

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LEANDRO MATHEUS FAVORETTO JEZ**

**CSMA ADAPTATIVO PARA REDES LORA**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2023**

**LEANDRO MATHEUS FAVORETTO JEZ**

## **CSMA ADAPTATIVO PARA REDES LORA**

### **Adaptive CSMA for LoRa Networks**

Dissertação apresentado(a) como requisito para obtenção do título(grau) de Mestre em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CP-GEI), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Anelise Munaretto Fonseca

Coorientador(a): Prof. Dr. Mauro Sérgio Pereira Fonseca

**CURITIBA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

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.



LEANDRO MATHEUS FAVORETTO JEZ

**CSMA ADAPTATIVO PARA REDES LORA**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Telecomunicações E Redes.

Data de aprovação: 16 de Setembro de 2022

Dra. Ana Cristina Barreiras Kochem Vendramin, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Daniel Fernando Pigatto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Mauro Sergio Pereira Fonseca, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 16/09/2022.

## RESUMO

JEZ, Leandro Matheus Favoretto. **CSMA Adaptativo para Redes LoRa**. 2023. 48 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2023.

Com uma crescente necessidade de mais dados e informações em todo o mundo, criou-se um paradigma para conectar todos os dispositivos e permitir que eles pudessem se comunicar para uma melhor gerência em diversos ramos. Esse paradigma, ficou conhecido como Internet das Coisas (IoT). As redes de longa distância de baixa potência (LPWANs) são uma boa alternativa para suprir essa indústria em expansão na qual o IoT se transformou, pois elas prometem: comunicações com baixo custo energético, longo alcance e de baixa potência. Dentre as alternativas de LPWANs, a tecnologia LoRa juntamente com o LoRaWAN foram muito estudados e são considerados boas opções para alcançar todos os quesitos necessários para uma rede LPWAN. LoRaWAN é um protocolo de acesso ao meio baseado na camada física Lora. Esta tecnologia utiliza Aloha puro, tamanho variável de pacote e espalhamento espectral adaptativo. O objetivo deste trabalho é propor uma mudança no protocolo de acesso ao meio, substituindo o padrão Aloha por um CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) Adaptativo. O impacto dessa alteração é analisado em termos da taxa de entrega de mensagens, taxa de vazão da rede e eficiência energética. Com o CSMA Adaptativo, pode-se notar uma melhora na vazão da rede e na eficiência energética, tornando o protocolo mais confiável e capaz de suportar implementações que necessitem dessas características. Redes LoRa tem como uma das suas maiores preocupações uma grande autonomia de seus nós, assim uma melhora na eficiência energética, em termos da quantidade de bits enviados por Joule de energia, torna o método de acesso ao meio proposto ainda mais atrativo. Pode-se notar com as simulações realizadas que com uma grande ocupação da rede, o CSMA Adaptativo obteve uma eficiência energética 177% maior que o CSMA e 62% maior que o Aloha.

**Palavras-chave:** LoRaWAN. LPWAN. Camada MAC. CSMA Adaptativo. Desempenho de rede.

## ABSTRACT

JEZ, Leandro Matheus Favoretto. **Adaptive CSMA for LoRa Networks**. 2023. 48 p.  
Dissertation (Master's Degree in Graduate Program in Electrical and Computer Engineering) –  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2023.

With a growing need for more data and information worldwide, a paradigm was created for connecting all devices and allowing them to communicate for better management in different branches. This paradigm became known as the Internet of Things (IoT). Low Power Wide Area Networks (LPWANs) are an excellent alternative to this expanding industry that the IoT has become, as they promise: low-energy, long-range, low-power communications. Among the options of LPWANs, the LoRa technology and the LoRaWAN have been extensively studied and are considered good options to achieve all the requirements necessary for an LPWAN network. LoRaWAN is a media access protocol based on the physical layer Lora. This technology uses pure Aloha, variable packet size, and adaptive spectral spreading. This work aims to propose a change in the media access protocol, replacing the Aloha standard with an Adaptive Carrier Sense Multiple Access. The impact of this change is analyzed in terms of message delivery rate, network throughput, and energy efficiency. With Adaptive CSMA, network throughput and energy efficiency can be noted, making the protocol more reliable and capable of supporting implementations that require these characteristics. One concern of LoRa networks is the excellent autonomy of their nodes. Hence, an improvement in energy efficiency, in terms of the number of bits sent by Joule of energy, makes the Adaptive CSMA even more attractive. Through simulations, it can be noted that with large network occupation, the Adaptive CSMA obtained an energy efficiency 177 % higher than CSMA and 62 % higher than Aloha.

**Keywords:** LoRaWAN. LPWAN. MAC Layer. Adaptive CSMA. Network performance.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Camadas protocolo LoRaWAN. . . . .	13
Figura 2 – Ilustração de uma rede LoRa. . . . .	19
Figura 3 – Ilustração pacote LoRA. . . . .	21
Figura 4 – Janelas de recepção dos dispositivos da classe A. . . . .	22
Figura 5 – Operação padrão CSMA. . . . .	31
Figura 6 – Esquema de recepção Aloha. . . . .	33
Figura 7 – Esquema de recepção CSMA. . . . .	34
Figura 8 – Esquema de recepção CSMA Adaptativo. . . . .	35
Figura 9 – Taxa de entrega de mensagens dos protocolos Aloha e CSMA . . . . .	37
Figura 10 – Vazão da rede usando os protocolos Aloha e CSMA . . . . .	38
Figura 11 – Consumo de energia dos protocolos Aloha e CSMA . . . . .	39
Figura 12 – Eficiência energética dos protocolos Aloha e CSMA . . . . .	39
Figura 13 – Taxa de recepção protocolos Aloha, CSMA e CSMA Adptativo . . . . .	40
Figura 14 – Vazão da rede usando os protocolos Aloha, CSMA e CSMA Adptativo . . . . .	41
Figura 15 – Consumo de energia pelos protocolos Aloha, CSMA e CSMA Adptativo . . . . .	42
Figura 16 – Eficiência energética dos protocolos Aloha, CSMA e CSMA Adptativo . . . . .	43
Figura 17 – Eficiência energética dos protocolos Aloha, CSMA e CSMA Adptativo com variação no tempo entre mensagens e mil nós . . . . .	44
Figura 18 – Eficiência energética dos protocolos Aloha, CSMA e CSMA Adptativo com variação no tempo entre mensagens e cinquenta nós . . . . .	44
Quadro 1 – Comparação de custo de <i>link</i> entre a tecnologia FSK e LoRa. . . . .	17
Quadro 2 – Comparação das tecnologias mais visadas do mercado. . . . .	18

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores das correntes elétricas em cada modo de operação dos nós . . . . .	29
Tabela 2 – Parâmetros dos cenários de simulação . . . . .	30

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

### ABREVIATURAS

art.	Artigo
cap.	Capítulo
sec.	Seção

### SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgement</i>
ADR	<i>Adaptive Data Rate</i>
CS	<i>Carrier Sense</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPv6	<i>Internet Protocol Version 6</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Networks</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>

### ACRÔNIMOS

DIFS	Espaço Entre Quadros DCF, do inglês <i>DCF Distributed coordination function</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Networks</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>9</b>
1.1	MOTIVAÇÃO . . . . .	10
1.2	OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	10
1.3	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO . . . . .	11
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>12</b>
2.1	REDES LORA . . . . .	12
2.1.1	Camada física LoRa . . . . .	13
2.1.2	Comparação DSSS e CSS . . . . .	14
2.1.3	Parâmetros LoRa . . . . .	15
2.2	ESTRUTURA DE REDES LORA . . . . .	18
2.3	ESTRUTURA DE UM PACOTE LORA . . . . .	20
2.4	LORAWAN . . . . .	21
2.4.1	Classe A . . . . .	21
2.4.2	Classe B . . . . .	22
2.4.3	Classe C . . . . .	22
2.5	TAXA DE DADOS ADAPTATIVA . . . . .	23
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b> . . . . .	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> . . . . .	<b>28</b>
4.1	METODOLOGIA . . . . .	28
4.2	ANÁLISES INICIAIS . . . . .	28
4.3	CSMA ADAPTATIVO PROPOSTO . . . . .	30
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> . . . . .	<b>36</b>
5.1	COMPARAÇÃO ALOHA E CSMA . . . . .	37
5.2	CSMA ADAPTATIVO . . . . .	39
5.3	TESTES COM DIFERENTES OCUPAÇÕES DO MEIO . . . . .	43
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS</b> . . . . .	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A implantação da Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) em um âmbito urbano visa melhorar a qualidade de vida da população, quando aplicada a uma grande área de cobertura (*Smart Cities*). Um dos benefícios desta implantação é, por exemplo, melhorar a administração pública, aprimorando a infraestrutura de comunicação que fornece acesso unificado, simples e econômico a uma infinidade de serviços públicos, desencadeando sinergias potenciais e aumentando a transparência aos cidadãos (ZANELLA *et al.*, 2014).

Para implementar essa infraestrutura de comunicação é necessário criar uma rede que comporte milhares de dispositivos se comunicando, muitas vezes simultaneamente, e que ainda assim consiga manter uma taxa aceitável de entrega de pacotes que por ela transitam. Também espera-se que os dispositivos não estejam ligados a uma rede de energia, fazendo com que estes necessitem de baterias próprias para seu funcionamento. Quanto maior o tempo de vida útil de um dispositivo, mais econômica será a manutenção da rede.

Tendo isto em vista, um dos maiores desafios de implementação de IoT é decidir a tecnologia de comunicação sem fio mais apropriada. Nos últimos anos, tecnologias conhecidas como *Low Power Wide Area Networks* (LPWAN) têm sido empregadas (MARGELIS *et al.*, 2015).

Nessa pesquisa investigou-se uma das tecnologias LPWAN mais promissoras e analisadas no mercado e meio científico, o protocolo LoRaWAN (Semtech Corporation, 2016).

Trabalhos científicos acerca das limitações do protocolo LoRaWAN vêm sendo conduzidos, sendo normalmente analisados parâmetros de rede, como escalabilidade, confiabilidade na entrega de pacotes e vazão da rede. Apesar disso, pouco se tem investigado sobre o impacto na modificação do método de acesso ao meio empregado pelo LoRaWAN.

Em 2018, pesquisadores utilizaram o método de Acesso múltiplo com detecção de portadora (CSMA) aplicado ao LoRaWAN, substituindo o protocolo padrão ALOHA (TO; DUDA, 2018). Assim, incitando uma nova linha de investigação no meio científico: consequências e vantagens na mudança do método de acesso ao meio em redes LoRaWAN.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Redes LPWAN, em especial redes LoRaWAN, trazem consigo diversas vantagens que são necessárias para criar uma infraestrutura de comunicação sem fio em ambientes como *Smart Cities*. Em seu artigo a Semtech Corporation (2016), explica as características que favorecem o seu uso, sendo essas:

- **Cobertura:** LoRaWan utiliza um modelo de infraestrutura, que se baseia em um *gateway* central, para cobrir uma ampla área. Em ambientes urbanos, o *gateway* cobre um raio de dois quilômetros, podendo chegar aos quinze quilômetros em áreas abertas;
- **Escalabilidade:** as redes são utilizadas nos mais diversos cenários. Por exemplo, sensores podem ser utilizados por pequenos agricultores para monitorar suas plantações ou por prefeituras para tomada de decisões nas gestões dos recursos públicos;
- **Custo:** baixo custo na implementação da rede, sendo necessário um *gateway*, os nós transmissores e uma conexão com um servidor. Os nós transmissores normalmente possuem uma grande autonomia, assim diminuindo o custo de manutenção da rede.

A presente pesquisa busca ampliar o entendimento dos limites das redes e seus comportamentos, quando utilizadas com um alto tráfego de mensagens. Ainda, os impactos das modificações no protocolo de acesso ao meio serão investigados, tendo como base os trabalhos de To e Duda (2018).

## 1.2 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é implementar um novo protocolo de acesso ao meio aplicado à LoRaWAN. Através, de uma modificação do CSMA contendo tempos de sensoria-mentos do meio adaptativo. Além disso, a dissertação busca ampliar ainda mais o conhecimento sobre os impactos nas modificações de parâmetros nos métodos de acesso ao meio em redes LoRaWAN.

O estudo tem como objetivos específicos:

- Criar um modelo simulado computacionalmente de uma rede LoRaWAN, onde seja possível registrar a transição de pacotes na rede e o estado de cada nó, incluindo o consumo da bateria de todos os nós;

- Comparar diferentes protocolos de acesso ao meio em redes LoRaWAN e compreender as vantagens e desvantagens de cada protocolo;
- Implementar um novo protocolo de acesso ao meio que obtenha ganhos significativos de desempenho sem comprometer a qualidade da rede.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

A presente dissertação está organizada em seis capítulos. No capítulo 2 encontra-se descrito o protocolo LoRa/LoRaWAN e os detalhes da sua especificação padrão. O capítulo 3 apresenta a revisão dos trabalhos relacionados relevantes. No capítulo 4 é realizada uma análise das limitações do modelo LoRaWAN padrão e as propostas de melhoria apresentadas nesta dissertação. O capítulo 5 mostra os resultados obtidos através de simulações. A conclusão e os trabalhos futuros são apresentados no capítulo 6.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo traz uma revisão da literatura acerca dos temas abordados neste trabalho. Inicialmente, apresenta-se a tecnologia LoRa. Para isso, faz-se necessário entender como atua a camada física LoRa, suas codificações (através da comparação DSSS/CSS) e os principais parâmetros deste tipo de rede, sendo eles: frequência da portadora, fator de espalhamento, largura de banda e taxa de codificação. Em seguida, as estruturas de redes e dos pacotes LoRa são apresentados. Por fim é abordado o protocolo LoRaWAN, seus tipos de classe, seu método de controle de acesso ao meio e as mecânicas utilizadas para garantir uma melhor utilização do meio.

### 2.1 REDES LORA

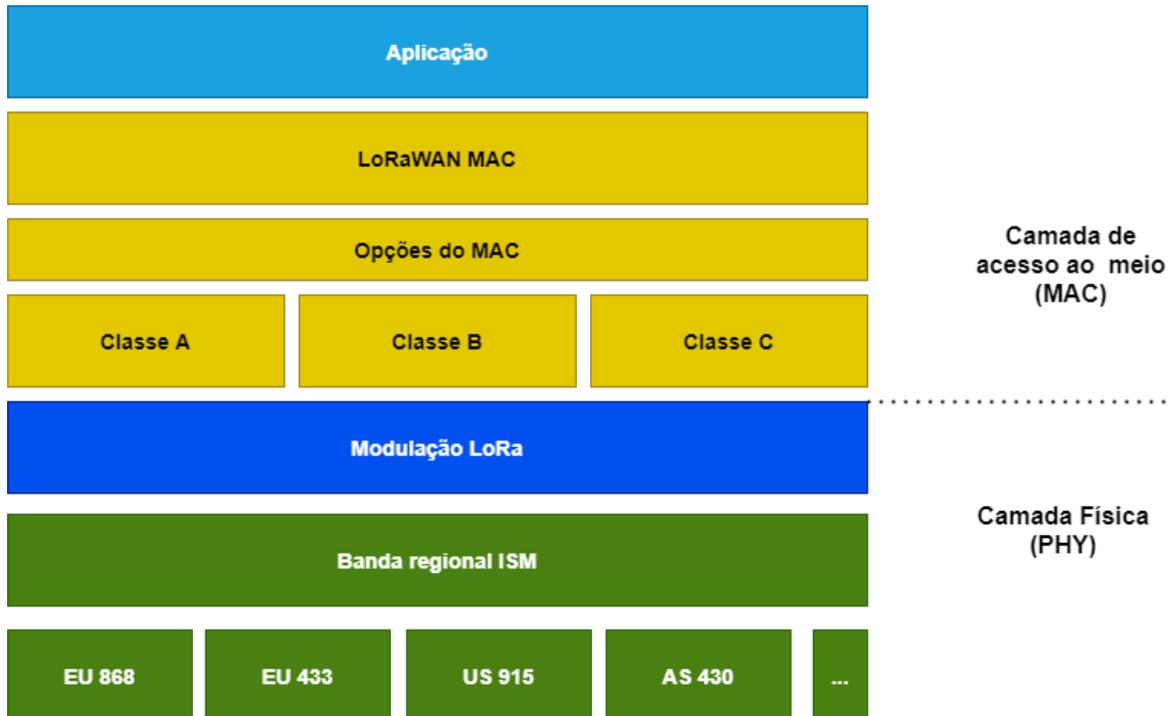
LoRa é uma tecnologia de comunicação sem fio de longo alcance, promovido pela LoRa Alliance LoRa Alliance® (2015). O sistema possui dispositivos alimentados por baterias, onde o consumo de energia é de suma importância. A tecnologia LoRa possui duas camadas distintas: uma camada física usando a técnica de modulação de rádio *Chirp Spread Spectrum* (CSS) e um protocolo de Controle de Acesso ao Meio (MAC): LoRaWAN.

A camada física LoRa é uma tecnologia de transmissão de dados sem fio desenvolvida e mantida pela Semtech Corporation Semtech Corporation (1960). LoRa oferece soluções para problemas reais em comunicação sem fio, com as principais características de transmissões de longo alcance, baixo consumo de energia e transmissões seguras de dados.

O LoRaWAN provê um mecanismo de controle de acesso ao meio que também define a arquitetura do sistema, bem como, os parâmetros de comunicação. Enquanto a modulação LoRa é própria da Semtech Corporation e não tem uma completa divulgação, o LoRaWAN é um padrão aberto sendo desenvolvido pela LoRa Alliance.

A Figura 1 apresenta um modelo das camadas presente no protocolo LoRaWAN, onde se pode visualizar melhor a distinção entre LoRa e LoRaWAN. Como pode-se notar, LoRa atua na camada física e implementa a forma de modulação utilizada pelos componentes da rede. Enquanto, o LoRaWAN atua na camada de acesso ao meio e controla os parâmetros da comunicação, destacando-se a escolha do método de acesso ao meio.

**Figura 1 – Camadas protocolo LoRaWAN.**



Fonte: Semtech Corporation (2016).

### 2.1.1 Camada física LoRa

LoRa é uma tecnologia de modulação de Rádio Frequência (RF) para redes LPWANs e foi criada para padronizá-las. LoRa fornece comunicações de longo alcance: até dois quilômetros em áreas urbanas e até quinze quilômetros ou mais em áreas rurais. Uma característica fundamental das soluções baseadas em LoRa são os requisitos de energia ultrabaixos, o que permite a criação de dispositivos operados por bateria que podem durar até dez anos.

Com uma técnica proprietária de modulação com espalhamento espectral derivada da tecnologia existente CSS, LoRa opera em um canal de largura banda fixa de 125 KHz ou 500 KHz (para canais de *uplink*) e 500 KHz (para canais de *downlink*). Além disso, LoRa usa fatores de propagação ortogonais, permitindo que a rede preserve a vida útil da bateria dos nós finais conectados.

Os nós de uma rede LoRa podem realizar otimizações adaptativas dos níveis de energia e taxas de dados. Por exemplo, um dispositivo final localizado próximo a um *gateway* (GW) deve transmitir dados com um fator de espalhamento (SF - *Spreading Factor*) baixo, permitindo maiores taxas de dados. No entanto, um dispositivo final localizado a vários quilômetros de um *gateway* precisa transmitir com um SF muito maior. Este fator de espalhamento mais alto

fornece maior ganho de processamento e maior sensibilidade de recepção, embora a taxa de dados seja, necessariamente, menor. O artigo Semtech Corporation (2019) explica com mais detalhes e funcionamento dos SF's e seus impactos na taxa de dados.

### 2.1.2 Comparação DSSS e CSS

Uma codificação DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) é obtida ao se multiplicar o sinal de dados com um padrão de bits predefinido, também conhecido como código de propagação (ou sequência de chip), e assim, é criado um sinal que possui componentes de frequência mais altos do que o sinal de dados original. Isso significa que a largura de banda do sinal é espalhada além da largura de banda do sinal original. Quando o sinal transmitido chega ao receptor de RF, ele é multiplicado por uma cópia idêntica do código de propagação usado no transmissor de RF, resultando em uma réplica do sinal de dados original. O livro de Ström *et al.* (2002) apresenta mais informações sobre a codificação DSSS.

Uma das desvantagens de um sistema DSSS é o fato de que ele requer um relógio de referência altamente preciso. A tecnologia CSS da Semtech oferece uma alternativa ao DSSS de baixo custo e baixo consumo de energia que não requer um relógio de referência de alta precisão. Na modulação LoRa, a propagação do espectro do sinal é obtida gerando um sinal chirp que varia continuamente em frequência.

Segundo Semtech Corporation (2016), uma vantagem do método é que os deslocamentos de tempo e frequência entre o transmissor e o receptor são equivalentes, reduzindo muito a complexidade do projeto do receptor Augustin *et al.* (2016). A largura de banda de frequência do chirp é equivalente à largura de banda espectral do sinal. O sinal de dados que transporta os dados de um dispositivo final para um *gateway* é chipado em uma taxa de dados mais alta e modulado no sinal portador chirp. A modulação LoRa também inclui um esquema de correção de erro variável que melhora a robustez do sinal transmitido. Para cada quatro bits de informação enviados, um quinto bit de informação de paridade é enviado.

O artigo Vangelista (2017) apresenta uma visão mais detalhada da modulação e demodulação utilizadas no modelo LoRa, esse artigo também demonstra os modelos matemáticos utilizados nesses procedimentos.

### 2.1.3 Parâmetros LoRa

Um rádio LoRa tem quatro parâmetros principais de configuração: frequência da portadora, fator de espalhamento, largura de banda e taxa de codificação. A seleção destes parâmetros determina o consumo de energia, a faixa de transmissão e a resiliência da transmissão. A seguir qualifica-se, através das informações presentes no artigo Semtech Corporation (2016), uma visão geral do significado de cada um:

- **Frequência da portadora:** a frequência da portadora (CF - *Carrier Frequency*) é a frequência central usada para a banda de transmissão.
- **Fator de espalhamento:** valor da quantidade de código de espalhamento aplicado ao sinal de dados original. A modulação LoRa tem um total de seis fatores de espalhamento (SF7 a SF12) ortogonais entre si. Quanto maior o fator de espalhamento usado, mais longe o sinal poderá viajar e ainda ser recebido sem erros pelo receptor de RF. Cada aumento no SF reduz pela metade a taxa de transmissão e dobra a duração da transmissão, com isso aumentando também o consumo de energia. O artigo Tiurlikova *et al.* (2018) explica em mais detalhes o uso do SF no protocolo LoRa.
- **Largura de banda:** a Largura de banda (BW - *Bandwidth*) corresponde à faixa de frequência ocupada pelo sinal modulado. Existe uma compensação no tamanho da BW. Quanto maior for a BW, maior será a taxa de dados, mas terá uma sensibilidade menor, devido à integração de ruído adicional. Uma BW menor trará uma sensibilidade mais alta, mas uma taxa de dados menor. Pode-se usar como exemplo de valores o transceptor SX1276 da Semtech Semtech Corporation (2020), os quais têm como valores permitidos de BW, de *uplink* (comunicação dos nós para o GW), 125 kHz para todos os SF's, do 7 ao 12, e 250 kHz apenas para nós operando com o SF 7;
- **Taxa de codificação:** essencialmente controla a quantidade de Correção de Erro de Encaminhamento (FEC - *Forward Error Correction*) que é adicionada aos dados de carga útil. Como tal, uma taxa de codificação mais alta não aumentará o alcance, mas tornará um *link* mais confiável se houver interferência. A taxa de codificação descreve a proporção entre os dados reais e os dados de correção de erros adicionados. Assim, como nos outros parâmetros, existe uma compensação em utilizar CR's maiores. Quanto maior a taxa de codificação, maior a resiliência à interferência dos pacotes, com menor taxa de dados do

nó. Rádios com CR diferente, e os mesmos CF/SF/BW, ainda podem comunicar-se uns com os outros.

Com as definições destes parâmetros, obtêm-se a taxa de dados ( $R_b$ ) teórica através da Equação 1 Semtech Corporation (2015).

$$R_b = SF * \frac{BW}{2^{SF}} * \frac{4}{4 + CR} \text{bits/s} \quad (1)$$

Onde:

- BW é a largura de banda da modulação (Hz);
- CR é a taxa de código, com CR variando de (1..4);
- SF é o fator de espalhamento, com SF variando de (7..12).

Por exemplo, um cenário com  $BW = 250$  kHz,  $SF = 7$ ,  $CR = 4/5$  terá uma taxa de bits de aproximadamente  $R_b = 11$  kbits/s.

Um quesito importante sobre o fator de espalhamento é o fato dos pacotes que usam diferentes SF's serem invisíveis uns para os outros e simplesmente aparecerem como ruído. Isso se deve ao fato de diferentes SF's serem ortogonais entre si. Portanto, dois pacotes que chegam ao mesmo tempo no mesmo canal de recepção em diferentes fatores de espalhamento não irão colidir. No entanto, dois pacotes com o mesmo fator de espalhamento chegando ao mesmo tempo no mesmo canal devem resultar em uma colisão.

Compreender essa característica do SF permite que se compreenda que utilizar diferentes valores de espalhamento espectral possibilita mais flexibilidade e resiliência para transmissões em uma mesma largura de banda.

Como exemplo, considerando uma rede FSK (*Frequency-Shift Keying*) usando 12 canais com uma banda estreita, cada canal com uma taxa de 1,2 kb/s, e ocupando uma largura de banda total de 125 kHz, tem-se a seguinte capacidade total de ocupação de canal:

$$Capacidade_{FSK} = 12 * 1,2 = 14,4kb/s \quad (2)$$

Ao considerar o transceptor SX 1276, descrito na documentação técnica Semtech Corporation (2020), utilizando a tecnologia LoRa, onde a ortogonalidade dos SF's permitem múltiplas transmissões na mesma faixa de frequência sem ocorrer colisões e ainda permite um

sétimo SF diferente (o SF = 6), pode-se calcular a ocupação de canal, considerando o mesmo BW de 125 kHz e CR de 4/5, como sendo:

$$\begin{aligned} \text{Capacidade}_{\text{LoRa}} &= SF12 + SF11 + SF10 + SF9 + SF8 + SF7 + SF6 \\ &= (293 + 537 + 976 + 1757 + 3125 + 5468 + 9375) \text{ kb/s} \\ &= 21,531 \text{ kb/s} \end{aligned}$$

(3)

Assim, pode-se verificar que o espalhamento espectral não só aumenta a robustez da transmissão como também traz uma eficiência da utilização do canal quando comparado a outras técnicas de modulação.

Ainda em comparação de um transceptor FSK comum e um SX 1276 utilizando LoRa, verifica-se o custo de *link* para cada esquema de modulação. Para uma potência de transmissão fixa observa-se na Figura 1 o custo de *link*.

**Quadro 1 – Comparação de custo de *link* entre a tecnologia FSK e LoRa.**

Modo	Taxa de dados (kb/s)	Sensibilidade	$\Delta$ (dB)
FSK	1,2	-122	-
LoRa SF = 12	0,293	-137	+15
LoRa SF = 11	0,537	-134,5	+12,5
LoRa SF = 10	0,976	-132	+10
LoRa SF = 9	1,757	-129	+7
LoRa SF = 8	3,125	-126	+4
LoRa SF = 7	5,468	-123	+1
LoRa SF = 6	9,375	-118	-3

**Fonte: Semtech Corporation (2015).**

Analisando a tabela é possível notar que nos cenários em que a modulação FSK atinge a mesma taxa de dados da modulação CSS (nos cenários com SF's 9 e 10) existe uma diferença de 7 a 10 dB na recepção. E nos cenários mais próximos entre as sensibilidades (SF 7), o transceptor LoRa obtém um taxa de dados 4,55 vezes superior.

Ao comparar redes LoRa com outras tecnologias deve-se analisar os pontos fortes e as desvantagens na implementação de cada uma das tecnologias. Mas, a escolha do tipo de rede deve ser sempre feito ponderando as necessidades da aplicação, o que torna cada uma delas opções viáveis no cenário correto. Para se ter uma lista de comparação mais coerente, foram apenas comparadas algumas das tecnologias mais visadas do mercado e que cubram uma larga

lista de cenários dentro das necessidades de IoT. O quadro 2 mostra as características dessas tecnologias.

**Quadro 2 – Comparação das tecnologias mais visadas do mercado.**

Bluetooth (PAN)	Muito baixa cobertura Baixa taxa de dados Baixo custo de implementação Média duração de bateria
Cat-M1	Muito baixa cobertura Alta taxa de dados Médio custo de implementação Baixa duração de bateria
LoRa (LPWAN)	Alta cobertura Baixa taxa de dados Baixo custo de implementação Alta duração de bateria Grande capacidade de conexões
Narrow-Band IoT	Baixa cobertura Baixa taxa de dados Baixo custo de implementação Alta duração de bateria Nós estacionários
Wi-Fi (LAN)	Baixa cobertura Alta taxa de dados Médio custo de implementação Baixa duração de bateria

**Fonte: Semtech Corporation (2015).**

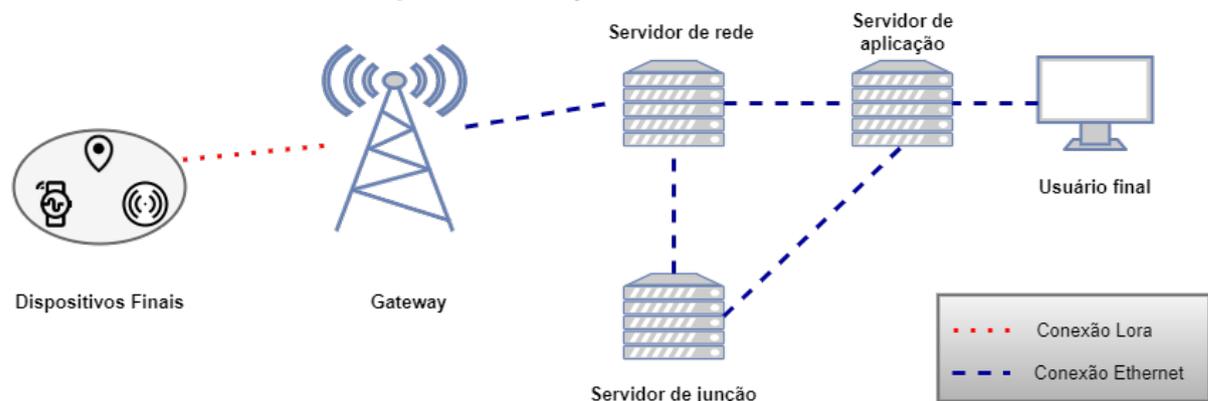
Através das principais características, que são essenciais para as mais diversas aplicações em IoT, pode-se identificar em quais condições seria mais viável se aplicar uma rede LoRa.

Com o diferencial de oferecer simultaneamente uma grande cobertura, alta duração de bateria e uma grande capacidade de conexões, LoRa atua muito bem como uma rede de sensoriamento, quanto há uma necessidade de conectar-se diversos nós sensores espalhados em uma grande área. Neste tipo de rede não costuma-se ter uma necessidade de grandes taxas de dados, o que elimina uma das desvantagens do LoRa. E ainda, o baixo custo de implementação da rede e a economia em manutenção, decorrente da alta duração de bateria, vem para complementar e incentivar ainda mais sua utilização.

## 2.2 ESTRUTURA DE REDES LORA

Redes LoRa são normalmente implementadas em uma topologia em estrela, nas quais os nós, dispositivos finais, transmitem pacotes a um *gateway* em um único salto, que repassa as mensagens para um servidor através de uma conexão de rede não LoRa (por exemplo, Ethernet). A Figura 2 representa uma rede LoRa com seus componentes e conexões.

**Figura 2 – Ilustração de uma rede LoRa.**



**Fonte: Autoria própria.**

Um dispositivo final (*ED - End Device*), também conhecido como nó, é um sensor ou um atuador que conecta-se aos *gateways* usando uma modulação RF LoRa. Para um grande número de aplicações, um dispositivo final é um sensor com autonomia que normalmente utiliza baterias. Como exemplos, quando usados como atuadores, podemos citar: controle de iluminação pública, válvula de água, prevenção de vazamentos, entre outros.

Um *gateway* LoRaWAN recebe mensagens moduladas LoRa de qualquer dispositivo final em sua área de cobertura e encaminha os pacotes de dados para o servidor de rede LoRa (*LNS - LoRa Network Server*), ao qual é conectado por meio de um *backbone* IP. Não há associação fixa entre um dispositivo final e um *gateway* específico. Em vez disso, o mesmo sensor pode se conectar a vários *gateways* na área. Quando conectados a múltiplos *gateways*, os nós reduzem significativamente suas taxas de erro de pacote, uma vez que as chances de pelo menos um *gateway* receber a mensagem são muito altas.

Os *gateways* operam inteiramente na camada física e, pode-se dizer que, nada mais são do que encaminhadores de mensagens LoRa. Eles apenas realizam uma verificação de integridade dos pacotes recebidos. Caso tenha-se perdido a integridade da mensagem, esta será descartada. Caso contrário, o GW irá encaminhar a mensagem para o LNS. Uma vez que vários *gateways* podem receber a mesma mensagem de um único dispositivo final, o LNS pode receber mensagens duplicadas.

O servidor de rede LoRa gerencia toda a rede, controlando dinamicamente os parâmetros de rede para adaptar o sistema às condições em constante mudança e estabelecendo conexões seguras. O servidor de rede garante a autenticidade de todos os sensores da rede e a integridade de todas as mensagens.

Dentre as ações de gerenciamento realizadas pelo LNS pode-se citar:

- Verificar o endereço dos nós;
- Autenticar quadro e gerenciar contador de quadro;
- Confirmar mensagens recebidas (ACK);
- Adaptar as taxas de dados usando o protocolo ADR (*Adaptive Data Rate*);
- Responder a todas as solicitações da camada MAC provenientes dos nós;
- Encaminhar pacotes para o servidor de aplicativo adequado;
- Enfileirar pacotes provenientes de servidores de aplicativos para quaisquer nós;
- Encaminhar mensagens de associação a rede entre os nós e o servidor de junção a rede.

Os servidores de aplicativos são responsáveis por manusear, gerenciar e interpretar com segurança os dados dos nós. Eles também geram todas as mensagens a serem enviadas da camada de aplicativo para os ED conectados.

O servidor de junção gerencia o processo de ativação dos dispositivos finais a serem adicionados à rede.

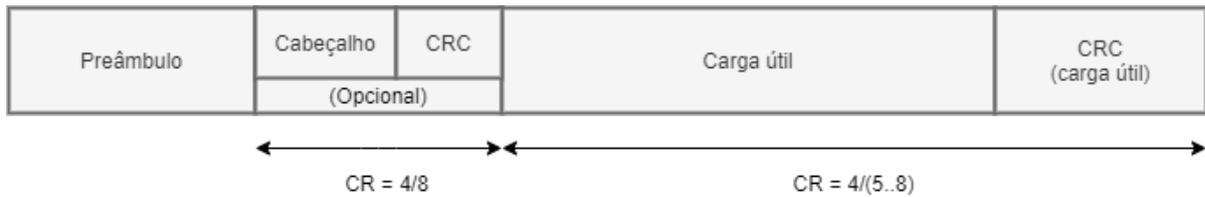
### 2.3 ESTRUTURA DE UM PACOTE LORA

Um pacote LoRa contém três elementos:

- **Preâmbulo:** utilizado para sincronizar o receptor com o fluxo de dados que está prestes a ser recebido. O tamanho do preâmbulo pode ser alterado para variar de 6 a 65535.
- **Cabeçalho (opcional):** caso habilitado pode conter as seguintes informações: o tamanho da carga útil, o valor do CR (*CODE RATE*), a presença, ou não, de uma verificação cíclica de redundância (*CRC - Cyclic Redundancy Check*) de 16 bits para a carga útil. O cabeçalho é transmitido com um CR igual a 4/8, e pode ter seu próprio CRC. No caso das informações já serem conhecidas pelo receptor pode-se optar pela não utilização de um cabeçalho.
- **Carga útil:** os dados que pretendem ser transmitidos.

A Figura 3 ilustra um pacote LoRA.

**Figura 3 – Ilustração pacote LoRA.**



**Fonte: Semtech Corporation (2020).**

## 2.4 LORAWAN

LoRaWAN é um protocolo que atua na camada de controle de acesso ao meio (MAC) e foi projetado para ser utilizado sobre a camada física (PHY) LoRa. As redes LoRaWAN são organizadas para transmitir pacotes a um *gateway* em um único salto. A comunicação é bidirecional entre dispositivos finais e *gateway*.

Uma das características das redes LoRaWAN são as impossibilidades de comunicações dispositivo a dispositivo. Os pacotes podem ser transmitidos apenas de um dispositivo final para o servidor de rede e vice-versa.

Para atender diversos números de aplicações, o LoRaWAN define três tipos diferentes de arranjos: Classe A, B e C.

### 2.4.1 Classe A

Somente a classe A deve estar implementada em todos os dispositivos finais. Sendo assim, dispositivos da classe B necessariamente precisam também poder operar como classe A, e dispositivos da classe C devem suportar as três implementações.

Definido pela LoRa Alliance, após um dispositivo de classe A realizar uma transmissão, deve-se abrir duas janelas de recepção, cada uma com um atraso específico e manipulável. O valor recomendado para cada janela de recebimento é 1 e 2 segundos, respectivamente. Essas janelas são usadas para receber do servidor uma mensagem de reconhecimento da chegada do pacote (ACK), ou mesmo alguns pacotes de dados. As características decorrentes do uso das janelas são:

- Caso o servidor tenha algum pacote para enviar a um nó, ele deve esperar até que uma das janelas se abra, e jamais conseguirá se comunicar em outro momento;
- Caso o nó receba uma mensagem na sua primeira janela de tempo ele não precisará abrir a

segunda;

- Os nós não podem enviar outros pacotes antes de receber qualquer resposta em uma de suas janelas ou antes dos dois tempos das janelas expirarem.

A Figura 4 apresenta o esquema de janelas de recepção dos dispositivos da classe A.



Analisando as características, pode-se notar que não existem formas de uma aplicação acordar um dispositivo final. Tendo isto em vista, a classe A não foi projetada para ser utilizada em uma rede de atuadores.

#### 2.4.2 Classe B

Uma rede utilizando classe B deve implementar um novo elemento na rede LoRa, os chamados *Beacons*. Um *beacon* é uma mensagem sincronizada no tempo que deve ser transmitida periodicamente pela rede por meio dos *gateways*. Os dispositivos finais devem receber periodicamente um dos *beacons* para que possam alinhar sua referência de tempo interna com a rede.

Com base na referência de tempo do *beacon*, os dispositivos finais podem abrir janelas de recepção periodicamente. Isso permite que um servidor de aplicação se comunique com um nó em qualquer uma das janelas de recepção. Para que uma rede LoRaWAN suporte dispositivos Classe B, todos os *gateways* LoRaWAN na rede precisam ter um GPS embutido para fornecer um relógio de sincronização preciso.

#### 2.4.3 Classe C

Os dispositivos da classe C são aqueles que não dependem da energia da bateria. Assim, eles estão sempre disponíveis para receber mensagens do LNS, a menos que estejam

transmitindo. Como resultado, eles oferecem a menor latência para comunicação do servidor com um dispositivo final.

Como os dispositivos da classe A na classe C os nós abrem duas janelas de escuta após uma transmissão. Mas, diferente dos dispositivos da classe A, essa segunda janela não tem um tempo máximo definido para fechar. Essa janela só se encerra com o início de uma nova transmissão pelo nó.

## 2.5 TAXA DE DADOS ADAPTATIVA

Taxa de dados adaptativa (ADR) é um mecanismo simples que modifica a taxa de dados com base no custo de *link* das transmissões de um nó para o *gateway*. A adaptação da rede busca utilizar melhor os recursos do meio de modo a diminuir o tempo no ar ou melhorar a probabilidade de entrega de cada pacote transmitido por um determinado ED.

Para realizar as modificações necessárias na rede, os NS baseiam-se nas mensagens encaminhadas pelo *gateways*. Essas mensagens contêm métodos informando a intensidade do sinal e o tempo para a recepção de cada pacote. Com base nos dados recebidos, o servidor de rede determina qual deve ser a taxa de dados ideal para cada nó.

A adaptação da rede se dá através da alteração do valor de SF utilizado em cada transmissão. Quando os valores são baixos, tem-se a característica de menor tempo no ar para as mensagens enviadas. Enquanto para os fatores de espalhamento maiores se tem a vantagem de uma maior intensidade do sinal na recepção pelos *gateways*.

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo traz uma revisão bibliográfica acerca dos temas relacionados a esse trabalho. A seguir é apresentado um breve resumo dos artigos mais relevantes publicados na área, incluindo uma análise e comparação com a pesquisa proposta neste trabalho.

As primeiras pesquisas publicadas sobre a tecnologia LoRa são datadas do ano de 2015. Essas pesquisas buscam avaliar a cobertura em redes que utilizavam LoRa.

Em Petajajarvi *et al.* (2015) é utilizado um dispositivo final, fixado em um carro e em um barco, a fim de verificar a distância máxima de transmissão em meios terrestre e marítimo. Segundo o estudo, para um nó operando na banda ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*) de 868 MHz usando 14 dBm de potência de transmissão e com um SF máximo, observa-se um alcance máximo de comunicação de mais de 15 km no solo e perto de 30 km na água.

Em Mikhaylov *et al.* (2016) são verificadas as limitações das redes LoRa. Inicialmente, os autores analisam a taxa e o tempo de transmissão de dados para um dispositivo final. Após essa análise, estima-se o número de nós suportados por um *gateway* com base na sua distribuição espacial. Por fim, é apresentada uma discussão das aplicações que podem ser utilizadas em uma rede LoRa e suas limitações. Os autores concluíram que, um nó próximo ao gateway consegue no máximo transmitir com uma taxa de 2 kbits/s e essa taxa decai com a distância chegando a 100 bits/s. Também foi verificado, que a escalabilidade de um único gateway chega a diversos milhões de nós transmitindo poucos bytes por dia.

Alguns parâmetros definidos em uma implementação LoRa trazem consigo características únicas. É o caso do espalhamento espectral ortogonal que possibilita transmissões concorrentes não destrutivas. A análise dessa característica é um dos pontos presentes em Bor *et al.* (2016). Outra peculiaridade dos dispositivos finais é a presença de um detector de portadora diferente do usado pela maioria dos outros transceptores, por detectar o preâmbulo das mensagens e não a real ocupação de um canal. No artigo também é registrada a precisão de tais detectores de portadora. Como resposta da indagação inicial do artigo, os autores concluem que redes LoRa não escalam bem, se utilizados apenas um gateway em uma área de 3.8 hectares pode-se apenas 120 nós transmitirem na rede. Mas também é apresentado que as redes LoRa podem escalar muito bem se usados parâmetros de transmissão dinâmica e/ou múltiplos gateways.

Em Bankov *et al.* (2016) buscam-se as limitações da tecnologia LoRa com foco na Taxa de Erro de Pacote e na Relação de Perda de Pacote. Para os testes é utilizada uma rede com três

canais e seis taxas de dados. Os autores concluem que o limite das redes que podem ser criadas com LoRaWAN são equivalentes ao tráfego gerado por 500 nós enviando duas mensagens por dia.

Embora uma das principais vantagens de redes LPWAN seja a possibilidade de prover comunicação em grandes distâncias, na ordem de quilômetros, existem diversas aplicações IoT para ambientes fechados. Em Neumann *et al.* (2016) é verificado como o LoRaWAN se comporta nesses cenários. Inicialmente, são apresentadas as limitações da rede em termos de periodicidade e tamanho dos dados de transmissões. Em seguida, são testadas as transmissões através de diversas salas do prédio considerado. Os autores constataram que os obstáculos não causam muito impacto nas transmissões dos dados.

O protocolo LoRaWAN não usa nativamente o protocolo IP (*Internet Protocol*), o que segundo Weber *et al.* (2016) torna mais difícil as integrações em um ambiente IoT com diversas tecnologias. Os autores propõem uma integração do protocolo IPv6 e concluem que o uso deste com LoRaWAN é possível na comunicação fim-a-fim, possibilitando uma completa integração no ambiente IoT.

Em Petrić *et al.* (2016) é apresentado um novo tipo de rede baseado na tecnologia LoRa, conhecida como LoRa FABIAN. Também é analisada a qualidade de serviço (*Quality of Service - QoS*) das redes. Os autores constataram dificuldades em analisar a performance de redes LoRa FABIAN, pela grande quantidade de variáveis que existem nos cenários testados. Eles ainda apontam, que até onde conseguiram compreender, não existe um protocolo de envio das mensagens entre múltiplos gateways para os nós, nos testes realizados os vários gateways enviaram as mensagens simultaneamente sem qualquer critério de qual deles deveria fazer esse envio.

Com o aumento na popularidade das redes LoRa, se faz necessária uma estratégia para mitigar a interferência entre redes vizinhas colocadas em uma localidade próxima Voigt *et al.* (2016). São utilizadas duas estratégias: antenas direcionais e múltiplos *gateways*. Através de simulações, comprova-se um ganho para ambas as estratégias, mas o uso de múltiplos *gateways* traz um ganho muito superior.

Em Silva *et al.* (2017) é realizado um estudo de caso para a tecnologia LoRaWAN, fazendo comparações com outras redes LPWAN largamente empregadas. Segundo os autores, LoRaWAN têm várias vantagens sobre outras tecnologias LPWAN, incluindo: melhor tempo no ar, melhor duração da bateria, comunicação bidirecional e ilimitada, criptografia nativa dos

pacotes sendo capaz de criar redes públicas e/ou privadas e taxa de dados adaptável permitindo maior escalabilidade da rede.

Redes sem fios, por utilizarem um meio comum e de fácil acesso a várias pessoas, são vulneráveis a diversos tipos diferentes de ataques. Tendo, isso em vista, em Aras *et al.* (2017) é analisada a vulnerabilidade das redes LoRa contra diferentes tipos de ataques. Os autores concluem que os dispositivos presentes no mercado, na época, são passíveis de diferentes ataques.

Para alcançar sempre a melhor eficiência em cada transmissão, a tecnologia LoRa traz uma grande diversidade de configurações para seus vários parâmetros. Mas, configurar os parâmetros de forma ideal é um desafio. Em Bor e Roedig (2017) relata-se que existem 6720 possíveis configurações dentro dessa tecnologia. Os autores trazem um regime de testes para determinar as configurações suficientes para um determinado cenário. Com isso, são fornecidos os primeiros passos na busca de um sistema automático de ótima qualidade para configurações em uma rede.

Mais atualmente, pesquisadores vêm demonstrando interesse em aprimorar a tecnologia LoRaWAN para ambientes de cidades inteligentes. Em To e Duda (2018) é proposto o uso de CSMA como método de acesso ao meio e realizada uma comparação com o método de acesso padrão Aloha. Os parâmetros avaliados são: taxa de entrega de pacotes, taxa de colisão e consumo de energia em cada nó. Os resultados constatam que o CSMA atinge uma maior taxa de entrega do que o protocolo Aloha convencional.

Uma das grandes preocupações ao lidar com redes para IoT é a capacidade de escalonamento das redes. Vindo de uma necessidade de diversas aplicações comunicarem-se com múltiplos dispositivos finais, em Georgiou e Raza (2017) e Bor *et al.* (2016) verifica-se a capacidade de redes LoRa escalonarem.

Em uma análise inicial pode-se comparar a utilização de tempos diferentes de DIFS (*Distributed Inter Frame Spacing*) proposta nesse trabalho com a que é realizada no protocolo IEEE 802.11e Mangold *et al.* (2002). Porém, deve-se notar que o protocolo aqui proposto não tem a intenção de prover qualquer tipo de QoS na rede, diferente do que se busca com a implementação do 802.11e.

O objetivo principal deste trabalho é implementar um novo método de acesso aplicado à tecnologia LoRaWAN, neste caso, o CSMA com tempos de sensoriamento do meio (*Carrier Sense - CS*) adaptativo. Diferentes tempos de sensoriamento do meio serão testados para verificar o comportamento da rede em relação às métricas de vazão, taxa de entrega de pacotes, eficiência

energética e consumo de bateria.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 METODOLOGIA

Este capítulo mostra os materiais e métodos utilizados durante a pesquisa realizada. Inicia-se com uma explicação do ambiente de simulação escolhido e os parâmetros utilizados. Em seguida, são apresentadas as análises iniciais realizadas seguidas de uma descrição do protocolo CSMA proposto em (TO; DUDA, 2018).

Por fim são apresentados os três esquemas de recepção (ALOHA, CSMA, CSMA Adaptativo) para melhor entender as modificações no controle de acesso ao meio propostos pelo protocolo CSMA Adaptativo.

### 4.2 ANÁLISES INICIAIS

Inicialmente, verificou-se a melhor forma de analisar uma rede LoRaWAN levando em conta os quesitos de escalabilidade da rede e o impacto no desempenho geral da mesma. Desejou-se simular redes que iriam de poucas dezenas até dezenas de milhares de nós. Levando em conta o custo financeiro e também a necessidade de uma grande área para instalar tais redes, decidiu-se que a simulação computacional seria a opção mais viável.

Na sequência foi necessário definir uma plataforma computacional para as simulações. Durante a revisão dos trabalhos sobre LoRaWAN encontrou-se um repositório que continha um modelo da rede implementado no ambiente ns-3.

O ns-3 é um simulador de rede de eventos discretos para sistemas de Internet, direcionado principalmente para pesquisa e uso educacional. O ns-3 (NSNAM, 2011) é um software livre, licenciado sob a licença GNU GPLv2 e está publicamente disponível para pesquisa, desenvolvimento e uso. Este simulador vem sendo amplamente utilizado por pesquisadores da área de redes de computadores, tornando-o uma excelente opção para validações da pesquisa realizada.

O módulo LoRaWAN adotado é capaz de operar com o módulo de energia padrão do ns-3, tornando possível realizar medições de consumo de energia e monitoramento da bateria dos nós sensores.

Os parâmetros de energia, como corrente elétrica e tensões adotadas, são extraídos do Semtech transceptor série SX1276 Semtech Corporation (2020). Os parâmetros utilizados para o

cálculo de consumo energético estão presentes na Tabela 1.

**Tabela 1 – Valores das correntes elétricas em cada modo de operação dos nós**

Tensão típica de 3,3V	
Estado do nó	Corrente
Transmitindo	112 mA
Recebendo	28 mA
Ocioso	1,4 mA
Dormindo	1,5 $\mu$ A

Originalmente o ns-3 era executado através de comando no terminal do Linux Mint (sistema operacional utilizado no computador realizando as simulações), mas sentiu-se a necessidade de se utilizar uma IDE (*Integrated Development Environment*) para facilitar algumas operações, principalmente para realizar o *debug* de trechos do código. A IDE Eclipse foi utilizada por ser um software aberto e por familiaridade dos pesquisadores.

Com o ambiente de trabalho devidamente configurado, iniciaram-se os primeiros testes. Os testes utilizaram modelos disponibilizados juntamente com o modelo LoRaWAN, onde apresentavam cenários simples para se familiarizar com configurações da rede necessárias como: números de nós, taxa de geração de mensagens, habilitar mensagens de *debug* para compreender cada etapa da simulação, entre outras coisas.

Após dominar as ferramentas, o novo objetivo foi estudar em detalhes o modelo da rede LoRaWAN, a fim de encontrar os pontos que precisariam ser modificados para trocar o método de acesso utilizado, do Aloha para o CSMA.

Foram identificados os objetos que eram chamados durante o envio de cada pacote. Esses objetos sofreram as modificações necessárias para implementar um método de sensoriamento do meio em cada nó. Os sensores foram modificados para que fossem utilizados para tomar a decisão sobre enviar uma mensagem ou aguardar para enviá-la mais tarde, dependendo da disponibilidade do meio. Esse é o funcionamento padrão de redes utilizando o CSMA.

Com o novo método de acesso, CSMA, tendo sido implementado, iniciou-se uma série de testes para validar a funcionalidade do mesmo. Durante os testes, comparando o modo CSMA com o modo Aloha, verificou-se uma grande melhora na taxa de entrega de mensagens, um aumento no consumo da bateria de todos os nós na rede e um aumento na eficiência energética para redes muito ocupadas. Todos os fatores encontrados estavam de acordo com o esperado.

Para se ter uma confiabilidade ainda maior nos resultados obtidos, até então, foram usados os mesmos parâmetros de simulação citados por To e Duda (2018) em seu artigo. Os parâmetros podem ser visualizados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Parâmetros dos cenários de simulação**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores</b>
Número de nós	10 até 10.000
Tamanho dos pacotes	50 bytes
DIFS	10 ms (CSMA) Adaptativo com DIFS máximo de 10 ms (CSMA Adaptativo)
Tempo de simulação	20.000 s
Número de simulações	10
Limite dos contadores	33
Tempo entre mensagens	600 s
SF's utilizados (aleatório)	7 ao 12

As novas simulações trouxeram resultados muito próximos aos relatados no artigo de Duda To e Duda (2018) e com isso valida-se a implementação realizada.

Após as mudanças de parâmetros e novas simulações constataram-se novamente as mesmas vantagens e desvantagens na substituição do protocolo de acesso ao meio. Devido a isto, surgiu uma nova proposta de modificação, que seria, alterar o tempo que os nós sensoreiam o meio.

Nos novos testes, com tempos variados de sensoriamento do meio, percebeu-se uma menor utilização da bateria dos nós, porém trouxe um impacto negativo na taxa de entrega de mensagens para redes com milhares de nós e juntamente uma menor eficiência energética para os cenários.

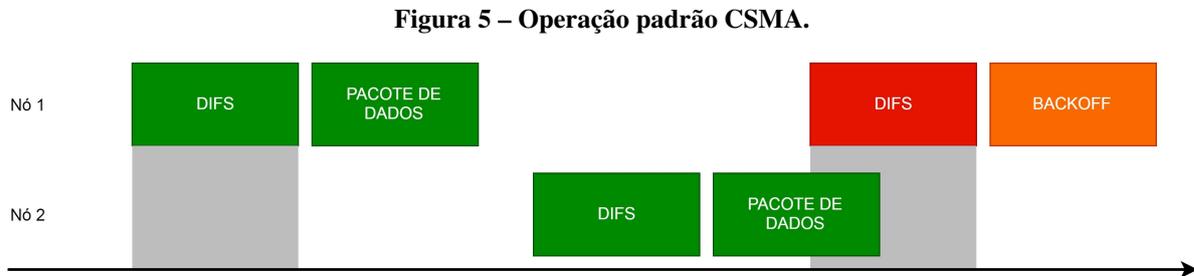
Todavia, o novo foco do projeto tornou-se implementar um protocolo de acesso ao meio que conseguisse ter um baixo consumo de bateria para redes com poucos nós, característica das redes Aloha. E ainda, para redes com grande ocupação desejava-se manter uma alta taxa de entrega de mensagens, característica das redes CSMA. Em resumo, propõe-se um novo protocolo que una as vantagens dos dois métodos anteriormente implementados.

Na seção a seguir será explicado o funcionamento do protocolo CSMA e detalhado o processo de sua modificação para aprimorá-lo de forma a atingir uma melhor utilização da bateria em redes pouco ocupadas.

### 4.3 CSMA ADAPTATIVO PROPOSTO

O protocolo CSMA no seu modo padrão exige que um nó que tenha um pacote para transmitir, monitore o canal por um período de tempo chamado DIFS (*Distributed Inter Frame Spacing*). Se durante o período de DIFS, o meio estiver desocupado, o nó está liberado para enviar sua mensagem. Entretanto, se durante a verificação for detectada a utilização do meio,

o nó deve aguardar um tempo aleatório de *Backoff*. Após aguardar o tempo de *backoff*, o nó deve iniciar a verificação do meio novamente. A Figura 5 exemplifica a operação padrão de um CSMA com duas transmissões: uma bem-sucedida e outra que detecta o meio ocupado e entra em *backoff*.



Fonte: autoria própria.

Nos testes realizados foram utilizados um tempo de DIFS de 10 *ms*, valor obtido do artigo de Duda To e Duda (2018) e usado para comparação com o mesmo. Mas esse valor, quando comparado a outras tecnologias de redes sem fio, representa uma grandeza muito superior. Exemplos disso, são os protocolos DSSS e FHSS que têm como tempo de DIFS 50  $\mu$ s e 128  $\mu$ s, seguindo a mesma ordem.

Com a percepção da discrepância de tempos foi testada a rede com novos valores de DIFS inferiores ao proposto por To e Duda (2018), na expectativa de compreender o seu significado. Mas, o que se verificou é que não existe grande impacto na taxa de entrega de mensagens, quando alterado o valor de DIFS para 1 *ms*. Uma queda na taxa de entrega de mensagens começa a aparecer apenas para redes com dezenas de milhares de nós.

Após esta verificação foi realizada ainda uma nova redução com uma utilização de DIFS na casa dos milissegundos, mas na simulação, devido a limitações do código, o valor do consumo de bateria parou de ser computado. Diante dessa situação, foi definido que 1 *ms* seria um bom valor para se usar e melhoraria a vida útil total da bateria, sendo um dos objetivos do novo protocolo.

Sendo assim, a nova meta era conseguir manter ganho na eficiência energética e remover a perda na taxa de entregas para redes mais povoadas. A solução proposta torna o valor de DIFS adaptável ao sensoriamento que os nós estavam fazendo. Assim, quando estivessem em redes desocupadas eles teriam um comportamento mais semelhante ao Aloha padrão utilizado, e quando eles sentissem que a rede estava bastante ocupada poderiam aproximar o seu valor de DIFS para os 10 *ms* e teriam um comportamento semelhante ao CSMA inicialmente implementado.

O novo protocolo proposto assume uma visão otimista da rede, iniciando com o menor tempo de DIFS esperando que a rede esteja livre e, caso encontre a rede ocupada, aumenta o tempo até ao máximo definido.

A modificação foi realizada após notar cenários em que poucas vezes, ao fazer o sensoriamento do meio, um nó realizava *backoff*. Esses cenários são comuns para redes com menos de 1000 nós. Tendo isso em vista, espera-se que ao diminuir o tempo DIFS diminua também o consumo da bateria que é utilizada pelos nós para se manter em um estado de sensoriamento.

Mesmo que inicialmente uma diminuição de alguns milissegundos por transmissão não aparente ter muito impacto, os dispositivos LoRaWAN são projetados para terem bateria por 8~10 anos. Assim pequenos ganhos acumulados podem representar um grande impacto na duração da bateria dos dispositivos.

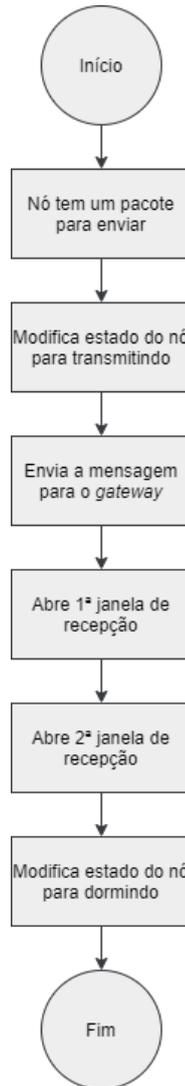
A implementação do protocolo CSMA traz também um aumento no consumo energético se comparado ao protocolo padrão Aloha. Tornando o tempo de sensoriamento adaptável, através do CSMA Adaptativo, espera-se que a rede tenha um gasto de energia mais próximo ao protocolo Aloha padrão.

A Figura 6 apresenta o processo de envio utilizando o protocolo Aloha, padrão do LoRaWAN. A maior característica do método é sua simplicidade. Uma vez que um nó deseje enviar o pacote, o processo se resume a modificar o modo do ED para transmitindo (Tx) e iniciar o envio.

Deve-se destacar que a rede implementada não está utilizando mensagens de confirmação (ACK), uma vez que caso ocorra colisão os pacotes perdidos não serão reenviados.

Em seguida, é permitido visualizar na Figura 7 as alterações iniciais integradas ao protocolo de envio dos pacotes, principalmente como pode ser destacado, uma verificação prévia do meio antes de enviar. Também foi incluída uma rotina de comportamento caso o meio estivesse ocupado. Sendo essa, iniciar um tempo de *backoff*, modificar o estado do nó para ocioso e ao final do tempo de *backoff* tentar uma retransmissão.

As alterações foram feitas para que a rede se comportasse como descrito pelo protocolo CSMA em seu método de acesso ao meio. Por fim, tem-se na Figura 8 uma visualização das mudanças propostas por este trabalho de pesquisa. É possível perceber as novas tomadas de decisões que caracterizam o método CSMA Adaptativo: quando alguns contadores adicionados à rede ultrapassam um limite definido, tem-se uma adaptação no tempo de sensoriamento do meio.

**Figura 6 – Esquema de recepção Aloha.**

**Fonte: autoria própria.**

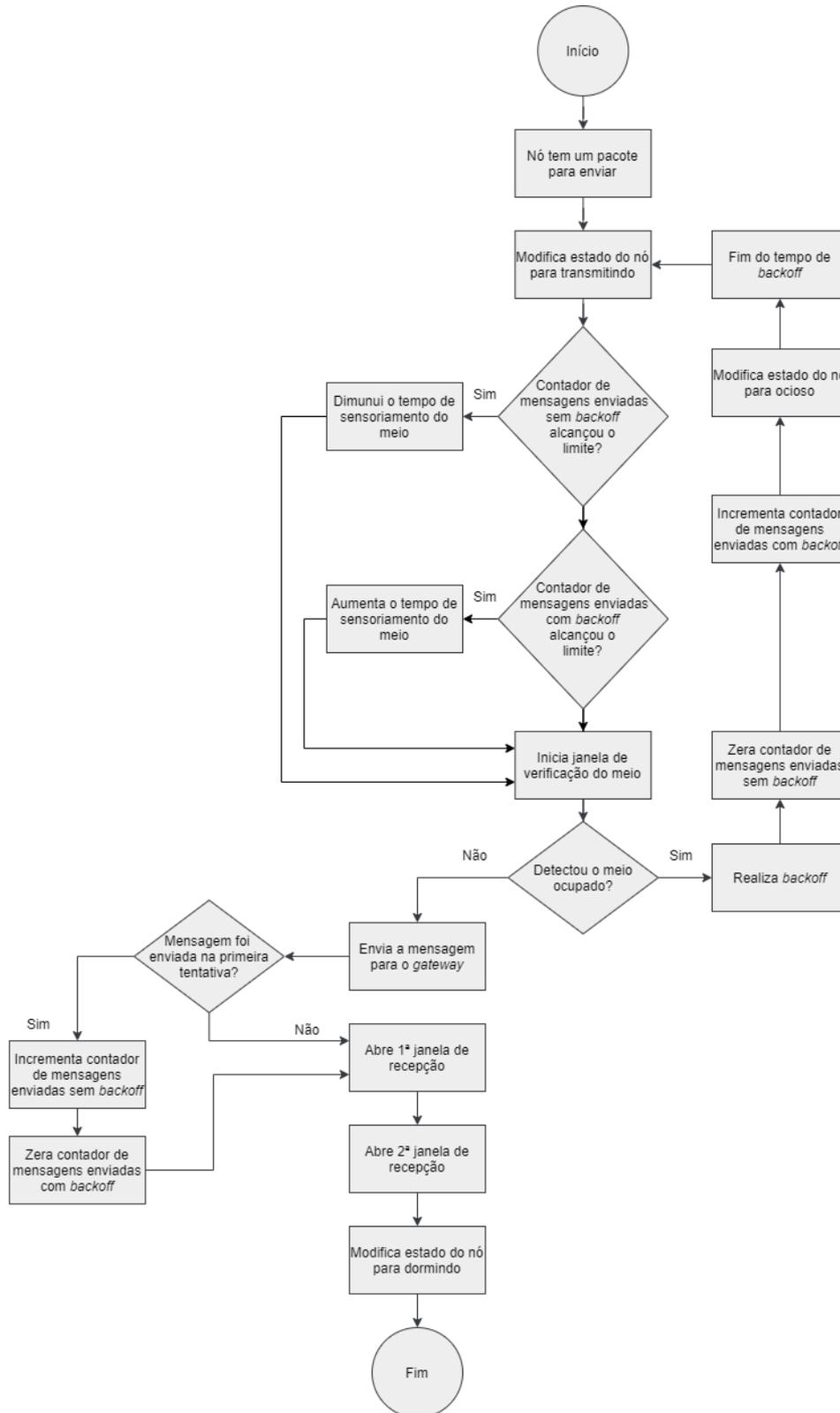
O método pretende utilizar as informações que os nós retiram no sensoriamento do meio, o que seria semelhante a uma interpretação do ED quanto à ocupação do meio compartilhado, para definir se devem gastar mais tempo verificando o meio. Assim, previne-se que os dispositivos finais gastem mais bateria do que o necessário.

**Figura 7 – Esquema de recepção CSMA.**



**Fonte: autoria própria.**

**Figura 8 – Esquema de recepção CSMA Adaptativo.**



**Fonte: autoria própria.**

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta uma análise e discussão dos resultados obtidos das simulações descritas no capítulo anterior, utilizando os mesmos parâmetros definidos na Tabela 2. Inicialmente são apresentadas as métricas utilizadas. Os primeiros resultados representam uma comparação dos protocolos ALOHA e CSMA. Em seguida são apresentados os resultados do protocolo CSMA Adaptativo, finalizando com uma discussão dos ganhos provenientes desse novo protocolo.

Para avaliar o desempenho dos protocolos de acesso ao meio, três métricas de desempenho são consideradas:

- **Taxa de entrega de mensagens:** representa o percentual de mensagens criadas ( $M_{criadas}$ ) que são entregues ( $M_{entregues}$ ) ao destino.

$$\text{Taxa de Entrega de Mensagens} = \frac{M_{entregues}}{M_{criadas}} \quad (4)$$

- **Vazão da rede:** representa a quantidade de bits que estão sendo efetivamente enviados pela rede levando em conta o tamanho dos pacotes enviados ( $M_{tamanho}$ ). Como se deseja obter uma vazão em bits por segundo deve-se normalizar o valor pelo tempo de simulação ( $T_{simulação}$ ). A Equação 5 demonstra como é realizado o cálculo da vazão da rede.

$$\text{Vazão da rede} = \frac{M_{entregues} * M_{tamanho}}{T_{simulação}} \quad (5)$$

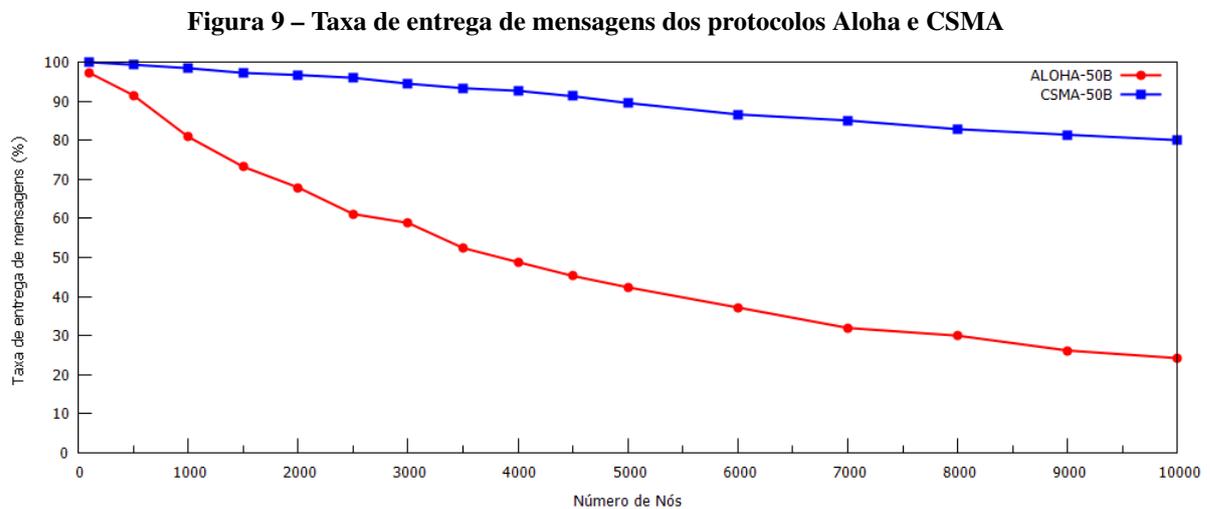
- **Eficiência energética:** representa a quantidade de bits que é possível enviar pela rede gastando um Joule de energia. É analisada a quantidade total de energia gasta ( $E_{gasta}$ ) por cada nó da rede e a quantidade de bits que cada nó conseguiu enviar. A Equação 6 demonstra como é realizado o cálculo da eficiência energética.

$$\text{Eficiência energética} = \frac{M_{entregues} * M_{tamanho}}{E_{gasta}} \quad (6)$$

## 5.1 COMPARAÇÃO ALOHA E CSMA

Inicialmente, foram avaliados os protocolos Aloha e uma versão CSMA com tempo DIFS fixo de dez *ms*. Variou-se também os números de dispositivo na rede, inicialmente com dez dispositivo e variando até dez mil. O tempo entre as transmissões dos pacotes é de 600s.

Na Figura 9 é apresentada a taxa de entrega de mensagens para os dois protocolos. Nota-se que a entrega de mensagens com o CSMA é maior para todos os números de nós. A diferença entre as curvas tende a aumentar à medida que o número de dispositivos cresce. Para 10.000 dispositivos, o ganho relativo é de 55% a favor do CSMA.



**Fonte: autoria própria.**

Com esses resultados é possível afirmar que o protocolo CSMA se manteve sempre acima de uma taxa de 80% de entrega de mensagens, chegando a um mínimo de 80,03% para uma rede com dez mil dispositivos.

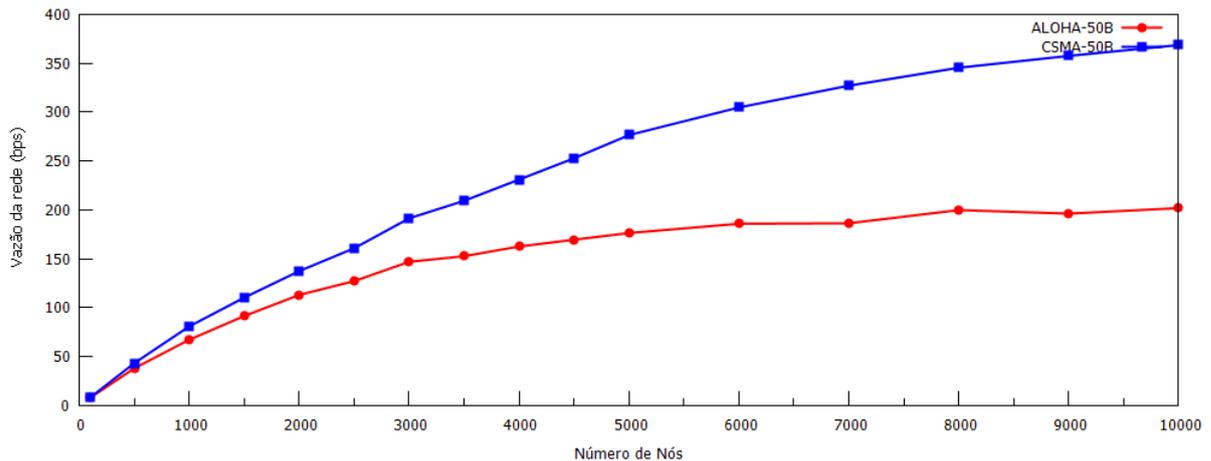
É possível ver também que se tem uma queda quase linear quando se aumenta o número de dispositivo na rede. Em contrapartida, com o método Aloha considera-se uma queda muito mais abrupta, onde rapidamente a rede apresenta uma entrega de menos de 80% dos pacotes gerados. A taxa mínima de entrega de mensagens do protocolo Aloha foi de 25% para uma rede com dez mil nós.

Considerando todas as variações dos números de nós, o CSMA obteve ganhos de 3% a 55% na taxa de entrega de pacotes, quando comparado ao Aloha.

A Figura 10 ressalta a vazão da rede em bits por segundo (bps). Com o uso do protocolo Aloha é visto uma rápida saturação do canal. A partir de 3.000 nós, a rede apresenta pouca variação com uma taxa de transferência de aproximadamente 150 bps.

Observa-se que para o método CSMA tem-se um resultado diferente. A vazão da rede continua a crescer à medida que o número de dispositivos na rede aumenta, o que mostra que a taxa máxima da rede ainda não foi alcançada mesmo no último teste com dez mil nós, tendo nesse caso, uma taxa acima de 350 bps.

**Figura 10 – Vazão da rede usando os protocolos Aloha e CSMA**



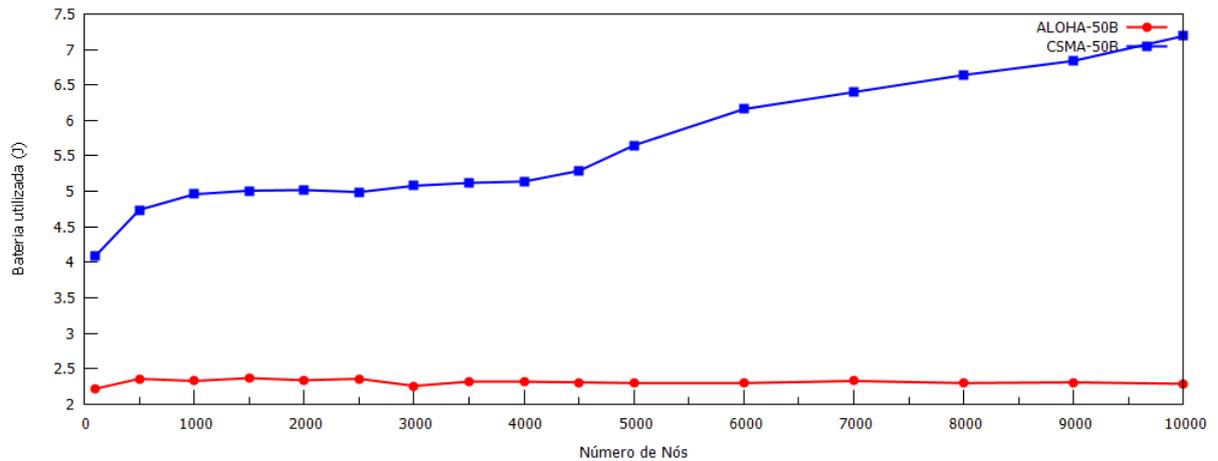
**Fonte: autoria própria.**

Considerando que redes LoRa têm uma grande preocupação com a autonomia de seus ED, compreender o impacto no uso da bateria se faz necessário. A Figura 11 apresenta o consumo médio por dispositivo final da rede.

Nota-se que mesmo para o cenário inicial com apenas dez nós, onde há poucas ocorrências de um nó ter encontrado o meio ocupado, o uso da bateria ficou perto do dobro para o método CSMA. Já para as redes utilizando Aloha, considera-se uma constante utilização da bateria de  $2,3 J$ . Isso era o esperado, pois o tempo em que os dispositivos permanecem em modo de transmissão é sempre constante independente do número de dispositivo na rede.

A última comparação de desempenho realizada foi em relação à eficiência energética de cada método de acesso. Na Figura 12 pode-se observar que o protocolo Aloha teve um melhor desempenho em todos os cenários testados. Isso pode ser explicado quando analisa-se a eficiência energética com os resultados apresentados nas Figuras 10 e 11. Como inicialmente o CSMA consome quase o dobro de bateria se comparado ao Aloha, com uma vazão de rede muito próxima, é esperado que a eficiência energética com a rede Aloha também seja quase o dobro se comparado com o CSMA. Isto é, em cenários com rede Aloha com pouca ocupação do canal consegue-se entregar um número de pacotes muito semelhante ao CSMA consumindo muito menos recursos. Com o aumento da ocupação do meio, percebe-se que a diferença entre a eficiência energética apresentada pelos protocolos diminui. Muito disso, deve-se ao fato de

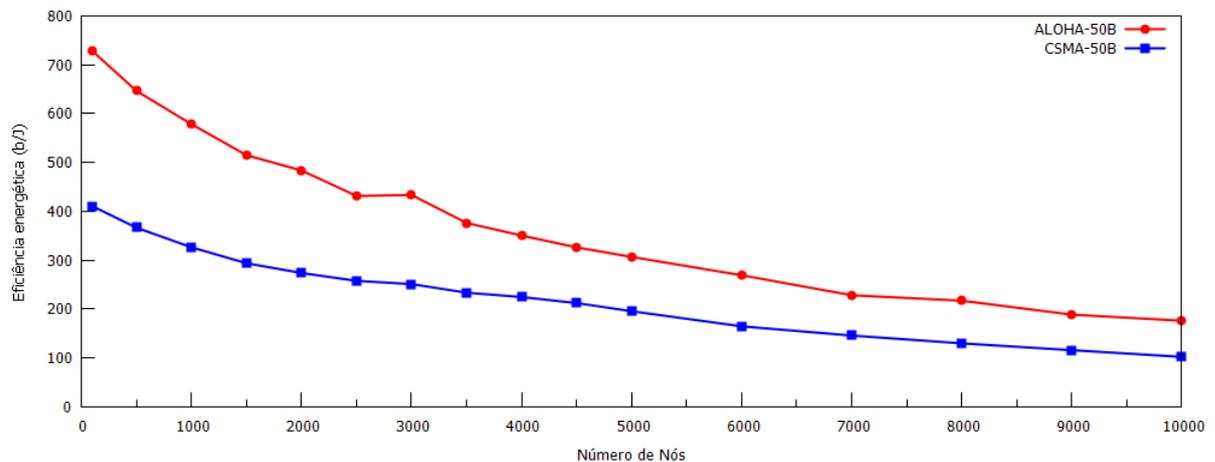
**Figura 11 – Consumo de energia dos protocolos Aloha e CSMA**



Fonte: autoria própria.

um grande aumento na vazão de rede obtida pelo CSMA, enquanto o Aloha provê um aumento na vazão da rede mais lento. Contudo, também considera-se o aumento do uso da bateria, principalmente no CSMA, o que impede que os valores de eficiência energética se igualem em qualquer cenário testado.

**Figura 12 – Eficiência energética dos protocolos Aloha e CSMA**



Fonte: autoria própria.

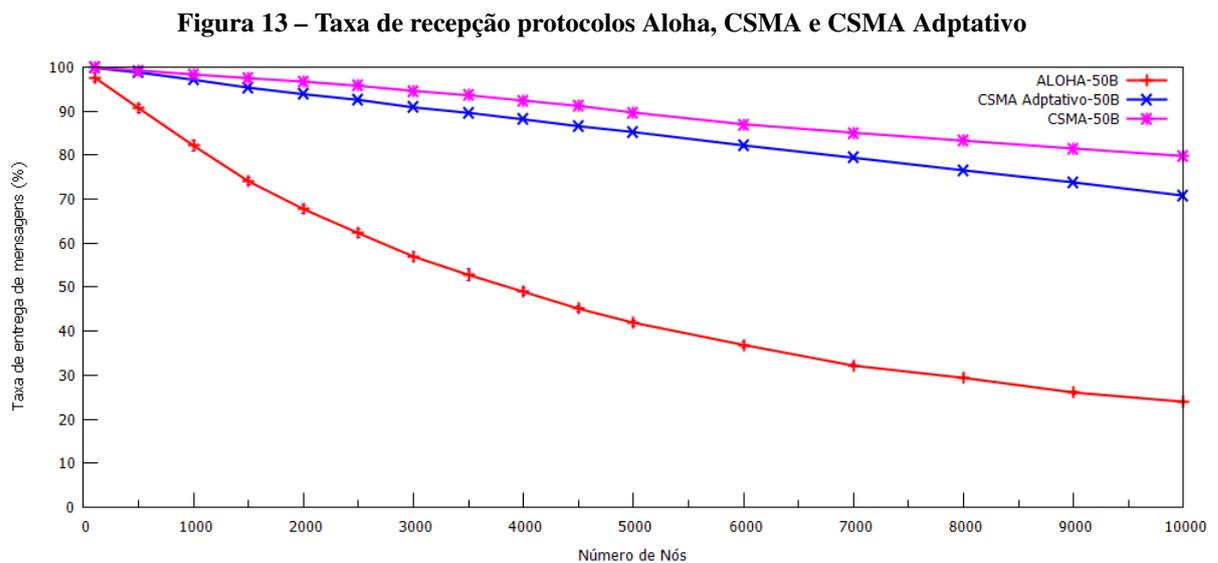
## 5.2 CSMA ADAPTATIVO

Após vários cenários de teste notou-se que quanto menor a ocupação do canal, menos se faz necessário um prévio sensoriamento do meio. Porém, as vantagens de se fazer uma análise prévia é o aumento da capacidade de acomodar um maior tráfego de mensagens na rede. Sendo assim, foi proposto um novo método de acesso ao meio, onde para redes pouco ocupadas se

faria a menor verificação prévia do meio possível e, se observada uma maior ocupação da rede, aumentaria automaticamente o tempo de sensoriamento.

O objetivo dessas alterações é obter uma melhora em relação à taxa de entrega de mensagens e à vazão da rede se comparado ao método de acesso CSMA e, principalmente, diminuir o consumo de energia dos nós. Assim, espera-se ter uma rede com uma eficiência energética igual ao de redes Aloha, mas com as vantagens do CSMA.

Após as modificações necessárias, detalhadas na Figura 8, implementou-se o novo modelo de acesso ao meio chamado de CSMA Adaptativo. As Figuras 13, 14, 15 e 16 apresentam o desempenho dos três protocolos de acesso ao meio (Aloha, CSMA e CSMA Adaptativo) em relação à taxa de entrega de mensagens, vazão da rede, consumo de energia e eficiência energética, respectivamente, variando o número de dispositivos na rede e considerando um tempo entre mensagens de 600s.



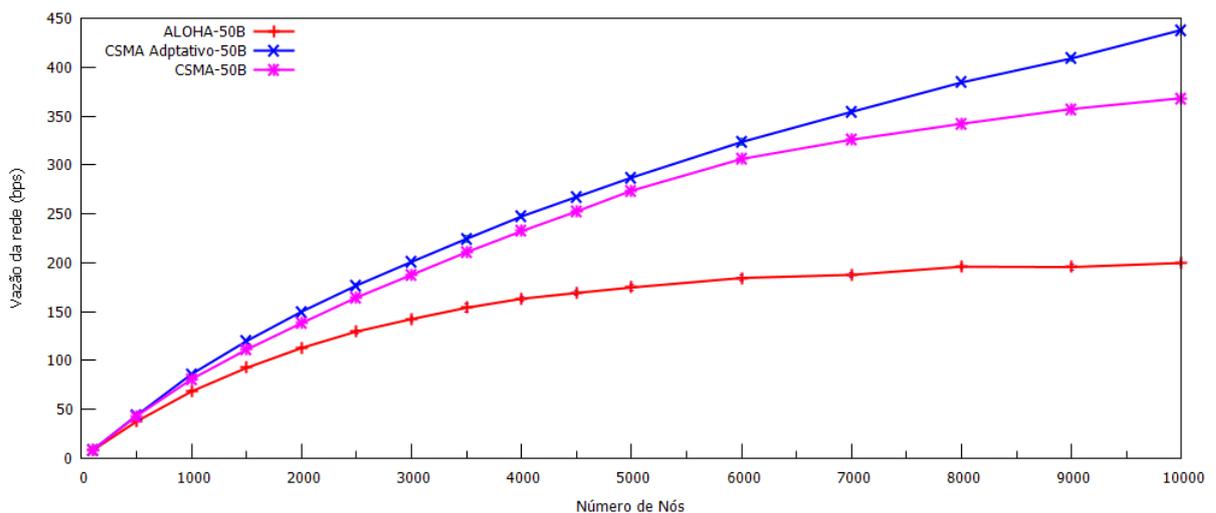
**Fonte: autoria própria.**

Na Figura 13 pode ser visto que assim como a versão original do CSMA, o CSMA Adaptativo consegue manter uma alta taxa de entrega de mensagens. Apesar de entregar menos mensagens do que o CSMA, essa perda é de no máximo 12,8%, pior caso ocorrido com uma rede de 10.000 nós. Em relação ao Aloha original, o CSMA Adaptativo obtém uma taxa de entrega bem superior. Quanto maior o número de dispositivos na rede, maior é essa diferença de desempenho. Para uma rede com 10.000 nós, por exemplo, o CSMA Adaptativo obtém um ganho em relação à taxa de entrega de mensagens de 207% se comparado ao Aloha. Em cenários com uma rede menos congestionada, entre 1 e 2.000 nós, a diferença em relação à taxa de mensagens entregues entre o CSMA e o CSMA Adaptativo é muito pequena. Por exemplo, em

um cenário com 1.000 nós, o CSMA Adaptativo apresentou uma taxa de entrega de mensagens de 97,15% em comparação com 98,36% de mensagens entregues no CSMA e 82,16% no Aloha. Já no cenário com 10.000 dispositivos o CSMA Adaptativo apresentou uma taxa de entrega de mensagens de 70,82% em comparação com 79,83% de mensagens entregues no CSMA e 23,98% no Aloha.

Com uma verificação mais rápida do meio executada pelo CSMA Adaptativo, um fluxo maior de mensagens trafega pela rede. Na Figura 14 pode-se ver a vazão da rede. Inicialmente, a vazão da rede é muito próxima para os três protocolos. Mas, com o aumento no número de dispositivos na rede, aumenta-se a ocupação do meio e a diferença no desempenho dos protocolos aumenta. A partir de 1.000 dispositivos na rede pode ser visto que o CSMA Adaptativo começa a apresentar um melhor desempenho em relação à vazão da rede se comparado ao Aloha e CSMA. No cenário com 1.000 dispositivos, por exemplo, o CSMA Adaptativo, o CSMA e o Aloha apresentam uma vazão (em bps) de 86, 81 e 68, respectivamente. Isso representa para o CSMA Adaptativo um ganho na vazão de rede de aproximadamente 6% em relação ao CSMA e 26% em relação ao Aloha. No cenário com 10.000 nós, por exemplo, o CSMA Adaptativo, o CSMA e o Aloha apresentam uma vazão (em bps) de 438, 368 e 200, respectivamente. Isso representa para o CSMA Adaptativo um ganho na vazão da rede de 19% em relação ao CSMA e 119% em relação ao Aloha.

**Figura 14 – Vazão da rede usando os protocolos Aloha, CSMA e CSMA Adptativo**

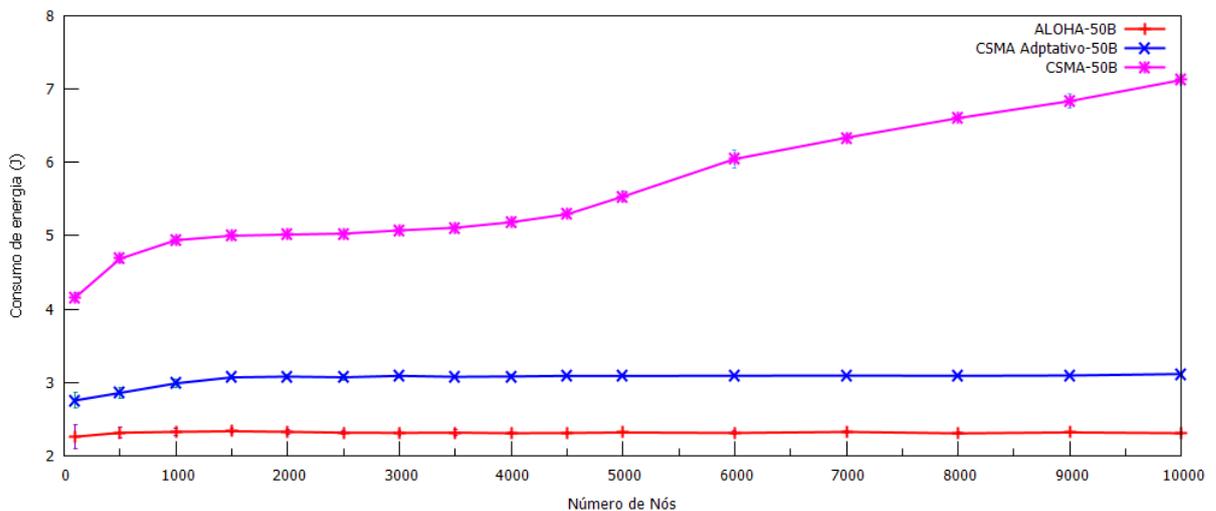


**Fonte: autoria própria.**

Vale lembrar que apenas o ganho obtido na vazão da rede não garante uma eficiência energética como a obtida pelo protocolo Aloha. Para isso é necessário analisar como se dá o consumo de energia dos dispositivos ao utilizar cada um dos protocolos avaliados. A Figura 15

apresenta esses dados. É possível verificar que o objetivo principal de diminuir o consumo de energia foi alcançado. Assim, como o método Aloha, o CSMA Adaptativo apresenta um gasto constante de energia. Como era esperado, o CSMA Adaptativo apresenta um maior consumo de energia em relação ao Aloha, pois mesmo utilizando um DIFS reduzido, o sensoriamento do meio faz com que o dispositivo se coloque em um modo energético mais custoso. Ao considerar um cenário com 1.000 nós, o consumo de energia no CSMA Adaptativo foi 28,40% maior que o Aloha e 39,51% menor do que o CSMA. No cenário com 10.000 nós, o consumo de energia foi 34,94% maior que o Aloha e 56,28% menor do que o CSMA.

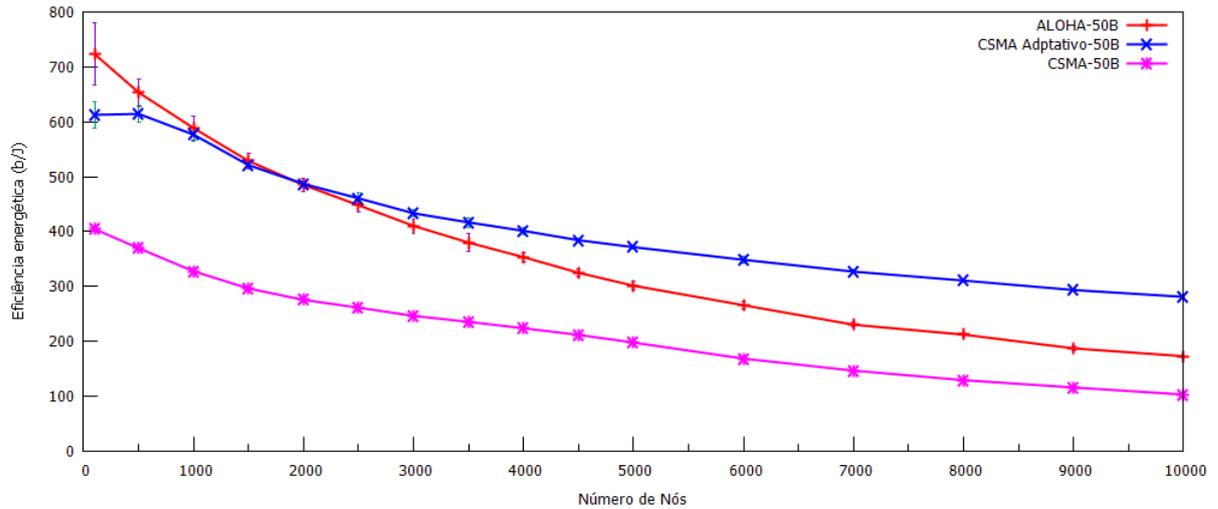
**Figura 15 – Consumo de energia pelos protocolos Aloha, CSMA e CSMA Adptativo**



**Fonte: autoria própria.**

Espera-se que com uma maior vazão da rede, o CSMA Adaptativo consiga compensar o consumo extra de energia com uma maior eficiência energética. A Figura 16 confirma essa afirmação, como é possível perceber, nos cenários com até 500 nós, o CSMA Adaptativo ainda não apresentava uma maior vazão se comparado ao Aloha, a eficiência do CSMA Adaptativo nesses cenários ainda é menor se comparado ao Aloha. Em cenários com um número de dispositivos variando entre 1.000 e 2.000, tem-se uma aproximação grande na eficiência energética dos protocolos Aloha e CSMA Adaptativo. No cenário com 1.000 nós, a eficiência energética do CSMA Adaptativo foi apenas 2% menor que o Aloha e 75% maior que o CSMA. Com uma maior vazão da rede, o CSMA Adaptativo consegue um desempenho melhor. Por exemplo, em um cenário com 10.000 nós, o CSMA Adaptativo, o CSMA e o Aloha apresentam uma eficiência energética de 281 bits/J, 103 bits/J e 173 bits/J, respectivamente. Isso representa que o CSMA Adaptativo obteve uma eficiência 173% maior que o CSMA e 62% maior que o Aloha.

**Figura 16 – Eficiência energética dos protocolos Aloha, CSMA e CSMA Adaptativo**



Fonte: autoria própria.

### 5.3 TESTES COM DIFERENTES OCUPAÇÕES DO MEIO

Após a análise dos cenários apresentados anteriormente decidiu-se testar novos cenários, onde seria possível analisar o comportamento da variação da ocupação da rede e seus impactos. A ocupação foi variada junto com a mudança no tempo entre mensagens. Assim, quanto menor o tempo entre mensagens, maior a ocupação da rede.

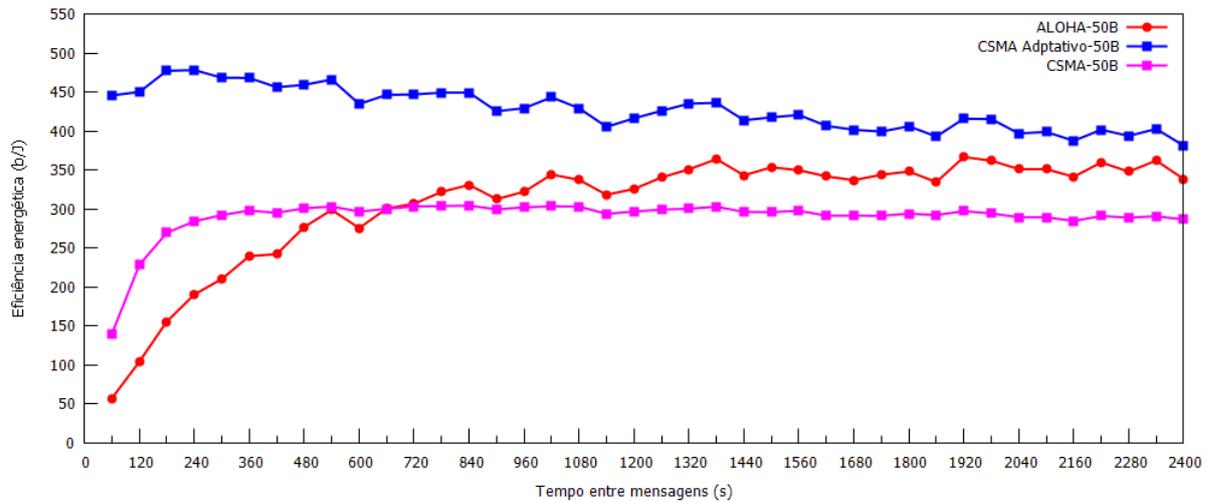
A Figura 17 apresenta os resultados obtidos, considerando 1000 dispositivos na rede.

Nos cenários com maior ocupação da rede, mais especificamente com um tempo entre mensagens menor do que 660s, o protocolo CSMA com tempo fixo de sensoriamento obteve um melhor desempenho se comparado ao protocolo Aloha. Com um tempo entre mensagens maior do que 660s, onde se tem uma diminuição na ocupação da rede, a eficiência energética entre os protocolos CSMA e Aloha se invertem. Em relação ao CSMA Adaptativo, para todos os tempos entre mensagens o protocolo proposto obteve o melhor desempenho. Por exemplo, em um cenário com tempo entre mensagens de 360s, o CSMA Adaptativo obteve uma eficiência energética 95,29% maior que o Aloha e 57,02% maior que o CSMA.

A Figura 18 apresenta uma rede com cinquenta nós. Chega-se aqui o comportamento esperado de uma eficiência energética igual para redes utilizando Aloha e CSMA Adaptativo, pois, os dispositivos vão encontrar na maior parte de suas tentativas um meio desocupado. Sendo assim, o protocolo CSMA Adaptativo vai se aproximar muito ao comportamento do protocolo Aloha, diminuindo seu tempo de escuta ao meio ao menor valor configurado possível.

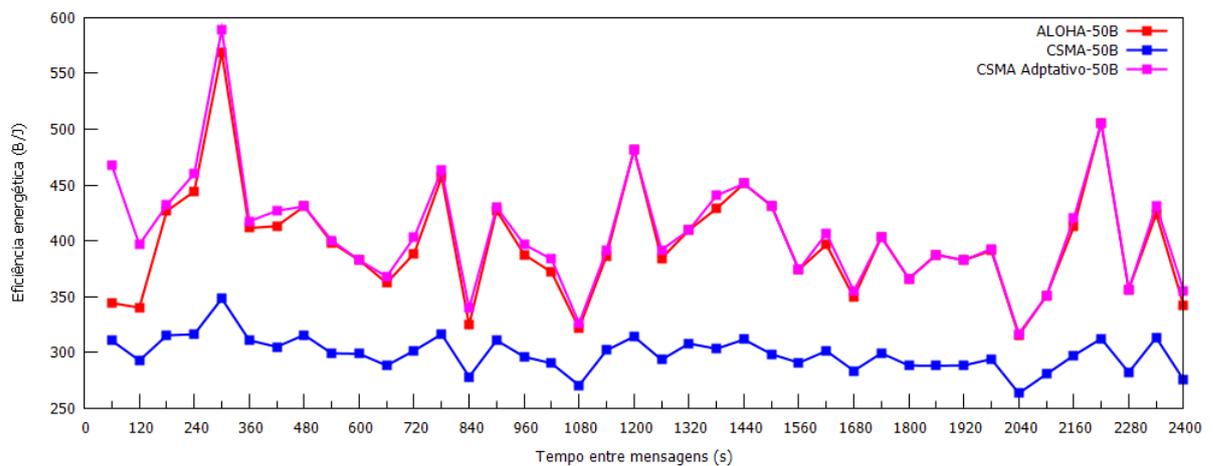
Pode-se notar através dos dados apresentados que os primeiros resultados da comparação

**Figura 17 – Eficiência energética dos protocolos Aloha, CSMA e CSMA Adptativo com variação no tempo entre mensagens e mil nós**



Fonte: autoria própria.

**Figura 18 – Eficiência energética dos protocolos Aloha, CSMA e CSMA Adptativo com variação no tempo entre mensagens e cinquenta nós**



Fonte: autoria própria.

dos protocolos ALOHA e CSMA evidenciaram uma possível melhora no desempenho do CSMA para redes com poucos nós. Com isso, após realizadas algumas mudanças de parâmetros no tempo de CS, obteve-se um novo protocolo tentando alcançar essa melhora, o CSMA Adaptativo. Realizados os testes podem-se notar os ganhos do CSMA Adaptativo em questões de vazão da rede, bateria gasta por nó e eficiência energética. Por fim, foi apresentado o quão próximo o protocolo ALOHA e o CSMA Adaptativo ficam em questão de eficiência energética em uma rede com poucos nós, apresentando uma grande vantagem sobre o protocolo CSMA.

## 6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Este trabalho apresentou um novo protocolo de acesso ao meio aplicado à tecnologia LoRaWAN. Esse protocolo chamado de CSMA Adaptativo propõe variar o tempo de sensoriamento do meio de acordo com a ocupação da rede. Inicialmente, o protocolo utilizará um menor tempo de sensoriamento, esperando que a rede esteja livre e, caso encontre a rede ocupada, esse tempo será aumentado. Assim, quando os nós estiverem em redes desocupadas eles terão um comportamento mais semelhante ao Aloha padrão e quando eles sentirem que a rede está bastante ocupada seu comportamento se assemelherá ao CSMA padrão.

O desempenho dos protocolos foi analisado em relação às métricas de taxa de entrega de pacotes, vazão de rede, consumo de energia e eficiência energética. De acordo com os resultados obtidos, quanto menos congestionada estiver a rede, mais próximo será o desempenho dos protocolos em relação à taxa de entrega de mensagens e vazão da rede. Conforme aumenta-se o número de nós na rede, maior será a diferença de desempenho entre os protocolos. Por exemplo, em uma rede com 10000 nós, o CSMA Adaptativo apresentou uma taxa de entrega de mensagens de 70,82% em comparação com 79,83% de mensagens entregues no CSMA e 23,98% no Aloha. Isso representou para o CSMA Adaptativo um aumento em relação ao número de mensagens entregues de 195% se comparado ao Aloha e uma perda de 11,29% se comparado ao CSMA. No mesmo cenário, o CSMA Adaptativo, o CSMA e o Aloha apresentam uma vazão de 438 bps, 368 bps e 200 bps, respectivamente. Isso representa para o CSMA Adaptativo um ganho na vazão de rede de 19% em relação ao CSMA e 119% em relação ao Aloha. Em relação ao consumo de energia dos nós, o Aloha é o protocolo que consome menos energia dos nós, seguido pelo CSMA Adaptativo e CSMA. Devido ao uso do DIFS adaptável, o CSMA Adaptativo foi capaz de reduzir o consumo em energia dos nós em 56,28% se comparado ao CSMA, com um aumento de 34,94% se comparado ao Aloha. Porém, com uma maior vazão da rede, o CSMA Adaptativo conseguiu compensar o consumo extra de energia em relação ao Aloha e prover uma maior eficiência energética. Nesse mesmo cenário com 10000 nós, o CSMA Adaptativo obteve uma eficiência energética 173% maior (281 bits/J) que o CSMA (103 bits/J) e 62% maior que o Aloha (173 bits/J).

Como trabalhos futuros, pretende-se analisar o impacto da utilização de protocolos de acesso ao meio TDMA (*Time Division Multiple Access*). Esses protocolos podem trazer um maior grau de confiança na entrega de mensagens eliminando esta deficiência das redes LoRaWAN.

## REFERÊNCIAS

ARAS, Emekcan; RAMACHANDRAN, Gowri Sankar; LAWRENCE, Piers; HUGHES, Danny. Exploring the security vulnerabilities of lora. *In: 2017 3rd IEEE International Conference on Cybernetics (CYBCONF)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

AUGUSTIN, Aloÿs; YI, Jiazi; CLAUSEN, Thomas; TOWNSLEY, William Mark. A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 16, n. 9, p. 1466, 2016.

BANKOV, Dmitry; KHOROV, Evgeny; LYAKHOV, Andrey. On the limits of lorawan channel access. *In: IEEE. 2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*. [S.l.], 2016. p. 10–14.

BOR, Martin; ROEDIG, Utz. Lora transmission parameter selection. *In: IEEE. 2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*. [S.l.], 2017. p. 27–34.

BOR, Martin C; ROEDIG, Utz; VOIGT, Thiemo; ALONSO, Juan 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*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 59–67.

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

LoRa Alliance®. **Lora Alliance**. 2015. Disponível em: <https://lora-alliance.org/>.

MANGOLD, Stefan; CHOI, Sunghyun; MAY, Peter; KLEIN, Ole; HIERTZ, Guido; STIBOR, Lothar. Ieee 802.11 e wireless lan for quality of service. *In: SN. Proc. European Wireless*. [S.l.], 2002. v. 2, p. 32–39.

MARGELIS, George; PIECHOCKI, Robert; KALESHI, Dritan; THOMAS, Paul. Low throughput networks for the iot: Lessons learned from industrial implementations. *In: IEEE. 2015 IEEE 2nd world forum on internet of things (WF-IoT)*. [S.l.], 2015. p. 181–186.

MIKHAYLOV, Konstantin; PETAEJAEJAERVI, Juha; HAENNINEN, Tuomo. Analysis of capacity and scalability of the lora low power wide area network technology. *In: VDE. European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference*. [S.l.], 2016. p. 1–6.

NEUMANN, Pierre; MONTAVONT, Julien; NOËL, Thomas. Indoor deployment of low-power wide area networks (lpwan): A lorawan case study. *In: IEEE. 2016 IEEE 12th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. [S.l.], 2016. p. 1–8.

NSNAM. **What is ns-3?** 2011. Disponível em: <https://www.nsnam.org/about/>.

PETAJAJARVI, Juha; MIKHAYLOV, Konstantin; ROIVAINEN, Antti; HANNINEN, Tuomo; PETTISSALO, Marko. On the coverage of lpwans: range evaluation and channel attenuation model for lora technology. *In: IEEE. 2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*. [S.l.], 2015. p. 55–59.

PETRIĆ, Tara; GOESSENS, Mathieu; NUAYMI, Loutfi; TOUTAIN, Laurent; PELOV, Alexander. Measurements, performance and analysis of lora fabian, a real-world implementation of lpwan. *In: IEEE. 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. [S.l.], 2016. p. 1–7.

Semtech Corporation. **Semtech**. 1960. Disponível em: <https://www.semtech.com/>.

Semtech Corporation. **AN1200.22: LoRa Modulation Basics. Rev. 2**. 2015. Disponível em: <http://wiki.lahoud.fr/lib/exe/fetch.php?media=an1200.22.pdf>.

Semtech Corporation. **LoRa® and LoRaWAN®**. 2016. Disponível em: <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>.

Semtech Corporation. **Understanding the LoRa® Adaptive Data Rate**. 2019. Disponível em: [https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/Understanding\\_LoRa\\_Adaptive\\_Data\\_Rate\\_Downloadable.pdf](https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/Understanding_LoRa_Adaptive_Data_Rate_Downloadable.pdf).

Semtech Corporation. **Datasheet SX1276-7-8-9**. 2020. Disponível em: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1276>.

SILVA, Jonathan de Carvalho; RODRIGUES, Joel JPC; ALBERTI, Antonio M; SOLIC, Petar; AQUINO, Andre LL. Lorawan—a low power wan protocol for internet of things: A review and opportunities. *In: IEEE. 2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*. [S.l.], 2017. p. 1–6.

STRÖM, Erik; OTTOSSON, Tony; SVENSSON, Arne. **An introduction to spread spectrum systems**. [S.l.]: Chalmers tekniska högskola, 2002.

TIURLIKOVA, Aleksandra; STEPANOV, Nikita; MIKHAYLOV, Konstantin. Method of assigning spreading factor to improve the scalability of the lorawan wide area network. *In: IEEE*.

**2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)**. [S.l.], 2018. p. 1–4.

TO, Thanh-Hai; DUDA, Andrzej. Simulation of lora in ns-3: Improving lora performance with csma. *In: 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–7.

VANGELISTA, Lorenzo. Frequency shift chirp modulation: The lora modulation. **IEEE Signal Processing Letters**, IEEE, v. 24, n. 12, p. 1818–1821, 2017.

VOIGT, Thiemo; BOR, Martin; ROEDIG, Utz; ALONSO, Juan. Mitigating inter-network interference in lora networks. **arXiv preprint arXiv:1611.00688**, 2016.

WEBER, Patrick; JÄCKLE, Daniel; RAHUSEN, David; SIKORA, Axel. Ipv6 over lorawan™. *In: IEEE. 2016 3rd International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*. [S.l.], 2016. p. 75–79.

ZANELLA, Andrea; BUI, Nicola; CASTELLANI, Angelo; VANGELISTA, Lorenzo; ZORZI, Michele. Internet of things for smart cities. **IEEE Internet of Things journal**, IEEE, v. 1, n. 1, p. 22–32, 2014.