



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

OSVALDO DA SILVA NETO

DESEMPENHO DE REDES LR-FHSS COM RESOLUÇÃO ASSÍNCRONA DE COLISÕES

Florianópolis

2024

Oswaldo da Silva Neto

**DESEMPENHO DE REDES LR-FHSS COM RESOLUÇÃO
ASSÍNCRONA DE COLISÕES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Richard Demo Souza

Coorientador: Prof. Dr. Arliones Stevert Hoeller Junior

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

da Silva Neto, Osvaldo
DESEMPENHO DE REDES LR-FHSS COM RESOLUÇÃO ASSÍNCRONA DE
COLISÕES / Osvaldo da Silva Neto ; orientador, Richard Demo
Souza, coorientador, Arliones Stevert Hoeller Junior, 2024.
62 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. LRFHSS - Long-Range
Frequency-Hopping Spread Spectrum. 3. Comunicação via
satélite. 4. ACRDA - Asynchronous Contention Resolution
Diversity Aloha. 5. Internet das Coisas. I. Souza, Richard
Demo. II. Hoeller Junior, Arliones Stevert. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

OSVALDO DA SILVA NETO

**DESEMPENHO DE REDES LR-FHSS COM RESOLUÇÃO
ASSÍNCRONA DE COLISÕES**

O presente trabalho no nível de mestrado foi avaliado e aprovado, em 25 de Março de 2024, por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Odilson Tadeu Valle
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Jamil Farhat
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Telles Brunelli Lazzarin,
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

Prof. Dr. Richard Demo Souza,
Orientador

Florianópolis, 2024.

Agradecimentos

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que desempenharam um papel fundamental na realização desta dissertação.

Primeiramente, minha eterna gratidão vai para minha amada esposa, Rafaela de Aguiar Chaves de Souza, e nossa adorável filha, Ariel da Silva. Durante os momentos mais desafiadores, vocês foram a minha fortaleza, a luz que iluminou os dias mais sombrios. A paciência e o apoio incondicional que vocês me proporcionaram são inestimáveis, e eu sou eternamente grato por ter vocês ao meu lado.

Aos meus professores e orientadores extraordinários, o Prof. Dr. Richard Demo Souza, o Prof. Dr. Arliones Stevert Hoeller Junior e o Dr. Jean Michel de Souza Sant'Ana, quero destacar especialmente a paciência e o entendimento que demonstraram diante das dificuldades que enfrentamos ao longo deste projeto. Sua orientação, conhecimento profundo e comprometimento com o meu crescimento acadêmico não apenas me guiaram, mas também moldaram minha jornada de forma única. Vocês são verdadeiros mentores e amigos, e essa conquista é também de vocês.

Um agradecimento especial é devido à banca examinadora, composta pelo Prof. Dr. Odilson Tadeu Valle do Instituto Federal de Santa Catarina e pelo Prof. Dr. Jamil Farhat da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por disponibilizarem seu valioso tempo e por compartilharem suas perspicazes análises e sugestões.

À minha querida família, minha mãe Sandra Regina Miguel da Silva, meu pai Osvaldo da Silva Filho, e minha querida sogra Elisabeth Botelho de Aguiar, quero expressar minha profunda gratidão pela ajuda e apoio incansáveis.

Este trabalho é o resultado de uma jornada marcada por desafios e superações, mas também por momentos de aprendizado e crescimento pessoal. Cada um de vocês fez parte dessa jornada, e é com emoção no coração que agradeço por seu papel fundamental em minha vida.

Resumo

Neste trabalho, aplicamos um método de resolução de colisões no *Long-Range Frequency-Hopping Spread Spectrum* (LR-FHSS), que é uma nova alternativa ao esquema de modulação *Long-Range* (LoRa) baseado em espalhamento espectral por chirp *Chirp Spread Spectrum* (CSS), patenteado pela Semtech. Mais especificamente, modificamos o protocolo *Asynchronous Contention Resolution Diversity Aloha* (ACRDA) para atender aos requisitos do LR-FHSS e aprimorar o desempenho do LR-FHSS contra possíveis colisões. No esquema proposto, apenas o *gateway* requer modificações, enquanto a operação do ACRDA é transparente do ponto de vista dos dispositivos, seguindo a operação regular do LR-FHSS. Nossos resultados, obtidos através de um simulador de eventos discretos, mostram que o esquema proposto supera o LR-FHSS regular em vários aspectos, como sucesso médio da rede (até 60% de melhoria nos cenários considerados), transmissão de dados (2 vezes melhor) e número de dispositivos suportados para um nível de confiabilidade alvo (mais de 2 vezes melhor). Por fim, também avaliamos o impacto no desempenho do esquema proposto variando parâmetros do ACRDA como o tamanho da janela e o tamanho do passo, mostrando que um tamanho de janela relativamente pequeno (aproximadamente 2 vezes o tempo no ar de uma única mensagem) é suficiente para se aproximar do sucesso assintótico da rede alcançado por uma janela infinita.

Palavras-chave: IoT, LR-FHSS, Comunicação via satélite, LPWAN, Aloha, ACRDA

Abstract

In this work, we apply an Aloha protocol in conjunction with LR-FHSS, which is an enhancement of the widely adopted LoRa modulation scheme based on Chirp Spread Spectrum (CSS), patented by Semtech. More specifically, we modify the ACRDA protocol to meet the requirements of LR-FHSS and enhance the performance of LR-FHSS against potential collisions. In the proposed scheme, only the gateway requires modifications, while the ACRDA operation is transparent from the perspective of devices, following the regular operation of LR-FHSS. Our results, obtained through a discrete event simulator, demonstrate that the proposed scheme outperforms regular LR-FHSS in various aspects, such as average network success (up to 60% improvement in the considered scenarios), throughput (2 times better), and the number of supported devices for a target reliability level (more than 2 times better). Finally, we also evaluate the impact on the performance of the proposed scheme of ACRDA parameters such as the window size and the step size, showing that a relatively small window size (approximately 2 times the airtime of a single message) is sufficient to approach the asymptotic maximum network success achieved by an infinite window.

Keywords: IoT, LR-FHSS, Satellite Communication, LPWAN, Aloha, ACRDA

Lista de Figuras

- Figura 1 Espectrograma ilustrando um sinal do tipo *up-chirp*, no qual se observa um aumento contínuo da frequência com o passar do tempo. As cores representam a densidade espectral de potência, com tons mais quentes indicando maior energia e tons mais frios indicando menor energia. Fonte: Próprio autor. 30
- Figura 2 Espectrograma ilustrando um sinal do tipo *down-chirp*, no qual se observa um decréscimo contínuo da frequência com o passar do tempo. As cores representam a densidade espectral de potência, com tons mais quentes indicando maior energia e tons mais frios indicando menor energia. Fonte: Próprio autor. 31
- Figura 3 Esquema da separação de *grids* para alocação de canais no espectro EU868 LR-FHSS utilizado na região da União Europeia. O diagrama mostra dois canais com espaçamento de 137 kHz ou 336 kHz, cada um subdividido em 8 *grids* de 3.9 kHz. Fonte: Adaptado de [3]. 34
- Figura 4 Estrutura de Pacote. Fonte: [3]. 35
- Figura 5 Estrutura do *header*. Fonte: [3]. 35
- Figura 6 Representação gráfica do uso de frequência ao longo do tempo para dois dispositivos (Dispositivo 01 e Dispositivo 02) operando no espectro de 868 MHz. As barras escuras e claras representam a transmissão de dados pelos dispositivos em diferentes pontos do tempo, ilustrando a técnica de salto em frequência para minimizar colisões e interferências entre os sinais. Barras maiores representam *headers*, menores representam fragmentos de *payload*. Fonte: Próprio autor. 36
- Figura 7 Diagrama da arquitetura de uma estrutura de rede *Long-Range*

Wide-Area Network (LoRaWAN), mostrando a interconexão entre dispositivos, *gateways* e servidores até as aplicações finais. Os dispositivos conhecidos como sensores e atuadores, conectam-se aos *gateways* via LoRa ou LR-FHSS. Fonte: Próprio autor. 38

Figura 8 Visão do *gateway* de vários frames virtuais dentro da janela de decodificação para vários usuários compartilhando um *grid* “X”. Caixas sombreadas indicam *headers* e fragmentos de *payload* em colisão. Fonte: Adaptada de [3] 46

Figura 9 Média da taxa de sucesso da simulação (Sim) e da análise (Eqn) tanto para LR-FHSS regular quanto para LR-FHSS baseado em ACRDA, para diferentes números de dispositivos finais N e taxas de dados DR8, DR9, com tamanho de *payload* $b = 10$ bytes. Fonte: Próprio autor. 50

Figura 10 Média da taxa de sucesso da simulação (Sim) e da análise (Eqn) tanto para LR-FHSS regular quanto para LR-FHSS baseado em ACRDA, para diferentes números de dispositivos finais N e taxas de dados DR8, DR9, com tamanho de *payload* $b = 30$ bytes. Fonte: Próprio autor. 50

Figura 11 Média da taxa de sucesso da simulação (Sim) e da análise (Eqn) tanto para LR-FHSS regular quanto para LR-FHSS baseado em ACRDA, para diferentes números de dispositivos finais N e taxas de dados DR8, DR9, com tamanho de *payload* $b = 50$ bytes. Fonte: Próprio autor. 51

Figura 12 Taxa média de sucesso do DR8 ACRDA LR-FHSS para diferentes tamanhos de janela W e diferentes tamanhos de passo ΔW , com $N = 80000$ dispositivos finais e *payload* de $b = 10$ bytes. Fonte: Próprio autor. 51

Figura 13 *Goodput* para LR-FHSS regular e do LR-FHSS baseado em

ACRDA para diferentes números de dispositivos N e taxas de dados {DR8, DR9}, com tamanho de *payload* $b = 10$ bytes. Fonte: Próprio autor. 53

Figura 14 *Goodput* para LR-FHSS regular e LR-FHSS baseado em ACRDA para diferentes números de dispositivos N e taxas de dados {DR8, DR9}, com tamanho de *payload* $b = 30$ bytes. Fonte: Próprio autor. 54

Figura 15 *Goodput* para LR-FHSS regular e LR-FHSS baseado em ACRDA para diferentes números de dispositivos N e taxas de dados {DR8, DR9}, com tamanho de *payload* $b = 50$ bytes. Fonte: Próprio autor. 54

Figura 16 Número de dispositivos finais suportados para o LR-FHSS regular e o LR-FHSS baseado em ACRDA, para tamanhos de *payload* $b \in \{10, 30, 50\}$ bytes e taxas de dados {DR8, DR9}, para uma taxa média de sucesso de 0,8. Fonte: Próprio autor. 55

Figura 17 Número de dispositivos finais suportados para o LR-FHSS regular e o LR-FHSS baseado em ACRDA, para tamanhos de *payload* $b \in \{10, 30, 50\}$ bytes e taxas de dados {DR8, DR9}, para uma taxa média de sucesso de 0,9. Fonte: Próprio autor. 56

Lista de Tabelas

Tabela 1	SF, alcance, taxa de bits e tempo no ar (ToA) para transmissão LoRa.	32
Tabela 2	Descrição Camada Física Protocolo LR-FHSS.	37
Tabela 3	Parâmetros adotados nos resultados numéricos.	49

Lista de Abreviaturas e Siglas

IoT Internet das Coisas

LPWAN *Low-Power Wide-Area Network*

LR-FHSS *Long-Range Frequency-Hopping Spread Spectrum*

FHSS *Frequency-Hopping Spread Spectrum*

CSS *Chirp Spread Spectrum*

D2D Dispositivo Para Dispositivo

NCC *Network Coded Cooperation*

CRDSA *Contention Resolution Diversity Slotted Aloha*

ACRDA *Asynchronous Contention Resolution Diversity Aloha*

E-SSA *Enhanced Spread Spectrum Aloha*

W-CDMA *Wide-band Code Division Multiple Access*

LoRa *Long-Range*

LoRaWAN *Long-Range Wide-Area Network*

SF *Spreading Factor*

SS *Spread Spectrum*

OCW *Operating Channel Width*

NTN *Non-terrestrial Networks*

DtS-IoT *Direct-to-Satellite IoT*

LEO *Low Earth Orbit*

D2D	Dispositivo para Dispositivo
CRC	Código de Redundância Cíclica
OCW	<i>Operating Channel Width</i>
OBW	<i>Occupied Band Width</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
DTS	<i>Direct-to-Satellite</i>

Sumário

1	Introdução	23
1.1	Trabalhos Relacionados	24
1.2	Objetivos	27
1.3	Organização	27
2	Tecnologias LPWANs	29
2.1	LoRa	30
2.2	LR-FHSS - Long Range Frequency Hopping Spread Spectrum	32
2.3	Arquitetura da Rede LoRaWAN	37
2.4	Comparativo Entre LoRa e LR-FHSS	38
3	Modelo de Sistema	41
3.1	ACRDA com LR-FHSS	43
3.1.1	Aspectos Práticos	45
4	Resultados Numéricos	49
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	57
5.1	Trabalhos Futuros	58
	Referências Bibliográficas	59

Capítulo 1

Introdução

As *Low-Power Wide-Area Networks* (LPWANs) correspondem a um conjunto de tecnologias que permitem comunicação de longa distância com baixo consumo de energia, desenvolvidas especificamente para atender aos requisitos de dispositivos para Internet das Coisas (IoT) [1–3]. Dentre as alternativas tecnológicas para estas aplicações, destaca-se a tecnologia LoRa [3, 4], que é uma técnica de modulação que usa CSS, patenteada pela Semtech [3, 5]. Sua implementação normalmente utiliza-se de uma topologia estrela, seguindo o modelo de arquitetura LoRaWAN [3, 6, 7]. Nesse contexto, os dispositivos finais se comunicam diretamente com o *gateway* usando um protocolo baseado em Aloha, sem mecanismos de prevenção de colisões, podendo comprometer a escalabilidade do sistema [3, 8, 9].

É importante ressaltar que o protocolo Aloha permite a transmissão de dados entre os terminais independentemente da atividade de outros terminais. Se uma mensagem for transmitida com sucesso, a estação base pode enviar uma confirmação por meio de um canal de retorno. No entanto, se o terminal não receber essa confirmação, ele retransmite a mensagem após aguardar por um período de tempo aleatório [10]. Embora o protocolo Aloha incorpore mecanismos para confirmar a recepção de mensagens, tais estratégias são frequentemente omitidas em implementações LoRaWAN convencionais.

Dessa forma, a falta de mecanismos de prevenção de colisões no protocolo Aloha, combinada com a tecnologia LoRaWAN, pode resultar em potenciais conflitos e competição por recursos de comunicação, impactando a escalabilidade da rede LPWAN para IoT. A implementação de estratégias para gerenciar eficientemente essas colisões pode ser crucial para otimizar o desempenho do sistema.

Para aumentar o desempenho e suportar um maior número de dispositivos, a LoRa Alliance[®] expandiu recentemente as especificações LoRaWAN para incorporar a técnica LR-FHSS em mensagens de *uplink* [11]. Isto aumenta significativamente a capacidade da rede e a sua robustez contra interferências, sendo uma abordagem promissora no âmbito da *Direct-to-Satellite IoT* (DtS-IoT), ao permitir que satélites *Low Earth Orbit* (LEO) recebam dados de dispositivos IoT em áreas remotas onde a implantação de infraestrutura terrestre não é viável [11, 12].

A tecnologia LR-FHSS é uma técnica de espalhamento espectral de salto de frequência que envolve a transmissão de pequenos fragmentos de *payload* por meio de diferentes canais, acompanhada pela transmissão de réplicas de *header* para aumentar a robustez do sistema [11, 12]. Isso se torna especialmente relevante ao considerar que os satélites LEO têm órbitas relativamente rápidas, exigindo uma comunicação eficiente durante o curto período em que estão acima do horizonte local [13]. Os sistemas LEO operam em órbitas entre 500 e 2.000 km acima da superfície terrestre, o período de órbita nessas altitudes varia entre 90 e 120 minutos, enquanto a região de cobertura de um satélite varia de 3.000 a 4.000 km. Portanto, o tempo máximo durante o qual um satélite em órbita LEO está acima do horizonte local por um observador na Terra é de até 20 minutos [14].

1.1 Trabalhos Relacionados

A iniciativa pioneira de fornecer uma análise de desempenho do LR-FHSS pode ser atribuída a [15], na qual os autores ofereceram uma visão abrangente da especificação, do formato do pacote da camada física e da estratégia de salto de frequência. Além disso, uma comparação inicial com o LoRaWAN CSS revela uma considerável vantagem potencial do LR-FHSS em cenários de redes densas, com único gateway. Posteriormente, uma formulação detalhada do LR-FHSS, centrada na probabilidade de colisão, é apresentada em [16], confirmando a capacidade potencial do LR-FHSS em

suportar redes densas. Além disso, os autores destacam que a perda de *header* é o fator que mais limita a probabilidade de sucesso. A análise do LR-FHSS é expandida ainda mais em [17], onde o modelo é refinado para incorporar o efeito do desvanecimento do canal, possibilitando uma estimativa mais precisa da capacidade de rede LR-FHSS.

Uma vez que os estudos em [15–17] estabelecem os limites de desempenho do LR-FHSS, uma direção de pesquisa intrigante surge no sentido de aprimorar a confiabilidade da rede. Motivado pela constatação de que a perda de *header* é a principal fonte de erro no LR-FHSS, o trabalho em [18] apresenta um método capaz de decodificar quadros LR-FHSS sem *header*. A abordagem utiliza padrões conhecidos de salto de frequência para identificar fragmentos relacionados ao mesmo quadro transmitido. Embora apresente resultados promissores, algumas suposições limitadoras são levantadas, como a presunção de que os fragmentos podem ser detectados e que o número de fragmentos é constante para cada quadro. Este trabalho destaca a importância de aprimorar a robustez do LR-FHSS e sugere uma abordagem inovadora para mitigar a perda de *header* em prol da confiabilidade da rede.

Além disso, em [19], é proposto o uso de comunicações de Dispositivo para Dispositivo (D2D) entre dispositivos LR-FHSS, permitindo que os mesmos troquem mensagens e apliquem o conceito de *Network Coded Cooperation* (NCC) no *uplink*. Essa ideia foi inicialmente introduzida no contexto do LoRaWAN CSS em [20], enquanto os autores em [19] definem os ajustes necessários para aplicá-la ao LR-FHSS e realizam a análise correspondente. Ao aplicar a abordagem D2D com NCC ao LR-FHSS, a performance da rede aumenta consideravelmente na probabilidade de falha para algumas densidades de rede. No entanto, embora os resultados em [19] sejam muito promissores, a aplicação da tecnologia D2D em uma rede LR-FHSS pressupõe que os dispositivos estejam relativamente próximos uns dos outros, o que pode não ser o caso para muitas redes práticas de IoT baseadas em satélites.

Dado que o protocolo LR-FHSS é baseado em Aloha com replicação de mensagens, é razoável esperar que estratégias que melhorem o de-

sempenho de redes do tipo Aloha também possam ser benéficas no escopo do LR-FHSS. Em particular, em [21], é introduzido o esquema de múltiplo acesso *Contention Resolution Diversity Slotted Aloha* (CRDSA). No CRDSA, os dispositivos transmitem réplicas de seus pacotes de dados usando Aloha em *slots* de tempo. Além disso, cada réplica contém informações sobre os *slots* de tempo das outras réplicas. Assim, ao decodificar com sucesso uma réplica, o receptor pode remover o efeito das outras réplicas transmitidas em *slots* de tempo diferentes, utilizando técnicas avançadas de cancelamento de interferência. Consequentemente, colisões potenciais nesses outros *slots* de tempo podem ser resolvidas, permitindo a decodificação de pacotes de um usuário diferente e, portanto, possibilitando a remoção das réplicas desse segundo usuário. Embora exija recursos adicionais de memória no receptor, tal método pode melhorar consideravelmente a taxa de transferência e a taxa de erro de pacotes, tornando seu uso atrativo na prática.

Posteriormente, *Gaudenzi et al.* [22] introduziram uma evolução do CRDSA, chamada ACRDA, que não requer sincronização de *slots* entre os dispositivos transmissores. Conforme descrito em [22], o ACRDA compartilha algumas semelhanças com o CRDSA e o *Enhanced Spread Spectrum Aloha* (E-SSA), este último apresentado detalhadamente em [23]. No E-SSA, as transmissões empregam *Wide-band Code Division Multiple Access* (W-CDMA) como espalhamento espectral e técnicas de cancelamento de interferência para obter melhor desempenho com operação assíncrona em canais de *downlink* relativamente amplos. O decodificador ACRDA adota processamento de memória baseado em janela deslizante para réplicas assíncronas de pacotes, conforme introduzido em [23], o que é essencial para o caso de transmissões não sincronizadas. Além disso, o ACRDA utiliza o mecanismo de cancelamento de interferência CRDSA de [21], baseado no conhecimento do número de réplicas de pacotes e sua localização dentro da janela deslizante.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é investigar e avaliar a aplicação do conceito ACRDA em redes LR-FHSS, com foco no aprimoramento da confiabilidade da comunicação. Especificamente, almeja-se compreender como a implementação do ACRDA pode influenciar a capacidade e a confiabilidade da rede.

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são estabelecidos:

- Analisar o Desempenho do LR-FHSS: Avaliar o desempenho do sistema LR-FHSS em termos de capacidade de rede e confiabilidade considerando as especificações padrão.
- Investigar a Aplicação da técnica ACRDA no contexto do LR-FHSS: Adaptar e aplicar o conceito de ACRDA ao LR-FHSS, explorando como esse protocolo pode ser integrado para melhorar a confiabilidade e o desempenho do sistema.
- Avaliar a Sensibilidade aos Parâmetros do ACRDA: Explorar como diferentes configurações de parâmetros, como o tamanho da janela e o passo com que esta janela caminha, afetam no desempenho do ACRDA no contexto do LR-FHSS.
- Comparar o Desempenho com o LR-FHSS: Realizar comparações quantitativas entre a implementação proposta de ACRDA para LR-FHSS e o LR-FHSS padrão em termos de confiabilidade, capacidade da rede e eficiência energética.

1.3 Organização

O restante desta dissertação está organizada de maneira a proporcionar uma compreensão clara e progressiva do estudo realizado. O segundo capí-

tulo disserta sobre tecnologias LPWAN, em especial LoRa e LR-FHSS. O terceiro capítulo apresenta uma explicação detalhada do modelo de sistema LR-FHSS utilizado. Os parâmetros de simulação, as métricas de desempenho e resultados numéricos são apresentados e discutidos no quarto capítulo, onde a eficácia do LR-FHSS baseado em ACRDA é comparada com o LR-FHSS regular em aspectos como confiabilidade, *goodput* e capacidade de suporte a dispositivos.

A dissertação conclui com um resumo das descobertas principais, suas implicações e sugestões para pesquisas futuras no quinto capítulo. As referências bibliográficas e apêndices complementam o documento, fornecendo informações adicionais e suporte técnico ao estudo. Esta organização visa facilitar a navegação do leitor pelo conteúdo, garantindo uma compreensão aprofundada do impacto do ACRDA no LR-FHSS e em redes IoT.

Capítulo 2

Tecnologias LPWANs

Nos últimos anos, uma revolução tecnológica tem remodelado a interação com o ambiente ao nosso redor. Essa transformação é impulsionada pela ascensão da IoT, através da conexão de dispositivos e sensores para coletar e compartilhar informações valiosas. Essa interconexão não apenas melhora nossa qualidade de vida, mas também impulsiona a eficiência operacional e transforma setores inteiros [24].

Diante do crescente papel da IoT na atual revolução digital, torna-se evidente que a conexão eficiente entre dispositivos é uma necessidade. Para que a IoT alcance seu pleno potencial, agindo como uma facilitadora para uma ampla gama de inovações e melhorias, é essencial dispor de um meio de comunicação acessível, capaz de cobrir vastas áreas geográficas e eficiente em termos de energia. Nesse contexto, surge um potencial significativo para a expansão das implantações e aplicações das Redes LPWAN em praticamente todos os setores da sociedade [24, 25].

Seguindo o caminho inverso das demais tecnologias de conectividade como 3G/4G ou WiFi, que buscam altas taxas de transmissão de dados ou a minimização de latência, o modelo LPWAN busca ter mais eficiência utilizando baixa potência, escalabilidade e cobertura [26]. Ademais, as tecnologias LPWAN apresentam limitações em termos de uso de largura de banda e aderem a restrições rígidas de ciclo de trabalho, expressas como uma porcentagem do tempo em que um dispositivo pode transmitir dados [27].

Um dos principais padrões das LPWAN é o LoRaWAN [26], que se destaca devido à sua capacidade de cobertura e escalabilidade [28]. LoRaWAN é um protocolo de rede que utiliza na sua camada física as tecnologias LoRa ou LR-FHSS.

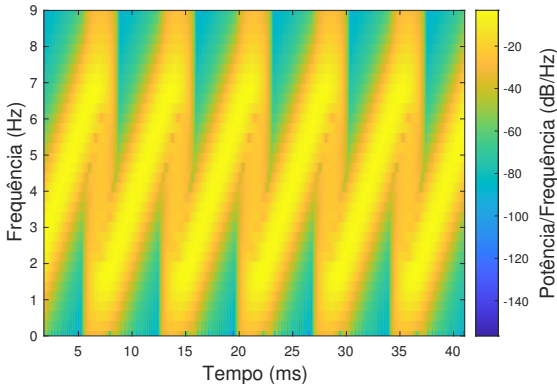


Figura 1: Espectrograma ilustrando um sinal do tipo *up-chirp*, no qual se observa um aumento contínuo da frequência com o passar do tempo. As cores representam a densidade espectral de potência, com tons mais quentes indicando maior energia e tons mais frios indicando menor energia. Fonte: Próprio autor.

2.1 LoRa

LoRa é um acrônimo para “*Long-Range*”, ou longo alcance em português. A técnica de modulação utilizada pelo *LoRa* é o *CSS*, a qual envolve um sinal cuja frequência varia continuamente, o *chirp*, e que explora espalhamento espectral. Essencialmente, a informação contida em qualquer sinal *LoRa* é representada pela frequência inicial do *chirp* [7, 29, 30].

Os *chirps* apresentam uma mudança contínua de frequência ao longo do tempo. Essas variações podem ser ascendentes, caracterizadas como *up-chirp* (Figura 1), ou descendentes, denominadas *down-chirp* (Figura 2). Além disso, os *chirps* são ciclicamente deslocados, ou seja, após atingirem a frequência mais alta, retornam à frequência mais baixa, ou vice-versa. É por meio da frequência inicial do *chirp* que as informações são transmitidas [7, 31].

LoRa opera em um canal de largura de banda de 125 kHz ou 500 kHz (para canais de *uplink*) e 500 kHz (para canais de *downlink*). A taxa de transmissão de dados varia de 293 a 5.340 bps [6], dependendo do *Spre-*

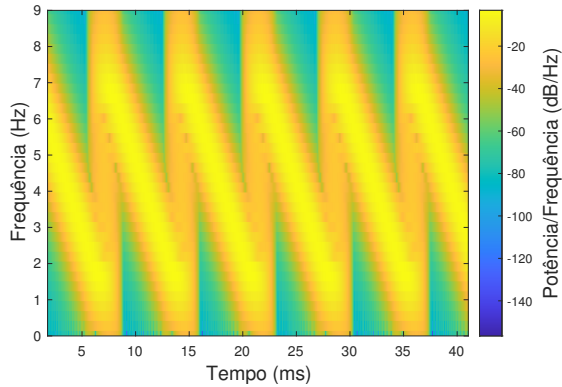


Figura 2: Espectrograma ilustrando um sinal do tipo *down-chirp*, no qual se observa um decréscimo contínuo da frequência com o passar do tempo. As cores representam a densidade espectral de potência, com tons mais quentes indicando maior energia e tons mais frios indicando menor energia. Fonte: Próprio autor.

ading Factor (SF), em português, fator de espalhamento, das configurações de largura de banda do canal e das taxa do código corretor de erro (*Forward Error Correction* (FEC)). As diferenças nestes fatores de espalhamento ocasionam a chamada ortogonalidade na transmissão, permitindo que múltiplas transmissões simultâneas com SF diferentes [7, 24, 30].

A escolha do SF pode oferecer uma troca entre alcance e consumo. Por exemplo, um dispositivo próximo a um *gateway* pode transmitir dados com um SF baixo, necessitando de menos tempo na transmissão e, conseqüentemente, consumindo menos energia. Em contrapartida, dispositivos situados a vários quilômetros de um *gateway* podem necessitar de um SF mais elevado, resultando em uma transmissão mais longa, o que dá ao receptor mais oportunidades de amostrar a potência do sinal, melhorando a sensibilidade e a cobertura [32].

No entanto, vale ressaltar que o aumento ou diminuição do SF pode impactar diretamente o consumo de energia do dispositivo. Um SF mais elevado resulta em uma transmissão mais lenta, mas com maior alcance, en-

Tabela 1: SF, alcance, taxa de bits e tempo no ar (ToA) para transmissão LoRa.

SF	Taxa	Alcance	ToA - 10 bytes
7	5340 bps	2 km	56 ms
8	3125 bps	4 km	103 ms
9	1760 bps	6 km	205 ms
10	980 bps	8 km	371 ms
11	537 bps	11 km	741 ms
12	293 bps	14 km	1483 ms

Fonte: Adaptado de [30].

quanto um SF mais baixo permite transmissões mais rápidas, porém com alcance limitado. Portanto, a escolha do SF está diretamente relacionada aos requisitos específicos de cada aplicação, equilibrando a necessidade de alcance e eficiência energética [32]. A vida útil geralmente se refere à duração da bateria, sendo prolongada por estratégias eficientes de gerenciamento de energia [33].

Conforme a Tabela 1, a modulação LoRa tem um total de seis fatores de espalhamento diferentes (SF7 a SF12). É importante reforçar que, quanto maior este fator, maior o alcance mas também maior o consumo de energia.

Por fim, LoRa opera geralmente dentro das especificações definidas pelo protocolo de rede LoRaWAN, o acesso ao meio é do tipo Aloha, e suporta diferentes frequências de portadora dentro das faixas não licenciadas, como 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz e 2.4 GHz.

2.2 LR-FHSS - Long Range Frequency Hopping Spread Spectrum

Em 2020 a LoRa Alliance[®], responsável pelo protocolo LoRaWAN, expandiu suas diretrizes para incluir a modulação LR-FHSS ao seu portfólio. O principal foco do LR-FHSS é em aplicações DtS-IoT, onde um único *gateway* precisa prover serviço para um número muito grande de dispositivos.

O emprego da modulação LR-FHSS é exemplificado no estudo [16], onde se evidencia a capacidade de sustentar cargas totais com notável eficiência. Os resultados revelam um aumento significativo na capacidade em aproximadamente 36 vezes superior quando comparado ao oferecido pelo LoRa¹ [34].

LR-FHSS é uma modulação que usa espalhamento espectral por salto de frequência [15]. Durante a transmissão de um único pacote de dados, o LR-FHSS salta por várias frequências, enquanto utiliza a modulação GMSK com largura de banda de 488Hz em cada salto. A largura de banda total do LR-FHSS e a separação mínima de canais num salto dependem das especificações regionais [35]. Por exemplo, na União Europeia, a largura de banda total do LR-FHSS é de 137 kHz ou 336 kHz. Essa variação na largura de banda significa que o LR-FHSS pode suportar diferentes números de canais físicos de 488 Hz. A escolha dos canais para cada salto deve manter uma separação mínima. Isso resulta em *grids* dentro do canal total LR-FHSS, onde os canais no mesmo *grid* estão espaçados por uma largura de banda de 3.9kHz, na União Europeia [35]. Esse esquema de separação dos canais em *grids* é ilustrado na Figura 3.

Conforme a especificação da LoRa Alliance[®] [35], o pacote LR-FHSS inclui um *header* e um *payload*. Para uma confiabilidade aprimorada, duas ou três cópias do *header* são enviadas sequencialmente pelo dispositivo final em diferentes canais físicos. Uma única cópia do *header* tem um Tempo no Ar (ToA) de $t_h = 233.472$ ms, sendo cada *header* transmitido em um canal físico distinto. Após a transmissão das cópias do *header*, o *payload* é primeiro codificado, utilizando um código convolucional de 1/3 ou 2/3, e depois dividido em vários fragmentos para serem transmitidos sequencialmente em diferentes canais físicos dentro da mesmo *grid*, realizando saltos de frequência a cada $t_f = 102.4$ ms. Dessa forma, o tempo total de transmissão do pacote LR-FHSS é $t_{packet} = t_h \times h + t_p$, onde h é o número de réplicas do *header* e t_p é o tempo de transmissão do *payload*, obtido como $t_p = f \times t_f$ e f é o número

¹Importante mencionar que este estudo se baseou em condições ideais de canal, sem considerar desvanecimentos ou presença de ruído.

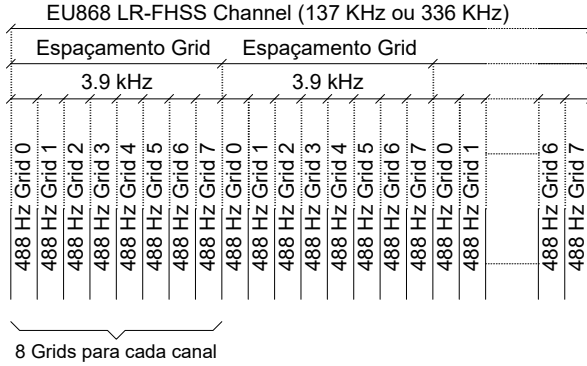


Figura 3: Esquema da separação de *grids* para alocação de canais no espectro EU868 LR-FHSS utilizado na região da União Europeia. O diagrama mostra dois canais com espaçamento de 137 kHz ou 336 kHz, cada um subdividido em 8 *grids* de 3.9 kHz. Fonte: Adaptado de [3].

de fragmentos de *payload* [35]

$$f = \left\lceil \frac{b+3}{6CR} \right\rceil, \quad (2.1)$$

onde b é o comprimento do *payload* (em bytes) e CR representa a taxa de codificação.

Ademais, em termos de acesso ao meio, o LR-FHSS segue o protocolo MAC Aloha não sincronizado [36]. Um dispositivo final seleciona pseudoaleatoriamente seu canal inicial para a primeira cópia do *header*, e canais subsequentes são então escolhidos a partir do mesmo *grid*. O *header* contém, entre outras informações essenciais, a semente usada para gerar a sequência de saltos de frequência pseudoaleatória, permitindo que o *gateway* regenere a sequência de saltos de canal assim que decodifica uma cópia do *header* [35]. Isso permite que o *gateway* localize as outras cópias do *header* e os fragmentos do *payload* dentro do *grid* de frequência em outros instantes de tempo. A recepção bem-sucedida do pacote de *uplink* no *gateway* requer a decodifi-

Header (Replicado 1 até 4 vezes)			Enviados uma única vez		
4 Bytes	4 Bytes	1 Byte	2 Bytes	L Bytes	2 Bytes
Sincronização	Header	CRC Header		Payload	CRC

Figura 4: Estrutura de Pacote. Fonte: [3].

Header								
8 bits	3 bits	2 bits	1 bit	1 bit	4 bits	9 bits	2 bits	2 bits
Comprimento payload	Taxa de dados	Taxa de codificação	Grid	Salto	Largura Banda	Sequência de salto	Sync index	RFU

Figura 5: Estrutura do *header*. Fonte: [3].

cação de pelo menos uma cópia do *header* e 1/3 ou 2/3 dos fragmentos do *payload*, dependendo da taxa de codificação [37].

A estrutura completa do pacote de transmissão, incluindo o *header* e o *payload*, é representada na Figura 4. O *header*, representado na Figura 5, contém informações de controle essenciais para o correto processamento da mensagem pelo receptor. Essas informações incluem o comprimento do *payload*, a taxa de codificação, o *grid*, o salto de frequência, a largura de banda, a sequência de saltos, além disso também são enviados dados de sincronização e Código de Redundância Cíclica (CRC) [12].

Detalhando a estrutura do *header*, conforme representado na Figura 5, podemos observar a sequência de campos que compõem esse segmento do pacote. Cada campo desempenha um papel crucial no processo de comunicação e garante a integridade e a confiabilidade dos dados transmitidos [12].

Após a transmissão dos *headers*, o *payload*, que consiste nos bytes de informação codificados, é dividido em fragmentos, conforme mostrado na Figura 4. Cada fragmento tem uma duração máxima de 50ms, garantindo uma transmissão eficiente e otimizada do conteúdo de dados. Essa abordagem de fragmentação contribui para minimizar o impacto de possíveis colisões de sinais e maximizar a confiabilidade da comunicação em ambientes adversos [12, 38].

A transmissão de dois dispositivos utilizando a modulação LR-FHSS

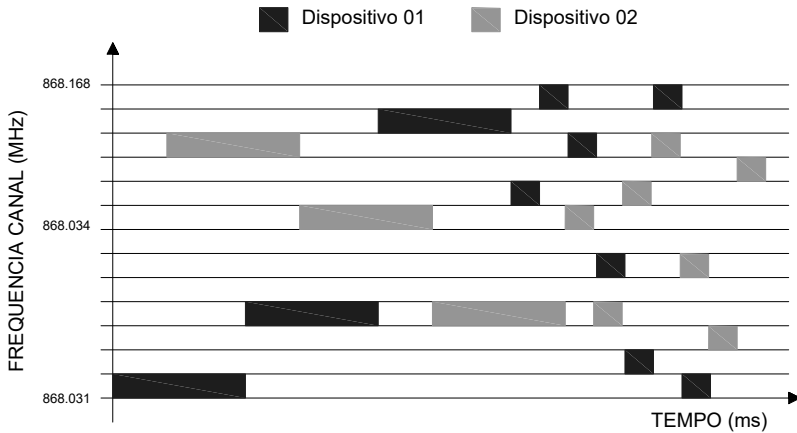


Figura 6: Representação gráfica do uso de frequência ao longo do tempo para dois dispositivos (Dispositivo 01 e Dispositivo 02) operando no espectro de 868 MHz. As barras escuras e claras representam a transmissão de dados pelos dispositivos em diferentes pontos do tempo, ilustrando a técnica de salto em frequência para minimizar colisões e interferências entre os sinais. Barras maiores representam *headers*, menores representam fragmentos de *payload*. Fonte: Próprio autor.

é ilustrada na Figura 6. Nessa figura, podemos observar como ocorre o espalhamento de frequência ao longo do tempo, o que contribui para a robustez do sistema contra interferências e colisões de sinais.

Neste trabalho, consideramos os parâmetros regionais da União Europeia definidos pela LoRa Alliance® [35], que incorporam quatro novas taxas de dados (DR) na especificação LoRaWAN por meio de diferentes configurações LR-FHSS, conforme resumido na Tabela 2.

Tabela 2: Descrição Camada Física Protocolo LR-FHSS.

Modo Datarate	Largura Banda (kHz)	Separação no <i>grid</i> (kHz)	Número de canais por device	Número de portadoras por salto	Taxa de Código <i>CR</i>	Número de Réplicas de <i>header</i>
DR5	1.523	25,4	60	3.120 (52 × 60)	1/3	3
DR6					2/3	2
DR8	137	3,9	35	280 (8 × 35)	1/3	3
DR9					2/3	2
DR10	336	3,9	86	688 (8 × 86)	1/3	3
DR11					2/3	2

Fonte: [13].

2.3 Arquitetura da Rede LoRaWAN

As redes LoRaWAN, operando com LoRa ou LR-FHSS na camada física, são normalmente organizadas em uma topologia estrela em que os *gateways* retransmitem mensagens de dispositivos para um servidor central. A comunicação é geralmente bidirecional onde a comunicação de *uplink* (dos dispositivos para o servidor) é favorecida em termos de capacidade [7]. Este formato é projetado para conectar dispositivos IoT em uma ampla área geográfica, oferecendo uma solução de redes de longo alcance e baixa potência [6, 27].

A Figura 7 apresenta um modelo ilustrado desta arquitetura, sendo composta por três elementos principais: dispositivos finais, *gateways* e servidores [6, 7, 27]. De modo geral, os dispositivos são sensores conectados, muitas vezes operados por bateria, que têm a principal tarefa de capturar condições físicas e eventos no ambiente [32]. Eles representam os dispositivos da rede IoT que coletam dados e podem realizar ações específicas, além de transmitir dados por meio da modulação LoRa ou da modulação LR-FHSS [25] para os *gateways*. Já as eventuais comunicações no sentido do *downlink* utilizam sempre a modulação LoRa.

Os *gateways*, por sua vez, encaminham as informações coletadas para os servidores centrais. Estes processam e disponibilizam os dados para serem

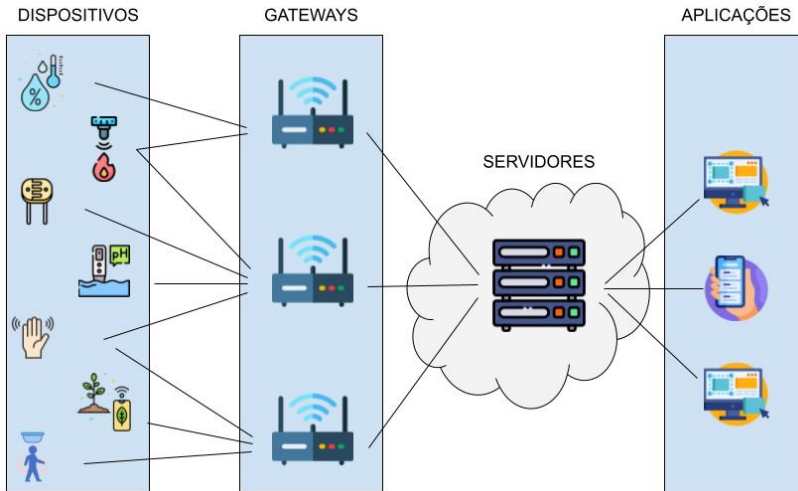


Figura 7: Diagrama da arquitetura de uma estrutura de rede LoRaWAN, mostrando a interconexão entre dispositivos, *gateways* e servidores até as aplicações finais. Os dispositivos conhecidos como sensores e atuadores, conectam-se aos *gateways* via LoRa ou LR-FHSS. Fonte: Próprio autor.

acessados e gerenciados pelas aplicações de usuário final, que podem incluir interfaces de monitoramento e controle [25].

2.4 Comparativo Entre LoRa e LR-FHSS

Utilizando a modulação por espalhamento espectral, o LoRa possui um alcance extenso e baixo consumo de energia. Em contrapartida, o LR-FHSS adota um esquema de salto de frequência para espalhar os sinais pelo espectro, o que eleva sua robustez contra interferências [11, 32].

A capacidade do LR-FHSS de suportar uma alta densidade de dispositivos por *gateway* é notável. Essa capacidade resulta de sua eficiência espectral e da técnica de salto de frequência, que possibilitam a coexistência harmoniosa de diversos sinais com interferência reduzida [38].

Adicionalmente, a eficiência do LR-FHSS é ampliada pela sua opera-

ção em faixas de espectro mais estreitas, promovendo um uso mais efetivo do espectro [38].

Entretanto, o LR-FHSS pode apresentar um tempo de transmissão no ar mais prolongado para uma transmissão com a mesma quantidade de dados se comparado com o LoRa, potencialmente aumentando o consumo energético dos dispositivos. Especialmente em ambientes com uma vasta quantidade de dispositivos IoT comunicando-se através de um único *gateway*, o LR-FHSS se mostra mais adequado, assegurando a transmissão eficiente de um maior volume de dados [38].

O uso do em comunicações *Direct-to-Satellite* (DTS) representa uma evolução significativa, especialmente para cenários não-urbanos ou muito remotos, onde a cobertura terrestre é limitada ou inexistente. Esta tecnologia permite a comunicação eficaz e confiável entre dispositivos terrestres e satélites em órbita baixa da Terra, beneficiando-se de passagens frequentes dos satélites para manter a conectividade. As vantagens do LR-FHSS sobre o LoRa para DTS incluem melhor resistência a interferências e maior eficiência espectral, o que é crucial para maximizar a capacidade de rede e a qualidade da conexão em tais cenários [19].

Por outro lado, em cenários urbanos com ampla cobertura de *gateways*, o LoRa pode apresentar vantagens. Sua capacidade de efetuar repetições de transmissão e sua eficiência energética, sobretudo para dispositivos situados próximos aos *gateways*, constituem uma solução eficaz para assegurar uma comunicação confiável e eficiente [38].

A decisão entre LR-FHSS e LoRa deve ser embasada em uma análise criteriosa das exigências específicas da aplicação, considerando aspectos como a densidade de dispositivos, necessidades de alcance, susceptibilidade a interferências e limitações de consumo energético. Tais tecnologias disponibilizam vantagens distintas que, quando alinhadas às necessidades da aplicação, potencializam sua eficácia.

Em síntese, as tecnologias LoRa e LR-FHSS, ao serem empregadas conjuntamente, proporcionam uma solução integral e versátil para redes de

IoT. A flexibilidade, o alcance e a eficiência energética que oferecem as tornam ferramentas valiosas para uma vasta gama de aplicações na crescente esfera da IoT, destacando a importância de avaliar a combinação dessas tecnologias para satisfazer as diversas necessidades das redes de IoT [7, 16].

Capítulo 3

Modelo de Sistema

Consideramos uma rede composta por N dispositivos sob a cobertura de um único *gateway*, transmitindo um *payload* de b bytes usando LR-FHSS. O intervalo de tempo entre transmissões subsequentes do mesmo dispositivo segue uma variável aleatória exponencial com média $1/\lambda$. Isso implica que um dispositivo transmite, em média, uma mensagem a cada $1/\lambda$ unidade de tempo.

Para estimar o desempenho básico do LR-FHSS, utilizamos uma versão do modelo analítico apresentado em [16], mas sem o efeito de captura¹. Os tempos médios entre chegadas consecutivas de *headers* e fragmentos de *payload* são modelados por variáveis aleatórias exponenciais com $\lambda_h = h\lambda N$ e $\lambda_f = f\lambda N$, respectivamente. Como assumimos que os dispositivos estão dentro da cobertura do *gateway*, consideramos que a única fonte de erro é a possível colisão entre mensagens transmitidas por diferentes dispositivos. O intervalo de vulnerabilidade para um determinado fragmento de *header* transmitido no tempo x_i é definido como $(x_i - t_h, x_i + t_h)$. Supondo que todos os fragmentos de *payload* são do mesmo tamanho, o número médio de elementos de pacote (*headers* e fragmentos de *payload*) que chegam durante o intervalo vulnerável do *header* é

$$A_h = \lambda_h 2t_h + \lambda_f (t_h + t_f), \quad (3.1)$$

onde o primeiro termo da soma corresponde ao número médio de *headers*, enquanto o segundo termo representa o número médio de fragmentos de

¹Não há referência para um limiar de captura apropriado na tecnologia LR-FHSS. Adicionalmente, assumimos que todos os dispositivos estão sob cobertura, então as colisões dominam fortemente os erros de decodificação.

payload dentro do intervalo vulnerável do *header*. Uma abordagem semelhante é aplicada aos fragmentos de *payload*, cujo intervalo vulnerável é $(x_i - t_f, x_i + t_f)$, e o número médio de elementos de pacote que chegam dentro desse intervalo vulnerável é

$$A_f = \lambda_f 2t_f + \lambda_h(t_h + t_f). \quad (3.2)$$

Conforme mencionado anteriormente, o sucesso de uma transmissão, denotado por P_s , depende de dois componentes: P_h , que representa a probabilidade de receber pelo menos um dos h *headers*, e P_γ , a probabilidade de receber pelo menos $\gamma = p \times \text{CR}$ dos p fragmentos de *payload* no total. Considerando que existem C canais físicos dentro dos *grids*, a probabilidade de receber pelo menos um *header* sem colisão é [16]

$$P_h = 1 - \underbrace{\left(1 - \left(1 - \frac{1}{C}\right)^{A_h - 1}\right)^h}_{\text{Probabilidade de perder todas as } h \text{ réplicas de } header}, \quad (3.3)$$

onde $(1 - 1/C)^{A_h - 1}$ representa a probabilidade de receber corretamente uma única réplica de *header* [16]. De maneira semelhante, a probabilidade de receber com sucesso um fragmento de *payload* é dada por

$$P_1 = \left(1 - \frac{1}{C}\right)^{A_f - 1}. \quad (3.4)$$

Adotando a distribuição binomial, é possível obter a probabilidade de receber com sucesso pelo menos γ fragmentos como

$$P_\gamma = 1 - \sum_{k=0}^{\gamma-1} \binom{p}{k} P_1^k (1 - P_1)^{p-k}, \quad (3.5)$$

onde $\binom{a}{b} = \frac{a!}{b!(a-b)!}$ representa o coeficiente binomial, e $\binom{p}{k} P_1^k (1 - P_1)^{p-k}$ é a probabilidade de receber corretamente k dos p fragmentos de *payload* trans-

mitidos. Finalmente, a probabilidade de sucesso do pacote torna-se

$$P_s = P_h P_\gamma. \quad (3.6)$$

Além disso, outra métrica de desempenho de interesse é o *goodput*, que é o número médio de pacotes recebidos com sucesso multiplicado pelo tamanho da *payload*.

3.1 ACRDA com LR-FHSS

Para aumentar a confiabilidade, no ACRDA [22], os dispositivos recorrem ao Aloha não sincronizado para transmitir réplicas de pacotes, que são transmitidas sequencialmente dentro de um frame virtual. Devido à falta de sincronização entre os dispositivos no ACRDA, os frames virtuais de diferentes transmissores não estão alinhados no receptor, aumentando as colisões em comparação com o Aloha sincronizado. No entanto, o desempenho geral é aprimorado pela eliminação do efeito de réplicas colididas de pacotes que já foram decodificados.

No LR-FHSS, os dispositivos não estão sincronizados com o *gateway*. Apesar de não utilizar slots de tempo sincronizados, o transmissor LR-FHSS segue intervalos de tempo específicos para o salto de frequência, de modo que as réplicas de *header* ou fragmentos de *payload* sejam enviados sequencialmente. Os sinais recebidos em uma rede LR-FHSS podem ser vistos como uma variante de ACRDA, com cópias de *header* LR-FHSS e fragmentos de *payload* que se assemelham a réplicas de pacotes ACRDA. No entanto, no caso do LR-FHSS, essas “réplicas” estão separadas no tempo e na frequência, além de não serem decodificadas individualmente. No entanto, uma rede LR-FHSS habilitada para ACRDA requer modificações apenas no *gateway*, não no lado do dispositivo, o que é um aspecto muito positivo do ponto de vista prático.

Dessa forma, como os dispositivos não estão sincronizados no tempo,

o *gateway* utiliza uma janela deslizante com um passo discreto ΔW de tamanho W . Neste trabalho, normalizamos tanto o tamanho da janela deslizante W quanto o tamanho do passo discreto ΔW pela duração máxima de tempo de uma transmissão.

O *gateway*, então procura dentro da janela deslizante por uma réplica válida de *header* por meio de correlação com um preâmbulo conhecido. Quando uma cópia de *header* é decodificada com sucesso, o *gateway* conhece a posição de tempo e frequência das outras cópias de *header* e fragmentos de *payload* dessa transmissão específica. O *gateway* tenta recuperar o *payload* se houver fragmentos de *payload* suficientes dentro da janela deslizante atual. Se for bem-sucedido, a mensagem transmitida é detectada, e o *gateway* pode remover, do sinal recebido, o efeito das cópias de *header* e fragmentos de *payload* correspondentes a essa mensagem específica. Mesmo os fragmentos ou cópias de *header* dessa mensagem específica que colidiram com *headers*/fragmentos de outras mensagens podem ser removidos, já que o *gateway* conhece o conteúdo exato e a posição de tempo-frequência desses fragmentos ou cópias de *header* colididos, simplificando consideravelmente² a tarefa do mecanismo de cancelamento de interferência [22].

Após a decodificação bem-sucedida de uma mensagem e a remoção de possíveis fragmentos ou cópias de *header* colididos pertencentes a essa mensagem, o *gateway* procura por uma cópia de *header* válida de uma mensagem diferente dentro da mesma janela deslizante. Se positivo, então o procedimento acima se repete até a decodificação bem-sucedida de uma nova mensagem e a remoção de qualquer fragmento ou cópia colidida relacionada a essa mensagem. Esse procedimento é repetido até que não seja encontrada nenhuma nova cópia de *header* válida de uma mensagem. Nesse caso, o *gateway* avança a janela deslizante por um tamanho de passo pré-definido e busca repetidamente por cópias de *header* válidas. Além disso, o *gateway* ar-

²A estimativa de canal ou correção de deslocamento de frequência relacionados aos fragmentos ou cópias de *header* colididos pode ser alcançada considerando o conteúdo (que é conhecido!) desse fragmento ou cópia de *header* como um sinal piloto.

mazena essa informação se uma mensagem decodificada na janela deslizante anterior tiver um fragmento de *payload* que se estende até a próxima janela deslizante. Assim que o *gateway* começa a trabalhar na próxima janela deslizante, o efeito desses fragmentos é removido antes de a busca por uma cópia de *header* válida começar.

A Figura 8 ilustra um cenário no qual quatro usuários transmitem um pacote simultaneamente na mesma grade LR-FHSS. Neste exemplo, apesar da dispersão em vários canais físicos, o decodificador LR-FHSS recompõe os *headers* recebidos e os fragmentos de *payload* em um quadro virtual para cada transmissão. Começando com a transmissão do Usuário B, o *gateway* decodifica o pacote, pois recebe pelo menos uma cópia de *header* e pelo menos um terço dos fragmentos de *payload*. O *gateway* então subtrai o fragmento de *payload* P1d3 do Usuário B e recupera a primeira cópia de *header* do Usuário A (Hdr1). Notavelmente, o fragmento de *payload* P1d1 do Usuário A se sobrepõe com o *header* Hdr2 do Usuário C. Ainda assim, o *gateway* pode decodificar o pacote do Usuário A sem cancelamento de interferência porque recebe o suficiente dos fragmentos de *payload* do Usuário A sem colisão. No entanto, as três cópias de *header* do Usuário D se sobrepõem com os fragmentos de *payload* do Usuário C, então o *gateway* só pode decodificar o Usuário D após decodificar com sucesso o Usuário C e cancelar a interferência em pelo menos uma das cópias de *header* do Usuário D.

3.1.1 Aspectos Práticos

É relevante destacar alguns aspectos práticos relacionados à adaptação proposta do ACRDA à tecnologia LR-FHSS.

1) *Transparente para dispositivos finais*: O primeiro aspecto a ser observado é que a estratégia está em conformidade com a especificação atual do transmissor, sendo transparente do ponto de vista dos dispositivos finais.

2) *Modificações no Gateway*: No que diz respeito ao *gateway*, dois pontos se destacam. O primeiro é o requisito de memória. O *gateway* deve

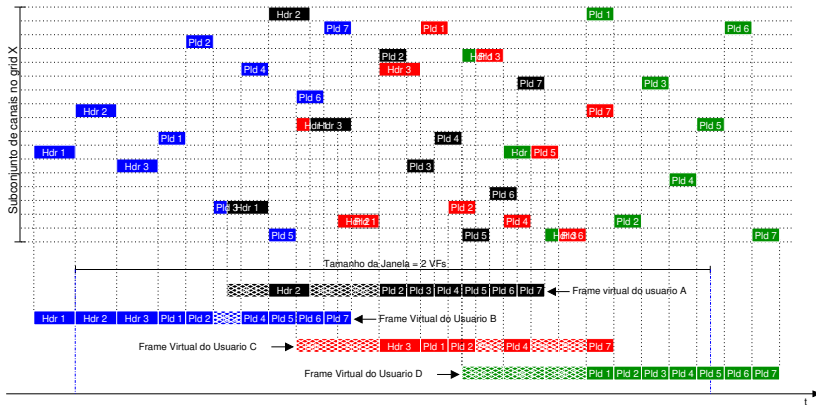


Figura 8: Visão do *gateway* de vários frames virtuais dentro da janela de decodificação para vários usuários compartilhando um *grid* “X”. Caixas sombreadas indicam *headers* e fragmentos de *payload* em colisão. Fonte: Adaptada de [3]

armazenar o sinal recebido amostrado no período de duração de uma janela deslizante. O requisito total de memória depende, assim, do número de bits por amostra e da largura de banda do canal LR-FHSS utilizada. Por exemplo, no caso de largura de banda de canal de 137 kHz, janelas deslizantes com o dobro do tempo no ar considerando 30 bytes de *payload* com DR8 ($W \approx 4.8$ s), e amostras de 16 bits tomadas a 1.5 vezes a taxa de Nyquist, o requisito de memória é de cerca de 4 MBytes.

O segundo ponto relevante em relação ao *gateway* é o cancelamento de interferências. Após decodificar uma mensagem com sucesso, o *gateway* reconstrói cópias de *header* ou fragmentos de *payload* que colidem com transmissões de outras mensagens. Para um cancelamento adequado, o *gateway* deve corrigir qualquer deslocamento de frequência e aplicar a atenuação de canal correspondente sofrida por tais cópias de *header* ou fragmentos colididos antes de subtrai-los do sinal recebido. Isso requer uma estimativa adequada desses parâmetros, facilitada pelo conhecimento do *gateway* sobre o conteúdo desses fragmentos ou cópias de *header*. Portanto, eles podem ser usados como sinais piloto, da mesma forma que discutido em [22] para

o ACRDA regular. Dessa forma, essa questão, muitas vezes crítica para o cancelamento de interferência, é elegantemente resolvida pelo design.

Capítulo 4

Resultados Numéricos

Para avaliar o desempenho do método proposto, desenvolvemos um simulador de eventos discretos usando o *framework SciPy* em Python. A simulação incorpora a implementação ACRDA adaptada para LR-FHSS, conforme discutido na Seção 3.1. A menos que seja indicado o contrário, os parâmetros do LR-FHSS e da simulação são aqueles apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Nas Figuras 9, 10 e 11, representamos a taxa média de sucesso da rede em função do número de dispositivos N , para tamanhos de *payload* $b \in \{10, 30, 50\}$ bytes, respectivamente. As linhas representam os resultados da simulação, enquanto os marcadores representam a probabilidade de sucesso da equação (3.6) para os casos de LR-FHSS regular (ou seja, sem ACRDA). Em primeiro lugar, observamos que os resultados teóricos e de simulação têm um comportamento semelhante, mas os resultados teóricos são ligeiramente otimistas. Essa discrepância ocorre porque a formulação que leva à equação (3.6) não leva em consideração a correlação temporal entre as cópias de *header* e os fragmentos de *payload*. Na prática, se um fragmento

Tabela 3: Parâmetros adotados nos resultados numéricos.

Parâmetro	Valor
Intervalo médio de transmissão $\frac{1}{\lambda}$	900 s
Tamanho da janela deslizante W	2
Tamanho do passo da janela deslizante ΔW	0.5
Número de iterações de simulação	10^3
Tempo de simulação	3600 s

Fonte: Próprio autor.

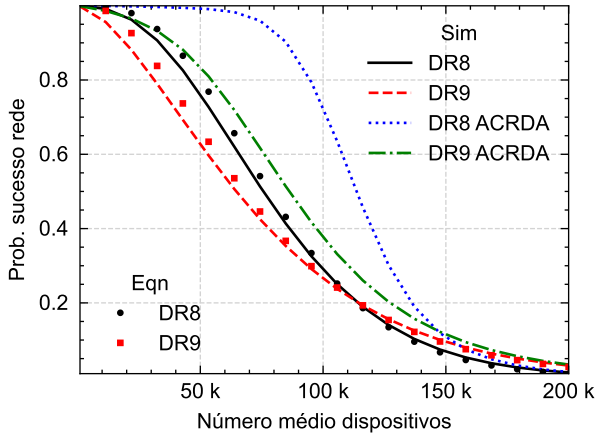


Figura 9: Média da taxa de sucesso da simulação (Sim) e da análise (Eqn) tanto para LR-FHSS regular quanto para LR-FHSS baseado em ACRDA, para diferentes números de dispositivos finais N e taxas de dados DR8, DR9, com tamanho de *payload* $b = 10$ bytes. Fonte: Próprio autor.

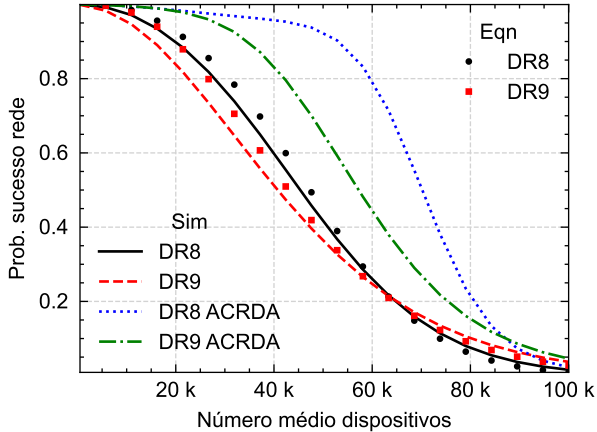


Figura 10: Média da taxa de sucesso da simulação (Sim) e da análise (Eqn) tanto para LR-FHSS regular quanto para LR-FHSS baseado em ACRDA, para diferentes números de dispositivos finais N e taxas de dados DR8, DR9, com tamanho de *payload* $b = 30$ bytes. Fonte: Próprio autor.

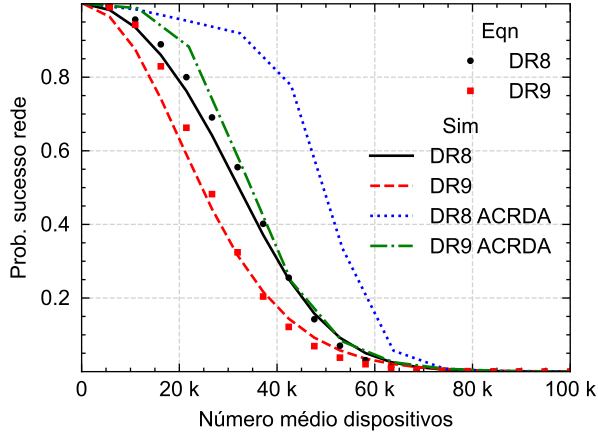


Figura 11: Média da taxa de sucesso da simulação (Sim) e da análise (Eqn) tanto para LR-FHSS regular quanto para LR-FHSS baseado em ACRDA, para diferentes números de dispositivos finais N e taxas de dados DR8, DR9, com tamanho de *payload* $b = 50$ bytes. Fonte: Próprio autor.

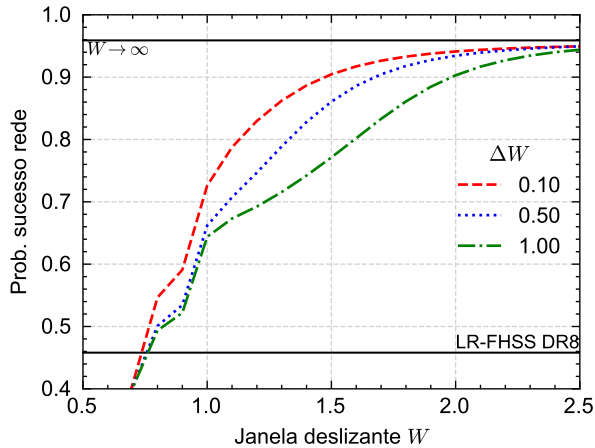


Figura 12: Taxa média de sucesso do DR8 ACRDA LR-FHSS para diferentes tamanhos de janela W e diferentes tamanhos de passo ΔW , com $N = 80000$ dispositivos finais e *payload* de $b = 10$ bytes. Fonte: Próprio autor.

de uma mensagem específica sofre uma colisão, a probabilidade de que outro fragmento da mesma mensagem sofra uma colisão aumenta porque outra mensagem está sendo transmitida simultaneamente. Esse comportamento não é considerado em (3.6) nem em [16], que assume que todas as transmissões são independentes para fins de facilidade matemática.

Outra observação das Figuras 9, 10 e 11 é que é possível obter níveis mais baixos de erros com o ACRDA DR9 em comparação com o LR-FHSS regular DR8. Isso implica que configurações de taxa de dados mais elevadas podem ser utilizadas ao mesmo tempo em que se obtém um desempenho melhor, o que, de outra perspectiva, resulta em uma maior eficiência energética. Por fim, observamos que a vantagem do esquema DR9 baseado em ACRDA sobre o LR-FHSS regular DR8 aumenta com o tamanho do *payload* devido ao aumento relativo no tráfego médio ou tempo no ar. Por exemplo, ao aumentar o tamanho do *payload* de 10 para 30 bytes, o DR8 aumenta o tempo no ar aproximadamente em 1,72 vezes, enquanto o DR9 o aumenta apenas em 1,58 vezes. Isso ocorre porque o DR8 possui três réplicas de *header*, enquanto o DR9 possui apenas duas. A duração do *header* constitui uma proporção maior da transmissão geral para tamanhos de *payload* menores.

Na Figura 12, apresentamos a taxa média de sucesso da rede como uma função do tamanho da janela ACRDA para tamanhos de passo de janela iguais a $\{0.1, 0.5, 1.0\}$. Lembre-se de que o tamanho da janela e o tamanho do passo são normalizados pelo tempo no ar de uma mensagem completa. A linha reta preta na parte superior representa o limite superior, que corresponde a um tamanho de janela infinito ou, na simulação, um tamanho de janela igual ao tempo de simulação. A linha reta preta na parte inferior representa a taxa média de sucesso da rede do LR-FHSS regular, sem ACRDA, e, portanto, é independente do tamanho da janela. Como esperado, com o ACRDA, o desempenho é significativamente afetado quando o tamanho da janela normalizado cai abaixo de um. Em tais casos, no final de uma transmissão, o receptor não possui informações sobre os elementos iniciais do pacote (réplicas de *header* e/ou fragmentos de *payload*), começando pelos *headers*.

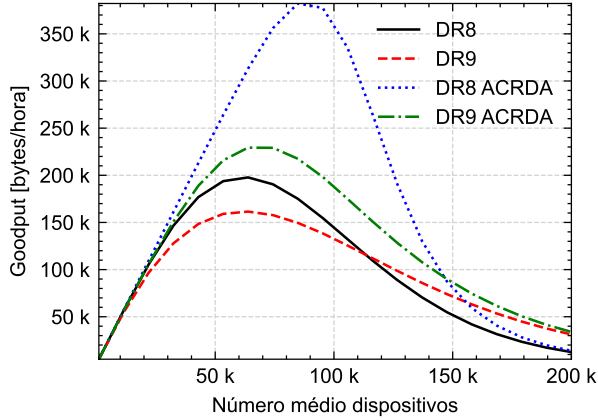


Figura 13: *Goodput* para LR-FHSS regular e do LR-FHSS baseado em ACRDA para diferentes números de dispositivos N e taxas de dados {DR8, DR9}, com tamanho de *payload* $b = 10$ bytes. Fonte: Próprio autor.

Consequentemente, à medida que o tamanho da janela diminui, o desempenho piora, eventualmente tornando-se pior do que o LR-FHSS regular. Por sua vez, o impacto do tamanho do passo é particularmente evidente em tamanhos de janela menores. No entanto, para tamanhos de janela suficientemente grandes (por volta de 2,5 neste cenário), a taxa média de sucesso da rede se aproxima do limite superior, independentemente do valor do tamanho do passo.

As Figuras 13, 14 e 15 representam a relação entre o *goodput* e o número médio de dispositivos N para diferentes taxas de dados e tamanhos de *payload* $b \in \{10, 30, 50\}$ bytes. Como previamente demonstrado em [15, Fig.4], existe um número ótimo de dispositivos que maximiza a taxa de transferência efetiva. No esquema LR-FHSS baseado em ACRDA, podemos ver que o *goodput* aumenta, assim como o número de dispositivos que alcançam a taxa máxima. Quando combinado com as Figuras 9 e 10, também podemos observar o aumento na confiabilidade no *goodput*. Por exemplo, para $b = 30$ bytes e DR8, o máximo de *goodput* é 360 kBytes por hora (kB/h) com 37.000 dispositivos ao usar o LR-FHSS regular, com uma taxa de sucesso em torno

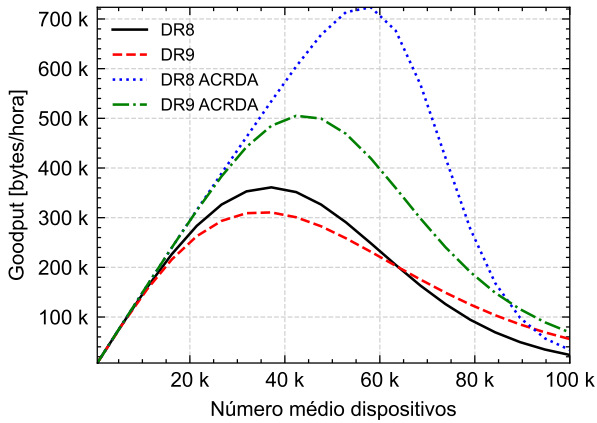


Figura 14: *Goodput* para LR-FHSS regular e LR-FHSS baseado em ACRDA para diferentes números de dispositivos N e taxas de dados $\{DR8, DR9\}$, com tamanho de *payload* $b = 30$ bytes. Fonte: Próprio autor.

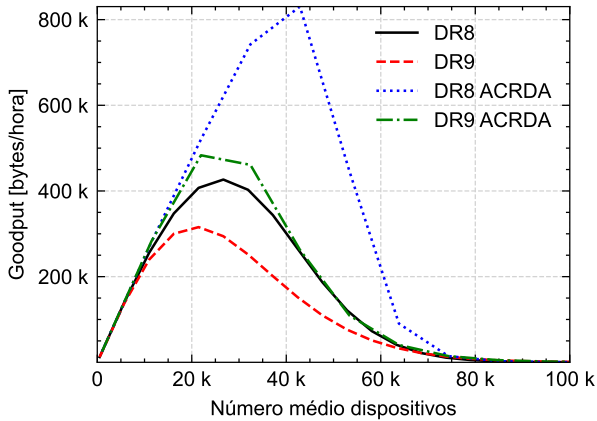


Figura 15: *Goodput* para LR-FHSS regular e LR-FHSS baseado em ACRDA para diferentes números de dispositivos N e taxas de dados $\{DR8, DR9\}$, com tamanho de *payload* $b = 50$ bytes. Fonte: Próprio autor.

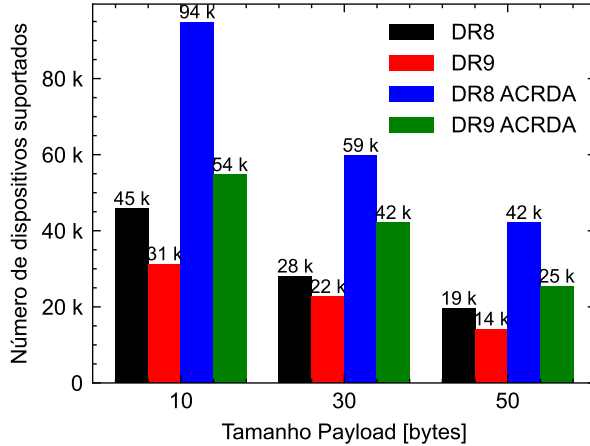


Figura 16: Número de dispositivos finais suportados para o LR-FHSS regular e o LR-FHSS baseado em ACRDA, para tamanhos de *payload* $b \in \{10, 30, 50\}$ bytes e taxas de dados $\{DR8, DR9\}$, para uma taxa média de sucesso de 0,8. Fonte: Próprio autor.

de 0,65. No entanto, com o LR-FHSS baseado em ACRDA, esses números melhoram significativamente para 723 kB/h com 58.000 dispositivos e uma taxa de sucesso de 0,83, representando um aumento de duas vezes no *goodput* e um aumento de 1,57 vezes no número de dispositivos finais com um aumento de 1,27 vezes na confiabilidade da transmissão. Além disso, observamos que o *goodput* aumenta consistentemente com tamanhos de *payload* maiores, principalmente porque mais dados do *payload* são transmitidos para a mesma quantidade de sinalização, ou seja, o número de *headers* permanece constante.

Finalmente, as Figuras 16 e 17 apresentam o número máximo de dispositivos suportados de forma que a taxa de sucesso da rede permaneça abaixo de um limite específico, que foi definido como 0,8 na Figura 16 e 0,9 na Figura 17, respectivamente. É evidente, a partir dos resultados, que o número de dispositivos finais suportados mais do que dobra em todos os casos ao adotar o ACRDA. Além disso, para todos os cenários, o LR-FHSS com ACRDA pode

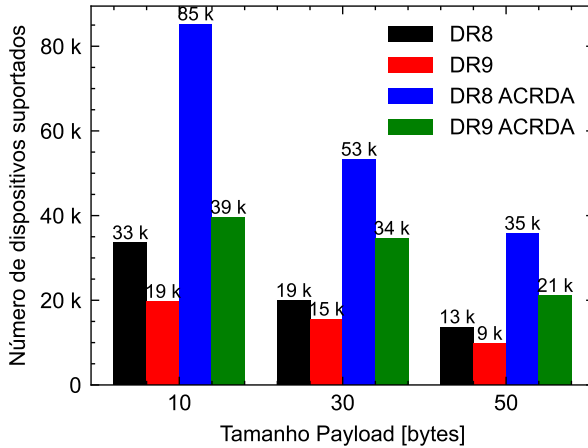


Figura 17: Número de dispositivos finais suportados para o LR-FHSS regular e o LR-FHSS baseado em ACRDA, para tamanhos de *payload* $b \in \{10, 30, 50\}$ bytes e taxas de dados {DR8, DR9}, para uma taxa média de sucesso de 0,9. Fonte: Próprio autor.

operar com uma taxa de dados mais alta do que o LR-FHSS regular, enquanto ainda suporta muitos dispositivos. Isso destaca a eficácia do ACRDA em aumentar o número de dispositivos finais em uma rede, mantendo a mesma taxa média de sucesso e, ao mesmo tempo, reduzindo o consumo de energia dos dispositivos finais, estendendo sua vida útil operacional.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalhos Futuros

O estudo realizado evidencia que a adaptação do protocolo ACRDA ao LR-FHSS representa um avanço significativo para redes IoT que operam em contextos de LPWANs. A integração do ACRDA ao LR-FHSS demonstra melhorias expressivas no desempenho, em particular na confiabilidade da rede, na eficiência e na capacidade de suportar um maior número de usuários, sem impor exigências adicionais aos dispositivos.

Os resultados obtidos através da simulação de eventos discretos revelam que o LR-FHSS baseado em ACRDA supera o LR-FHSS regular em diversos aspectos cruciais. Notavelmente, a taxa média de sucesso da rede foi aumentada em até 60% nos cenários analisados, enquanto o *goodput* experimentou melhorias da ordem de 100%. Além disso, o número de dispositivos finais suportados para um determinado nível de confiabilidade também aumentou consideravelmente.

Um dos achados mais relevantes é que um tamanho de janela de aproximadamente duas vezes o tempo no ar de uma única mensagem já é suficiente para alcançar taxas de sucesso de rede próximas ao máximo obtido com uma janela de tamanho infinito. Esta observação sugere que os benefícios do esquema ACRDA podem ser obtidos sem a necessidade de recursos computacionais excessivamente elevados no *gateway*.

Contudo, é importante reconhecer que a aplicação do LR-FHSS baseado em ACRDA requer que os *gateways* tenham uma capacidade de memória e processamento superior à necessária para o LR-FHSS regular. Este requisito adicional representa um compromisso entre melhor desempenho e maior complexidade e custo dos equipamentos de infraestrutura de rede.

5.1 Trabalhos Futuros

Este estudo abre diversas vertentes para futuras pesquisas. Uma direção promissora é investigar o limite de capacidade de redes LR-FHSS em variados contextos e configurações. Este estudo pode incluir a análise do número máximo de dispositivos suportados em um ambiente de rede definido, sob diversas condições de tráfego e padrões de interferência. Compreender esses limites permitirá otimizar a alocação de recursos e melhorar a escalabilidade da rede.

Outra vertente de pesquisa pode explorar melhor a variação dos parâmetros da especificação LR-FHSS. Isso inclui a modificação do número de réplicas de *header* transmitidos e a taxa de codificação, com o objetivo de avaliar seus impactos na eficiência de transmissão e na resistência a colisões. Outros experimentos podem ser conduzidos para determinar as configurações ideais que equilibram confiabilidade e capacidade adaptando-se dinamicamente às condições da rede.

Referências Bibliográficas

- [1] CENTENARO, M. et al. Long-Range Communications in Unlicensed Bands: The Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios. *IEEE Wireless Communications*, v. 23, n. 5, p. 60–67, 2016.
- [2] CHILAMKURTHY, N. S. et al. Low-Power Wide-Area Networks: A Broad Overview of Its Different Aspects. *IEEE Access*, v. 10, p. 81926–81959, 2022.
- [3] SANT’ANA, J. M. d. S. et al. Asynchronous contention resolution-aided aloha in lr-fhss networks. *IEEE Internet of Things Journal*, p. 1–1, 2024.
- [4] Shanmuga Sundaram, J. P.; Du, W.; Zhao, Z. A Survey on LoRa Networking: Research Problems, Current Solutions, and Open Issues. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 22, n. 1, p. 371–388, Firstquarter 2020. ISSN 2373-745X.
- [5] LoRa Semtech. *LoRa What Is LoRa*. 2023. Disponível em: <<https://www.semtech.com/lora>>.
- [6] ALLIANCE®, L. *What is LoRaWAN® Specification*. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/about-lorawan/>>.
- [7] MOORE, S. M. M. D. *LoRa - LoRaWAN and Internet of Things for beginners*. Savoie Mont Blanc University, 2021. Disponível em: <<https://www.univ-smb.fr/lorawan/wp-content/uploads/2022/01/Book-LoRa-LoRaWAN-and-Internet-of-Things.pdf>>.
- [8] Georgiou, O.; Raza, U. Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale? *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 6, n. 2, p. 162–165, Apr. 2017. ISSN 2162-2337.
- [9] JOUHARI, M. et al. A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 25, n. 3, p. 1841–1876, 2023.
- [10] LAYA, A. et al. Goodbye, aloha! *IEEE Access*, v. 4, p. 2029–2044, 2016.
- [11] LU, L. A. T. *LoRaWAN® Protocol Expands Network Capacity with New Long Range – Frequency Hopping Spread Spectrum Technology*.

Disponível em: <<https://blog.semtech.com/lorawan-protocol-expands-network-capacity-with-new-long-range-frequency-hopping-spread-spectrum-technology>>.

- [12] SEMTECH CORPORATION. *LR-FHSS System Performance*. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JeIG/a/3n000000v6Zk/HgJkybW6VIcq5a14y8JlvWBPrsUtpJnv5eHgtbnHikI>>.
- [13] ULLAH, M. A.; MIKHAYLOV, K.; ALVES, H. Analysis and simulation of lorawan lr-fhss for direct-to-satellite scenario. *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 11, n. 3, p. 548–552, 2022.
- [14] ILCEV, S. D. Low earth orbits (leo). In: *2010 20th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 406–408.
- [15] BOQUET, G. et al. LR-FHSS: Overview and Performance Analysis. *IEEE Communications Magazine*, v. 59, n. 3, p. 30–36, 2021.
- [16] ULLAH, M. A.; MIKHAYLOV, K.; ALVES, H. Analysis and Simulation of LoRaWAN LR-FHSS for Direct-to-Satellite Scenario. *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 11, n. 3, p. 548–552, 2022.
- [17] MALEKI, A.; NGUYEN, H. H.; BARTON, R. Outage Probability Analysis of LR-FHSS in Satellite IoT Networks. *IEEE Communications Letters*, v. 27, n. 3, p. 946–950, 2023.
- [18] FRAIRE, J. A.; GUITTON, A.; IOVA, O. *Recovering Headerless Frames in LR-FHSS*. arXiv, 2023. ArXiv:2306.08360 [cs]. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/2306.08360>>.
- [19] MALEKI, A. et al. *D2D-aided LoRaWAN LR-FHSS in Direct-to-Satellite IoT Networks*. arXiv, 2022. ArXiv:2212.04331 [eess]. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/2212.04331>>.
- [20] ALVES, L. H. de O. et al. Network-Coded Cooperative LoRa Network With D2D Communication. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 9, n. 7, p. 4997–5008, 2022.
- [21] CASINI, E.; GAUDENZI, R. D.; HERRERO, O. D. R. Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA (CRDSA): An Enhanced Random Access Scheme for Satellite Access Packet Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 6, n. 4, p. 1408–1419, 2007.

- [22] GAUDENZI, R. D. et al. Asynchronous Contention Resolution Diversity ALOHA: Making CRDSA Truly Asynchronous. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 13, n. 11, p. 6193–6206, 2014.
- [23] HERRERO, O. D. R.; GAUDENZI, R. D. High efficiency satellite multiple access scheme for machine-to-machine communications. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. 48, n. 4, p. 2961–2989, 2012.
- [24] CHAUDHARI, B. S.; ZENNARO, M.; BORKAR, S. Lpwan technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations. *Future Internet*, MDPI, v. 12, n. 3, p. 46, 2020.
- [25] RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Commun. Surveys Tutorials*, v. 19, n. 2, p. 855–873, Apr 2017. ISSN 1553-877X.
- [26] SONG, Y. et al. An internet of energy things based on wireless lpwan. *Engineering*, v. 3, n. 4, p. 460–466, 2017. ISSN 2095-8099. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917306057>>.
- [27] FARRELL, S. *Low-Power Wide Area Network (LPWAN) Overview*. RFC Editor, 2018. RFC 8376. (Request for Comments, 8376). Disponível em: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc8376>>.
- [28] LoRa Alliance. *LoRa Alliance Website*. 2018. Disponível em: <<http://www.lora-alliance.org>>.
- [29] VANGELISTA, L. Frequency shift chirp modulation: The lora modulation. *IEEE Signal Processing Letters*, v. 24, n. 12, p. 1818–1821, 2017.
- [30] SEMTECH CORPORATION. *Documentation - What are LoRa® and LoRaWAN®?* [S.l.].
- [31] KUAN, F. *What is the Technology Behind LoRa Frequency*. Disponível em: <<https://www.mokosmart.com/lora-frequency/>>.
- [32] SEMTECH CORPORATION. *LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview*. [S.l.], 2019.
- [33] WANG, Y. et al. Energy-efficient data and energy integrated management strategy for iot devices based on rf energy harvesting. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 8, n. 17, p. 13640–13651, 2021.

- [34] MALEKI, A. et al. *D2D-aided LoRaWAN LR-FHSS in Direct-to-Satellite IoT Networks*. 2022.
- [35] LORA ALLIANCE TECHNICAL COMMITTEE REGIONAL PARAMETERS WORKGROUP. *LoRaWAN Regional Parameters*". [S.l.], 2022. RP002-1.0.4. Disponível em: <<https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>>.
- [36] ABRAMSON, N. The ALOHA System: Another Alternative for Computer Communications. In: *Proceedings of the November 17-19, 1970, Fall Joint Computer Conference*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1970. (AFIPS '70 (Fall)), p. 281–285. ISBN 9781450379045. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/1478462.1478502>>.
- [37] ULLAH, M. A.; MIKHAYLOV, K.; ALVES, H. Massive Machine-Type Communication and Satellite Integration for Remote Areas. *IEEE Wireless Communications*, v. 28, n. 4, p. 74–80, 2021.
- [38] CORPORATION, S. *LR-FHSS System Performance*. [S.l.]. Disponível em: <semtech.com/products/wireless-rf/lora-edge/lr1110#documentation>.