\}$. Pela figura, pode-se verificar que para todos os valores de \mathcal{N} , existe um ponto de intersecção entre ambas as tecnologias. Para $\mathcal{N} = 100$ e $\mathcal{N} = 300$, este ponto de intersecção acontece em $CDF \approx 97\%$ com $PER = 2,62\%$ e $PER = 6,61\%$, respectivamente. Isto significa que, para 97% dos nós, há uma PER para o 6TiSCH que é inferior ao LoRaWAN, que está de acordo com o desempenho melhor do 6TiSCH para $\mathcal{N} \in \{100, 300\}$ e $\mathcal{C} = 8$ visto na Figura 9. No entanto, para $\mathcal{N} = 600$, a Figura 9 mostra que o LoRaWAN tem uma PER melhor. Comparando

tal resultado com o visto na Figura 10, pode ser visto que, para 84% dos nós, a PER foi inferior para 6TiSCH do que o visto para o LoRaWAN. Isto deve-se ao fato de que, para o 6TiSCH, havia cerca de 10% dos nós com uma PER superior a 15%, o que degrada significativamente a PER médio. Isto também indica que, embora os parâmetros dos nós 6TiSCH, como o tamanho da fila, fossem suficientemente bons para manter cerca de 90% dos nós com uma PER relativamente baixa, tais parâmetros não foram suficientes para todas as situações que contribuíram significativamente para o aumento da PER visto na Figura 9 para $\mathcal{N} = 600$. Finalmente, pode-se também visualizar que os resultados da PER para LoRaWAN são mais homogêneos do que os vistos para 6TiSCH.

Figura 10 – CDF em função da PER para os protocolos LoRaWAN e 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km, $\mathcal{R} = 2$, $\mathcal{C} = 8$, $\beta = 2$, e $\mathcal{N} \in \{100, 300, 600\}$



Fonte: Autoria própria.

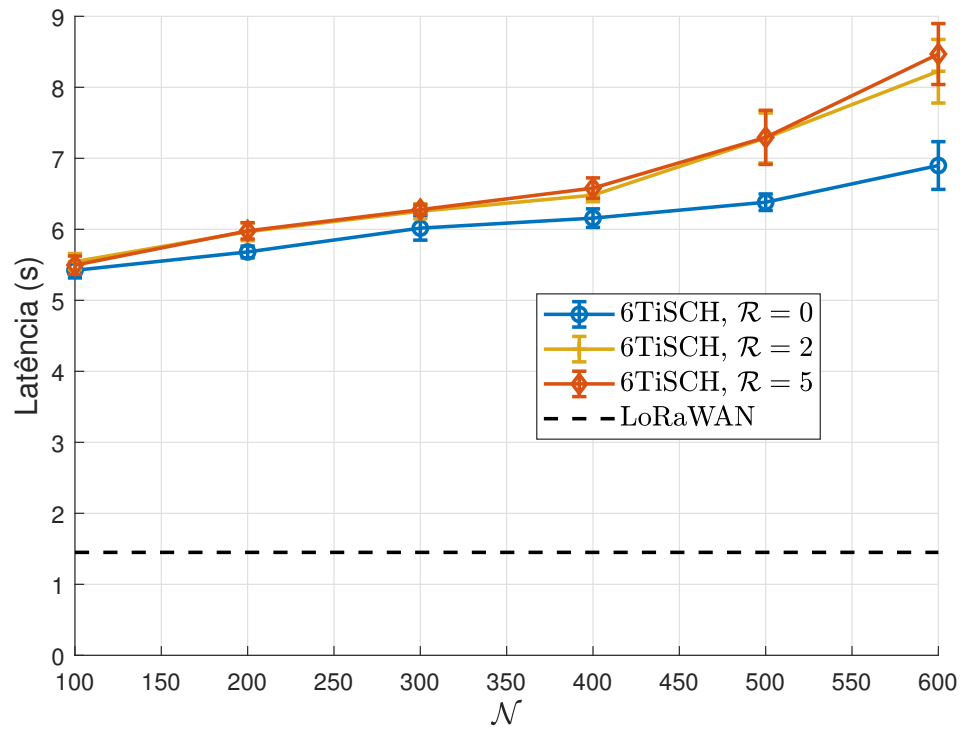
Ao contrário do LoRaWAN, que utiliza a topologia de estrela, o protocolo 6TiSCH utiliza a configuração em malha de tal forma que outro parâmetro importante é a latência, ou seja, o tempo que o pacote leva para chegar ao destino pretendido. A latência está associada ao número máximo de tentativas \mathcal{R} . Neste sentido, a Figura 11 mostra a latência em relação a \mathcal{N} para $\mathcal{R} \in \{0, 2, 5\}$ com $\mathcal{D} = 2$ km. Além disso, também é traçada uma linha reta em $S = 1,45$ s associada à tecnologia LoRaWAN, apenas como comparação do limite superior e indica o tempo de antena necessário para transmitir um pacote utilizando

SF = 12 com um canal de *uplink* de 125 kHz. Cabe notar que, nas simulações com $\mathcal{D} = 2$ km e $\beta = 1$, nenhuma transmissão utilizou SF = 12, menos de 1% utilizou SF = 11, e mais de 85% utilizou SF = 7. Em termos de ciclo de trabalho, isto é importante uma vez que, para uma restrição de 1%, um nó será permitido a enviar um pacote de 20 bytes aproximadamente 19 e 500 vezes por hora para, respectivamente, SF = 12 e SF = 7. Embora haja um aumento significativo na latência entre $\mathcal{R} = 0$ e $\mathcal{R} = 2$, há um pequeno aumento entre $\mathcal{R} = 2$ e $\mathcal{R} = 5$. Tal comportamento justifica-se porque o limite de $\mathcal{R} = 2$ foi suficiente para a maioria dos casos de perda de pacotes. Mais importante, para todos os valores de \mathcal{R} , a latência associada à tecnologia 6TiSCH foi pelo menos 3,7 vezes maior do que a necessária para a tecnologia LoRaWAN. Este comportamento acontece devido à topologia em malha da tecnologia 6TiSCH, que pode exigir vários saltos para transmitir a mensagem. Os resultados das simulações tiveram uma profundidade máxima de árvore de 5 e 7 para, respectivamente, $\mathcal{N} = 100$ e $\mathcal{N} = 600$, o que contribui para o aumento da latência visto nesta figura¹. Além disso, embora o número médio máximo de nós-filhos por simulação tenha aumentado com o aumento de \mathcal{N} , o máximo absoluto considerando todas as simulações foi aproximadamente o mesmo, resultando em um máximo de 25 nós-filhos por nó. Por fim, o aumento de \mathcal{N} diminuiu o número médio de nós-filhos, resultando em 1,16 nós-filhos por nó para $\mathcal{N} = 100$ e 1,03 nós-filhos por nó para $\mathcal{N} = 600$.

Por fim, observando a relação inerente entre a PER e a latência à medida que \mathcal{R} aumenta, na Figura 12 é apresentada a PER em função da latência para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{R} \in \{0, 2, 5\}$ e $\mathcal{D} = 2$ km. A partir dos resultados, pode ser verificado que, enquanto o aumento de \mathcal{R} diminui a PER, a latência aumenta. Para $\mathcal{N} = 300$, há uma diminuição significativa da PER entre $\mathcal{R} = 0$ e $\mathcal{R} = 2$, de 10,22% para 0,79%, mas há apenas um leve aumento da latência, de 6,01 s para 6,25 s, representando um aumento de 4%. No entanto, para $\mathcal{N} = 600$ o aumento da latência é mais relevante, de 6,90 s para 8,22 s, o que representa um aumento da latência de 19%. Tal diferença é explicada por dois efeitos: em primeiro lugar, o aumento em \mathcal{N} de 300 para 600 significa que o número médio de saltos por mensagem tende a aumentar; em segundo lugar, e talvez mais importante, uma rede mais densa resulta em uma PER por saltos mais elevada, havendo assim mais tentativas de retransmitir uma determinada mensagem, resultando em uma latência mais elevada. Finalmente, semelhante ao visto na Figura 11, a latência para $\mathcal{R} = 2$ e $\mathcal{R} = 5$ são semelhantes. No entanto, tais diferenças aumentam à medida que \mathcal{N} aumenta, por exemplo, 0,36% e 2,94% para, respectivamente, $\mathcal{N} = 300$ e $\mathcal{N} = 600$, que

¹A máxima profundidade de árvore na literatura é normalmente definida como 5 ou 6, como descrito em (HERMETO et al., 2018) e (HERMETO et al., 2019).

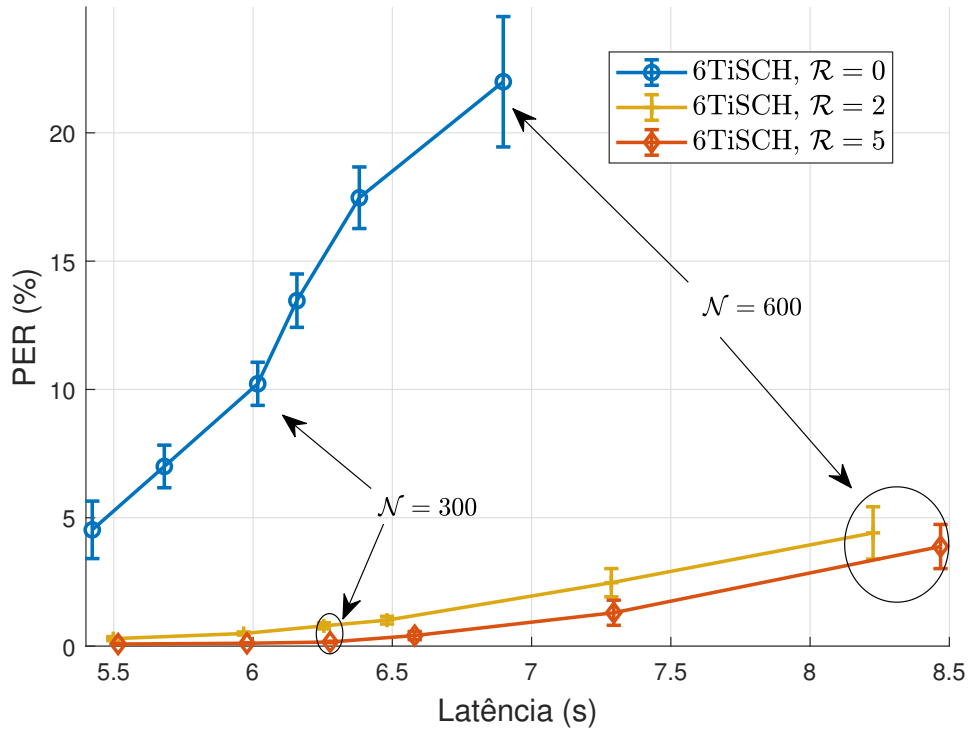
Figura 11 – Latência em função de \mathcal{N} para diferentes valores de \mathcal{R} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km



Fonte: Autoria própria.

é novamente resultado do aumento da necessidade das retransmissões reais.

Figura 12 – PER em função da latência para diferentes valores de \mathcal{R} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km



Fonte: Autoria própria.

4.2 ANÁLISE ESPECÍFICA DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS EM REDES 6TiSCH

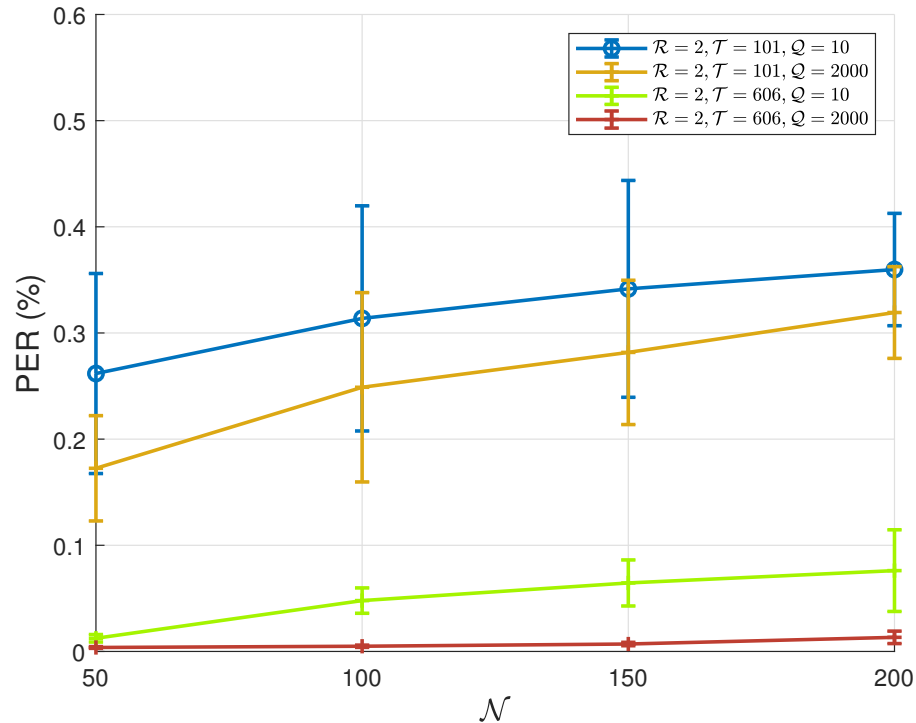
Esta seção aborda cenários adicionais de simulações e apresenta resultados numéricos com foco no desempenho do protocolo 6TiSCH, de forma mais específica, na análise de como a variação de parâmetros da rede como o número máximo de retransmissões, tamanho de fila e comprimento do *slotframe* influenciam na latência e na taxa de erro de pacote (PER) total e devido a causas específicas. No que diz respeito a estas falhas, verifica-se que os casos mais comuns de falhas de transmissão observados em simulações anteriores são erros resultantes por excesso de retransmissões e por fila de transmissão cheia. Para as simulações analisadas, são consideradas duas variações no comprimento do *slotframe*: $\mathcal{T} = 101$, com uma duração de slot de 0,04 s, resultando em um slotframe de 4,04 s, e $\mathcal{T} = 606$, com uma duração de slot de 0,04 s, resultando em um slotframe de 24,24 s. Isso implica que os slotframes se repetirão aproximadamente a cada 4 s e 24 s, respectivamente, para $\mathcal{T} = 101$ e $\mathcal{T} = 606$. As durações de intervalo mantêm a premissa de um tamanho máximo de pacote de 127 bytes, seguido de um *acknowledgement*, a uma taxa de 50 kbps. É importante ressaltar que a duração do *slot*

influencia diretamente a latência na comunicação 6TiSCH. Para este conjunto específico de simulações, é considerada uma combinação específica da variação de parâmetros pré-determinados, a menos que seja afirmado o contrário. Considera-se a variação do número de nós, $\mathcal{N} \in \{50, 100, 150, 200\}$. Também varia-se o número máximo de retransmissões em caso de perda de pacotes $\mathcal{R} \in \{2, 200\}$. Outro parâmetro alterado nas simulações é o tamanho da fila de transmissão, definido para $\mathcal{Q} \in \{10, 2000\}$. O parâmetro que estabelece a dimensão da área quadrada foi mantido em $\mathcal{D} = 2$ km, bem como o número de canais de escuta $\mathcal{C} = 8$ que também permanece inalterado neste conjunto de simulações.

Com o intuito de aprofundar a análise do desempenho visto nas Figuras 7 e 8 para o protocolo 6TiSCH em razão de diferentes configurações, nas Figuras 13 e 14 é apresentada a PER em função de \mathcal{N} com $\mathcal{D} = 2$ km para diferentes valores de \mathcal{Q} e \mathcal{T} , quando $\mathcal{R} = 2$ e $\mathcal{R} = 200$, respectivamente. Tal análise possibilita a avaliação do desempenho do sistema diante da variação de \mathcal{R} , \mathcal{Q} e \mathcal{T} , cujo aumento leva a uma redução PER, se traduzindo na melhoria do desempenho. Enquanto o aumento do número de retransmissões possibilita a redução da PER por meio da retransmissão de pacotes perdidos em cada salto, o aumento da fila contribui para a diminuição da PER ao ampliar a capacidade de armazenamento de pacotes destinados à transmissão em cada nó. Por sua vez, o aumento do comprimento do *slotframe* auxilia na redução das colisões entre as transmissões. A partir dos resultados apresentados na Figura 13, é possível constatar que para $\mathcal{R} = 2$, o aumento no comprimento do *slotframe* resulta em uma redução mais significativa da PER em comparação com o aumento da fila de transmissão. Ao aumentar o tamanho da fila em 200 vezes houve uma diminuição de até 1,52 vez para $\mathcal{T} = 101$ e de até 12 vezes para $\mathcal{T} = 606$ na PER, enquanto o aumento de 6 vezes no comprimento do *slotframe* resultou em uma diminuição de até 21 vezes para $\mathcal{Q} = 10$ e de até 55 vezes para $\mathcal{Q} = 2000$ na PER. Por outro lado, na Figura 14 observa-se que para $\mathcal{R} = 200$, o aumento da fila exerce uma influência mais pronunciada na redução da PER, ou seja, o tamanho da fila passou a ter um peso maior que a influência do comprimento do *slotframe*. Neste caso, ao aumentar o tamanho da fila em 200 vezes houve uma diminuição de até 1,85 vez para $\mathcal{T} = 101$ e de até 3,47 vezes para $\mathcal{T} = 606$ na PER, enquanto o aumento de 6 vezes no comprimento do *slotframe* resultou em uma diminuição de até 1,18 vezes para $\mathcal{Q} = 10$ e de até 2,34 vezes para $\mathcal{Q} = 2000$ na PER. Por fim, ao comparar as Figuras 13 e 14, observa-se que o aumento do número de retransmissões resulta em uma redução ainda mais significativa na PER.

A Figura 15 ilustra a análise da taxa de perda de pacote específica para erros causados pelo número máximo de retransmissões em função de \mathcal{N} , considerando $\mathcal{R} = 2$.

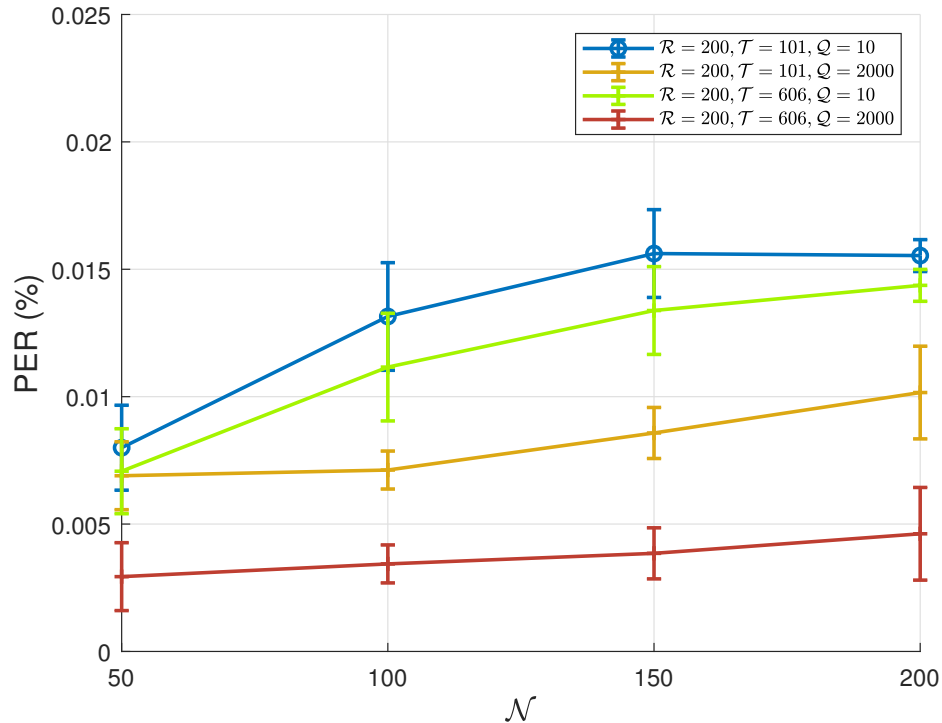
Figura 13 – PER em função de \mathcal{N} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e $\mathcal{R} = 2$ e diferentes valores de \mathcal{Q}



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que as simulações com um comprimento do *slotframe* $\mathcal{T} = 101$ perfazem uma maior taxa de erros de transmissão em relação ao número máximo retransmissões. Isto ocorre devido ao fato de que, para $\mathcal{T} = 606$, há um número menor de colisões, resultando em uma diminuição tanto na necessidade de retransmissão quanto no número de pacotes que falham devido ao limite de tentativas. Além disto, é importante destacar que este resultado indica a possibilidade de ocorrência de mais perdas relacionadas às filas de transmissão. Já para um valor elevado de \mathcal{Q} , o aumento da fila de mensagens permite a diminuição de pacotes descartados por fila cheia, resultando em uma diminuição de até 27% nos erros de transmissão. Na mesma figura, observa-se ainda que as simulações com $\mathcal{T} = 606$ apresentam uma PER por número máximo de retransmissões inferior, o que pode ser justificado pela melhoria na alocação dos *slots* e, que consequentemente reduz a taxa de erros de transmissão em relação a um comprimento do *slotframe* reduzido. Quanto ao aumento da fila de mensagens de $\mathcal{Q} = 10$ para $\mathcal{Q} = 2000$, os resultados das simulações demonstram uma PER menor, com uma redução de até 75%, confirmando que, em cenários com um comprimento do *slotframe* aumentado e consequente melhor alocação dos pacotes, o aumento da fila de mensagens influencia no sucesso da transmissão.

Figura 14 – PER em função de \mathcal{N} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e $\mathcal{R} = 200$ e diferentes valores de \mathcal{Q}

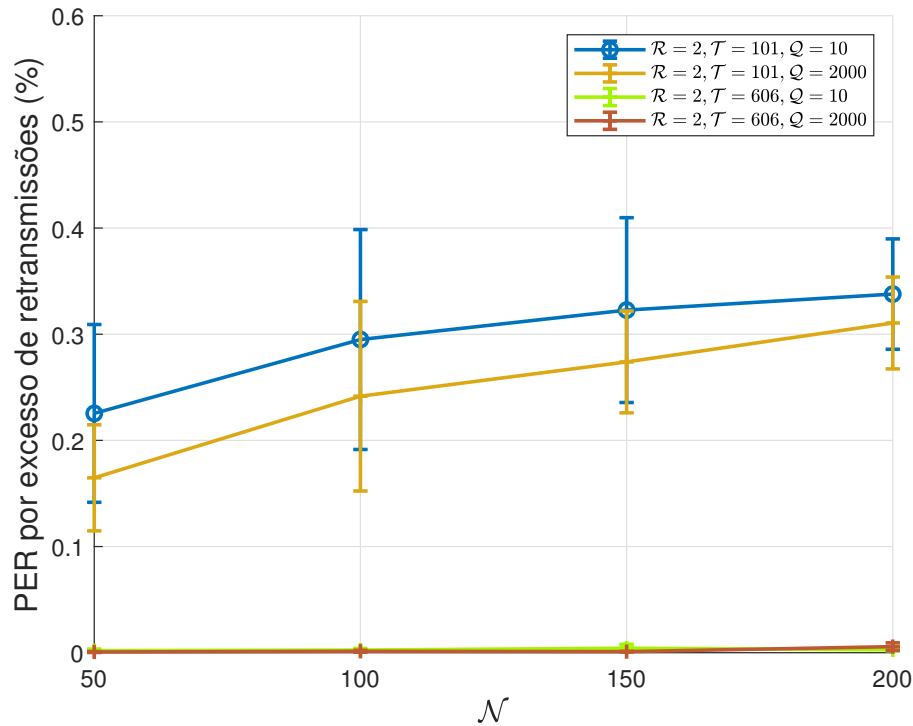


Fonte: Autoria própria.

As simulações para $\mathcal{R} = 200$ e $\mathcal{Q} = 2000$ não constituem análise gráfica relevante pois apresentaram, tanto para $\mathcal{T} = 101$ quanto para $\mathcal{T} = 606$, 0% de perdas de pacote por número máximo de retransmissões. Para $\mathcal{Q} = 10$ a taxa de erros de transmissão também é de 0% para $\mathcal{T} = 606$ e tende a 0% para $\mathcal{T} = 101$, em conformidade com a análise anterior para $\mathcal{R} = 2$, justificado novamente pela melhor alocação dos *slots* para $\mathcal{T} = 606$. O parâmetro $\mathcal{R} = 200$ se mostra suficiente para o sucesso de retransmissão em quase todas as simulações deste conjunto de parâmetros quando se observa erros causados por número máximo de retransmissões.

Na Figura 16 é apresentada a taxa de perda de pacote por fila cheia em função de \mathcal{N} com $\mathcal{Q} = 10$. Observa-se que, em contraste com o que é apresentado na Figura 15, uma menor taxa de erros de fila cheia ocorre com valores de \mathcal{T} reduzido. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de que, nas simulações com $\mathcal{T} = 101$ a frequência de erros por causa do número máximo de retransmissões é mais frequente do que com $\mathcal{T} = 606$. No entanto, assim como observado anteriormente na Figura 15, o aumento de \mathcal{T} contribui para uma melhor alocação e distribuição dos *slots* em comparação com $\mathcal{T} = 101$. Tal comportamento possibilita a transmissão oportuna das mensagens,

Figura 15 – PER causada por excesso no número de retransmissões em função de \mathcal{N} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e $\mathcal{R} = 2$ e diferentes valores de \mathcal{Q} e \mathcal{T}

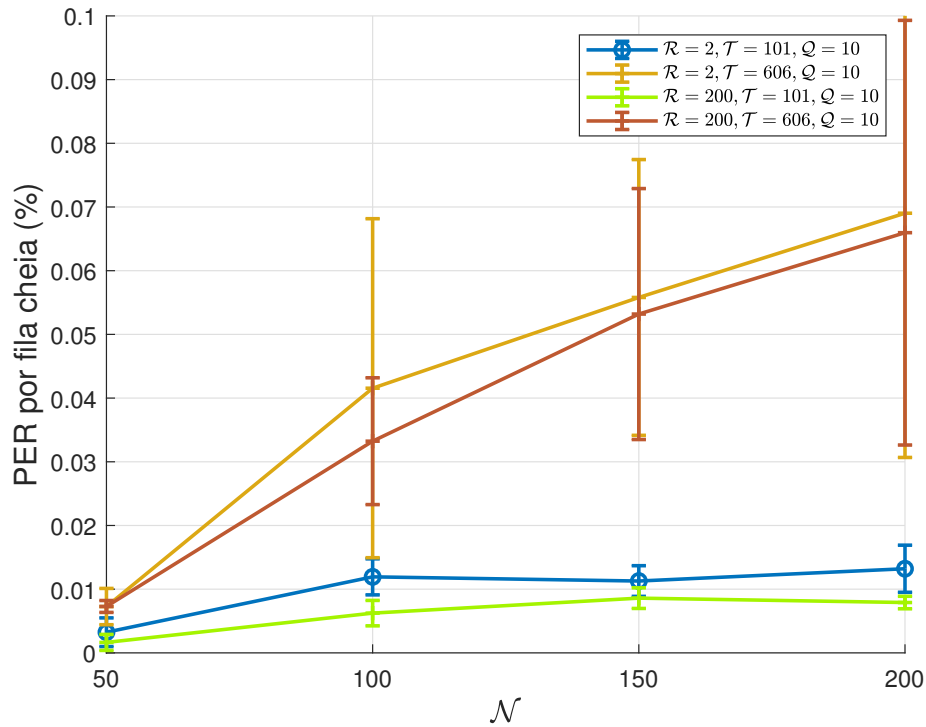


Fonte: Autoria própria.

ao diminuir a incidência de erros devido ao número máximo de retransmissões com $\mathcal{T} = 606$, mas resultando em uma acumulação de erros devido a fila de mensagens cheia, e conseqüentemente, uma maior taxa de erros. Em um cenário com $\mathcal{T} = 606$ observa-se também, como esperado, que o aumento de \mathcal{R} para retransmissões reduz a taxa de erros devido à fila cheia tanto para $\mathcal{T} = 101$ quanto para $\mathcal{T} = 606$. Para simulações com o $\mathcal{R} = 200$ e $\mathcal{T} = 606$, é observada uma diminuição de até 19% na taxa de erros por fila cheia em comparação com $\mathcal{R} = 2$ e $\mathcal{T} = 606$, o que pode ser atribuído ao número adicional de tentativas de retransmissão. Já para simulações com $\mathcal{R} = 200$ e $\mathcal{T} = 101$ observa-se uma redução da taxa de erros por fila cheia de até 50% em comparação com $\mathcal{R} = 2$ e $\mathcal{T} = 101$, também justificado pelo maior número de tentativas de transmissão. Ademais, ao aumentar o tamanho da fila de mensagens para $\mathcal{Q} = 2000$ tanto para $\mathcal{R} = 2$ e $\mathcal{R} = 200$ quanto para $\mathcal{T} = 101$ e $\mathcal{T} = 606$ não são identificados nas erros de transmissão causados por fila cheia simulações e, por isso, os resultados não necessitam ser ilustrados.

Os resultados representados na Figura 17 mostram a variação da latência em função de \mathcal{N} quando $\mathcal{T} = 101$. Pela figura, é possível verificar que a variação ascendente de \mathcal{N} e \mathcal{R} causam um leve aumento na latência, assim como já observado na Figura 11. A

Figura 16 – PER causada por fila cheia em função de \mathcal{N} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e $\mathcal{Q} = 10$ e diferentes valores de \mathcal{R} e \mathcal{T}

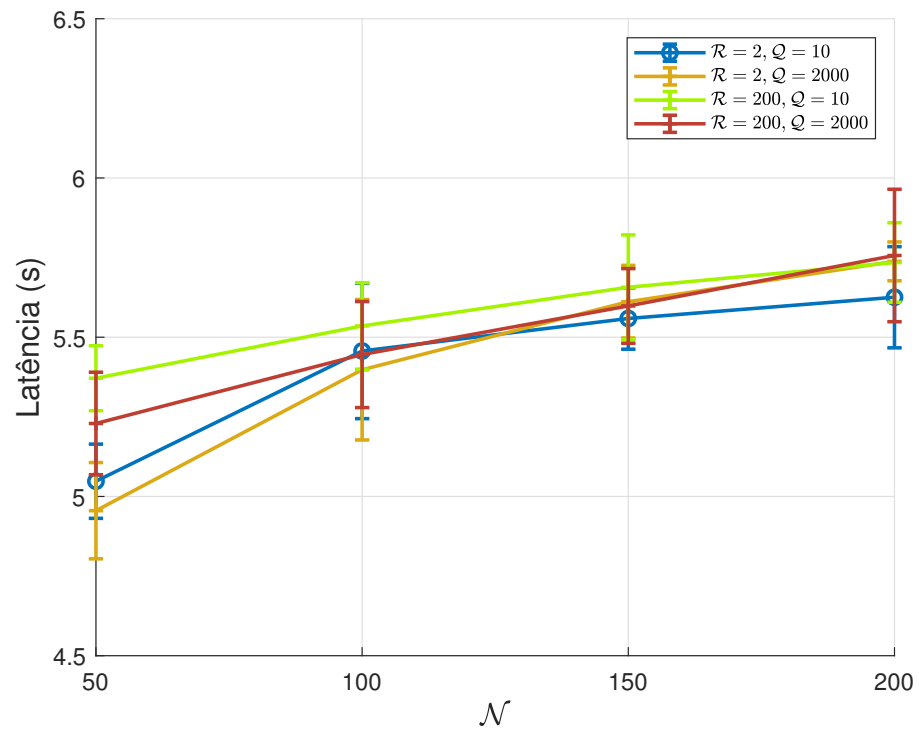


Fonte: Autoria própria.

provável necessidade de se retransmitir pacotes por meio de múltiplos saltos na topologia em malha do 6TiSCH justifica tal aumento de latência. Enquanto um aumento de \mathcal{Q} representa uma diminuição da latência para os valores iniciais de \mathcal{N} na figura, tal comportamento é invertido com o aumento de \mathcal{N} . Isto se deve ao fato de que, para valores baixos de \mathcal{N} , um aumento no tamanho da fila evita a retransmissão desnecessária de pacotes ao mesmo tempo que permite a alocação eficiente de *slots*. Entretanto, tal alocação eficiente diminui à medida que \mathcal{N} aumenta, resultando em uma entrega com maior latência dos pacotes. É importante notar que, ainda sim, o aumento de \mathcal{Q} traz vantagens para o sistema em qualquer cenário, uma vez que é preferível garantir a entrega de pacotes com um maior atraso do que nunca entregá-los.

Na Figura 18 é possível verificar a variação da latência em função de \mathcal{N} . Assim como observado na Figura 17, o aumento de \mathcal{R} influencia no aumento da latência na Figura 18, devido a retransmissões ocorridas nos múltiplos saltos associados à topologia em malha. Entretanto, diferente do observado na Figura 17, um aumento em \mathcal{Q} diminui a latência para todos os valores de \mathcal{N} analisados. Isto se deve ao fato de que um cenário com o tamanho do *frame* $\mathcal{T} = 606$ disponibiliza *slotframes* maiores, havendo assim uma

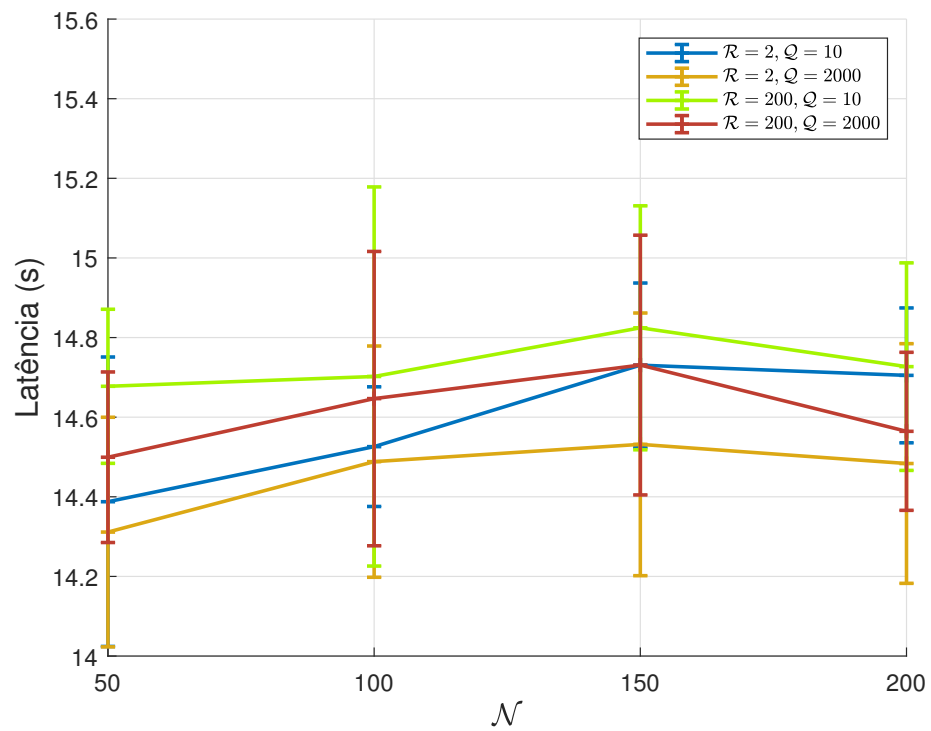
Figura 17 – Latência em função de \mathcal{N} para diferentes valores de \mathcal{R} e \mathcal{Q} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e $\mathcal{T} = 101$



Fonte: Autoria própria.

alocação de *slots* melhor aproveitada, diminuindo, assim, a latência para todos os cenários analisados.

Figura 18 – Latência em função de \mathcal{N} para diferentes valores de \mathcal{R} para o protocolo 6TiSCH com $\mathcal{D} = 2$ km e $\mathcal{T} = 606$



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho compara-se duas das principais tecnologias LPWAN, nomeadamente LoRaWAN e 6TiSCH, em termos de PER para diferentes cenários de rede e com um número variável de nós. Com o objetivo de efetuar uma comparação razoável entre estas tecnologias, os resultados apresentados demonstraram uma relação de troca, do inglês *trade-off*: 6TiSCH supera LoRaWAN, com base nas simulações realizadas, quando há limitações associadas ao número de *gateways* na área, enquanto que LoRaWAN obtém uma melhor escalabilidade à medida que o número de *gateways* aumenta. Contudo, enquanto a rede LoRaWAN não se deteriora significativamente à medida que a taxa de transmissão de pacotes diminui e o número de nós aumenta, a rede 6TiSCH sofre um impacto drástico, o que indica que LoRaWAN é mais apropriado para taxas de transmissão de pacotes mais baixas numa rede densa do que a tecnologia 6TiSCH. Quedas de pacotes ocorreram devido a colisões e filas de transmissão cheias. A fim de lidar com tais efeitos, o aumento do comprimento do *slotframe*, que diminui as colisões, demonstrou melhores resultados do que o aumento do tamanho da fila, mas ao custo de uma maior latência. Além disso, os resultados apresentados demonstraram uma forte dependência entre a PER e o número máximo de tentativas permitidas para 6TiSCH, enquanto a latência associada ao LoRaWAN pode ser consideravelmente menor do que a do 6TiSCH. Esta diferença aumenta com o número de nós, principalmente devido ao aumento da latência máxima observada na rede 6TiSCH. O aumento do número de canais disponíveis diminui a PER para ambas as tecnologias, mas, à medida que \mathcal{N} aumenta, o 6TiSCH acaba por ser limitado por outros parâmetros, tais como o comprimento do *slotframe* e o tamanho da fila de transmissão. Ainda, a PER observada foi mais homogênea para o LoRaWAN do que para o 6TiSCH.

Com o objetivo de verificar a influência dos parâmetros do 6TiSCH, foram obtidos resultados variando o número máximo de retransmissões, o tamanho da fila de transmissão e comprimento do *slotframe*. Os resultados obtidos demonstram que tanto o aumento da fila de transmissões quanto do número máximo de retransmissões são capazes de diminuir a perda de pacotes (PER). Entretanto, a influência do aumento do número máximo de retransmissões é muito mais significativo do que aquela apresentada com o aumento do tamanho da fila de transmissão. Ainda, o aumento do tamanho da fila de transmissão é melhor aproveitado quando o comprimento do *slotframe* é maior. Para um *slotframe* maior, observa-se também que o aumento do tamanho da fila de transmissão foi capaz de

proporcionar tanto a diminuição da latência quanto da perda de pacotes (PER), enquanto para um comprimento do *slotframe* menor, embora ambos os valores sejam reduzidos para valores menores do número de nós, há um aumento da latência quando há um número maior nós na rede. Ainda assim, o aumento do tamanho da fila de transmissão é sempre mais oportuno, uma vez que é melhor entregar pacotes com uma latência maior do que nunca os entregar. A geração de gráficos de *throughput* seria uma possibilidade buscando avaliar a capacidade das redes e da topologia. bem como a parametrização dos simuladores para o posicionamento dos *gateways* nas bordas do espaçamento. Ainda como estudo adicional seria possível a variação dos modelos de canal adotados nos dois simuladores.

Embora as conclusões deste trabalho sejam dependentes do cenário, elas lançam luz sobre as diferenças relevantes no desempenho relacionado com estas duas tecnologias. Ao mesmo tempo que planejam as redes de IoT, os desenvolvedores de sistemas podem utilizar tais resultados para determinar a melhor abordagem, dependendo da escala da rede, decidindo qual a tecnologia e os respectivos parâmetros mais adequados, ao mesmo tempo que compreendem os seus limites.

Os trabalhos futuros incluem uma análise do consumo energético, do comportamento do *downlink*, por exemplo, quando é necessário um reconhecimento de ponta-a-ponta, e da resiliência de interferência de cada rede. Além disto, propõe-se uma investigação adequada da utilização de múltiplas raízes para a rede 6TiSCH. Nesse sentido, as raízes que operam em sub-faixas de frequência diferentes, para evitar interferências, poderiam ser comparadas com as raízes que operam na mesma sub-faixa de frequência. A fim de comparar os protocolos 6TiSCH e LoRaWAN num cenário com um número limitado de nós distribuídos por uma pequena área, são também demandadas mais investigações de uma função objetiva mais adequada para o protocolo RPL. Tal investigação poderia tentar minimizar a PER por meio de várias estratégias, tais como a minimização do número de saltos. Também é tema de interesse futuro um estudo com foco nas considerações realistas de uso de canal, as prováveis causas de desvanecimento e sombreamento e seus possíveis impactos na performance da rede. Em cenários de simulação similares ao apresentados neste estudo, um possível avanço seria observar a latência em função do número médio de saltos da DODAG , bem como uma análise da taxa média de envio de pacotes na rede, assim como avaliar o número médio de retransmissões e caso de falha, na tecnologia 6TiSCH.

REFERÊNCIAS

ABEELE, F. V. den; HAXHIBEQIRI, J.; MOERMAN, I.; HOEBEKE, J. Scalability analysis of large-scale lorawan networks in ns-3. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 4, n. 6, p. 2186–2198, 2017.

ACCETTURA, N.; VOGLI, E.; PALATTELLA, M. R.; GRIECO, L. A.; BOGGIA, G.; DOHLER, M. Decentralized traffic aware scheduling in 6tisch networks: Design and experimental evaluation. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 2, n. 6, p. 455–470, 2015.

ANATEL. **Ato regulatório nº 14448**. dec 2017. <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/index.php/component/content/article?id=1139>. Accessed: 2023-06-25.

AYOUB, W.; SAMHAT, A. E.; NOUVEL, F.; MROUE, M.; PRÉVOTET, J.-C. Internet of mobile things: Overview of lorawan, dash7, and nb-iot in lpwans standards and supported mobility. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 21, n. 2, p. 1561–1581, 2019.

BELLO, L. L.; LOMBARDO, A.; PATTI, G.; RENO, M. A platform for evaluating clustering strategies in mobile iee 802.15.4-tsch networks. In: **2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)**. 2019. p. 987–992.

BERTHELSEN, E.; MORRISH, J. **Forecasting the Internet of Things Revenue Opportunity**. London, U.K., Apr. 2015. Disponível em: <https://machinaresearch.com/report/forecasting-the-internet-of-things-revenue-opportunity/>.

BOR, M. C.; ROEDIG, U.; VOIGT, T.; ALONSO, J. M. Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale? In: **Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2016. (MSWiM '16), p. 59–67. ISBN 9781450345026. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/2988287.2989163>.

BRUN-LAGUNA, K.; DIEDRICHS, A. L.; DUJOVNE, D.; LÉONE, R.; VILAJOSANA, X.; WATTEYNE, T. (not so) intuitive results from a smart agriculture low-power wireless mesh deployment. In: **Proceedings of the Eleventh ACM Workshop on Challenged Networks**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2016. (CHANTS '16), p. 25–30. ISBN 9781450342568. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/2979683.2979696>.

CASTELLS-RUFAS, D.; GALIN-PONS, A.; CARRABINA, J. The regulation of unlicensed sub-ghz bands: Are stronger restrictions required for lpwan-based iot success? **CoRR**, abs/1812.00031, 2018. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1812.00031>.

CHANG, T.; VUČINIĆ, M.; VILAJOSANA, X.; DUQUENNOY, S.; DUJOVNE, D. **6TiSCH Minimal Scheduling Function (MSF)**. set. 2020. Work in Progress. Disponível em: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-ietf-6tisch-msf-18>.

CUI, S.; JOE, I. Collision prediction for a low power wide area network using deep learning methods. **Journal of Communications and Networks**, v. 22, n. 3, p. 205–214, 2020.

DUJOVNE, D.; WATTEYNE, T.; VILAJOSANA, X.; THUBERT, P. 6tisch: deterministic ip-enabled industrial internet (of things). **IEEE Communications Magazine**, v. 52, n. 12, p. 36–41, 2014.

DUY, T. P.; DINH, T.; KIM, Y. Distributed cell selection for scheduling function in 6tisch networks. **Computer Standards & Interfaces**, v. 53, p. 80–88, 2017. ISSN 0920-5489. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092054891730106X>.

ERICSSON. **4G/5G IoT connections rising as 2G/3G declines**. 2023. Disponível em: <https://www.ericsson.com/49dd9d/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2023/ericsson-mobility-report-june-2023.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2023.

FADLULLAH, Z. M.; FOUDA, M. M.; KATO, N.; TAKEUCHI, A.; IWASAKI, N.; NOZAKI, Y. Toward intelligent machine-to-machine communications in smart grid. **IEEE Communications Magazine**, v. 49, n. 4, p. 60–65, 2011.

FRANCISCO, S.; PINHO, P.; LUÍS, M. Improving lora network simulator for a more realistic approach on lorawan. In: **2021 Telecoms Conference (ConfTELE)**. 2021. p. 1–6.

GEORGIU, O.; RAZA, U. Low power wide area network analysis: Can lora scale? **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 6, n. 2, p. 162–165, 2017.

GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. Cambridge University Press, 2005.

GOMEZ, C.; MINABURO, A.; TOUTAIN, L.; BARTHEL, D.; ZUNIGA, J. C. Ipv6 over lpwans: Connecting low power wide area networks to the internet (of things). **IEEE Wireless Communications**, v. 27, n. 1, p. 206–213, 2020.

HAIJ-HASSAN, A.; IMINE, Y.; GALLAIS, A.; QUOITIN, B. Consensus-based mutual authentication scheme for industrial iot. **Ad Hoc Networks**, v. 145, p. 103162, 2023. ISSN 1570-8705. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870523000823>.

HAUBRO, M.; ORFANIDIS, C.; OIKONOMOU, G.; FAFOUTIS, X. Tsch-over-lora: Long range and reliable ipv6 multi-hop networks for the internet of things. **Internet Technology Letters**, v. 3, p. e165, 04 2020.

HAXHIBEQIRI, J.; MOERMAN, I.; HOEBEKE, J. Low Overhead Scheduling of LoRa Transmissions for Improved Scalability. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 6, n. 2, p. 3097–3109, 2019.

HERMETO, R. T.; GALLAIS, A.; THEOLEYRE, F. On the (over)-reactions and the stability of a 6tisch network in an indoor environment. In: **Proceedings of the 21st ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of**

Wireless and Mobile Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018. (MSWIM '18), p. 83–90. ISBN 9781450359603. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3242102.3242104>.

HERMETO, R. T.; GALLAIS, A.; THEOLEYRE, F. Experimental in-depth study of the dynamics of an indoor industrial low power lossy network. **Ad Hoc Networks**, Elsevier, v. 93, p. 101914, out. 2019. Disponível em: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02323117>.

HOELLER, A.; SOUZA, R. D.; LÓPEZ, O. L. A.; ALVES, H.; NETO, M. de N.; BRANTE, G. Analysis and performance optimization of lora networks with time and antenna diversity. **IEEE Access**, v. 6, p. 32820–32829, 2018.

HOSNI, I.; THÉOLEYRE, F. Self-healing distributed scheduling for end-to-end delay optimization in multihop wireless networks with 6tisch. **Computer Communications**, v. 110, p. 103–119, 2017. ISSN 0140-3664. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366416306156>.

IEEE. **IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 3: Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks.** 2012. 1-252 p.

IQBAL, M.; ABDULLAH, A. Y. M.; SHABNAM, F. An application based comparative study of lpwan technologies for iot environment. In: **2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)**. 2020. p. 1857–1860.

KHARB, A. S. S. Performance evaluation of tsch in industrial wsn. **9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference, UEMCON**, p. 1047–1054, 2018.

KIM, K. T.; KIM, H.; PARK, H.; KIM, S. An industrial iot mac protocol based on ieee 802.15.4e tsch for a large-scale network. In: **2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)**. 2017. p. 721–724.

LE, H.-P.; JOHN, M.; PISTER, K. Energy-aware routing in wireless sensor networks with adaptive energy-slope control. In: **EE290Q-2 Spring**. 2009.

LEI, L.; ZHANG, Y.; SHEN, X. S.; LIN, C.; ZHONG, Z. Performance analysis of device-to-device communications with dynamic interference using stochastic petri nets. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 12, n. 12, p. 6121–6141, 2013.

LIAO, C.; ZHU, G.; KUWABARA, D.; SUZUKI, M.; MORIKAWA, H. Multi-hop lora networks enabled by concurrent transmission. **IEEE Access**, v. 5, p. 21430–21446, 2017.

M. Ortiz, F.; T. de Almeida, T.; FERREIRA, A. E.; M.K. Costa, L. H. Experimental vs. simulation analysis of lora for vehicular communications. **Computer Communications**, v. 160, p. 299–310, 2020. ISSN 0140-3664. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366419319966>.

MAHMOOD, A.; SISINNI, E.; GUNTUPALLI, L.; RONDÓN, R.; HASSAN, S. A.; GIDLUND, M. Scalability analysis of a lora network under imperfect orthogonality. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 3, p. 1425–1436, 2019.

- MONTENEGRO, G.; KUSHALNAGAR, N.; HUI, J.; CULLER, D. **Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks**. Sep. 2007.
- MORIN, E.; MAMAN, M.; GUIZZETTI, R.; DUD, A. Comparison of the device lifetime in wireless networks for the internet of things. **IEEE Access**, v. 5, p. 7097–7114, 2017.
- MORRISH, J. **Low Power Wide Area wireless network technologies for M2M: A technical comparison of on-ramp, sigfox and weightless**. 2013.
- MUNICIO, E.; DANEELS, G.; VUČINIČ, M.; LATRÉ, S.; FAMAÉY, J.; TANAKA, Y.; BRUN, K.; MURAOKA, K.; VILAJOSANA, X.; WATTEYNE, T. Simulating 6tisch networks. **Transactions on Emerging Telecommunications Technologies**, v. 30, n. 3, p. e3494, 2019. E3494 ett.3494.
- NOKIA. **LTE evolution for IoT connectivity, nokia white paper**. 2016. Disponível em: <http://resources.alcatel-lucent.com/asset/200178>. Acesso em: 8 nov. 2021.
- PALATTELLA, M. R.; WATTEYNE, T.; WANG, Q.; MURAOKA, K.; ACCETTURA, N.; DUJOVNE, D.; GRIECO, L. A.; ENGEL, T. On-the-fly bandwidth reservation for 6tisch wireless industrial networks. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 2, p. 550–560, 2016.
- PETAJAJARVI, J.; MIKHAYLOV, K.; ROIVAINEN, A.; HANNINEN, T.; PETTISSALO, M. On the coverage of lpwans: range evaluation and channel attenuation model for lora technology. In: **2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)**. 2015. p. 55–59.
- POP, A.-I.; RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Does bidirectional traffic do more harm than good in lorawan based lpwa networks? In: **GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference**. 2017. p. 1–6.
- PRANDO, L. R.; LIMA, E. R. de; MORAES, L. S. de; HAMERSCHMIDT, M. B.; FRAINDEIRAICH, G. Experimental performance comparison of emerging low power wide area networking (lpwan) technologies for iot. In: **2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)**. 2019. p. 905–908.
- RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: A survey. **CoRR**, abs/1606.07360, 2016. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1606.07360>.
- RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 19, n. 2, p. 855–873, 2017.
- REYNDERS, B.; WANG, Q.; TUSET-PEIRO, P.; VILAJOSANA, X.; POLLIN, S. Improving reliability and scalability of lorawans through lightweight scheduling. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 5, n. 3, p. 1830–1842, 2018.
- RIGHETTI, F.; VALLATI, C.; RASLA, D.; ANASTASI, G. Investigating the coap congestion control strategies for 6tisch-based iot networks. **IEEE Access**, v. 11, p. 11054–11065, 2023.
- SALLUM, E.; PEREIRA, N.; ALVES, M.; SANTOS, M. Performance optimization on lora networks through assigning radio parameters. In: **2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)**. 2020. p. 304–309.

- SELANDER, G.; MATTSSON, J.; PALOMBINI, F.; SEITZ, L. **Object Security for Constrained RESTful Environments (OSCORE)**. Jul. 2019.
- SEMTECH. **AN1200.13 SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem – Designer’s Guide**. Jul. 2013.
- SEMTECH. **LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview**. Dec. 2019.
- SEMTECH. **Understanding the LoRa Adaptive Data Rate**. Dec. 2019.
- SHELBY, Z.; HARTKE, K.; BORMANN, C. **The Constrained Application Protocol (CoAP)**. Jun. 2014.
- SHI, J.; SHA, M.; YANG, Z. Distributed graph routing and scheduling for industrial wireless sensor-actuator networks. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 27, n. 4, p. 1669–1682, 2019.
- SISINNI, E.; CARVALHO, D. F.; DEPARI, A.; BELLAGENTE, P.; FLAMMINI, A.; PASETTI, M.; RINALDI, S.; FERRARI, P. Assessing a methodology for evaluating the latency of ipv6 with schc compression in lorawan deployments. **Sensors**, v. 23, n. 5, 2023. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/5/2407>.
- SORNIN, N.; LUIS, M.; EIRICH, T.; KRAMP, T.; HERSENT, O. **LoRaWAN Specification**. San Ramon, CA, USA, 2015. Disponível em: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-07/lorawan1.0.3.pdf>.
- TEXAS INSTRUMENTS. **CC1352R SimpleLink High-Performance Multi-Band Wireless MCU**. 2020. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1352r.pdf?ts=1598293264962>.
- THUBERT, P. **Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)**. RFC Editor, mar. 2012. RFC 6552. (Request for Comments, 6552). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc6552.txt>.
- THUBERT, P.; NORDMARK, E. **Registration Extensions for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Network (6LoWPAN) Neighbor Discovery**. Nov. 2018.
- THUBERT, P.; NORDMARK, E.; CHAKRABARTI, S.; PERKINS, C. **Registration extensions for IPv6 over low-power wireless personal area network (6LoWPAN) neighbor discovery**. 2018.
- VILAJOSANA, X.; PISTER, K.; WATTEYNE, T. **Minimal IPv6 over the TSCH Mode of IEEE 802.15.4e (6TiSCH) Configuration**. May 2017.
- VILAJOSANA, X.; WATTEYNE, T.; CHANG, T.; VUČINIČ, M.; DUQUENNOY, S.; THUBERT, P. IETF 6TiSCH: A Tutorial. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, p. 1–1, 2019.
- VUČINIČ, M.; PEJANOVIC-DJURISIC, M.; WATTEYNE, T. Soda: 6tisch open data action. In: **2018 IEEE Workshop on Benchmarking Cyber-Physical Networks and Systems (CPSBench)**. 2018. p. 42–46.

VUČINIČ, M.; WATTEYNE, T.; VILAJOSANA, X. Broadcasting strategies in 6tisch networks. **Internet Technology Letters**, v. 1, n. 1, p. e15, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/itl2.15>.

WATTEYNE C. ADJIH, X. V. T. Lessons learned from large-scale dense ieee802.15.4 connectivity traces. **IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, CASE**, p. 145–150, 2015.

WINTER, T.; THUBERT, P.; BRANDT, A.; HUI, J.; KELSEY, R.; LEVIS, P.; PISTER, K.; STRUIK, R.; VASSEUR, J.; ALEXANDER, R. **Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks**. Mar. 2012.

WU, W.; LI, Y.; ZHANG, Y.; WANG, B.; WANG, W. Distributed queueing-based random access protocol for lora networks. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 7, n. 1, p. 763–772, 2020.

XIONG, X.; ZHENG, K.; XU, R.; XIANG, W.; CHATZIMISIOS, P. Low power wide area machine-to-machine networks: key techniques and prototype. **IEEE Communications Magazine**, v. 53, n. 9, p. 64–71, 2015.