

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANANÍAS AMBROSIO QUISPE

ESTRATÉGIA DE ENCONTRO PARALELO PARA ASSOCIAÇÃO DE
NÓS EM REDES WI-SUN FAN

CURITIBA PR

2025

ANANÍAS AMBROSIO QUISPE

ESTRATÉGIA DE ENCONTRO PARALELO PARA ASSOCIAÇÃO DE
NÓS EM REDES WI-SUN FAN

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica, Área de Telecomuni-
cações, Universidade Federal do Paraná, como
requisito parcial à obtenção do título de Dou-
tor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Evelio Martín García
Fernández

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Jardim Riella

CURITIBA PR

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Quispe, Ananías Ambrosio
Estratégia de encontro paralelo para associação de nós em redes WI-SUN
FAN / Ananías Ambrosio Quispe. – Curitiba, 2025.
1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Evelio Martín García Fernández
Coorientador: Rodrigo Jardim Riella

1. Redes elétricas – Analisadores. 2. Redes elétricas inteligentes. 3.
Temporizadores automáticos. 4. Rede de baixa potência. 5. Encontro paralelo.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. III. García Fernández, Evelio Martín. IV. Riella, Rodrigo
Jardim. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
ELÉTRICA - 40001016043P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **ANANIAS AMBROSIO QUISPE**, intitulada: **ESTRATÉGIA DE ENCONTRO PARALELO PARA ASSOCIAÇÃO DE NÓS EM REDES WI-SUN FAN**, sob orientação do Prof. Dr. EVELIO MARTÍN GARCÍA FERNÁNDEZ, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 31 de Outubro de 2025.

Assinatura Eletrônica
05/11/2025 13:05:50.0

EVELIO MARTÍN GARCÍA FERNÁNDEZ
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
05/11/2025 13:54:26.0

SAMUEL BARALDI MAFRA

Avaliador Externo (INSTITUTO NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES)

Assinatura Eletrônica
07/11/2025 15:17:24.0

CARLOS MARCELO PEDROSO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
06/11/2025 12:37:41.0

GUILHERME LUIZ MORITZ
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico todo o esforço dedicado à finalização desta tese à minha esposa, companheira constante nesta jornada, e à minha querida família, cuja presença em meus pensamentos me acompanhou, apesar da distância.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade e pela força concedidas ao longo desta jornada acadêmica.

Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Evelio M. G. Fernández, por sua orientação firme, dedicação e confiança ao longo de todo o processo. Estendo meus agradecimentos ao coorientador Rodrigo J. Riella e à Luciana M. Iantorno, do Lactec, que contribuíram de forma significativa para a realização deste trabalho e estiveram sempre dispostos a oferecer sua ajuda.

Agradeço ao Lactec e aos colaboradores dos laboratórios de Sistemas Eletrônicos e Digitais e do Futuro Grid, pelo suporte e pela infraestrutura disponibilizados, essenciais para a condução desta pesquisa.

Aos colegas e amigos do grupo de pesquisa, agradeço pelas discussões, sugestões e pelo ambiente colaborativo, que tanto enriqueceram este trabalho.

Por fim, agradeço à minha esposa e à minha família pelo carinho, incentivo e compreensão, fundamentais para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

A crescente demanda por conectividade e soluções de baixo custo tem levado à ampla adoção de comunicações de baixa taxa de dados e baixo consumo de energia. O padrão Wi-SUN FAN (*Wireless Smart Ubiquitous Network Field Area Network*) destaca-se por possibilitar conexões em larga escala entre dispositivos inteligentes em redes de serviços públicos e cidades inteligentes. Projetado para Redes de Baixa Potência e com Perdas (LLNs, do inglês *Low Power and Lossy Network*), o Wi-SUN FAN suporta a formação de múltiplas Redes de Área Pessoal (PANs, do inglês *Personal Area Network*) e topologias em malha com transmissões multi-salto e salto de canal, utilizando protocolos abertos compatíveis com IEEE 802.15.4. No entanto, o processo de associação de nós, que é dividido em cinco estados de junção, frequentemente resulta em tempos de conexão prolongados, particularmente em redes multi-saltos, o que compromete a escalabilidade e a confiabilidade da rede. Esta tese analisa os fatores que influenciam esses atrasos, com ênfase particular no Estado de Junção 1 (EJ1), que utiliza comunicação assíncrona e o algoritmo *trickle timer* para agendar pacotes de Anúncio PAN (PA, do inglês *PAN Advertisement*). Dependendo da configuração padrão, isso pode levar a intervalos de transmissão excessivamente longos. Para mitigar esse problema, é apresentada uma abordagem baseada na formação de *clusters* sincronizados entre nós não associados, explorando pacotes de Solicitação de Anúncio PAN (PAS, do inglês *PAN Advertisement Solicit*) e a estratégia de Encontro Paralelo (EP) para disseminar rapidamente as informações da rede. O algoritmo proposto, EP Wi-SUN FAN, foi avaliado por meio de simulações em diversas topologias de rede, demonstrando melhorias significativas em cenários lineares, totalmente conectados e em malha. Os ganhos mais expressivos foram observados na topologia linear, com reduções de até 71,22% no tempo de associação e 59,56% no consumo de energia durante o EJ1.

Palavras-chave: Encontro paralelo, Wi-SUN FAN, LLN, *trickle timer*.

ABSTRACT

The growing demand for connectivity and cost-effective solutions has led to the widespread adoption of low-data-rate and low-power communications. The Wi-SUN FAN (Wireless Smart Ubiquitous Network Field Area Network) standard stands out for enabling large-scale connections among smart devices in utility networks and smart cities. Designed for Low-Power and Lossy Networks (LLNs), Wi-SUN FAN supports the formation of multiple Personal Area Networks (PANs) and mesh topologies with multi-hop transmissions and channel hopping, using open protocols compatible with IEEE 802.15.4. However, the node association process, divided into five connection states, often results in prolonged connection times, particularly in multi-hop networks, which undermines both scalability and reliability. This thesis analyses the factors influencing these delays, with particular emphasis on Join State 1 (JS1), which employs asynchronous communication and the trickle timer algorithm to schedule PAN Advertisement (PA) packets. Depending on the default configuration, this may lead to excessively long transmission intervals. To mitigate this problem, an approach based on the formation of synchronized clusters among unassociated nodes is proposed, leveraging PAN Advertisement Solicit (PAS) packets and the Parallel Rendezvous (PR) strategy to accelerate network information dissemination. The proposed algorithm, PR Wi-SUN FAN, was evaluated through simulations in various network topologies, demonstrating notable improvements in linear, fully connected, and mesh scenarios. The most significant gains are observed in the linear topology, with reductions of up to 71.22% in association time and 59.56% in energy consumption during JS1.

Keywords: Parallel rendezvous, Wi-SUN FAN, LLN, trickle timer.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Pilha Wi-SUN FAN.	28
2.2	Tipos de nós Wi-SUN FAN.	28
2.3	Estados de junção no processo de conexão dos nós.	30
2.4	Salto de frequência <i>unicast</i>	31
2.5	Salto de frequência <i>broadcast</i>	32
2.6	Processo de varredura ativa e passiva.	32
2.7	Transmissões de trens de pacotes.	33
2.8	Algoritmo do <i>trickle timer</i> de dois intervalos com $k = 1$, em que I_1 representa o intervalo inicial e I_2 o intervalo resultante da duplicação do anterior. A linha azul representa uma transmissão no Wi-SUN FAN, indica o início de um trem de pacotes. A linha vermelha corresponde a uma transmissão suprimida devido à recepção de um pacote PA ou PAS, cuja ocorrência é sinalizada pelas linhas vermelhas pontilhadas.	34
4.1	Cenário experimental. (a) <i>Testbed</i> . (b) Esquema de conexão.	41
4.2	Quantidade de pacotes PA, PAS, PC e PCS.	45
4.3	Tempo médio decorrido em cada estado de junção.	45
5.1	Pilha Contiki-NG com funcionalidade incorporada para o processo de descoberta e associação.	49
5.2	Exemplos de topologia de rede: (a) linear, (b) totalmente conectada, (c) malha.	52

5.3	Topologias configuradas no Cooja: (a) Linear. (b) Totalmente conectado. (c) Malha.	54
5.4	Redes com 20 e 100 nós.	55
5.5	Tempos de conexão da rede nas topologias: (a) Linear. (b) Totalmente conectado. (c) Malha. (d) Malha com 20 nós.	56
5.6	Tempo de conexão de rede usando configurações para redes de pequena, mediana e grande escala.	58
6.1	Exemplo de formação de <i>cluster</i> em EP Wi-SUN FAN.	59
6.2	Exemplo do processo de associação de nós no EJ1 em uma topologia linear em redes Wi-SUN FAN.	63
6.3	Exemplo de processo de associação de nós no EJ1 em uma topologia linear em redes EP Wi-SUN FAN.	69
7.1	Topologias em Cooja: (a) Linear. (b) Totalmente conectado. (c) Malha. .	76
7.2	Comparação entre os algoritmos de simulação do Wi-SUN FAN e do EP Wi-SUN FAN em uma topologia linear.	79
7.3	Comparação entre os algoritmos de simulação do Wi-SUN FAN e do EP Wi-SUN FAN em uma topologia totalmente conectada.	80
7.4	Comparação entre os algoritmos de simulação do Wi-SUN FAN e do EP Wi-SUN FAN em uma topologia malha.	81

7.5 Resultados da simulação para as redes Wi-SUN FAN e PR Wi-SUN FAN em função do número de nós na rede malha (linhas contínuas com marcadores circulares e triangulares, respectivamente), comparados aos modelos teóricos para redes lineares (linhas tracejadas com marcadores circulares e triangulares, respectivamente) e totalmente conectadas (linhas pontilhadas com marcadores circulares e triangulares, respectivamente), considerando 90 canais.	82
7.6 Consumo médio de energia do Wi-SUN FAN e do EP Wi-SUN FAN em uma rede linear.	83
7.7 Consumo médio de energia do Wi-SUN FAN e do EP Wi-SUN FAN: (a) Totalmente conectado. (b) Malha.	84

LISTA DE TABELAS

2.1	Parâmetros recomendados de <i>trickle timer</i> do Wi-SUN FAN nos EJ1 e EJ3.	35
4.1	Parâmetros de configuração dos dispositivos.	41
4.2	Cenários experimentais do <i>trickle timer</i> .	42
4.3	Indicativo de término do estado.	42
4.4	Tempos dos estados de junção dos cenários (em minutos).	44
5.1	Vizinhos para cada topologia.	53
5.2	Vizinhos dos nós.	53
5.3	Parâmetros de configuração dos dispositivos.	54
7.1	Configurações usadas para diferentes números de canais.	76

LISTA DE SIGLAS

6LoWPAN	<i>IPv6 over LowPower Wireless Personal Area Networks</i>
BDI	<i>Broadcast Dwell Interval</i>
BS	<i>Broadcast Slot</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
DAO	<i>Destination Advertisement Object</i>
DH1CF	<i>Direct Hash Channel Function</i>
EAPoL	<i>Extensible Authentication Protocol over LAN</i>
EAP-TLS	<i>Extensible Authentication Protocol Transport Layer Security</i>
EJ	Estado Junção
EP	Encontro Paralelo
EUI	<i>Extended Unique Identifier</i>
ETX	<i>Expected Transmission Count</i>
FAN	<i>Field Area Network</i>
F	Folha
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
GTK	<i>Group Transient Key</i>
ICMPv6	<i>Internet Control Message Protocol Version 6</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
LLC	<i>Logical Link Control</i>

LLN	<i>Low Power and Lossy Network</i>
MAC	<i>Media Acces Control</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PA	<i>PAN Advertisement</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PAS	<i>PAN Advertisement Solicit</i>
PC	<i>PAN Configuration</i>
PCS	<i>PAN Configuration Solicit</i>
R	Roteador
RB	Roteador de Borda
RF	Radiofrequênciia
RFC	<i>Request For Comments</i>
RFC	<i>Request For Comments</i>
RPL	<i>IPv6 Routing Protocol for LLNs</i>
SO	Sistema Operacional
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TR51CF	<i>TR51 Channel Function</i>
UDI	<i>Unicast Dwell Interval</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
US	<i>Unicast Slot</i>

WAN *Wide Area Network*

Wi-SUN *Wireless Smart Ubiquitous Network*

LISTA DE SÍMBOLOS

c	Contador de consistência do <i>trickle timer</i>
C	Número de canais
$CHscan$	Varredura de canais
H	Número de saltos
I_c	Índice de canal
I_{\max}	Intervalo máximo do <i>trickle timer</i>
I_{\min}	Intervalo mínimo do <i>trickle timer</i>
k	Constante de redundância do <i>trickle timer</i>
N	Número de nós
Nch	Número de canais
ta_j	Tempo de recepção de pacote PA
tp_j	Início do tempo de <i>trem_PA</i>
tr_j	Tempo de recepção de pacote PAS
ts_j	Início do tempo de <i>trem_PAS</i>
T_c	Tempo de duração do pacotes PA ou PAS
T_d	Tempo entre o início do <i>trem_PA</i> e o instante de recepção de um pacote PA
T_e	Tempo de intervalo entre os pacotes transmitidos em um <i>trem_PA</i> ou <i>trem_PAS</i>
T_M	Tempo máximo permitido para que um nó receba um pacote PA

Qt Quantidade total de pacotes no EJ1 e EJ3

V Vetor de canais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Motivação e justificativa	20
1.2 Objetivo Principal	24
1.3 Objetivos Específicos	24
1.4 Trabalhos Publicados	25
1.5 Estrutura do Documento	26
2 VISÃO GERAL DO PADRÃO WI-SUN FAN	27
2.1 Pilha Wi-SUN FAN	27
2.2 Processo de conexão de nós Wi-SUN FAN	28
2.3 Programação de salto de canal	30
2.4 Varredura ativa no Wi-SUN FAN	32
2.5 Aplicação do <i>trickle timer</i> no Wi-SUN FAN	33
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	36
4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE CONEXÃO DE NÓS	40
4.1 Esquema experimental	40
4.2 Configurações de <i>trickle timer</i> nos experimentos	41
4.3 Verificações experimentais	43
5 IMPLEMENTAÇÃO DO PROCESSO DE CONEXÃO DE NÓS WI-	

SUN FAN EM CONTIKI-NG	47
5.1 Procedimento de implementação	48
5.2 Validação do simulador	51
5.2.1 Configuração do Experimento	52
5.2.2 Configuração do Simulador	53
5.3 Resultados	55
5.3.1 Validação da Topologia Linear	55
5.3.2 Validação da Topologia Totalmente Conectada	56
5.3.3 Validação da Topologia Malha	57
6 EP WI-SUN FAN: ENCONTRO PARALELO PARA ASSOCIAÇÃO WI-SUN FAN	59
6.1 Modelagem Estocástica da descoberta no EJ1 no Wi-SUN FAN	60
6.1.1 Rede linear no EJ1 - Wi-SUN FAN	62
6.1.2 Rede totalmente conectada no EJ1 - Wi-SUN FAN	65
6.1.3 Rede malha no EJ1 - Wi-SUN FAN	66
6.2 O processo de descoberta EP Wi-SUN FAN no EJ1	67
6.2.1 Rede linear no EJ1 - EP Wi-SUN FAN	68
6.2.2 Rede totalmente conectada no EJ1 - EP Wi-SUN FAN	71
6.2.3 Rede malha no EJ1 - EP Wi-SUN FAN	73
7 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	75
7.1 Configuração Experimental	75
7.2 Consumo de energia	77

7.3	Resultados	78
7.3.1	Rede linear	78
7.3.2	Rede totalmente conectada	80
7.3.3	Rede malha	81
7.3.4	Considerações sobre consumo de energia	82
7.3.5	Análise e discussão dos resultados	84
8	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	87
8.1	Conclusões	87
8.2	Trabalhos Futuros	88
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e justificativa

Com o desenvolvimento do paradigma de internet das coisas, diferentes padrões estão sendo selecionados e utilizados para conseguir atender a demanda de larga escala de interconexão de diferentes dispositivos inteligentes, em aplicações tais como cidades inteligentes e serviços utilitários (redes elétricas, água, gás entre outros). A necessidade de dispor de dispositivos de baixo consumo energético, baixo custo e tráfego de dados reduzido impulsionou a conformação de diferentes padrões, como a tecnologia Sigfox e as alianças Zigbee, Lora e Wi-SUN (*Wireless Smart Ubiquitous Network*)¹, entre outras (ANANI et al., 2019).

O presente trabalho é focado no perfil Wi-SUN FAN (*Field Area Network*), um padrão da aliança Wi-SUN, dirigido para redes de tipo LLN (*Low Power and Lossy Network*), caracterizadas por enlaces sem fio suscetíveis a perdas, interferências e instabilidade (WINTER et al., 2012). O Wi-SUN FAN tem sido de interesse para soluções interoperáveis (BEECHER, 2020; DIAS et al., 2022) em diferentes aplicações, especialmente para redes utilitárias e cidades inteligentes (Wi-SUN ALLIANCE, 2018) onde milhares de nós estão interligados (LANDIS+GYR, 2017; MOCHINSKI et al., 2022) formando várias PAN (*Personal Area Network*).

O padrão Wi-SUN FAN é composto por um conjunto de protocolos abertos e utiliza principalmente as camadas física e de enlace de dados compatíveis com o IEEE 802.15.4 (IEEE Std 802.15.4, 2020). Ele é caracterizado pela formação de uma topologia em malha, que possibilita a transmissão de dados por múltiplos saltos utilizando o protocolo RPL (*Routing Protocol for Low Power and Lossy Network*) (WINTER et al., 2012). Essa abordagem permite a formação de uma rede dinâmica, com taxas de dados de 50 kbps

¹<https://wi-sun.org>

e 150 kbps na versão 1.0 e de até 2.4 Mbps na versão 1.1 (MORIKAWA et al., 2023; IEEE Std 802.15.4, 2020). O padrão também assegura coexistência e operação simultânea com modulações FSK (*Frequency Shift Keying*) e OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) (OCHIAI et al., 2021; MORIKAWA et al., 2023), além de empregar salto de frequência para evitar interferências e interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes (AMBROSIO et al., 2021).

Por se tratar de uma rede em malha, sua arquitetura adota uma solução hierárquica composta por três tipos de nós: Roteador de Borda (RB), Roteador (R) e Folha (F). Esta rede deve atender uma demanda de comunicação de uma rede densa, gerando um grande fluxo de dados, e sabendo que os dispositivos têm características limitadas, deve ser dada uma atenção especial ao processo de conexão dos nós à rede, que engloba descoberta, união, autenticação e configuração de roteamento. No padrão Wi-SUN FAN (HIRAKAWA et al., 2023), este processo está formado por cinco etapas chamadas de estado de junção (EJ). O estado de junção 1 (EJ1) corresponde ao processo de descoberta e seleção de PAN, o estado junção 2 (EJ2) refere-se ao processo de autenticação, o estado de junção 3 (EJ3) corresponde ao processo de configuração de PAN, o estado de junção 4 (EJ4) envolve o processo de configuração do roteamento e estado de junção 5 (EJ5) é quando o nó está efetivamente conectado à PAN. Este processo de formação da rede é o início para a construção de uma rede Wi-SUN FAN, permitindo que os nós se juntem e anunciem sua presença posteriormente.

Este processo de conexão dos nós torna lento o processo de formação de rede, problema este que foi identificado no trabalho de Junjalearnvong et al. (JUNJALEARNVONG et al., 2019), onde revelaram-se tempos de conexão lentos em redes multi-saltos. Esses tempos excedem cinco minutos por nó em uma rede linear, conforme verificado experimentalmente (JUNJALEARNVONG et al., 2019; AMBROSIO et al., 2022; QUISPE et al., 2024). Atualmente, a documentação do Wi-SUN FAN fornece recomendações de parâmetros para configurações para redes de pequena escala (dezenas ou centenas de nós) e grande escala (milhares de nós) (IEEE Std 2857, 2021). No entanto, as avaliações expe-

rimentais realizadas em diferentes tipos de redes, como ponto a ponto (PHUNG, 2022), multi-salto e malha (JUNJALEARNVONG et al., 2018; AMBROSIO et al., 2022; SILICON LABORATORIES INC., 2022; QUISPE et al., 2024), indicam tempos de conexão persistentemente altos. Por exemplo, em redes de pequena escala, os tempos no primeiro nó foram superiores a três minutos, enquanto em redes de grande escala, foram superiores a quinze minutos (SILICON LABORATORIES INC., 2022).

Em eventos onde é necessário reiniciar o RB, a recuperação da rede pode apresentar tempos prolongados de restabelecimento. Situações adversas, como falhas operacionais ou climáticos extremos, podem comprometer o funcionamento dos sistemas de distribuição elétrica, resultando em interrupções nas redes de medição inteligente. Após o retorno da energia, a recuperação da comunicação é lenta devido às limitações dos protocolos. Em testes da Silicon Labs, uma rede com cem nós levou mais de uma hora para se restaurar (SILICON LABORATORIES INC., 2022). Essa demora no processo de conexão impacta negativamente a capacidade da rede de atingir seu objetivo principal de conectar e fornecer comunicação entre um grande número de dispositivos.

Para abordar este problema de tempo de conexão dos nós, é importante identificar e diferenciar os processos em cada EJ. No Wi-SUN FAN, o tempo do processo de conexão dos nós é determinado pela soma dos tempos de cada EJ. O padrão tem definido uma comunicação assíncrona nos estados EJ1 e EJ3 durante os processos de descoberta e configuração da PAN, respectivamente. O algoritmo *trickle timer* é utilizado para controlar o envio dos pacotes nesses estados (LEVIS et al., 2011). No estudo apresentado em (JUNJALEARNVONG et al., 2019), o problema do tempo de conexão dos nós é abordado por meio de uma análise do algoritmo *trickle timer* nos EJ1 e EJ3 em uma rede multi-salto. Os autores propõem um esquema de configuração de parâmetros do algoritmo, controlando especialmente as taxas de transmissão dos pacotes de descoberta e configuração, aumentando ou diminuindo o período de envio das mensagens.

Implementar um esquema de configuração do *trickle timer* para o envio dos pacotes no processo dos EJ1 e EJ3 permite verificar o impacto de compensação entre o tempo de

conexão, latência e escalabilidade da rede (YAO et al., 2024). Aumentar o intervalo de tempo de envio desses pacotes resulta em tempos de conexão mais longos, mas melhora a latência e a escalabilidade da rede. Por outro lado, diminuir o intervalo de tempo melhora o tempo de conexão, mas limita a escalabilidade e aumenta a latência devido ao tráfego de gerenciamento da rede (SILICON LABORATORIES INC., 2022).

Durante o processo de autenticação no EJ2, são definidos os parâmetros de segurança, incluindo os dados de autenticação e as chaves que deverão ser validadas pelo novo nó para que seu ingresso na rede seja autorizado (IEEE Std 2857, 2021). Um método implementado no padrão para melhorar o tempo de conexão dos nós é armazenar as informações de segurança para que, em caso de reinicialização do nó, ele não precise realizar novamente sua autenticação e possa pular o EJ2.

No caso do EJ4, durante o roteamento da rede, um método utilizado é a otimização do protocolo RPL para melhorar o tempo de conexão. As melhorias envolvem o balançamento de carga dos nós (HADAYA; ALABADY, 2022; HIRAKAWA et al., 2021), a estabilidade na construção da rede (HOTTA et al., 2020; NAGAO et al., 2025), reconexões aceleradas (HECK et al., 2025), a mobilidade de nós (WAYONG et al., 2021; JUNJALEARNVONG et al., 2017), e esquemas de configuração e/ou modificação de *trickle timer* no controle de pacotes do RPL (GHALEB et al., 2017; MASADEH et al., 2022; AGHAEI et al., 2021). Os esquemas de agendamento do salto de canal definem os tempos de escuta/transmissão para comunicações de *unicast* e *broadcast*. Estudos confirmam que a modificação dessas durações, especialmente em EJ4, afeta significativamente o desempenho (WAYONG et al., 2020; LEE; CHUNG, 2023).

A pesar desses esforços, verifica-se que são necessárias alternativas adicionais para reduzir os tempos de conexão dos nós. No Wi-SUN FAN, os nós não associados são ativos (IEEE Std 802.15.4, 2020; MOHAMADI et al., 2021), pois enviam pacotes de Solicitação de Anúncio PAN (PAS, do inglês *PAN Advertisement Solicit*) para acelerar a descoberta das redes. Propõe-se a utilização desses pacotes para o estabelecimento de *clusters* sincronizados durante a varredura dos canais, permitindo o compartilhamento

intracluster dos cronogramas de salto de canal. Essa abordagem corresponde a uma estratégia de Encontro Paralelo (EP), já aplicada em redes de rádio cognitivo (REGUERA et al., 2016; FLORES et al., 2017) e TSCH (*Time-Slotted Channel Hopping*) (ALGORÁ et al., 2018; BAE; CHUNG, 2020), que pode viabilizar a rápida disseminação de pacotes de Anúncio PAN (PA, do inglês *PAN Advertisement*) dentro do *cluster*, especificamente durante o EJ1 do padrão Wi-SUN FAN.

Para validar essa proposta, o método foi implementado no sistema operacional Contiki-NG, seguindo a abordagem apresentada em (QUISPE et al., 2024). O algoritmo de associação resultante foi denominado EP Wi-SUN FAN.

1.2 Objetivo Principal

O objetivo principal é reduzir o tempo de conexão dos nós do padrão Wi-SUN FAN, abordando o problema através da estratégia de Encontro Paralelo com a implementação do EP WiSUN FAN. A proposta baseia-se em aproveitar os pacotes PAS, gerados pelos nós não associados, para formar *clusters* sincronizados. Nesse esquema, os nós passam a compartilhar parâmetros mínimos de associação, o que possibilita a rápida disseminação dos pacotes PA dentro dos *clusters*, acelerando o processo no EJ1 e diminuindo o consumo de energia.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos compreendem:

- Avaliação experimental do tempo de conexão dos nós em uma rede multi-salto do padrão Wi-SUN FAN, para verificar os tempos atuais de cada EJ da rede com as configurações recomendadas pelo padrão.
- Implementação da ferramenta de simulação desenvolvida dentro do SO Contiki-NG para simular os tempos de formação das redes Wi-SUN FAN.

- Implementação, desenvolvimento e avaliação da estratégia do EP no Wi-SUN FAN em EJ1.

Os objetivos foram alcançados, e seus resultados serão apresentados e discutidos ao longo deste trabalho.

1.4 Trabalhos Publicados

A seguir, são apresentados os artigos publicados relacionados ao tema desta tese, compreendendo dois artigos em periódico de pesquisa e dois artigos em simpósios, os quais exploram o processo de conexão dos nós.

- QUISPE, A. A.; RIELLA, R. J.; IANTORNO, L. M.; DA FONSECA, P.H.; REGUERA, V.A.; FERNANDEZ, E. M. G. Parallel Rendezvous Strategy for Node Association in Wi-SUN FAN Networks. **Sensors**, MDPI, v. 25, n. 19, p. 6213, 2025.
- QUISPE, A. A.; RIELLA, R. J.; IANTORNO, L. M.; MARIANI, L. S.; FERNANDEZ, E. M. G. Analysis of Wi-SUN FAN network formation time. **Sensors**, MDPI, v. 24, n. 4, p. 1142, 2024.
- AMBROSIO, A.; RIELLA, R. J.; IANTORNO, L. M.; SANTOS, B. E. C.; RODRIGUES, D. d. H. C.; SILVA, G. T. A. da; BRITO, J. A.; FERNÁNDEZ, E. M. Avaliação experimental do tempo de formação de uma rede multi-salto do padrão Wi-SUN FAN. **Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)**, 2022.
- AMBROSIO, A.; RIELLA, R. J.; IANTORNO, L. M.; GOMES, V. B.; FERNÁNDEZ, E. M. Wi-SUN FAN interoperability: Verification through experiment test. **Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)**, 2021.

1.5 Estrutura do Documento

A sequência deste documento está organizada da seguinte maneira: O Capítulo 2 apresenta os conceitos fundamentais do padrão que servem de fundamento para o trabalho. O Capítulo 3 traz uma revisão bibliográfica dos estudos relacionados à melhoria do tempo de conexão dos nós no padrão Wi-SUN FAN. No Capítulo 4, é realizada uma avaliação experimental do processo de conexão de nós no padrão. O Capítulo 5 apresenta a implementação do processo de conexão dos nós Wi-SUN FAN em Contiki-NG. No Capítulo 6, é detalhada a proposta do EP Wi-SUN FAN. O Capítulo 7 descreve a avaliação de desempenho e os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 8 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 VISÃO GERAL DO PADRÃO WI-SUN FAN

Este capítulo apresenta uma visão geral do padrão Wi-SUN FAN, fornecendo os principais conceitos que fundamentam a pesquisa desenvolvida neste trabalho, abrangendo a descrição da pilha, o processo de conexão de nós, a programação de salto de canal, a varredura ativa e o algoritmo *trickle timer*.

2.1 Pilha Wi-SUN FAN

A Figura 2.1 apresenta as diferentes camadas que compõem o padrão (IEEE Std 2857, 2021), em conformidade com o modelo OSI. As camadas física e de enlace de dados são baseadas no protocolo IEEE802.15.4 (IEEE Std 802.15.4, 2020). A camada de enlace é dividida em duas subcamadas: MAC (*Medium Access Control*) e LLC (*logic link control*), que pode utilizar o serviço opcional de L2 *mesh*. Na camada de rede, o protocolo RPL (WINTER et al., 2012) é utilizado para a formação da rede, enquanto o 6LoWPAN (*IPv6 Over Low-Power Wireless PAN*), responsável pela adaptação do IPv6 e o ICMPv6 (*Internet Control Message Protocol for IPv6*), é utilizado para os pacotes de controle. A camada de transporte, por sua vez, oferece suporte ao tráfego de pacotes UDP (*User Datagram Protocol*) e TCP (*Transmission Control Protocol*). Além disso, o padrão inclui diferentes mecanismos de segurança como IEEE 802.1X, IEEE 802.11i e EAP-TLS (*Extensible Authentication Protocol Transport Layer Security*), garantindo a comunicação segura entre os nós. As camadas superiores do modelo OSI (aplicação, apresentação e sessão) não fazem parte da pilha de protocolos do Wi-SUN FAN.

Uma rede Wi-SUN FAN é hierárquica e consiste em três tipos de nós: um Roteador de Borda (RB), que gerencia todas as informações de roteamento de origem para os outros nós; o Roteador (R), que realiza o encaminhamento ascendente e descendente de pacotes e mantém tabelas de roteamento para seus nós vizinhos; e um nó Folha (F), que oferece

CAMADA	Wi-SUN FAN
Transporte	UDP, TCP
Rede	IPv6, 6LoWPAN, RPL, ICMPv6
Enlace de dados	LLC MAC
Física	L2 Mesh (opcional) IEEE 802.15.4

IEEE 802.1X
Segurança

Figura 2.1: Pilha Wi-SUN FAN.

as funcionalidades mínimas para descobrir e ingressar no PAN, além de enviar e receber pacotes. A Figura 2.2 ilustra os diferentes tipos de nós definidos pelo padrão.

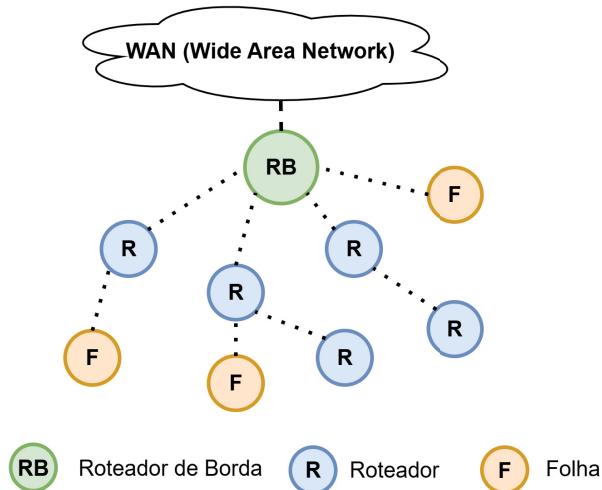


Figura 2.2: Tipos de nós Wi-SUN FAN.

2.2 Processo de conexão de nós Wi-SUN FAN

O processo de conexão de nós em uma rede Wi-SUN FAN é composto por cinco estados de junção (IEEE Std 2857, 2021). O EJ1 corresponde à comunicação inicial onde o nó RB (nó de publicidade) anuncia a presença da rede por meio de pacotes PA, que contêm os parâmetros mínimos (nome de PAN, horário local e agendamento de canais de *unicast*) necessários para que um nó possa se associar. Um nó que deseja ingressar na rede deve varrerativamente todos os canais em busca de um PA recebido de um RB ou de um nó

já associado. Para acelerar o envio dos PAs, os nós de junção (não associados) realizam solicitações através do envio de pacotes PAS. Durante esse processo, os nós de junção devem manter seu rádio constantemente ligado a fim de monitorar os canais disponíveis e detectar um PA válido para efetuar a associação. No EJ2, o nó inicia o processo de autenticação estabelecendo um fluxo de dados de autenticação com base nas informações do horário de escuta *unicast* de seu vizinho, aprendidas a partir do PA. No EJ3, ocorre um procedimento semelhante ao do EJ1 mas, nesse caso, são enviados pacotes de anúncio chamados PC (*PAN Configuration*) que contêm informações completas sobre a PAN como chaves de segurança ativas, horário de *broadcast*, detecção de mudanças, entre outros, permitindo uma operação mais segura. Para acelerar esse processo, podem ser enviados pacotes de solicitação PCS (*PAN Configuration Solicit*). No EJ4, o roteamento da rede é estabelecido por meio do protocolo RPL. Finalmente, no EJ5, o nó torna-se plenamente conectado à rede, atingindo o estado operacional. O controle do envio dos pacotes PA, PAS, PC e PCS nos EJ1 e EJ3 é realizado pelo algoritmo *trikle timer* (LEVIS et al., 2011), um mecanismo de temporização. Esse mesmo algoritmo, com configurações diferentes, é empregado no envio de determinados pacotes do protocolo RPL no EJ4. A Figura 2.3 mostra o processo de conexão dos nós através dos EJ.

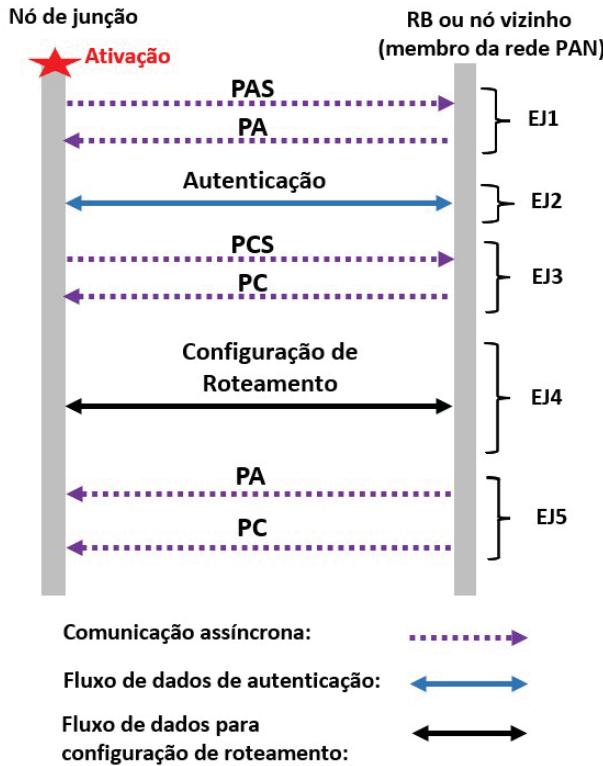


Figura 2.3: Estados de junção no processo de conexão dos nós.

2.3 Programação de salto de canal

Os nós suportam o salto de canal em uma sequência pseudoaleatória, definida pela função de canal para transmissões *unicast* e *broadcast* (IEEE Std 2857, 2021). A sequência de salto *unicast* é derivada do endereço EUI-64 do dispositivo e do conjunto de canais disponíveis, conforme o domínio regulatório de cada país (IEEE Std 2857, 2021; IEEE Std 802.15.4, 2020). A Figura 2.4 ilustra o salto de frequência *unicast*, no qual a sequência de salto pode ser entendida como uma repetição de intervalos de permanência de *unicast* (UDI, do inglês *Unicast Dwell Interval*) ou de intervalo *unicast* (US, do inglês *Unicast Slot*), sendo que o número US identifica uma posição específica dentro da sequência. De acordo com o padrão, o comprimento do UDI é definido entre 15 ms e 255 ms (IEEE Std 2857, 2021).

Uma função de canal define uma sequência pseudoaleatória utilizada para o agendamento de salto de canal. Ela estabelece um método para determinar, a partir da lista de canais físicos disponíveis, o canal específico no qual um nó opera em um determinado

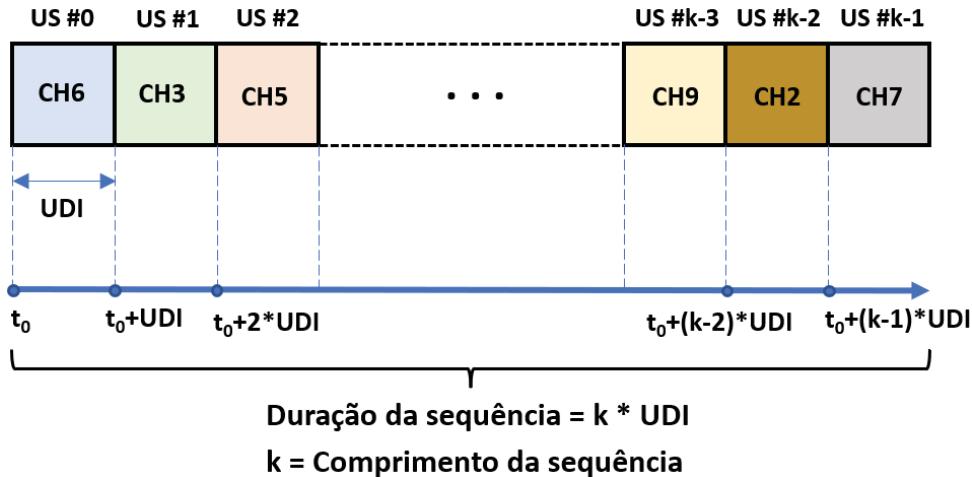


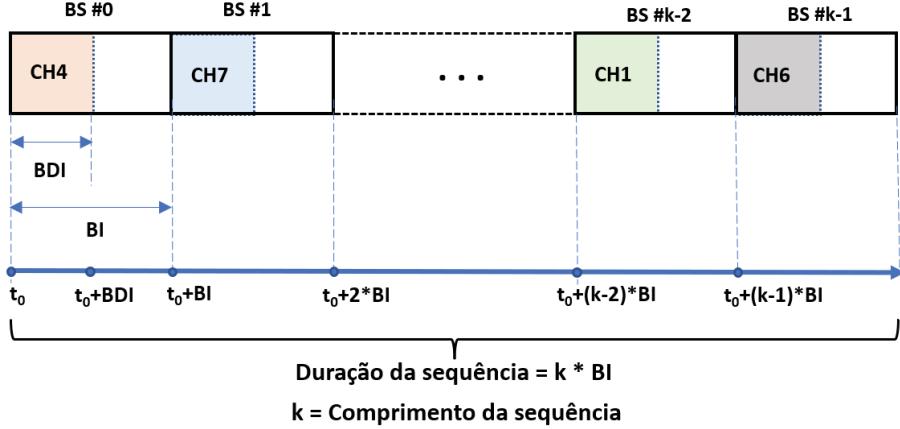
Figura 2.4: Salto de frequênci *unicast*.

instante. Diversas funções de canal são suportadas para a operação *unicast*, incluindo canal fixo, TR51CH, DH1CF e funções definidas pelo fornecedor (IEEE Std 2857, 2021).

Como cada nó gera seu próprio agendamento *unicast*, a transmissão de um pacote para um vizinho requer o cálculo do canal de frequência em que esse vizinho está escutando no momento da transmissão. Assim, o envio deve ocorrer nesse canal. Para determinar a posição atual na sequência de salto de canal de um nó, tanto o transmissor quanto o receptor devem utilizar a mesma função predefinida, baseada no endereço EUI-64, no número do canal e no número do US do nó.

A Figura 2.5 ilustra o salto de frequênci *broadcast*, no qual a sequência de salto pode ser entendida como uma sequência repetida de intervalos de *broadcast* (BI, do inglês *Broadcast Interval*) ou intervalo de *broadcast* (BS, do inglês *Broadcast Slot*), sendo que o número BS indica uma posição específica na sequência. O intervalo de permanência de *broadcast* (BDI, do inglês *Broadcast Dwell Interval*) é, em geral, muito menor que o BI.

Para realizar o processo de descoberta sobre esse agendamento de canal, o Wi-SUN FAN adota um método de varredura ativa.

Figura 2.5: Salto de frequência *broadcast*.

2.4 Varredura ativa no Wi-SUN FAN

As redes Wi-SUN FAN utilizam um método de varredura ativa para descoberta e associação de nós. Nesse modo, um nó que busca se conectar a uma rede inicia o processo transmitindo pacotes PAS, a fim de solicitar e acelerar as transmissões de PAs de nós anunciantes dentro da PAN. Esse procedimento contrasta com a varredura passiva, na qual o nó apenas varre os canais, sem enviar solicitações, até receber um pacote PA.

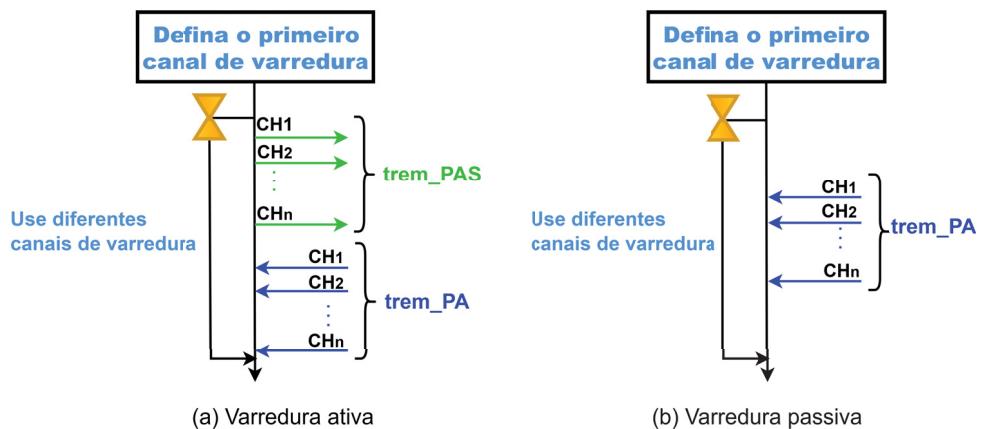


Figura 2.6: Processo de varredura ativa e passiva.

O mecanismo de varredura ativa consiste no envio de múltiplos pacotes PAS, transmitidos sequencialmente em cada canal físico disponível (CH_1, CH_2, \dots, CH_n), denominado *trem_PAS* neste trabalho. Ao receber um pacote PAS, um nó anunciante acelera as transmissões de PAs, também seguindo uma ordem sequencial de canais, denominada *trem_PA*. A Figura 2.6 ilustra esse processo de varredura ativa, em comparação com a

varredura passiva.

Durante o processo de descoberta e junção no EJ1, o Wi-SUN FAN utiliza o serviço MLME-WS-ASYNC-FRAME (IEEE Std 2857, 2021), um mecanismo primitivo responsável por gerenciar a transmissão assíncrona dos trens de pacotes PA e PAS. A Figura 2.7 ilustra essas transmissões, que devem abranger todos os canais disponíveis. Um *trem_PA* ou *trem_PAS* é caracterizado pela duração do pacote T_c , pelo intervalo entre transmissões consecutivas T_e e pela duração total do trem, expressa como $C \cdot T_e$, onde C denota o número de canais disponíveis.

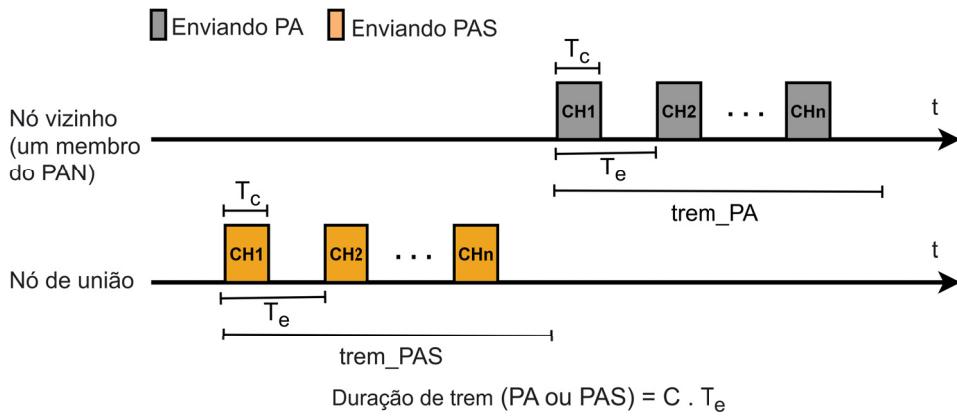


Figura 2.7: Transmissões de trens de pacotes.

O mecanismo MLME-WS-ASYNC-FRAME aciona a transmissão de pacotes PA ou PAS sempre que o *trickle timer* exige uma nova transmissão.

2.5 Aplicação do *trickle timer* no Wi-SUN FAN

Um nó de junção Wi-SUN FAN deve manter o *trickle timer* para controlar a frequência de transmissão dos pacotes PAS e PA nos processos EJ1 e EJ5, respectivamente. A operação do *trickle timer* é descrita na documentação RFC6206 (LEVIS et al., 2011), onde o algoritmo é configurado a partir de três parâmetros: I_{\min} , intervalo mínimo, definido em unidades de tempo como milissegundos ou segundos; I_{\max} , o intervalo máximo, calculado pela duplicação sucessiva de I_{\min} um número especificado de vezes; e k , a constante de redundância, é um número inteiro maior que zero que limita o número de transmissões

permitidas para evitar mensagens redundantes.

A Figura 2.8 ilustra o comportamento inicial do *trickle timer*, que começa zerando o contador de consistência c . Em seguida, o comprimento do intervalo I é selecionado aleatoriamente dentro do intervalo $[I_{\min}, I_{\min} \times 2^{I_{\max}}]$, e o tempo de transmissão t é escolhido de forma uniforme no subintervalo $[I/2, I]$ (DJAMAA; RICHARDSON, 2015). No contexto do Wi-SUN FAN, o tempo t representa o instante programado para o início dos trens PA ou PAS. Quando um nó recebe informações idênticas de seus vizinhos, o contador c é incrementado. A transmissão no instante t ocorre apenas se c for menor que a constante de redundância k ; caso contrário, ela é suprimida. Ao final de cada intervalo I , o algoritmo dobra sua duração até o limite máximo definido por I_{\max} . Se o intervalo atual ainda não tiver expirado, c é reiniciado e t é novamente selecionado aleatoriamente no intervalo $[I/2, I]$. Um aspecto relevante da operação do *trickle timer* é o período de somente escuta, correspondente à primeira metade de cada intervalo. Essa estrutura divide o intervalo em duas fases distintas: uma fase de somente escuta e uma fase de transmissão, durante a qual as transmissões podem ocorrer. O comportamento do *trickle timer* é detalhado em seis etapas na documentação RFC6206 (LEVIS et al., 2011).

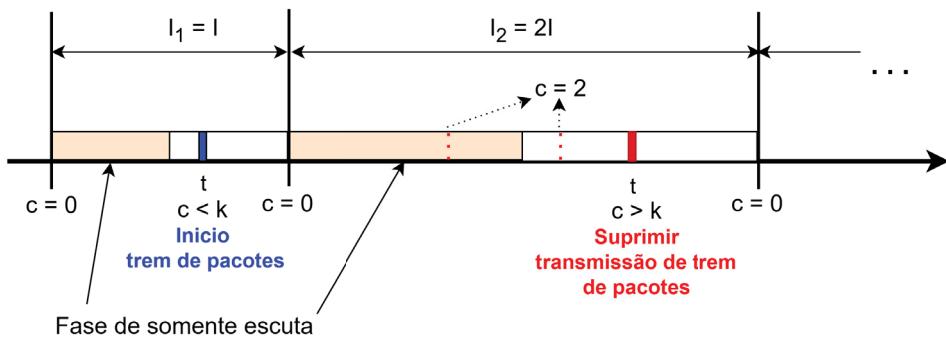


Figura 2.8: Algoritmo do *trickle timer* de dois intervalos com $k = 1$, em que I_1 representa o intervalo inicial e I_2 o intervalo resultante da duplicação do anterior. A linha azul representa uma transmissão no Wi-SUN FAN, indica o início de um trem de pacotes. A linha vermelha corresponde a uma transmissão suprimida devido à recepção de um pacote PA ou PAS, cuja ocorrência é sinalizada pelas linhas vermelhas pontilhadas.

Além disso, o *trickle timer* utiliza os conceitos de consistentes, inconsistentes e eventos genéricos para suprimir mensagens desnecessárias e adaptar o agendamento de pacotes de manutenção. Isso permite que o *trickle timer* seja ajustado e adotado por diferentes

protocolos, que interpretam esses eventos de acordo com sua semântica específica. No Wi-SUN FAN, a transmissão de pacotes PAS e PA incorpora essas considerações, conforme descrito na documentação padrão (IEEE Std 2857, 2021), relacionadas à inicialização, reinicialização ou interrupção do temporizador.

O padrão Wi-SUN FAN também fornece recomendações para a configuração do *trickle timer* de acordo com o tamanho da rede. Redes de pequena escala, com dezenas de nós por PAN, utilizam intervalos mais curtos para priorizar a capacidade de resposta, enquanto redes de grande escala, com milhares de nós por PAN, empregam intervalos mais longos para reduzir o congestionamento e otimizar a escalabilidade.

Na documentação do Wi-SUN FAN, os parâmetros I_{\min} , I_{\max} e k devem ser configurados com os valores $DISC_IMIN$, $DISC_IMAX$ e $DISC_K$, respectivamente. Os valores recomendados pelo padrão são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Parâmetros recomendados de *trickle timer* do Wi-SUN FAN nos EJ1 e EJ3.

Tipo de rede	$DISC_IMIN$ (segundos)	$DISC_IMAX$ (duplicações)	$DISC_K$
Pequena escala	15	2	1
Grande escala	60	4	1

A partir desses valores, é possível interpretar e calcular os parâmetros de I_{\min} , I_{\max} e k . Por exemplo, para uma rede de pequena escala, os valores seriam: $I_{\min} = DISC_IMIN = 15$ s, $I_{\max} = 15$ s $\times 2^{DISC_IMAX} = 60$ s e $k = DISC_K = 1$.

Este capítulo apresentou os principais conceitos que serão utilizados ao longo deste trabalho. Entre os pontos centrais, destacam-se: o processo de conexão dos nós, em particular o EJ1, no qual será implementada a proposta apresentada; a programação de salto de canal, com ênfase na programação *unicast*; a varredura ativa do processo de associação dos nós, cujo comportamento facilita a implementação da otimização proposta; e, por último, a aplicação do *trickle timer*, que permite compreender como ele é utilizado no contexto do padrão Wi-SUN FAN. O próximo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos estudos relacionados à redução do tempo de conexão dos nós nesse padrão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A documentação do padrão Wi-SUN FAN foi fornecida pela aliança Wi-SUN no ano 2017, limitada aos membros da aliança. Em 2020 foi publicada pela primeira vez pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) e atualizada no ano 2021. Este documento abrange os trabalhos relacionados aos estados de junção no processo de conexão dos nós.

Nos EJ1 e EJ3, o padrão define uma comunicação assíncrona no processo de descoberta e junção, na qual o algoritmo *trickle timer* é utilizado para controlar o envio dos pacotes PA e PAS no EJ1, e PC e PCS no EJ3. Em (JUNJALEARNVONG et al., 2019), os autores abordam o problema do tempo de conexão dos nós, identificando que o processo de conexão de um nó em uma rede linear multi-salto pode ultrapassar cinco minutos por salto. A partir de experimentos práticos e simulações, é analisado o impacto do algoritmo *trickle timer*, responsável pelo envio de pacotes PA, PAS, PC e PCS; e é demonstrado que os intervalos padrão contribuem para esse atraso. Como solução, é proposto um esquema de configuração do *trickle timer* e um mecanismo de resposta instantânea para os pacotes de solicitação. Os resultados indicam que essas abordagens reduzem o tempo de conexão do nó para até um minuto por salto. Publicações mais recentes, como a documentação de Wi-SUN FAN (IEEE Std 2857, 2021), apresentam recomendações para a configuração dos parâmetros do *trickle timer*, contemplando redes de pequena escala e grande escala. Essas recomendações divergem das configurações sugeridas em (JUNJALEARNVONG et al., 2019), evidenciando abordagens distintas para a otimização de redes.

No caso do EJ2, a otimização proposta pelo padrão (IEEE Std 2857, 2021) consiste em armazenar os dados de autenticação dos nós previamente registrados, permitindo que em uma reconexão o nó possa pular o processo do EJ2. Isso ocorrerá sempre que as chaves de autenticação não tiverem sido atualizadas. No trabalho de Ambrosio et al. (AMBROSIO et al., 2022), o tempo de autenticação foi medido em uma rede experimen-

tal multi-salto, e os resultados indicam que essa otimização reduz o tempo de conexão do nó em 14% no primeiro salto, em uma configuração de pequena escala. Entretanto, essa abordagem apresenta limitações, como nos casos de mudança de RB ou após longos períodos de desligamento dos equipamentos, situações que resultam na alteração das chaves de segurança.

No caso do EJ4, durante o roteamento da rede, uma das abordagens utilizadas é a otimização do protocolo RPL para reduzir o tempo de conexão no processo de roteamento da rede.

No estudo de Hotta et al. (HOTTA et al., 2020), os autores propõem um esquema otimizado de limiar de RSL (*Received Signal Level*) para aprimorar a estabilidade na construção de redes multi-salto. A avaliação experimental foi realizada em um edifício de escritórios com 13 nós, nos quais foram testados diferentes valores de limiar de RSL. Os resultados indicam que a otimização do limiar RSL reduziu significativamente a quantidade de mudanças de pais, alcançando até 96 % de redução em comparação ao uso de um limiar não otimizado. Além disso, observaram-se variações no tempo de construção da rede: algumas configurações apresentaram tempos significativamente menores quando o limiar foi otimizado. Em um dos teste, por exemplo, a combinação do esquema de filtragem de endereços MAC com o limiar otimizado reduziu o tempo total de construção da rede de 589 s para 313 s.

Diversos estudos recentes investigam aprimoramentos no algoritmo *trickle timer* para melhorar o desempenho do processo de roteamento em redes LLNs. O estudo apresentado em Ghaleb et al. (GHALEB et al., 2017) busca resolver problemas de tempos de convergência prolongados, o tempo de convergência refere-se ao momento em que o nó se junta à rede. Os autores propõem um algoritmo chamado Drizzle, conseguindo tempos de convergência mais rápidos em comparação ao *trickle timer* padrão, embora os valores exatos não tenham sido apresentados no estudo. Esses resultados se devem principalmente à eliminação do período de escuta do *trickle timer*, que permite que o nó agende sua transmissão o mais cedo possível.

Yassein et al. (YASSEIN et al., 2017) também analisaram a eficiência do *trickle timer* e propuseram o *Elastic Trickle Timer*, um algoritmo que aborda problemas de latência e desequilíbrio de carga ajustando dinamicamente o período de escuta com base no número de vizinhos de cada nó. Essa abordagem proporciona maior eficiência energética e comunicação mais ágil entre os nós, reduzindo o tempo de convergência em até 76 % em redes com 80 nós, segundo simulações.

Aghaei et al. (AGHAEI et al., 2021) desenvolveram o *LA-trickle*, que incorpora técnicas de aprendizado de máquina ao *trickle timer*. O algoritmo reduz significativamente o tempo de convergência, permitindo que os nós ajustem dinamicamente o intervalo e o número de repetições do *trickle timer* de acordo com as condições da rede. Por exemplo, em uma rede pequena de 21 nós, foi possível obter uma redução de 72% em comparação com o *trickle timer* padrão. Embora o *LA-trickle* tenha apresentado melhor desempenho em redes de menor densidade, onde os ganhos foram mais expressivos, gerou também uma maior frequência de mensagens de controle, ocasionando um aumento nas colisões.

Embora exista um número crescente de estudos sobre otimizações no processo de conexão em redes LLNs, observa-se que ainda há poucos trabalhos dedicados especificamente ao Wi-SUN FAN, sobretudo no que diz respeito ao tempo de conexão dos nós. O Wi-SUN FAN tem sido frequentemente comparado com o TSCH, abordando aspectos de desempenho (YOO et al., 2021), coexistência (MIZUTANI et al., 2020) e estratégias de integração entre as duas tecnologias (NI et al., 2021). No entanto, diferentemente do TSCH, onde a pesquisa evoluiu de forma mais consolidada em torno do problema de formação da rede, o Wi-SUN FAN ainda carece de mais publicações sobre o impacto de seus mecanismos de conexão dos nós. Nesse contexto, torna-se pertinente examinar soluções propostas para redes TSCH, as quais incorporam mecanismos voltados à redução do tempo de conexão dos nós e podem oferecer *insights* úteis para o aprimoramento do Wi-SUN FAN.

Em Mohamadi et. al (MOHAMADI et al., 2021), por exemplo, é proposta uma varredura ativa que permite ao nó de junção enviar solicitações de pacotes de descoberta ao nó anunciante. De forma semelhante ao Wi-SUN FAN, o fluxo dessas solicitações é con-

trolado pelo algoritmo *trickle Timer*. Os autores demonstram que essa estratégia acelera o processo de formação da rede em comparação à varredura passiva, embora os valores exatos não tenham sido especificados no estudo. Em trabalho posterior (MOHAMADI et al., 2022), os mesmos autores utilizam a mesma estratégia de varredura ativa, fazendo com que o nó gere um trem de pacotes de solicitações periodicamente, dispensando o uso do *trickle Timer*. Embora ambas as propostas apresentem tempos de formação quase idênticos em redes pequenas, a segunda apresenta melhor desempenho em redes maiores.

Além dessas propostas, Algora et al. (ALGORÁ et al., 2018) propuseram um algoritmo baseado na estratégia de encontro paralelo em redes TSCH, formando *cluster* de nós vizinhos não associados que permitem a troca de informações de salto de canal e de tempo. Dessa forma, os nós dentro dos *clusters* conhecem o esquema de salto e os tempos dos outros durante a associação, resultando em uma redução significativa do tempo de formação da rede. Em rede lineares, a redução no tempo de associação varia de 27,5 % para dois nós até 79,8 % para dez nós, evidenciando a eficiência da proposta em relação à configuração padrão. No padrão Wi-SUN FAN, a utilização de *clusters* para nós não associados ainda não foi explorada.

Neste capítulo, foi observado que a maioria das soluções concentra-se na otimização dos algoritmos *trickle timer* e RPL para reduzir o tempo de conexão dos nós no contexto do Wi-SUN FAN. Por outro lado, a abordagem proposta para o TSCH (ALGORÁ et al., 2018), embora aplicada a outro protocolo, destaca-se por apresentar um cenário de comunicação cooperativo por meio do uso de *clusters* de nós não associados. Isso motiva a exploração do comportamento dos nós não associados para melhorar o tempo de conexão dos nós no padrão Wi-SUN FAN. O próximo capítulo apresenta uma avaliação experimental do processo de conexão dos nós, permitindo analisar o comportamento do padrão e identificar em qual estado de junção a proposta apresentada pode ser aplicada.

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE CONEXÃO DE NÓS

Na versão mais recente da documentação do Wi-SUN FAN (IEEE Std 2857, 2021), foram adicionados novos parâmetros, incluindo as recomendações para o uso do algoritmo *trickle timer* no processo de conexão dos nós, contemplando dois cenários de redes: grande escala e pequena escala. Assim, a principal motivação desta parte do trabalho é identificar as causas da lenta formação da rede e obter uma visão atual do processo de conexão dos nós no Wi-SUN FAN. Para isso, foram realizadas capturas do fluxo de pacotes nos EJ1 e EJ3, utilizando o *testbed* ilustrado na Figura 4.1a, constituído por um nó RB e sete nós R, conectados por cabos seriais a um *hub*, que por sua vez está ligado a um computador responsável por registrar as informações do processo de conexão dos nós para análise.

4.1 Esquema experimental

A separação entre os dispositivos é de aproximadamente 10 cm e, para possibilitar os sete saltos entre eles em uma área reduzida, foi utilizada uma *whitelist* que é uma filtragem de endereços no *software*, que permitiu limitar a comunicação de RF (Radiofrequência) e definir os respectivos vizinhos. A configuração foi estabelecida da seguinte forma: o RB com R1 como vizinho, o R1 com vizinhos RB e R2, o R2 com vizinhos R1 e R3, o R3 com vizinhos R2 e R4, o R4 com vizinhos R3 e R5, o R5 com vizinhos R4 e R6, o R6 com vizinhos R5 e R7 e o R7 com vizinho R6. O esquema de conexão dos dispositivos é ilustrado na Figura 4.1b.

Embora adequado para validação funcional, esse arranjo apresenta limitações em termos de realismo. Mesmo com a *whitelist*, ainda ocorrem interferências entre os nós devido à curta distância física, condição que não representa a separação típica de redes reais. Além disso, situações de *outage* são praticamente inexistentes nesse ambiente controlado, ao contrário do que ocorre em cenários reais, onde fatores ambientais afetam a conecti-

vidade. Assim, o arranjo adotado deve ser interpretado como um ambiente controlado de experimentação, e não como uma reprodução fiel das condições encontradas em redes reais.

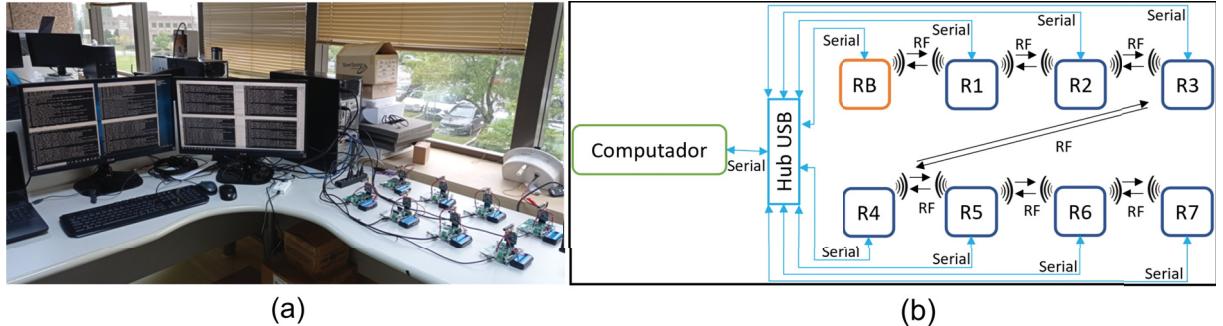


Figura 4.1: Cenário experimental. (a) *Testbed*. (b) Esquema de conexão.

Quando um dispositivo opera no perfil Wi-SUN FAN, ele deve suportar os modos de operação obrigatórios definidos pela documentação do padrão (IEEE Std 2857, 2021; IEEE Std 802.15.4, 2020). Para os experimentos, foi utilizada a configuração física específica para a faixa de frequências do Brasil no modo de operação 1b que, conforme o padrão, permite taxa de dados de 50 kbps com modulação FSK e 90 canais, cada um com 200 kHz de largura de banda. Os parâmetros de configuração dos dispositivos utilizados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros de configuração dos dispositivos.

Descrição	Parâmetros
Faixa de frequência	902-907,5 e 915-928 MHz (Brasil)
Modo de operação	1b
Taxa de dados	50 kbps
Potência	100 mW
Salto de Frequênci	abilitado (90 canais)

4.2 Configurações de *trickle timer* nos experimentos

Para os EJ1 e EJ3, foram configurados diferentes valores nos parâmetros globais do algoritmo *trickle timer* para os pacotes PA, PAS, PC e PCS. A Tabela 4.2 apresenta os cenários experimentais considerados. Para os EJ2 e EJ4, os parâmetros envolvidos nesses

estados foram mantidos em todos os cenários experimentais conforme as configurações recomendadas para redes de pequena escala, conforme descrito na documentação do padrão Wi-SUN FAN (IEEE Std 2857, 2021).

Tabela 4.2: Cenários experimentais do *trickle timer*.

Cenário	$DISC_IMIN$	$DISC_IMAX$ (duplicações)	$DISC_K$	Notação
C1	15 s	2	1	C1 (15, 2)
C2	15 s	4	1	C2 (15, 4)
C3	30 s	2	1	C3 (30, 2)
C4	30 s	4	1	C4 (30, 4)
C5	60 s	2	1	C5 (60, 2)
C6	60 s	4	1	C6 (60, 4)

Os cenários C1 e C6 correspondem aos parâmetros definidos pelo padrão Wi-SUN FAN para redes de pequena e grande escala, respectivamente. Foram adicionadas combinações intermediárias nos parâmetros (cenários C2, C3, C4 e C5) a fim de comparar o comportamento de troca de pacotes nos EJ1 e EJ3. O objetivo dos experimentos foi medir o tempo necessário para cada nó R se associar ao nó RB. Cada experimento foi repetido 10 vezes para cada uma das configurações. O procedimento adotado em cada experimento consistiu em ligar inicialmente os Roteadores de forma sequencial, e por último o RB. As medições foram realizadas nos cinco estados de junção, durante os sete saltos do esquema proposto. Como o número de amostras em cada experimento era pequeno, utilizou-se a distribuição t de *Student* para calcular o intervalo de confiança apresentado na seção de verificações experimentais.

A medição do tempo foi realizada em forma continua: do Salto 1 (S1) até o Salto (S7) e do EJ1 ao EJ4. Os registros iniciaram no momento de energização do RB (tempo 0s) até o indicativo de término de cada um dos estados, conforme descrito na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Indicativo de término do estado.

Estado	Indicativo de Término de Estado
EJ1	Recebimento do pacote PA
EJ2	Recebimento do último pacote de autenticação GTK (<i>Group Transient Key</i>)
EJ3	Recebimento do pacote PC
EJ4	Recebimento do último pacote do processo de roteamento DAO (<i>Destination Advertisement Object</i>) e entra no estado de junção 5

Realizou-se também a contagem total de pacotes nos EJ1 e EJ3 ao longo de todos os saltos Qt durante o processo de conexão dos nós, em cada cenário:

$$Qt = Qt_{S1} + Qt_{S2} + Qt_{S3} + Qt_{S4} + Qt_{S5} + Qt_{S6} + Qt_{S7}, \quad (4.1)$$

onde $Qt_{Si} = \sum_{k=1}^{p_i} PA(k) + \sum_{k=1}^{q_i} PAS(k) + \sum_{k=1}^{r_i} PC(k) + \sum_{k=1}^{s_i} PCS(k)$ é a somatória dos pacotes nos EJ1 e EJ3. Os valores p_i , q_i , r_i e s_i representam, respectivamente, a quantidade dos pacotes PA, PAS, PC e PCS em cada salto, $i = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]$.

Para comparar os tempos dos estados de junção em relação ao tempo total da rede, realizou-se a medição do tempo dos EJ1, EJ2, EJ3 e EJ4, de forma independente para cada salto. Os registros foram realizados do início até o indicativo de término de cada estado (Tabela 4.3), considerando todos os sete saltos. Posteriormente, foi calculado a média dos tempos de cada estado para fins de comparação.

4.3 Verificações experimentais

A Tabela 4.4 mostra as medições dos tempos dos estados de junção do processo de conexão dos nós para os sete saltos. Os dois modos recomendados para os parâmetros do *trickle timer* no EJ1 e EJ3, conforme o padrão Wi-SUN FAN, estão representados pelos cenários C1 (15, 2) e C6 (60, 4), que resultaram em tempos aproximados de conexão de 22 min e 34 min, respectivamente. Entre os cenários avaliados, C1 (15, 2) e C2 (15, 4) apresentaram os menores tempos de conexão, em torno de 22 min, enquanto C5 (60, 2) e C6 (60, 4) registraram os maiores, aproximadamente 36 min e 34 min, respectivamente.

Para os cenários com um mesmo $DISC_IMIN$ e $DISC_IMAX$ diferente, observou-se que o cenário com maior $DISC_IMAX$ apresentou menor tempo de conexão na rede. Esse comportamento possivelmente se deve ao fato de que um $DISC_IMAX$ mais elevado faz com que os nós permaneçam por mais tempo em períodos de silêncio, reduzindo a interferência entre eles. Portanto, a partir da Tabela 4.4, conclui-se que em redes de

pequena escala no padrão Wi-SUN FAN, um menor $DISC_IMIN$ de envio de pacotes de descoberta e junção resulta em um tempo reduzido para o processo de formação da rede. Além disso, a configuração de um valor mais alto de $DISC_IMAX$ contribui para diminuir a ocupação do canal de rádio e, consequentemente, melhorar o tempo de formação da rede em comparação com valores menores de $DISC_IMAX$.

Tabela 4.4: Tempos dos estados de junção dos cenários (em minutos).

S - EJ	C1 (15, 2)	C2 (15, 4)	C3 (30, 2)	C4 (30, 4)	C5 (60, 2)	C6 (60, 4)
S1 - EJ1	0,42	0,38	1,70	0,81	2,04	2,20
S1 - EJ2	0,62	0,58	1,89	1,01	2,23	2,40
S1 - EJ3	1,13	0,92	3,39	1,62	3,16	3,43
S1 - EJ4	2,89	2,66	5,07	3,21	4,53	5,03
S2 - EJ1	3,35	3,18	5,67	4,06	5,65	5,99
S2 - EJ2	3,59	3,42	5,91	4,30	5,88	6,22
S2 - EJ3	3,99	3,72	6,56	5,05	7,29	7,58
S2 - EJ4	5,68	5,49	8,11	6,70	8,68	9,25
S3 - EJ1	6,25	5,90	8,70	7,63	10,38	11,27
S3 - EJ2	6,71	6,17	8,97	7,98	10,81	11,69
S3 - EJ3	7,23	6,47	9,70	8,91	12,53	13,22
S3 - EJ4	9,04	8,30	11,42	10,59	14,04	15,21
S4 - EJ1	9,56	8,64	12,48	11,23	15,78	16,41
S4 - EJ2	9,90	8,94	12,86	11,52	16,16	16,71
S4 - EJ3	10,57	9,31	14,03	12,33	17,75	18,25
S4 - EJ4	12,30	10,75	15,59	14,15	19,66	19,56
S5 - EJ1	12,68	12,38	16,41	14,60	21,11	20,67
S5 - EJ2	13,14	12,90	16,82	14,97	21,63	21,00
S5 - EJ3	13,48	13,48	17,29	15,77	23,12	22,55
S5 - EJ4	15,26	15,50	19,07	17,45	24,78	24,11
S6 - EJ1	15,74	16,03	19,68	18,31	26,17	25,50
S6 - EJ2	16,46	16,50	20,16	18,71	26,64	26,05
S6 - EJ3	17,03	16,99	20,69	19,24	28,64	27,63
S6 - EJ4	18,81	18,79	22,64	21,09	30,85	29,12
S7 - EJ1	19,39	19,22	23,38	21,65	32,27	30,15
S7 - EJ2	20,00	19,67	23,85	22,28	32,74	30,63
S7 - EJ3	20,77	20,24	24,62	22,91	34,19	32,05
S7 - EJ4	22,49	22,39	26,27	24,76	35,76	33,83

A Figura 4.2 apresenta a quantidade média de pacotes dos tipos PA, PAS, PC e PCS transmitidos nos experimentos. Nota-se que os cenários com menores valores de $DISC_IMIN$ e $DISC_IMAX$ geram um número maior de pacotes e, portanto, maior ocupação do canal.

A Figura 4.3 ilustra os tempos médios decorridos em cada estado de junção nos

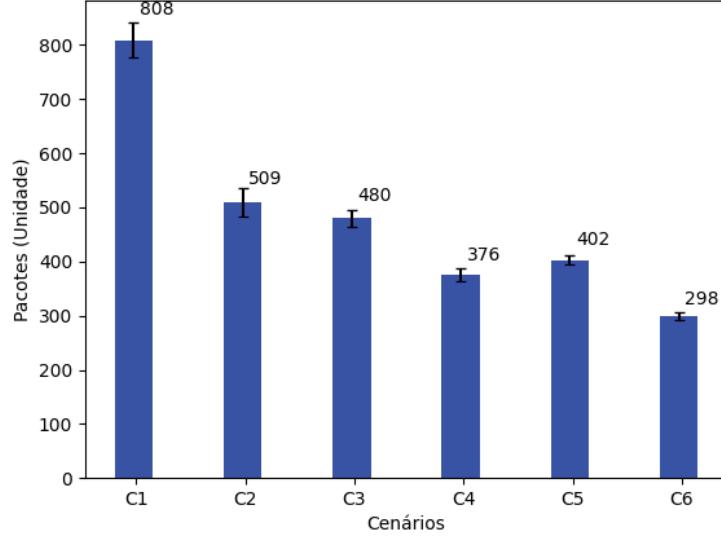


Figura 4.2: Quantidade de pacotes PA, PAS, PC e PCS.

seis cenários avaliados. Observa-se que a variação do parâmetro *DISC_IMIN* (15, 30 e 60) impacta diretamente nos tempos dos EJ1 e EJ3, evidenciando uma tendência de duplicação. Por outro lado, como as configurações dos parâmetros de *trickle timer* dos EJ2 e EJ4 (Autenticação e Configuração de roteamento) são independentes do EJ1 e EJ3, e não foram modificadas, seus resultados permanecem praticamente estáveis.

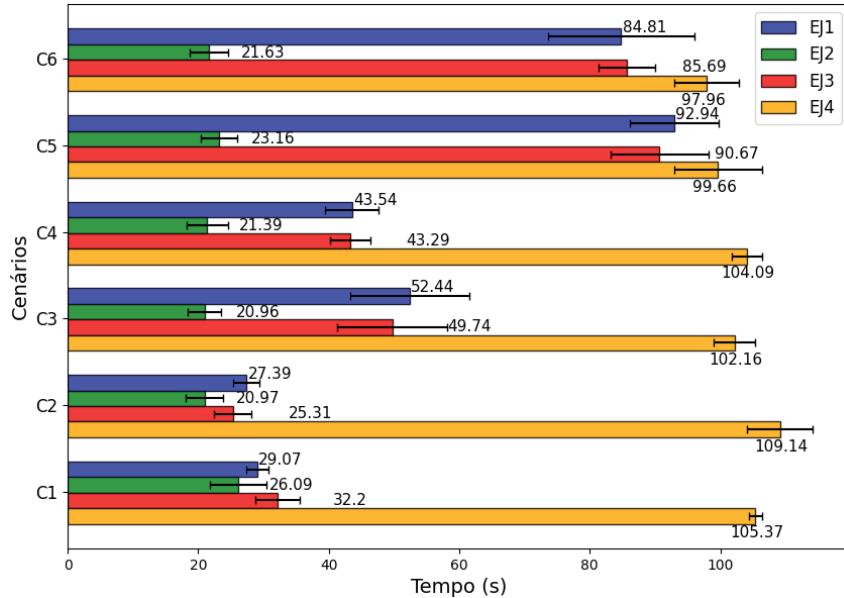


Figura 4.3: Tempo médio decorrido em cada estado de junção.

Com este estudo experimental em uma rede multi-salto de sete saltos, foram coletadas informações sobre os tempos de cada estado de junção do protocolo Wi-SUN FAN,

considerando tanto as duas configurações recomendadas pelo padrão (C1 e C6) quanto combinações intermediárias. Os resultados indicam tempos elevados no processo de conexão dos nós, em torno de 22 minutos para C1 e 34 minutos para C6. Além disso, verificou-se que a adoção de intervalos maiores (*DISC_IMAX*) entre o envio de mensagens contribui para reduzir, ainda que modestamente, o tempo de conexão dos nós ao diminuir a ocupação do canal de rádio.

Este capítulo apresentou as medições dos tempos do processo de conexão dos nós no padrão Wi-SUN FAN, evidenciando os elevados tempos de conexão e o impacto da configuração do *trickle timer* nesse processo. Além disso, observou-se que, devido à transição por cinco estados de junção, a estratégia de encontro paralelo deve ser implementada já no início do processo, isto é, no EJ1. Isso ocorre porque os pacotes PAS podem ser aproveitados para facilitar a formação de *cluster* entre os nós ainda não associados. O capítulo seguinte descreve a implementação do processo de conexão dos nos Wi-SUN FAN em Contiki-NG, o que possibilitou a avaliação da proposta apresentada.

5 IMPLEMENTAÇÃO DO PROCESSO DE CONEXÃO DE NÓS WI-SUN FAN EM CONTIKI-NG

A aplicação de metodologias experimentais, embora eficaz, demanda tempo e apresenta custos crescentes à medida que o número de dispositivos aumenta. Diante disso, alternativas como a simulação computacional tornam-se essências para reproduzir o comportamento do padrão, possibilitando análises rápidas de desempenho em diferentes cenários e parametrizações.

Com essa perspectiva, alguns trabalhos têm explorado o desenvolvimento de simuladores e emuladores para avaliar o desempenho do Wi-SUN FAN. A Silicon Labs, por exemplo, apresentou resultados de simulação utilizando a pilha já desenvolvida para seus dispositivos, criando ferramentas internas capazes de executar múltiplas instâncias da pilha Wi-SUN FAN em nós simulados; no entanto, este simulador é confidencial. Da mesma forma, em (HARADA; MASAKI, 2022; COMER et al., 2017) foram propostos emuladores voltados para a avaliação do Wi-SUN FAN na camada física, com os resultados focados nas características de transmissão em redes de larga escala. Contudo, tais emuladores não se mostram adequados para a implementação e avaliação de novos algoritmos em outras camadas do padrão.

Neste trabalho, implementa-se o processo de conexão de nós a rede Wi-SUN FAN utilizando o Contiki-NG (OIKONOMOU et al., 2022), um sistema operacional de código aberto compatível com uma ampla gama de hardware de redes de sensores sem fio, que oferece bibliotecas de protocolos para dispositivos inteligentes de baixo consumo de energia, permitindo sua configuração e teste no simulador Cooja em diversos cenários de rede. Dessa forma, os diferentes protocolos já disponíveis podem ser explorados para facilitar a implementação do padrão Wi-SUN FAN.

Nesta etapa, o objetivo foi desenvolver uma ferramenta de simulação que permita

avaliar, de um ponto de vista temporal, o processo de conexão dos nós em redes Wi-SUN FAN. Considerando o longo tempo de conexão desses nós, a funcionalidade proposta permite simular rapidamente as etapas de descoberta, conexão e formação da rede, facilitando a implementação de novas técnicas para reduzir o tempo de conexão dos nós. A incorporação da ferramenta de simulação desenvolvida no Contiki-NG foi validada por meio de medições dos tempos de conexão dos nós em experimentos realizados em ambientes controlados.

5.1 Procedimento de implementação

Nesta seção, descreve-se a implementação, dentro da estrutura da pilha Contiki-NG, de uma funcionalidade que permite avaliar o processo de conexão de nós a redes Wi-SUN FAN.

A Figura 5.1 mostra os mecanismos adicionados, destacando o salto de canal e o mecanismo de associação MLME-WS-ASYNC-FRAME integrados à camada de enlace de dados. Diferentemente da Figura 2.1, nesta figura é apresentada a ordem de utilização dos protocolos ao empregar o simulador Cooja. Além disso, os arquivos CSMA-CA (*CARRIER Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) (IEEE Std 802.15.4, 2020) e RPL (WINTER et al., 2012) foram adaptados para considerar o processo de salto de canal do Wi-SUN FAN.

O principal motivo para utilizar o simulador Cooja é que ele permite replicar os cenários utilizados nos experimentos, nos quais cada nó é um sistema Contiki compilado e executado. Além disso, o simulador oferece uma interface para analisar e interagir com os nós; possibilitando a captura de mensagens das simulações e facilitando a visualização da rede. Também é possível criar cenários personalizados.

A funcionalidade de salto de canal é implementada de acordo com as informações técnicas da documentação do padrão e resumidas no Capítulo 2; essa funcionalidade é adicionada a uma pasta chamada ‘wisun-mac/’, localizada dentro da pasta ‘net/’ da pilha

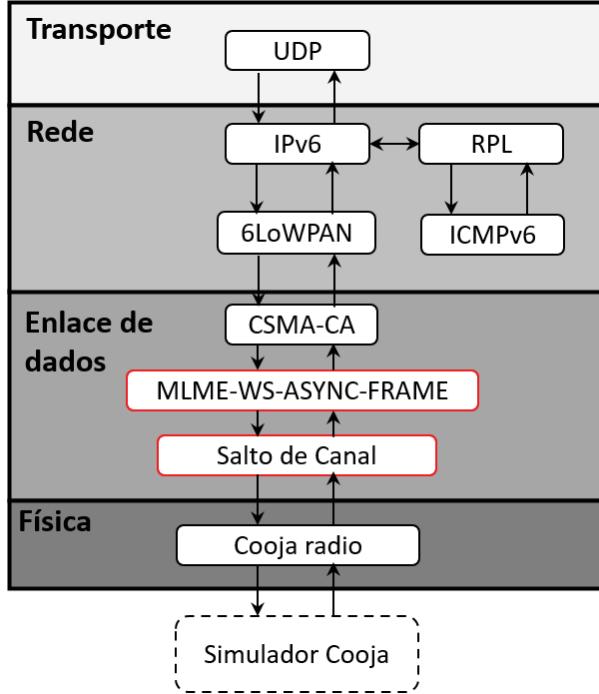


Figura 5.1: Pilha Contiki-NG com funcionalidade incorporada para o processo de descoberta e associação.

Contiki-NG (KURNIAWAN, 2018). A funcionalidade de associação MLME-WS-ASYNC-FRAME é implementada conforme descrito no Capítulo 2, e é colocada na mesma pasta da funcionalidade anterior. Para que os nós executem o processo de associação em uma rede Wi-SUN FAN, conforme ilustrado na Figura 2.3, foram gerados dois tipos de nós com características de RB e R, correspondentes, no simulador, aos arquivos “border-router.c” e “router.c”.

O processo de associação desses nós integrando as duas funcionalidades é implementado no Algoritmo 1. Inicialmente, um nó realiza uma varredura de canais ($CHscan$), ouvindo pacotes PA e PC nos canais disponíveis no vetor V (vetor que contém os canais disponíveis para a rede). Essa varredura é executada canal por canal, na ordem de sua ocorrência em V , seguindo um procedimento *round-robin*, iniciando em um canal aleatório definido por uma função de canal.

Os nós inicializam as seguintes variáveis: o número de canais disponíveis (Nch), utilizado para dimensionar V ; o índice do canal (I_c), responsável por selecionar o canal em V ; e o tempo de varredura por canal ($UDIScan$), que define o intervalo de escuta em

Algoritmo 1 Conexão de nós Wi-SUN FAN

```

1:  $Nch$ : número de canais disponíveis
2:  $I_c$ : índice de canal
3:  $UDIscan$ : tempo de varredura do canal
4:  $V[ ] \leftarrow$  função_de_canal()
5:  $I_c \leftarrow 0$ 
6: nó = EJ1
7: início do trickle timer de PAS
8: enquanto o nó está em processo de conexão faça
9:   se o tempo  $UDI$  expirou então
10:    reinicia o tempo  $UDI$ 
11:     $I_c \leftarrow (I_c + 1)$ 
12:     $CHscan \leftarrow V[I_c]$ 
13:   fim de se
14:   se nó = EJ1 então
15:     nó não está associado
16:     transmite PAS quando o trickle timer permite
17:     se PA é recebido então
18:       parada do trickle timer de PAS
19:       node ← EJ3
20:     fim de se
21:   fim de se
22:   se nó = EJ3 então
23:     nó não está associado
24:     início do trickle timer de PCS
25:     transmite PCS quando o trickle timer permite
26:     se PC é recebido então
27:       parada do trickle timer de PCS
28:       node ← EJ4
29:     fim de se
30:   fim de se
31:   se nó = EJ4 então
32:     inicio de configuração do roteamento do nó
33:     fim do processo de roteamento do nó
34:     node ← EJ5
35:   fim de se
36:   se nó = EJ5 então
37:     nó está associado
38:     início de trickle timer de PA
39:     início de trickle timer de PC
40:     início do RPL
41:   fim de se
42: fim de enquanto
  
```

cada canal (linhas 1 a 3 no Algoritmo 1). O vetor V é gerado pela função de canal, e I_c é inicializado em 0, iniciando a varredura pelo primeiro canal (linhas 4 a 5 no Algoritmo 1).

Quando os nós estão no EJ1 e desejam se conectar, iniciam o *trickle timer* de PAS e escutam cada canal pelo período definido em $UDIscan$, alternando de canal a cada intervalo conforme a estratégia *round-robin*, ou seja, incrementando I_c em 1 (linhas 6 a 14 no Algoritmo 1). Assim que um nó não associado recebe um PA, o *trickle timer* do

PAS é interrompido, o nó extrai as informações de tempo de comunicação *unicast* do nó Wi-SUN FAN e, como o EJ2 não foi implementado no simulador, prossegue diretamente para o EJ3 (linhas 17 a 21 no Algoritmo 1).

No EJ3, o nó repete o processo anterior, iniciando o *trickle timer* do PCS, escutando os canais em V pelo período *UDIscan* e alternando-os via *round-robin* (linhas 22 a 25 no Algoritmo 1). Ao detectar um PC, o nó extrai as informações para a comunicação *broadcast* e prossegue para o EJ4 (linhas 26 a 30 no Algorithm 1).

No EJ4, o nó executa o processo de roteamento na rede com auxílio do protocolo RPL (linhas 31 a 35 no Algorithm 1). Finalmente, o nó atinge o EJ5 onde inicializa os processo de *trickle timer* para PA e PC, além do RPL, permitindo dar continuidade ao processo de descoberta de novos nós (linhas 36 a 41 no Algorithm 1).

5.2 Validação do simulador

Para validar a funcionalidade proposta e investigar o tempo de conexão dos nós, foram realizados diversos experimentos em um ambiente interno de laboratório e, em seguida, comparados com simulações no Cooja utilizando topologias de rede comuns. Para isso, definiram-se três topologias de rede com um número reduzido de nós, seguindo uma metodologia semelhante à descrita em (ALGORÁ et al., 2018), o que facilitou a análise.

A Figura 5.2a apresenta uma topologia linear composta por um nó RB e sete nós R, caracterizando uma interação linear entre os nós. As Figuras 5.2b e c mostram as topologias totalmente conectada e em malha, ambas compostas por um nó RB e quatro nós R. Na topologia totalmente conectada, os nós podem receber/transmitir diretamente de/para qualquer nó na rede. Já na topologia em malha, os nós podem possuir mais de dois vizinhos, mas não conseguem transmitir/receber de determinados nós, seja por restrição de alcance ou por configurações específicas que limitam a comunicação com certos vizinhos.

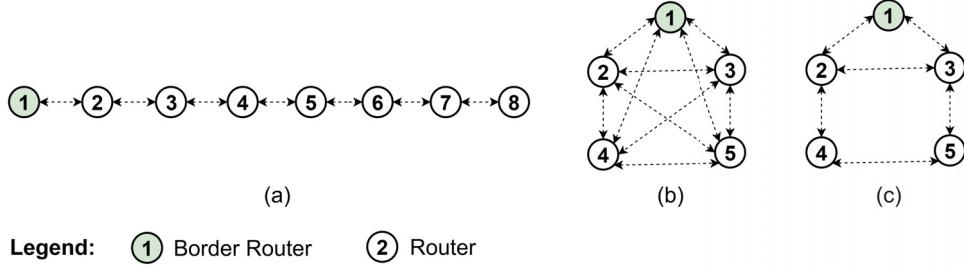


Figura 5.2: Exemplos de topologia de rede: (a) linear, (b) totalmente conectada, (c) malha.

5.2.1 Configuração do Experimento

Para os experimentos, foi seguido um procedimento semelhante ao apresentado em (AMBROSIO et al., 2022) para as três topologias. Os experimentos foram realizados com dispositivos Wi-SUN FAN em um ambiente de laboratório, permitindo uma interação controlada entre os dispositivos. Como o EJ2 não foi implementado na proposta, o tempo de conexão da rede foi calculado a partir das medições nos EJ1, EJ3 e EJ4. As mensagens indicativas da conclusão de cada estado estão apresentadas na Tabela 4.3, no Capítulo 4. Para registrar os tempos de conexão da rede em um cenário experimental, foi implementado um *testbed*, também descrito no Capítulo 4, no qual as mensagens da Tabela 4.3 foram registradas para cada dispositivo. O esquema de conexão entre os dispositivos é apresentando na Figura 4.1, igualmente no Capítulo 4.

Os dispositivos foram configurados com a autenticação desabilitada e a distância mínima entre eles foi mantida em aproximadamente 10 cm. Para reproduzir as topologias entre os dispositivos na Figura 5.2 foi utilizada uma lista de permissões (*whitelist*), recurso de software que filtra endereços e permite restringir a comunicação por RF (radiofrequência) entre os dispositivos, definindo assim seus vizinhos. A Tabela 5.1 apresenta os vizinhos definidos para cada topologia.

Os parâmetros configurados nos dispositivos para as três topologias são mostrados na Tabela 4.1, no Capítulo 4. Cada experimento foi repetido 10 vezes para cada topologia. O procedimento consistiu, inicialmente, na conexão ordenada dos nós do tipo R e, por fim, na conexão do nó RB. As medições foram realizadas nos estados de conexão de cada

Tabela 5.1: Vizinhos para cada topologia.

Dispositivo	Linear	Totalmente conectado	Malha
RB_1	R_2	R_2, R_3, R_4, R_5	R_2, R_3
R_2	RB_1, R_3	RB_1, R_3, R_4, R_5	RB_1, R_3, R_5
R_3	R_2, R_4	RB_1, R_2, R_4, R_5	RB_1, R_2, R_4
R_4	R_3, R_5	RB_1, R_2, R_3, R_5	R_3, R_5
R_5	R_4, R_6	RB_1, R_2, R_3, R_4	R_2, R_4
R_6	R_5, R_7	-	-
R_7	R_6, R_8	-	-
R_8	R_7	-	-

nó, conforme a topologia configurada. Como o número de amostras em cada experimento era pequeno, utilizou-se a distribuição t de *Student* para calcular o intervalo de confiança apresentada na seção dos resultados.

Adicionalmente, validou-se experimentalmente uma topologia em malha com 20 nós no *testbed* descrito, adotando a configuração de vizinhança definida na Tabela 5.2 e uma lista de permissões (*whitelist*) para restringir a comunicação entre os dispositivos.

Tabela 5.2: Vizinhos dos nós.

Dispositivo	Vizinhos	Dispositivo	Vizinhos
RB_1	R_9	R_{11}	R_2, R_3, R_6, R_7
R_2	$R_6, R_7, R_9, R_{11}, R_{13}, R_{20}$	R_{12}	R_8, R_{10}, R_{15}
R_3	$R_5, R_6, R_{11}, R_{14}, R_{16}$	R_{13}	R_2, R_4, R_7, R_{19}
R_4	R_7, R_{13}, R_{19}	R_{14}	R_3, R_6, R_8, R_{10}
R_5	R_3, R_{16}	R_{15}	R_8, R_{12}
R_6	$R_2, R_3, R_{11}, R_{14}, R_{20}$	R_{16}	R_3, R_5, R_{18}
R_7	$R_2, R_4, R_9, R_{11}, R_{13}, R_{19}$	R_{17}	R_{18}
R_8	$R_{12}, R_{14}, R_{15}, R_{16}$	R_{18}	R_8, R_{16}, R_{17}
R_9	RB_1, R_2, R_7, R_{20}	R_{19}	R_4, R_7, R_{13}
R_{10}	R_{12}, R_{14}, R_{20}	R_{20}	R_2, R_6, R_9, R_{10}

5.2.2 Configuração do Simulador

As topologias implementadas nos experimentos foram reproduzidas no simulador. A Figura 5.3 apresenta as topologias linear, totalmente conectada e em malha configuradas no simulador Cooja; para definir os vizinhos de cada nó no simulador, foi utilizada a Tabela 5.1.

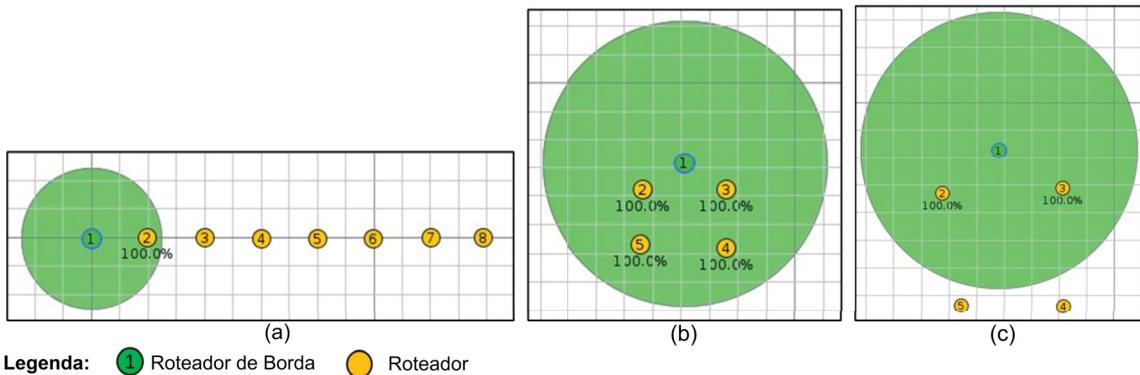


Figura 5.3: Topologias configuradas no Cooja: (a) Linear. (b) Totalmente conectado. (c) Malha.

Cada simulação foi repetida 10 vezes para cada topologia, variando aleatoriamente o tempo de ativação dos nós em cada execução. Em todas as simulações, foram registradas as mensagens relacionadas ao processo de transição dos EJs, conforme indicado na Tabela 4.3, no Capítulo 4. Os parâmetros configurados no simulador estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Parâmetros de configuração dos dispositivos.

Descrição	Parâmetros
UDI	100 ms
BDI	250 ms
BI	1000 ms
Número de canais	90
Tipo de rede	Pequena escala

Para validar o simulador com o experimento de topologia de malha de 20 nós, Cooja foi usado para criar uma rede com uma distribuição aleatória de um RB e dezenove nós R, conforme mostrado na Figura 5.4a.

Além disso, uma rede de malha composta por um nó BR e 100 nós R foi gerada para comparação com o resultado apresentado em (SILICON LABORATORIES INC., 2022), conforme mostrado na Figura 5.4b.

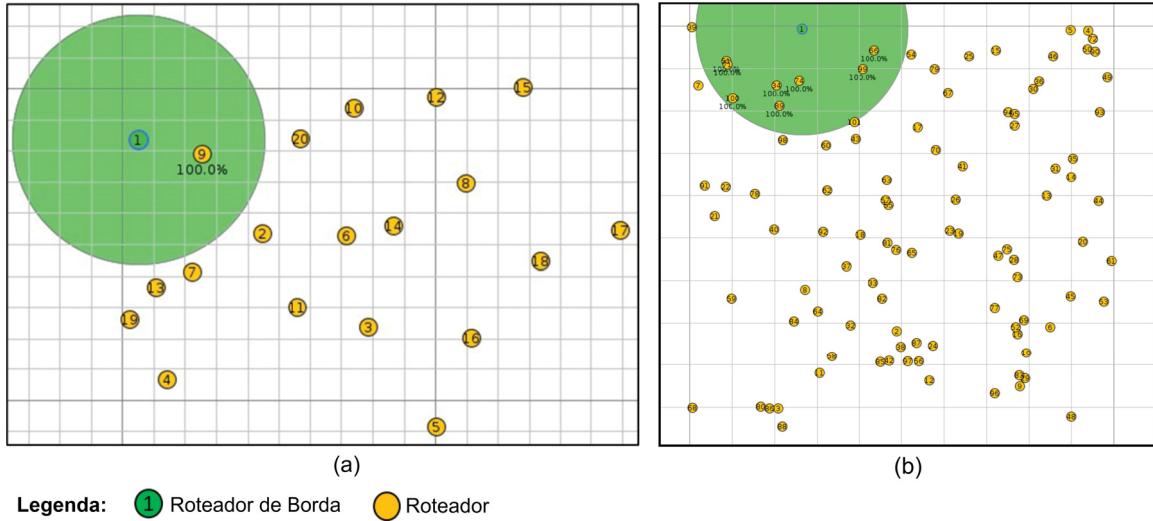


Figura 5.4: Redes com 20 e 100 nós.

5.3 Resultados

Os experimentos e simulações deste estudo incluem dados obtidos em laboratório interno. Adicionalmente, foram realizadas simulações para comparar os tempos de conexão da rede com os resultados experimentais apresentados em (SILICON LABORATORIES INC., 2022), que utilizou 100 dispositivos em configurações de pequena, mediana e grande escala. Na sequência, apresentam-se os resultados para as topologias linear, totalmente conectada e em malha.

5.3.1 Validação da Topologia Linear

O tempo de conexão dos nós na topologia linear é apresentado na Figura 5.5a, na qual se observam tempos médios de formação da rede de 1167,6 s nos experimentos e de 969 s nas simulações. O tempo obtido nos experimentos é aproximadamente 20,5 % maior que o observado nas simulações, o que evidencia a influência das variabilidades e interferências presentes no ambiente real. O nó 1 corresponde ao RB, iniciando no EJ5, enquanto as medições do tempo de conexão da rede começam a partir do nó 2 (nó R). Por se tratar de uma topologia linear, o nó 2, mais próximo do RB, é o primeiro a se conectar. O nó 3 aguarda a conclusão do nó 2 para iniciar o seu próprio processo, e assim sucessivamente,

até que o último nó R se junte à rede. Esse comportamento caracteriza a conexão multi-salto.

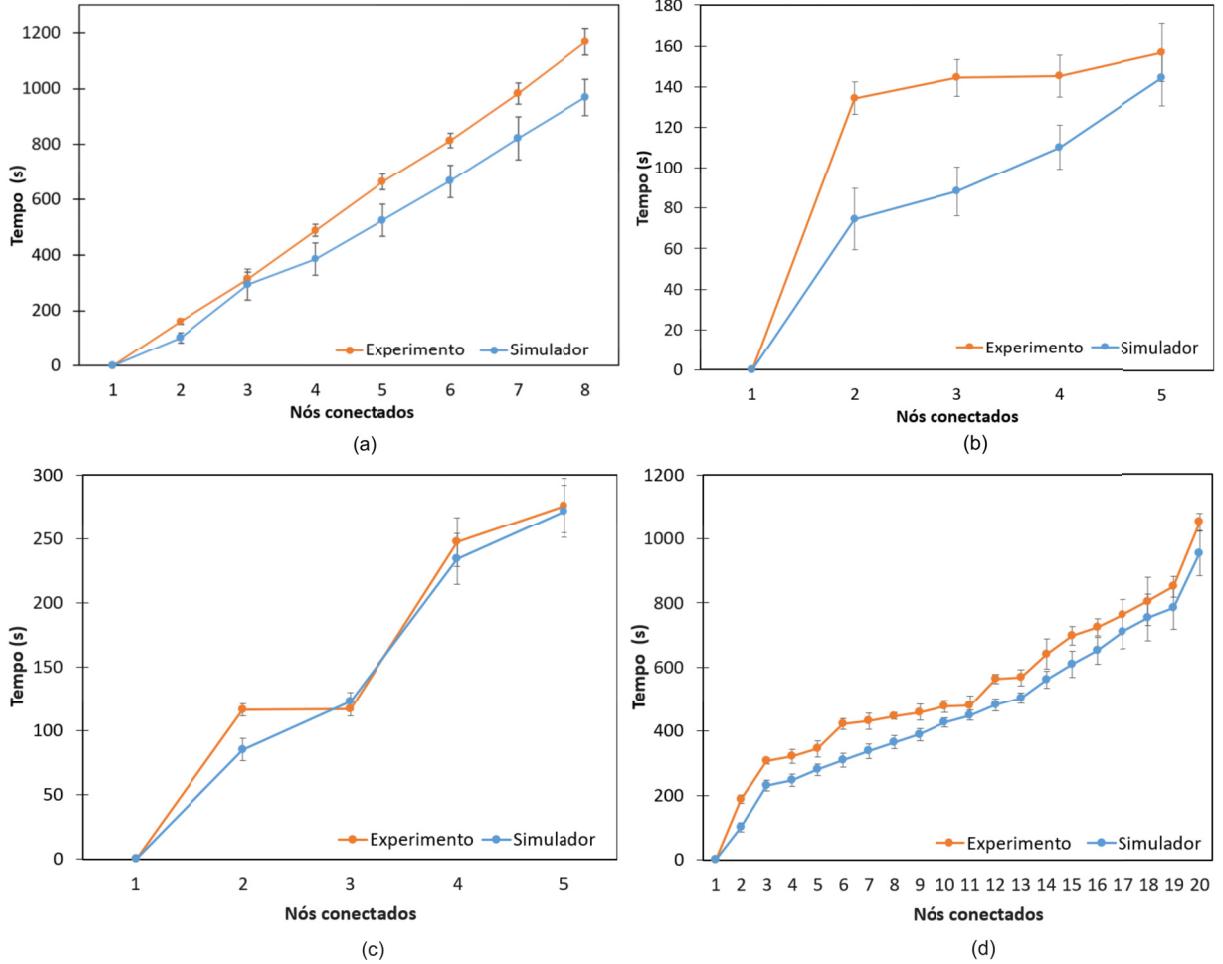


Figura 5.5: Tempos de conexão da rede nas topologias: (a) Linear. (b) Totalmente conectado. (c) Malha. (d) Malha com 20 nós.

Com essa topologia linear, verificou-se que cada nó R apresentou um tempo de conexão semelhante a cada salto na rede. A curva obtida por simulação seguiu a mesma tendência da curva experimental, evidenciando um crescimento contínuo.

5.3.2 Validação da Topologia Totalmente Conectada

O tempo de conexão dos nós na topologia totalmente conectada é mostrado na Figura 5.5b, com tempos médios de formação da rede de 156,8 s e 144,21 s, obtidos a partir dos resultados experimentais e da simulação, respectivamente. O tempo obtido nos experimentos é

aproximadamente 8,73 % maior que o observado nas simulações. Na Figura 5.5b, observa-se que, na simulação, os primeiros nós se conectaram mais rapidamente em relação aos experimentos, resultado esperado devido ao ambiente ideal e controlado da simulação. Apesar disso, a simulação apresentou uma tendência de crescimento semelhante à observada nos resultados experimentais.

5.3.3 Validação da Topologia Malha

A Figura 5.5c apresenta o tempo de conexão dos nós na topologia em malha, mostrando tempos médios de formação da rede de 276 s e 271,42 s para os resultados experimentais e de simulação, respectivamente. O tempo obtido nos experimentos é aproximadamente 1,69 % maior que o observado nas simulações. Observa-se que os resultados experimentais e de simulação foram muito próximos.

Para analisar o comportamento da topologia em malha em um cenário maior, foi testada uma rede com vinte nós (1 nó RB e 19 nós R). Os tempos totais de conexão de todos os nós foram de 1049,5 s para os experimentos e 955,35 s para as simulações. O tempo obtido nos experimentos é aproximadamente 9,85 % maior que o observado nas simulações. Um comportamento semelhante pode ser observado em ambas as curvas, que coincidem em alguns valores de tempo de conexão, principalmente nos últimos nós a se conectar, conforme mostrado na Figura 5.5d.

Com o objetivo de comparar os resultados experimentais de outros estudos, foram realizadas simulações usando as mesmas configurações do trabalho (SILICON LABORATORIES INC., 2022), onde o tempo de conexão foi medido em uma rede com 100 nós. Para isso, foram consideradas configurações de redes de pequeno, mediano e grande escala, ajustando-se o algoritmo *trickle timer* para configurar os tempos de geração dos pacotes de controle que impactam a escalabilidade da rede. A Figura 5.6 apresenta os resultados dessas simulações, evidenciando o efeito da configuração pelo tipo da rede. Em particular, para a rede com 100 nós, os tempos de conexão obtidos foram muito próximos aos reportados no (SILICON LABORATORIES INC., 2022), nos quais foram medidos 13, 37

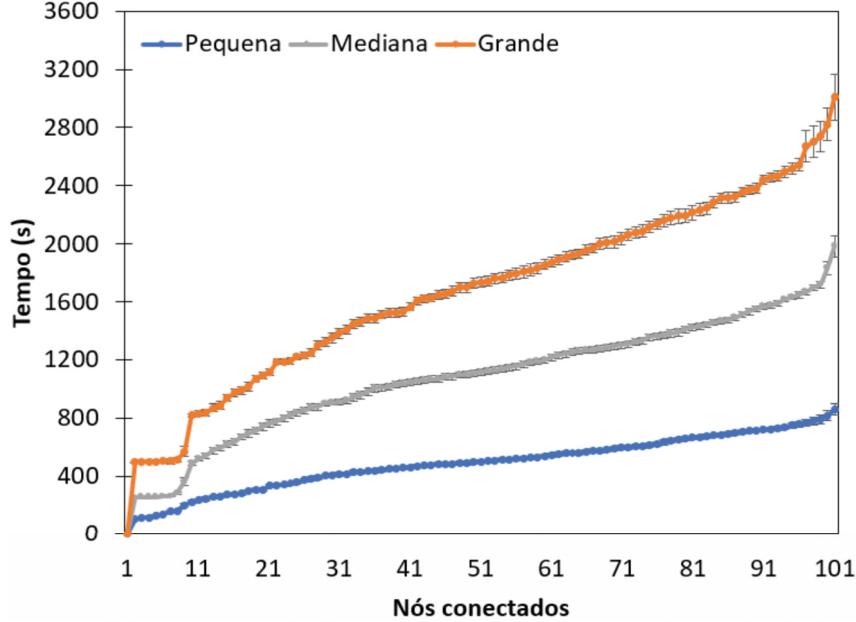


Figura 5.6: Tempo de conexão de rede usando configurações para redes de pequena, mediana e grande escala.

e 55 minutos para configurações de rede pequena, mediana e grande, respectivamente.

Neste Capítulo, é apresentada uma ferramenta de simulação para analisar o processo de conexão de nós a redes Wi-SUN FAN, a partir da implementação de um novo procedimento na camada de enlace da pilha Contiki-NG, que possibilitou a medição do tempo de conexão dos nós nesse padrão. Por meio de experimentos realizados em ambientes internos, observa-se uma tendência coincidente entre os tempos de conexão medidos experimentalmente e aqueles obtidos por simulação, especialmente na topologia em malha. Além disso, foram realizadas simulações que replicaram cenários experimentais descritos em outros trabalhos, confirmando resultados semelhantes quanto aos tempos de conexão em redes Wi-SUN FAN. Esses resultados reforçam a relevância da funcionalidade proposta, evidenciando seu potencial como ferramenta eficaz para o estudo do processo de conexão de nós em redes Wi-SUN FAN. O próximo capítulo apresenta a descrição, implementação e avaliação da proposta de Encontro Paralelo para associação Wi-SUN FAN (EP Wi-SUN FAN), utilizando o simulador desenvolvido. Além disso, inclui uma análise teórica do processo de associação no EJ1, permitindo compreender o comportamento desse estado, de interesse direto para a implementação da solução proposta neste trabalho.

6 EP WI-SUN FAN: ENCONTRO PARALELO PARA ASSOCIAÇÃO WI-SUN FAN

A proposta EP Wi-SUN FAN introduz um esquema de junção cooperativa baseado na estratégia de encontro paralelo, com o objetivo de acelerar o processo de conexão de nós do tipo R no padrão Wi-SUN FAN. A proposta busca aproveitar os pacotes PAS transmitidos por nós não associados para formar *clusters* sincronizados durante a varredura de canais realizada por esses mesmos nós. Cada *cluster* gera, para cada nó não associado, uma lista contendo informações sobre seus vizinhos não associados (*tabela_EP*), incluindo o esquema de agendamento de salto de canal *unicast*. Dessa forma, quando um nó membro do *cluster* consegue se conectar à rede Wi-SUN FAN, ele dissemina rapidamente pacotes PA para os vizinhos presentes em sua lista por meio de comunicação *unicast*; essa transmissão não é governada pelo *trickle timer*. Após concluir a disseminação dentro do *cluster*, o nó pode retomar a transmissão assíncrona de pacotes PA, agora governada pelo *trickle timer*. A Figura 6.1 ilustra a formação de dois *clusters* em uma rede EP Wi-SUN FAN. Em cada *cluster*, cada nó opera de forma independente, gerando a sua própria *tabela_EP*, que armazena as informações dos vizinhos que compõem o *cluster*.

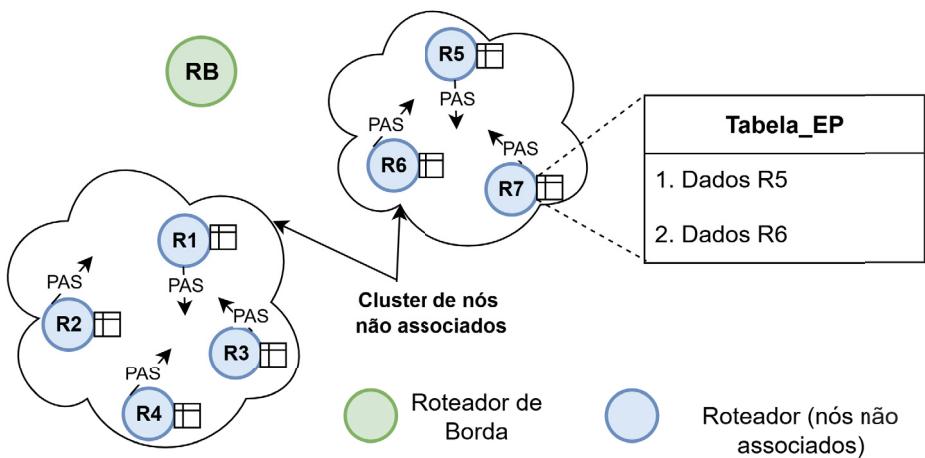


Figura 6.1: Exemplo de formação de *cluster* em EP Wi-SUN FAN.

O *cluster* opera de acordo com as seguintes considerações:

- O nó não associado opera de forma totalmente distribuída, gerando de forma independente a sua própria *tabela_EP* e tomando decisões com base nas informações recebidas dos nós vizinhos, sem depender de um controlador ou servidor central.
- O nó não associado classifica a sua *tabela_EP* de acordo com a intensidade do sinal do pacote PAS recebido dos vizinhos, que deve estar em um nível aceitável ($\text{RSSI} > -87 \text{ dBm}$) (SRINIVASAN; LEVIS, 2006). Essa ordem é utilizada para o envio de pacotes PA por comunicação *unicast* (*PA_unicast*) a cada vizinho da lista.
- O nó não associado pode remover um vizinho da sua *tabela_EP* caso receba um pacote do *trem_PA*, indicando que esse vizinho não se encontra mais no EJ1.

6.1 Modelagem Estocástica da descoberta no EJ1 no Wi-SUN FAN

Em redes Wi-SUN FAN, um nó em EJ1 inicia a descoberta realizando uma varredura de canais (*CHscan*) para detectar pacotes PA nos canais disponíveis. Essa varredura é realizada de maneira sequencial, seguindo a ordem definida pelo vetor de canais **V**, calculada por meio de uma função de canal em um sistema *round-robin*. Para este estudo, implementa-se uma abordagem em que o processo de conexão transita diretamente do EJ1 para o EJ5 na versão 1.0 do padrão. Ao ignorarem-se os estados de junção intermediários, os nós passam a operar exclusivamente no EJ1, permitindo uma análise teórica focada nessa fase específica, o que facilita a comparação com a proposta de encontro paralelo. Embora os demais estados desempenhem papéis essenciais no fluxo completo de conexão, a sua remoção não prejudica a análise proposta, pois esses estados não influenciam o mecanismo de descoberta nem o tempo necessário para que o nó identifique um anunciante.

O Algoritmo 2 descreve o processo de conexão no Wi-SUN FAN para nós no EJ1. O procedimento se inicia com a definição do número de canais (*Nch*), essencial para o salto de canal (linha 1). Em seguida, uma função de canal gera uma sequência pseudoaleatória

a partir do endereço EUI-64 do nó, armazenada no vetor **V** (linha 2). O índice de canal (I_c) seleciona o canal atual dentro de **V** (linha 3), enquanto o Intervalo de Permanência de *Unicast* (*UDI*) define o tempo de escuta em cada canal antes da comutação (linha 4). I_c é inicializado como 0 (linha 5), iniciando a varredura no primeiro canal da sequência contida em **V**. O nó entra então no EJ1 (linha 6), estado inicial de conexão. Nesse ponto, o *trickle timer* para pacotes PAS é ativado (linha 7), e o nó realiza a varredura no canal **V**[I_c] (linha 8), seguindo a sequência previamente gerada.

Após a configuração inicial, o nó entra em um loop contínuo durante a conexão de rede (linha 9). Nesse loop, verifica-se primeiramente a expiração do temporizador *UDI*; caso tenha expirado, o temporizador é reiniciado, I_c é incrementado e o nó avança para o próximo canal em **V** (linhas 10 a 14). Enquanto não estiver associado e permanecer no EJ1, se o *trickle timer* permitir, o nó transmite pacotes PAS para solicitar a recepção de pacotes de PA (linhas 15 a 17). Ao receber um pacote PA, o nó interrompe o *trickle timer* de PAS e transita para EJ5 (linhas 18 a 22). Em EJ5 (estado operacional), o *trickle timer* de PA é iniciado, permitindo que o nó anuncie sua presença aos vizinhos e contribua para a formação da rede (linhas 23 a 26). Durante todo o processo, o nó monitora continuamente seu estado de junção e realiza a varredura dos canais definidos em **V** (linha 27).

A lista de candidatos do Protocolo de Autenticação Extensiva sobre LAN (EAPoL) não foi implementada no EJ1. No padrão Wi-SUN FAN, essa lista é utilizada para determinar a PAN à qual o nó tentará se conectar, com base no menor custo de rota, que depende principalmente das informações obtidas no EJ4. No presente estudo, essa funcionalidade foi omitida para permitir uma análise focada exclusivamente na avaliação do processo de descoberta e associação do EJ1. Dessa forma, o nó seleciona apenas o primeiro PA recebido para avançar para o EJ5. Essa simplificação reduz a complexidade da implementação e possibilita um estudo teórico mais direto sobre o comportamento no EJ1.

Com base nessas considerações, é realizada uma análise teórica seguindo a modelagem apresentada em (ALGORÁ et al., 2018), considerando três topologias de rede: linear,

Algoritmo 2 Processo de descoberta de Wi-SUN FAN no EJ1

```

1:  $Nch$ : número de canais disponíveis
2:  $\mathbf{V}[ ] \leftarrow$  função_de_canal()
3:  $I_c$ : índice de canal
4:  $UDI$ : intervalo de permanência de canal
5:  $I_c \leftarrow 0$ 
6: nó = EJ1
7: início do trickle timer de PAS
8:  $CHscan \leftarrow \mathbf{V}[I_c]$ 
9: enquanto o nó está em processo de conexão faça
10:   se o tempo  $UDI$  expirou então
11:     reinicia o tempo  $UDI$ 
12:      $I_c \leftarrow (I_c + 1)$ 
13:      $CHscan \leftarrow \mathbf{V}[I_c]$ 
14:   fim de se
15:   se nó = EJ1 então
16:     nó não está associado
17:     transmite PAS quando o trickle timer permite
18:     se PA é recebido então
19:       parada do trickle timer de PAS
20:       node  $\leftarrow$  EJ5
21:     fim de se
22:   fim de se
23:   se nó = EJ5 então
24:     nó está associado
25:     início de trickle timer de PA
26:   fim de se
27: fim de enquanto
  
```

totalmente conectada e em malha, conforme ilustrado na Figura 5.2.

6.1.1 Rede linear no EJ1 - Wi-SUN FAN

A Figura 6.2 descreve um processo de troca de pacotes e associação em uma topologia de rede linear, composta por um RB (nó 1, inicialmente associado) e $N - 1 = 3$ nós R (nós 2–4) tentando se conectar. Este cenário de pior caso (Figura 5.2a) possui um diâmetro de rede de $H = N - 1$ saltos e C canais disponíveis. O nó 1 está conectado em t_1 . Durante a associação, o nó j ($j = 2, 3, \dots, N$) escuta os pacotes PA transmitidos pelo nó $j - 1$ e os pacotes PAS enviados pelo nó não associado $j + 1$, com exceção do nó N , que escuta apenas o PA do nó $N - 1$. A associação ocorre de forma sequencial: o nó j somente se conecta após a associação do nó $j - 1$. A Figura 6.2 ilustra essa linha do tempo evidenciando que a conexão do nó N depende da associação prévia do nó $N - 1$.

Para cada nó, a sequência de canais é apresentada por barras horizontais pontilhadas,

cujo comprimento é determinado pelo número de canais disponíveis (C). As transmissões de *trem_PA* e *trem_PAS* são ilustradas por barras verticais cinza e laranja, respectivamente, enquanto as recepções de pacotes PA e PAS são indicadas por barras verticais verde e azul.

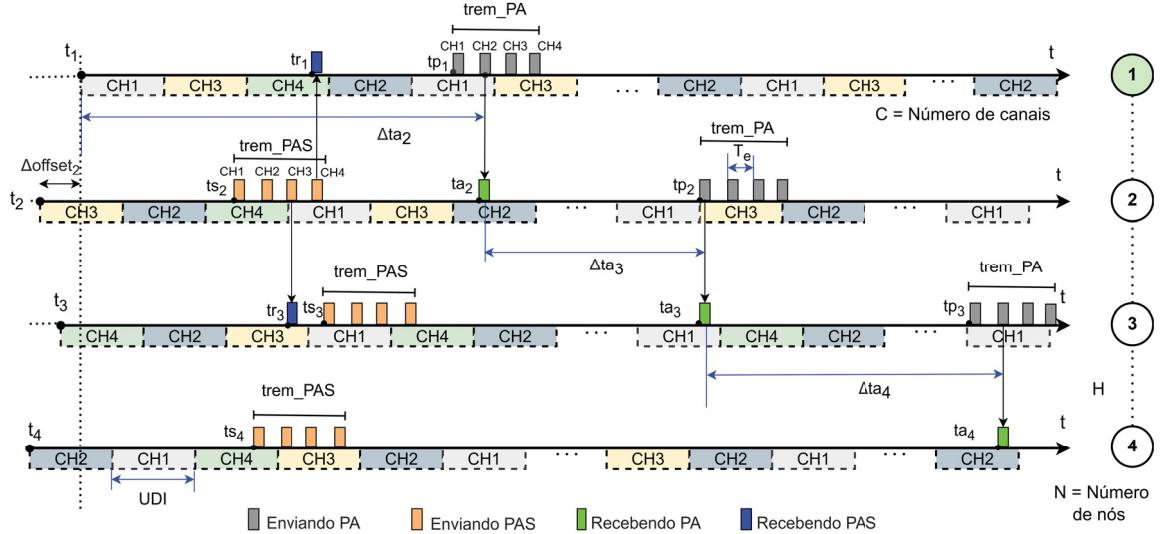


Figura 6.2: Exemplo do processo de associação de nós no EJ1 em uma topologia linear em redes Wi-SUN FAN.

Neste contexto, o nó 1 (distinto dos demais nós) inicia a formação da rede em $t_1 = 0$. Para medir o tempo de formação da rede linear, os deslocamentos de tempo (Δoffset_j) de cada nó roteador são desconsiderados. Esse alinhamento garante que todas as medições sejam referenciadas ao tempo de início do Roteador de Borda.

Um ponto importante é a desconsideração, neste cálculo, da recepção de pacotes PAS no tempo tr_j para o caso de um nó associado, uma vez que isso não afeta o início do tempo do primeiro *trem_PA*, ocorrido no tempo tp_j . Essa situação gera uma inconsistência no *trickle timer*, que reinicia o intervalo para I_{\min} . No entanto, isso não causa impacto, uma vez que o intervalo já está definido como I_{\min} . Além disso, no caso de recepção de PAS por nós não associados, também pode-se desconsiderar a geração de uma consistência no *trickle timer*, que suprime o envio do *trem_PAS*, que não é considerado neste cálculo.

O tempo necessário para que o nó j se associar à rede Wi-SUN FAN é representado por ta_j , que é o tempo decorrido desde o momento em que o nó $j - 1$ se associa até o

momento em que o nó j recebe um PA do nó $j - 1$. Isso pode ser representado como

$$\Delta ta_j = ta_j - ta_{j-1}, \quad 1 < j \leq N. \quad (6.1)$$

Como $t_1 = 0$, o valor de ta_1 também é 0, resultando em $\Delta ta_2 = ta_2$. Esse intervalo corresponde ao tempo entre a associação do nó 1 e a recepção do PA pelo nó 2 e, portanto, é igual ao tempo de associação do nó 2. O valor de ta_2 depende do tempo tp_1 , que marca o início do *trem_PA*, e do instante em que o nó 2 recebe um dos pacotes desse *trem_PA*. O valor de tp_1 é determinado pelo intervalo especificado no *trickle timer*, que segue uma distribuição uniforme contínua (DJAMAA; RICHARDSON, 2015) ao longo do intervalo $[I/2, I]$. Dessa forma, o valor esperado do início do *trem_PA* é $\mathbb{E}[tp_1] = \frac{3I}{4}$.

Seja T_d o tempo entre o início do *trem_PA* e o instante em que um pacote PA é recebido pelo nó 2, assumindo que pelo menos um pacote será recebido. Em um cenário de recepção garantida, a recepção ocorrerá, no máximo, em até $C \cdot T_e$ unidades de tempo. Considerando que o início do salto do nó 2 é uniformemente distribuído ao longo do *trem_PA*, tem-se que $T_d \sim U[0, C \cdot T_e]$, com $\mathbb{E}[T_d] = \frac{C \cdot T_e}{2}$. Consequentemente, o valor esperado de ta_2 é dado por

$$\mathbb{E}[ta_2] = \mathbb{E}[tp_1] + \left(\frac{C \cdot T_e}{2} \right). \quad (6.2)$$

Considerando que o nó $j - 1$ não inicia o envio de um *trem_PA* antes de se associar à rede, isso implica que o tempo decorrido entre a associação de um nó e o envio do PA para o próximo nó é o mesmo para todos os nós da rede. Essa suposição é razoável, uma vez que, no contexto do algoritmo Wi-SUN FAN, a sequência de ações dos nós ocorre de forma ordenada em uma rede linear. Portanto, o valor esperado do tempo entre a associação dos nós, denotado como Δta_j nesta análise, pode ser assumido como igual para todos os nós da rede, ou seja:

$$\mathbb{E}[\Delta ta_j] = \mathbb{E}[\Delta ta_i], \quad \forall i, j \in [2, N]. \quad (6.3)$$

Com base em (6.3) e reescrevendo (6.1) de forma mais conveniente, obtém-se:

$$\mathbb{E}[ta_j] = \mathbb{E}[ta_{j-1} + \Delta ta_2]. \quad (6.4)$$

A partir dessa formulação, ao resolver a equação de recorrência linear, o valor esperado do tempo necessário para a formação de uma rede linear de diâmetro $H = N - 1$, denotado por ta_N , pode ser expresso como:

$$\mathbb{E}[ta_N] = (N - 1) \cdot \mathbb{E}[ta_2]. \quad (6.5)$$

6.1.2 Rede totalmente conectada no EJ1 - Wi-SUN FAN

Em uma rede totalmente conectada, todos os nós estão dentro do alcance de transmissão uns dos outros, podendo enviar e receber pacotes diretamente entre si. Nesse tipo de topologia, a comunicação ocorre sem a necessidade de encaminhamento por múltiplos saltos, conforme ilustrado na Figura 5.2b. Nesse cenário, quando um nó ainda não associado tenta ingressar na rede, ele pode estabelecer a conexão por meio de qualquer vizinho que já esteja associado.

Seja X_{ji} o tempo necessário para o nó j receber um pacote PA enviado pelo nó i . Então, o tempo de associação ta_j em uma rede com $N - 1$ nós tentando se associar é dado por

$$ta_j = \min(\{X_{ji}\}), \quad \forall i \neq j, \quad (6.6)$$

onde $\min(\{X_{ji}\})$ indica que o nó j seleciona o menor tempo de recepção de pacotes PA entre todos os nós i , devido à simplificação adotada de se associar ao primeiro PA recebido. Considerando agora o último nó a se associar à rede, com índice $1 < l \leq N$, a partir de (6.6), o tempo esperado para a formação de uma rede com $N - 1$ nós não associados em uma topologia totalmente conectada pode ser expresso pelo tempo de associação desse

último nó:

$$\mathbb{E}[ta_N] = \mathbb{E}[ta_l] = \mathbb{E}[\min(\{X_{li}\})], \quad \forall i \neq l. \quad (6.7)$$

Considerando um cenário ideal, no qual não se levam em conta as deficiências que podem fazer com que os nós percam um pacote PA, por exemplo, devido a colisões ou ruído, é possível estabelecer um limite superior para o tempo que o nó l levaria para receber um PA do RB (X_{l1}). Esse limite é determinado pelo *trickle timer* e pelo *trem_PA*. Assumindo que esse limite existe, o tempo máximo para o nó l receber um PA do BR é definido como T_M , de modo que $\mathbb{E}[ta_N] \leq T_M$, onde $T_M = I + (C \cdot T_e)$, sendo I o intervalo definido pelo *trickle timer*, C o número máximo de canais disponíveis e T_e o tempo de intervalo entre PAs no *trem_PA*.

Em uma rede totalmente conectada, diferentemente do caso linear, o tempo esperado para a formação da rede, $\mathbb{E}[ta_N]$, não cresce linearmente com o número de nós; em vez disso, o valor esperado diminui à medida que o número de nós aumenta, em um cenário otimista que desconsidera falhas na recepção de pacotes PA e PAS. Ou seja, o valor obtido pela equação (6.7) reduz-se conforme cresce a quantidade de elementos em $\{X_{li}\}$. Esse comportamento é discutido na Seção 6.2, no contexto da rede totalmente conectada do EP Wi-SUN FAN.

6.1.3 Rede malha no EJ1 - Wi-SUN FAN

Em uma rede malha, ilustrada na Figura 5.2c, os nós podem ter mais de dois vizinhos, o que significa que cada nó na rede pode ser conectado a vários outros nós. No entanto, é importante destacar que, mesmo possuindo múltiplos vizinhos, um nó em uma rede malha só pode transmitir e receber dados de seus vizinhos diretos durante o EJ1. Por exemplo, na Figura 5.2c, o nó 4 pode se associar à rede apenas por meio dos nós 2 ou 5, dependendo de qual nó receba um PA primeiro.

Para um nó em uma rede malha, seja $\{D_{ji}\}$ o conjunto de nós que estão dentro do alcance de comunicação direta do nó j e dos quais este pode receber um pacote PA. Dado

esse conjunto, (6.6) pode ser reescrito como

$$ta_j = \min(\{X_{ji}\}), \quad \forall i \in \{D_{ji}\}, \quad (6.8)$$

e o tempo esperado para a conexão de toda a rede pode ser expresso como

$$\mathbb{E}[ta_N] = \mathbb{E}[ta_l] = \mathbb{E}[\min(\{X_{li}\})], \quad \forall i \in \{D_{ji}\}. \quad (6.9)$$

Como o número de elementos em D_{ji} é menor que N , o tempo esperado para a formação de uma rede em malha é maior do que o de uma rede totalmente conectada com o mesmo número de nós. Além disso, o diâmetro da rede impacta o resultado da equação (6.9); no entanto, como o diâmetro H é menor que o número de nós N , torna-se evidente que $\mathbb{E}[ta_N]$ é limitado superiormente pela equação (6.5). Ou seja, espera-se que $\mathbb{E}[ta_N]$ para uma rede em malha esteja situado entre os valores obtidos para uma rede totalmente conectada e para uma rede linear. Essa interpretação intuitiva é corroborada pelos resultados apresentados no Capítulo 7.

6.2 O processo de descoberta EP Wi-SUN FAN no EJ1

O Algoritmo 3 descreve o processo EP Wi-SUN FAN, que segue a estratégia de encontro paralelo e permite que nós não associados troquem informações de sincronização por meio de pacotes PAS durante o EJ1. Das linhas 1 a 21, o procedimento é o mesmo descrito no Algoritmo 2. Quando um nó não associado recebe um pacote PAS, ele armazena as informações de sincronização necessárias em uma tabela chamada *tabela_EP* (linhas 22 a 24). Ao receber um pacote PA, o nó transita para o EJ5, passa a estar associado e inicia o *trickle timer* de PA (linhas 26–28). Em seguida, envia um pacote PA via *unicast* para cada um de seus vizinhos não associados registrados na *tabela_EP* (linhas 29–31 no Algoritmo 3).

No Algoritmo 3, seguem-se as mesmas considerações do Algoritmo 2, sendo que a

Algoritmo 3 Processo de descoberta EP Wi-SUN FAN no EJ1

```

1:  $Nch$ : número de canais disponíveis
2:  $\mathbf{V}[] \leftarrow$  função_de_canal()
3:  $I_c$ : índice de canal
4:  $UDI$ : intervalo de permanência de canal
5:  $I_c \leftarrow 0$ 
6: nó = EJ1
7: início de trickle timer de PAS
8:  $CHscan \leftarrow \mathbf{V}[I_c]$ 
9: enquanto o nó está em processo de conexão faça
10:   se o tempo de  $UDI$  expirou então
11:     reinicia o tempo de  $UDI$ 
12:      $I_c \leftarrow (I_c + 1)$ 
13:      $CHscan \leftarrow \mathbf{V}[I_c]$ 
14:   fim de se
15:   se nó = EJ1 então
16:     nó não está associado
17:     transmite PAS quando o trickle timer permite
18:     se PA ou  $PA\_unicast$  é recebido então
19:       parada de trickle timer de PAS
20:       nó  $\leftarrow$  EJ5
21:     fim de se
22:     se PAS é recebido então
23:        $tabela\_EP \leftarrow$  dados de agendamento unicast
24:     fim de se
25:   fim de se
26:   se nó = EJ5 então
27:     nó está associado
28:     início de trickle timer de PA
29:     para cada nó em  $tabela\_EP$  faça
30:       prever e envia  $PA\_unicast$  para o nó
31:     fim de para
32:   fim de se
33: fim de enquanto
  
```

lista de candidatos EAPoL não é implementada. Essa escolha também visa reduzir a complexidade da implementação, permitindo um estudo mais controlado por meio do isolamento de EJ1. As análises são realizadas nas topologias linear, totalmente conectadas e em malha, conforme ilustrado na Figura 5.2.

6.2.1 Rede linear no EJ1 - EP Wi-SUN FAN

A Figura 6.3 apresenta um exemplo do processo de associação de nós em uma topologia que consiste em um RB (nó 1), que já inicia associado, e $N - 1$ nós R não associados na rede (nós 2 a 4), que estão tentando se associar. Para cada nó R, é exibida uma sequência de canais representada por barras horizontais pontilhadas, a qual depende do número

de canais disponíveis, C . As transmissões de $trem_PA$, $trem_PAS$ e $PA_unicast$ são indicadas por barras verticais nas cores cinza, laranja e vermelho, respectivamente. As recepções de pacotes PA e $PA_unicast$ são representadas por barras verticais verdes, enquanto as recepções de pacotes PAS aparecem em azul.

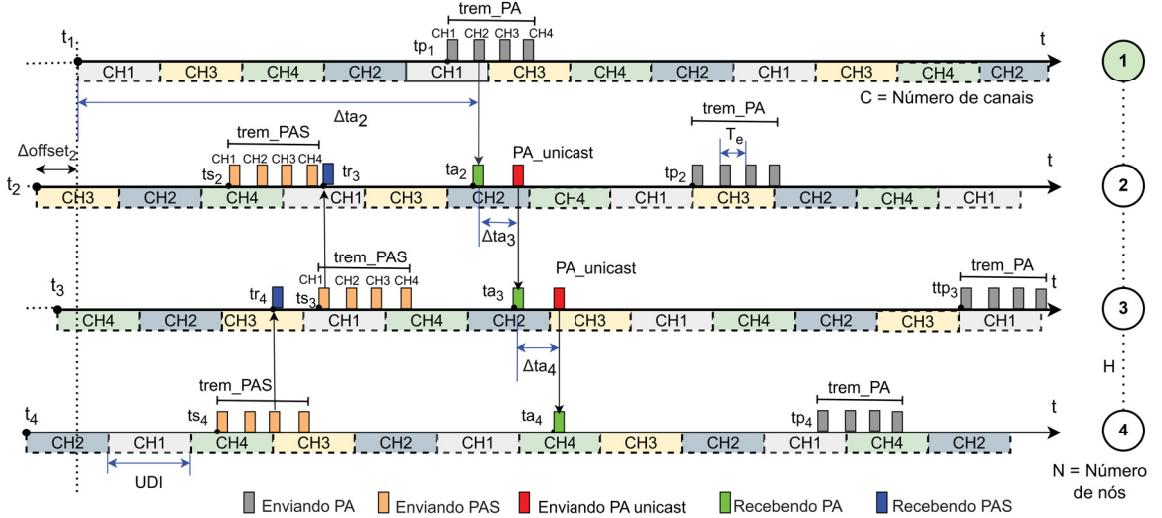


Figura 6.3: Exemplo de processo de associação de nós no EJ1 em uma topologia linear em redes EP Wi-SUN FAN.

Neste cenário, no caso geral, após o nó $j - 1$ se conectar à rede, $2 \leq j \leq N$, ele pode enviar imediatamente pacotes $PA_unicast$ para o nó j se já tiver recebido um pacote PAS e o armazenado em sua *tabela_EP* para o nó j . Caso contrário, o nó j terá que aguardar um período determinado por seu *trickle timer*, que corresponde ao processo convencional de Wi-SUN FAN. Considerando que o tempo de transmissão de PAs para nós vizinhos no cenário de encontro paralelo é insignificante em comparação com o tempo necessário para que esses vizinhos concluam sua associação, o valor esperado do incremento de tempo de associação para o nó j pode ser expresso como:

$$\mathbb{E} [\Delta ta_j] = \mathbb{E} [\Delta ta^{n^{PAS}}] (1 - P_j), \quad 1 < j \leq N, \quad (6.10)$$

onde $\Delta ta^{n^{PAS}}$ representa o tempo esperado para associação na ausência de um PAS previamente recebido e P_j é a probabilidade de que o nó $j - 1$ já tenha recebido um PAS do nó j antes da associação. Em outras palavras, esse tempo adicional ocorrerá apenas

se o nó $j - 1$ não tiver recebido um PAS do nó j .

Como o RB (nó 1) já está associado à rede desde t_1 , ele não possui uma *tabela_EP* e, portanto, não armazena informações sobre pacotes PAS. Assim, $P_2 = 0$. Consequentemente, o tempo de associação do nó 2 será sempre equivalente ao cenário em que nenhum PAS foi recebido. Para este caso, temos:

$$\mathbb{E} [\Delta ta_2] = \mathbb{E} [\Delta ta^{nPAS}] = \mathbb{E} [ta_2]. \quad (6.11)$$

Em geral, o tempo total para que o nó j se associe corresponde à soma do tempo de associação do nó anterior com o tempo adicional necessário para que o nó j complete sua associação, ou seja,

$$\mathbb{E} [ta_j] = \mathbb{E} [ta_{j-1}] + \mathbb{E} [\Delta ta_j]. \quad (6.12)$$

Assim, ao substituir (6.10) e (6.11) em (6.12), obtém-se:

$$\mathbb{E} [ta_j] = \mathbb{E} [ta_{j-1}] + \mathbb{E} [ta_2] (1 - P_j). \quad (6.13)$$

Supondo que o tempo durante o qual o nó $j - 1$ pode ouvir um PAS do nó j , denotado por $X_{j-1,j}$, segue o cronograma do *trickle timer* e ocorre em janelas de tempo distintas, simplifica-se a análise teórica modelando $X_{j-1,j}$ como uma variável aleatória uniformemente distribuída ao longo do intervalo $[0, T_M]$. Com base nessa suposição, a probabilidade de o nó $j - 1$ ter recebido um PAS do nó j antes da associação, no tempo médio $\mathbb{E} [ta_{j-1}]$, é dada por

$$P_j = \begin{cases} \frac{\min (\mathbb{E} [ta_{j-1}], T_M)}{T_M}, & j = 3, 4, \dots, N, \\ 0, & j = 2. \end{cases} \quad (6.14)$$

O tempo esperado para todos os $N - 1$ nós R se associem à rede é obtido substituindo

(6.14) em (6.13), resultando em:

$$\mathbb{E}[ta_N] = T_M \left[1 - \left(1 - \frac{\mathbb{E}[ta_2]}{T_M} \right)^N \right]. \quad (6.15)$$

A equação (6.15) apresenta uma relação exponencial inversa, indicando um ganho cumulativo à medida que a probabilidade de escuta antecipada aumenta. Quando o tempo $\mathbb{E}[ta_2]$ é pequeno em relação a T_M , os nós têm maior probabilidade de receber PASs mais cedo, resultando em uma formação mais rápida da rede.

6.2.2 Rede totalmente conectada no EJ1 - EP Wi-SUN FAN

Quando o algoritmo EP Wi-SUN FAN é utilizado em uma rede totalmente conectada, como ilustrado na Figura 5.2b, o primeiro nó a se conectar à rede envia pacotes PA para todos os vizinhos com os quais pode se comunicar. Os nós subsequentes realizam o mesmo procedimento, gerando um "efeito dominó". Isso significa que, à medida que mais nós se conectam, aumentam as chances de recepção de PAs, já que cada nó pode atuar como ponto de sincronização para os outros. Portanto, como discutido anteriormente, espera-se que o EP Wi-SUN FAN apresente desempenho superior ao Wi-SUN FAN convencional nesse tipo de rede.

Neste cenário, assim como nas análises anteriores, desconsideram-se falhas que poderiam impedir os nós de receber corretamente os pacotes PA e PAS. Assume-se que o tempo necessário para um nó anunciar a presença da rede aos vizinhos em sua *tabela_EP* é desprezível em comparação a ta_N . Além disso, para o último nó a se associar, denotado como nó l , assume-se que: (i) o conjunto de instantes em que um PA é recebido de qualquer nó $i \neq l$, $\{X_{li}\}$, é composto por variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas; e (ii) tais variáveis seguem uma distribuição uniforme no intervalo $[\frac{T_M}{2}, T_M]$. No início do *trem_PA*, considera-se que a varredura dos canais é uniformemente distribuída no tempo e que os PAs são transmitidos em qualquer um dos C canais com igual

probabilidade. Assim, a função de distribuição cumulativa de ta_l é dada por:

$$F_{ta_l}(x) = \text{P}(ta_l \leq x) = 1 - \prod_{i \neq l} \text{P}(X_{li} > x), \quad (6.16)$$

onde

$$\text{P}(X_{li} > x) = \left(\frac{T_M - x}{\frac{T_M}{2}} \cdot \left(1 - \frac{1}{C}\right) \right), \quad x \in \left[\frac{T_M}{2}, T_M \right]. \quad (6.17)$$

Considerando que a rede possui N nós, segue que

$$\prod_{i \neq l} \text{P}(X_{li} > x) = \left(\frac{T_M - x}{\frac{T_M}{2}} \cdot \left(1 - \frac{1}{C}\right) \right)^N, \quad x \in \left[\frac{T_M}{2}, T_M \right], \quad (6.18)$$

portanto, $F_{ta_l}(x)$ pode ser definida como

$$F_{ta_l}(x) = \begin{cases} 0 & , \quad x < \frac{T_M}{2}, \\ 1 - \left(\frac{T_M - x}{\frac{T_M}{2}} \cdot \left(1 - \frac{1}{C}\right) \right)^N & , \quad \frac{T_M}{2} \leq x \leq T_M, \\ 1 & , \quad x > T_M. \end{cases} \quad (6.19)$$

Ao derivar (6.19), obtém-se a função de densidade de probabilidade correspondente como

$$f_{ta_l}(x) = \frac{2N}{T_M} \left(\frac{T_M - x}{\frac{T_M}{2}} \cdot \left(1 - \frac{1}{C}\right) \right)^{N-1}, \quad \frac{T_M}{2} \leq x \leq T_M. \quad (6.20)$$

Agora, o tempo esperado para o último nó se juntar à rede, t_{a_N} , pode ser calculado como

$$\mathbb{E}[t_{a_N}] = \int_{\frac{T_M}{2}}^{T_M} x f_{ta_l}(x) dx = \frac{2T_M}{N+2} + \frac{T_M}{2} \cdot \left(\frac{C}{C-1} \right). \quad (6.21)$$

Este resultado pode ser interpretado como uma estimativa do tempo médio necessário para que o último nó se conecte à rede em um cenário otimista, no qual se desconsideram falhas na recepção dos pacotes PA e PAS. Observa-se que ta_N diminui à medida que o número de nós aumenta, apresentando um deslocamento médio adicional abaixo do limite

máximo. Isso sugere que, com mais nós, torna-se mais provável que alguns descubram a rede rapidamente, reduzindo assim o tempo médio para a conexão do último nó.

6.2.3 Rede malha no EJ1 - EP Wi-SUN FAN

A Figura 5.2c apresenta um exemplo de configuração de rede em malha. No algoritmo PR Wi-SUN FAN, é possível que os nós 2 e 3 recebam pacotes PAS dos nós 4 e 5, respectivamente. Isso permite que os nós 2 e 3 armazenem essas informações em suas *tabela_EP* e enviem imediatamente pacotes *PA_unicast*, acelerando a associação dos nós 4 e 5. Dessa forma, o algoritmo de encontro paralelo facilita a associação entre nós dentro do alcance mútuo, permitindo o armazenamento das informações na *tabela_EP*.

Como uma rede em malha pode apresentar múltiplos caminhos de formação, combinando características de uma rede linear (número de saltos) e de uma rede totalmente conectada (número de vizinhos com visibilidade mútua), derivar uma expressão analítica em forma fechada torna-se mais complexo. Assim, considerando o comportamento híbrido dos modelos de rede estudados anteriormente, pode-se afirmar que o valor esperado de ta_N está dentro do intervalo de tempos finais de associação para redes lineares e totalmente conectadas, satisfazendo

$$\frac{2T_M}{N+2} + \frac{T_M}{2} \cdot \left(\frac{C}{C-1} \right) \leq \mathbb{E}[ta_N] \leq T_M \left[1 - \left(1 - \frac{\mathbb{E}[ta_2]}{T_M} \right)^N \right], \quad (6.22)$$

onde $\mathbb{E}[ta_2]$ representa o tempo de formação esperado para o primeiro nó em uma rede linear, seja utilizando Wi-SUN FAN ou EP Wi-SUN FAN, o qual pode ser determinado a partir de (6.2). Evidências experimentais que corroboram esses argumentos são apresentadas no próximo capítulo.

Neste capítulo, foi realizada uma análise teórica do processo de associação no EJ1 para o Wi-SUN FAN e para o EP Wi-SUN FAN, verificando-se que é possível obter

ganhos com a proposta apresentada, especialmente em uma rede lineal. Esses ganhos serão confirmados no capítulo seguinte.

7 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Este capítulo apresenta a metodologia e a avaliação de desempenho da proposta EP-Wi-SUN FAN em comparação com a versão original do padrão.

7.1 Configuração Experimental

Para avaliar o desempenho da proposta, realizou-se uma comparação entre o Wi-SUN FAN e o EP Wi-SUN FAN durante o EJ1. O sistema operacional Contiki-NG foi utilizado, seguindo a abordagem descrita em (QUISPE et al., 2024) para implementar os algoritmos 2 e 3. Utilizando a ferramenta Cooja do Contiki-NG, conduziram-se diversas simulações com nós RB e R, executadas no nó nativo Cooja (QUISPE et al., 2024). A configuração adotada operava na banda Sub-GHz, oferecendo 90 canais e uma taxa de dados de 50 kbps no simulador.

Para refletir a natureza assíncrona das redes Wi-SUN FAN, geraram-se três topologias: linear, totalmente conectada e em malha. Em cada topologia, múltiplas simulações foram conduzidas, variando os tempos de ativação dos nós por meio do parâmetro "semente aleatória", replicando assim as condições de uma rede de serviços públicos fixa. Em todas as simulações, os nós R iniciam desconectados, ou seja, começam no EJ1. Em cada cenário, um RB (nó 1) foi implantado, enquanto os nós restantes (nós 2 a N) foram do tipo R. Na topologia linear, 10 nós R foram implantados, cada um tentando se associar. Nas topologias totalmente conectadas e em malha, entre 10 a 50 nós R foram implantados, todos também tentando se associar. Para o tamanho da *tabela_EP*, definiu-se uma capacidade máxima de 50 vizinhos. As topologias foram construídas usando Cooja, e a Figura 7.1 apresenta as topologias referentes ao número máximo de nós utilizados neste estudo.

Como o desempenho da varredura de canais depende fortemente da frequência das

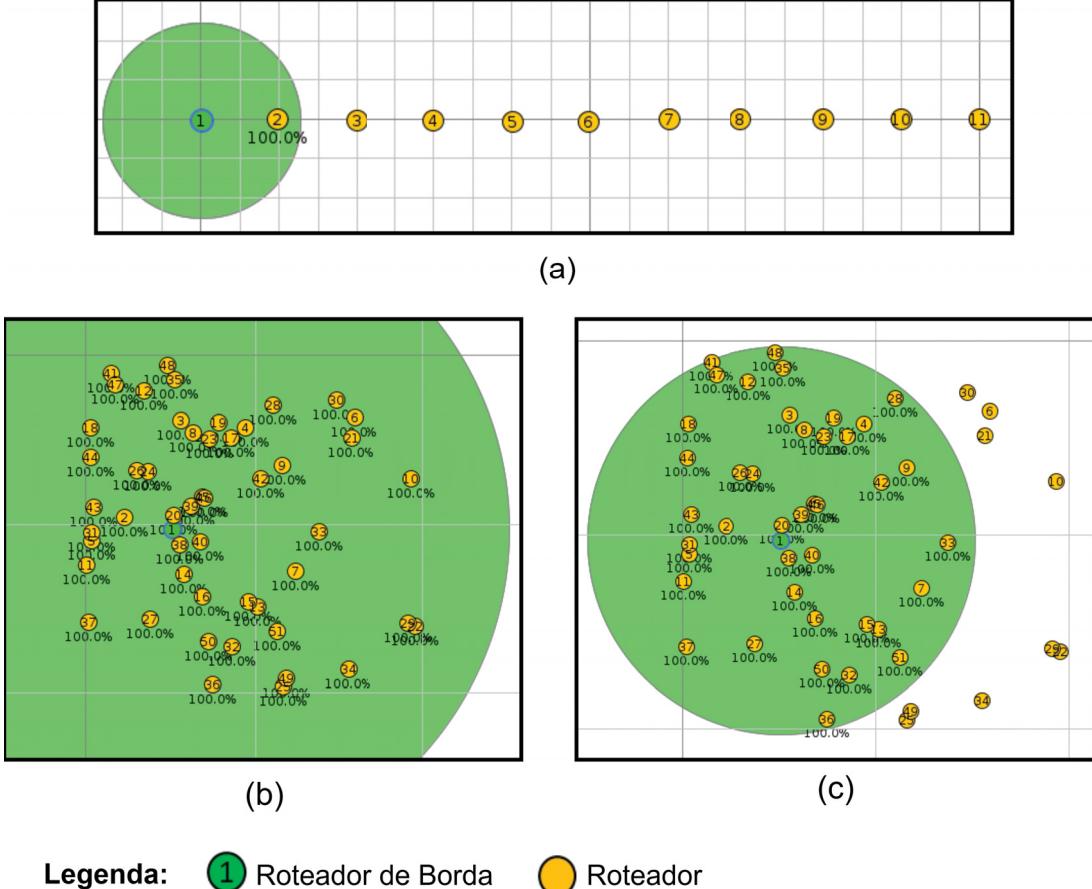


Figura 7.1: Topologias em Cooja: (a) Linear. (b) Totalmente conectado. (c) Malha.

transmissões de pacotes PA e PAS, e dado que o padrão não define explicitamente o intervalo T_e para essas transmissões, mas exige que o comprimento do UDI permaneça dentro de um intervalo determinado, foram implementadas três configurações para a função de canal utilizada. Essa função gera uma sequência pseudoaleatória cujo cumprimento corresponde ao número de canais, simplificando assim a análise. Essas configurações consideram os parâmetros UDI e T_e . A Tabela 7.1 apresenta as configurações adotadas para diferentes números de canais nas topologias simuladas.

Tabela 7.1: Configurações usadas para diferentes números de canais.

CH	UDI (ms)	T_e (s)
10	10	1
40	50	2
90	20	1,8

Essas configurações garantem que os pacotes PA ou PAS sejam transmitidos pelo menos uma vez em toda a sequência pseudoaleatória, a qual opera de acordo com um

escalonamento cíclico *round-robin*.

Para configurar o *trickle timer* no início da transmissão do trem de pacotes PA ou PAS, foram utilizados os seguintes parâmetros: $I_{\min} = 15$ s, $I_{\max} = 60$ s e $k = 1$, tanto para o Wi-SUN FAN quanto para o PR Wi-SUN FAN, em uma configuração de pequena escala (IEEE Std 2857, 2021). A única variação ocorreu na topologia linear do PR Wi-SUN FAN, onde $k = 2$ foi adotado para transmitir pacotes PAS de forma redundante, evitando sua rápida supressão (LEVIS et al., 2011). Essa configuração visa aumentar a eficácia do armazenamento das informações do único vizinho na *tabela_EP*.

O desempenho dos algoritmos 2 e 3 é avaliado em termos do tempo médio necessário para formar uma rede com N nós, incluindo os nós RB e R, durante a fase de associação no EJ1. Para a coleta dos dados, foram realizadas 100 simulações para cada número de canais, conforme indicado na Tabela 7.1.

7.2 Consumo de energia

Em termos de consumo de energia, tanto os nós RB quanto os nós R no Wi-SUN FAN mantêm suas interfaces de rádio continuamente ativas durante os processos de associação e operação. Especificamente para os nós R, essa configuração é necessária para possibilitar a comunicação com outros nós posicionados abaixo deles, denominados filhos. Devido ao seu papel na rede Wi-SUN FAN, não se espera que os nós R implementem intervalos de suspensão, mecanismo comumente utilizado para economia de energia.

Para estimar o consumo de energia, considera-se a topologia de rede linear apresentada na Figura 7.1a. O consumo de energia é avaliado ao final do tempo de associação de cada nó R (ta_j). Assim, o consumo total de energia em EJ1 do nó j , E_j , pode ser representado como

$$E_j = ta_j \cdot Pa, \quad (7.1)$$

onde Pa é a potência consumida pelo nó enquanto o rádio permanece ligado durante as

fases de associação.

Os nós RB e R operam alternando entre dois modos: transmissão (Tx) e recepção (Rx). Para estimar, por exemplo, o valor de Pa , considera-se o consumo de energia nos modos Tx e Rx, cuja soma é obtida multiplicando-se a tensão de alimentação pela corrente consumida em cada nó. Para a análise apresentada neste trabalho, utilizam-se as especificações do CC1352P7 como exemplo: corrente de 8 mA no modo Tx, 5,4 mA no modo Rx e 2,63 mA para a CPU, com tensão de operação de 3,3 V. Esse valores resultam em um consumo de energia aproximado de 52,9 mJ/s.

7.3 Resultados

Esta seção apresenta os resultados da análises teóricas e das simulações realizadas para as topologias linear, totalmente conectado e em malha.

7.3.1 Rede linear

A Figura 7.2 apresenta o comportamento de uma rede linear em função do número de nós (N) durante o processo de associação em EJ1. As linhas contínuas com marcadores circulares representam os valores de ta_N obtidos por simulação para o Wi-SUN FAN convencional, enquanto as linhas contínuas com marcadores triangulares vazios correspondem aos valores para o EP Wi-SUN FAN. Em ambos os casos, as simulações foram realizadas considerando diferentes números de canais disponíveis. As linhas pontilhadas com marcadores circulares indicam os resultados da análise teórica para o Wi-SUN FAN convencional, enquanto as linhas pontilhadas com marcadores triangulares vazios representam à análise teórica para o EP Wi-SUN FAN, desenvolvida nas Seções 6.1 e 6.2, respectivamente.

Em relação ao Wi-SUN FAN convencional, os resultados indicam que o tempo de associação aumenta com o número de canais, uma vez que um nó precisa percorrer um conjunto maior de canais para receber um PA. Em todos os cenários, esse tempo apresenta

crescimento linear, pois cada nó j depende da conexão do nó anterior. A diferença média de tempo entre os nós, Δta_j , mantém-se praticamente constante, corroborando a análise teórica apresentada na Seção 6.1. Por exemplo, nas simulações com 90 canais (linha contínua azul-claro), Δta_j é de aproximadamente 89,7 s, valor próximo a ta_2 , que corresponde ao primeiro nó R associado. No caso do EP Wi-SUN FAN, observou-se que, para $j \geq 3$, os nós provavelmente trocaram pacotes PAS preenchendo a *tabela_EP*. Consequentemente, esses nós podem ter se conectado por meio de pacotes *PA_unicast*. No cenário de 90 canais, por exemplo, foram obtidos $\Delta ta_3 = 52,8$ s, $\Delta ta_4 = 28,9$ s e $\Delta ta_5 = 23,9$ s. Esses valores evidenciam uma redução significativa no tempo de associação para o EP Wi-SUN PR no EJ1, quando comparado ao Wi-SUN FAN convencional.

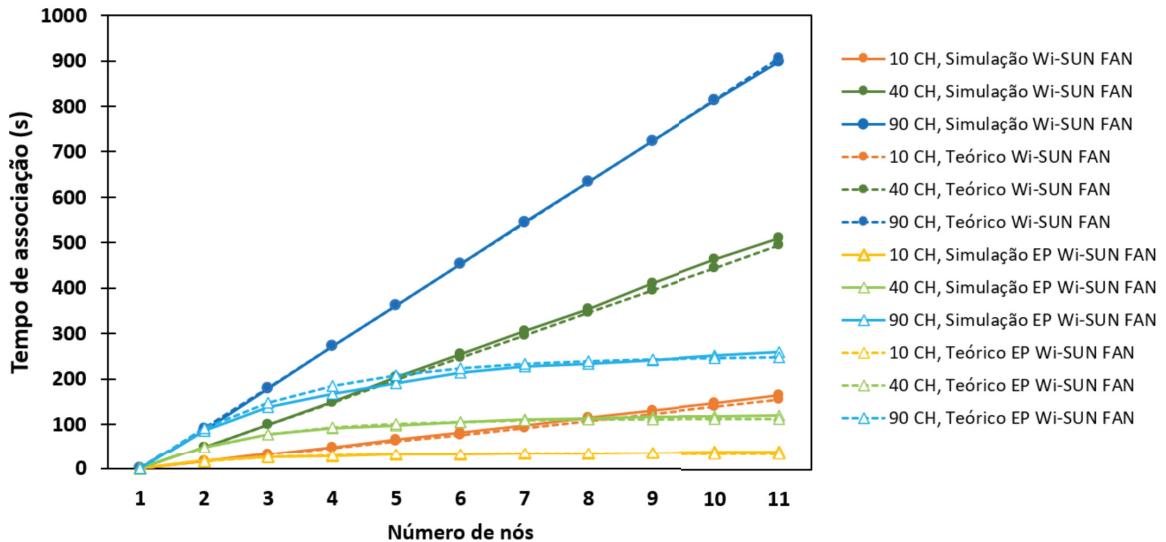


Figura 7.2: Comparação entre os algoritmos de simulação do Wi-SUN FAN e do EP Wi-SUN FAN em uma topologia linear.

Verificou-se também que o tempo de associação no EJ1 para o EP Wi-SUN FAN apresenta uma redução significativa em relação ao Wi-SUN FAN convencional. No cenário de 90 canais, por exemplo, o tempo de associação sem PR foi de 897,4 s, enquanto com PR foi de 258 s, o que corresponde a uma redução de 71,22 %. Esse resultado evidencia uma melhoria expressiva no tempo necessário para a formação da rede linear.

7.3.2 Rede totalmente conectada

Nesta rede, em que cada nó pode se comunicar diretamente com qualquer outro, foi possível observar o efeito da densidade da rede. A Figura 7.3 apresenta a comparação entre o Wi-SUN FAN e o EP Wi-SUN FAN no EJ1, em termos de tempo de associação, para diferentes quantidades de nós R , variando de 10 a 50. Observa-se que o tempo de associação ta_N diminui à medida que N aumenta em ambos os casos. Em cenários com um maior número de canais disponíveis, essa redução é ainda mais pronunciada, possivelmente devido à menor ocorrência de colisões de pacotes. Outra explicação pode estar associada à duração do *trem_PA*: o período $C \cdot T_e$ é maior nesses cenários, permitindo que nós já associados transmitam um número maior de PAs, acelerando a associação do último nó.

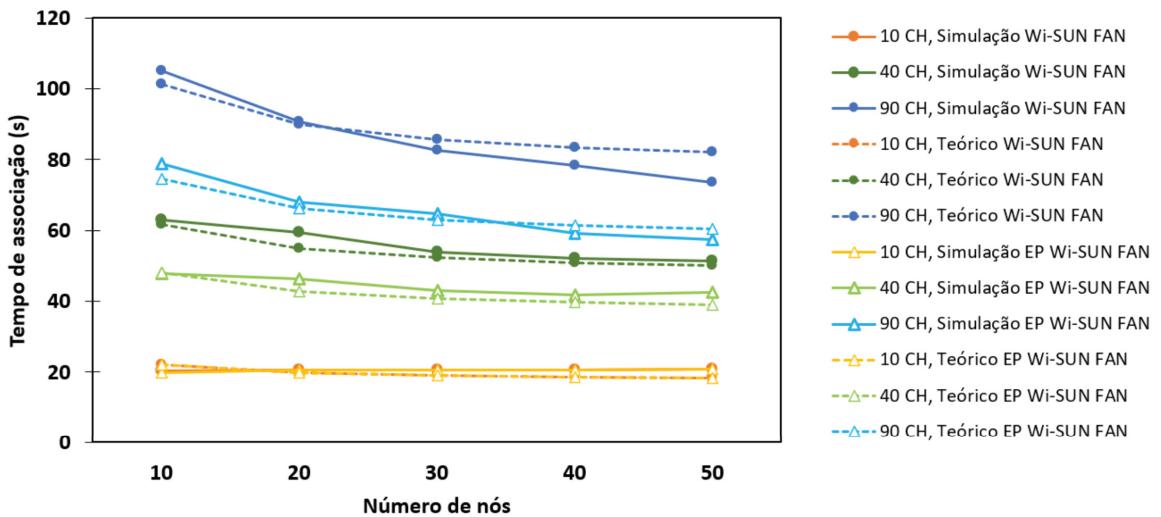


Figura 7.3: Comparaçāo entre os algoritmos de simulaçāo do Wi-SUN FAN e do EP Wi-SUN FAN em uma topologia totalmente conectada.

No caso do EP Wi-SUN FAN, nota-se uma redução adicional no tempo de associação em relação ao Wi-SUN FAN convencional. Esse ganho pode ser atribuído à supressão do tempo de espera para o início do *PA_train*, já que o envio de *PA_unicast* ocorre quase imediatamente. Além disso, com mais canais disponíveis, os nós levam mais tempo para detectar um pacote PA; nesse intervalo, há maior probabilidade de receberem um pacote PAS e, assim, iniciarem a transmissão de pacotes *PA_unicast*, acelerando o processo de associação da rede. Por exemplo, no cenário de 90 canais e 50 R, o tempo de associação sem EP foi de 73,45 s, enquanto com EP foi de 57,51 s, representando uma redução de

29,87 %. Esse resultado demonstra uma melhoria significativa no tempo necessário para a formação da rede totalmente conectada.

A Figura 7.3 também apresenta a comparação entre as simulações e a análise teórica desenvolvida nas Seções 6.1 e 6.2 para o Wi-SUN FA e o EP Wi-SUN FAN. Observa-se que os resultados simulados seguem a tendência prevista pelo modelo teórico. As discrepâncias identificadas entre a simulação e a análise teórica decorrem de simplificações adotadas no modelo.

7.3.3 Rede malha

A Figura 7.4 apresenta o tempo de associação em função do número de nós para uma topologia malha, considerando tanto o Wi-SUN FAN quanto o EP Wi-SUN FAN no EJ1. Verifica-se que as simulações conduzidas com o mecanismo EP Wi-SUN FAN resultam em uma redução no tempo de associação dos nós, sobretudo em função da presença de múltiplos saltos na topologia em malha, o que aumenta a probabilidade de que nós mais distantes recebam um pacote *PA_unicast* para efetuar sua associação.

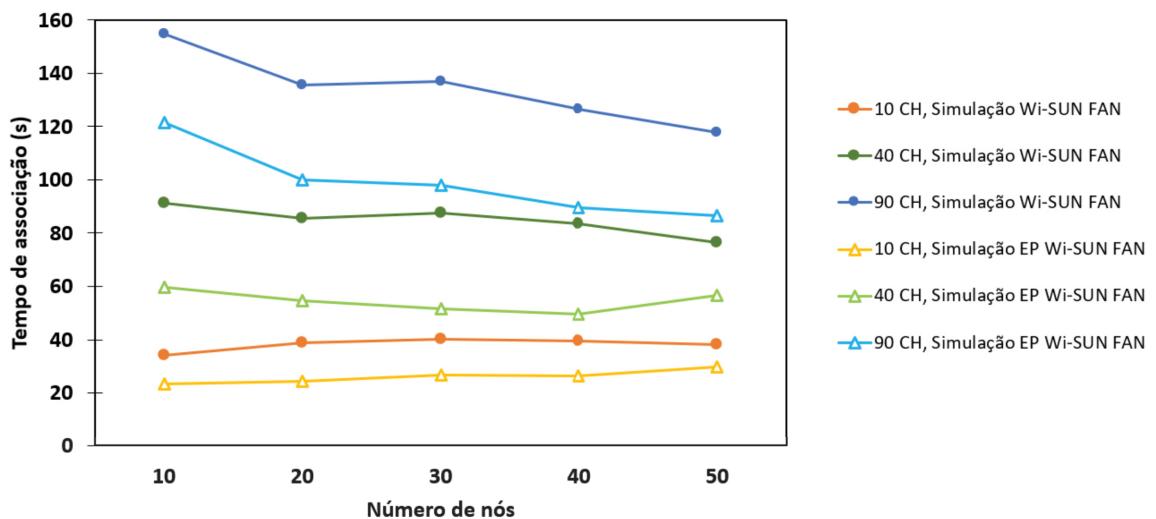


Figura 7.4: Comparação entre os algoritmos de simulação do Wi-SUN FAN e do EP Wi-SUN FAN em uma topologia malha.

Além disso, verificou-se que cenários com maior número de canais disponíveis apresentam reduções ainda mais expressivas no tempo de associação. Esse comportamento é

atribuído à maior duração do *trem_PA*, que proporciona aos nós não associados mais tempo para receber pacotes PAS e construir sua *tabela_EP*. Por exemplo, no cenário com 90 canais e 50 nós R, o tempo de associação sem EP foi de 117,89 s, enquanto com EP foi de 86,45 s, resultando em uma redução de 26,67 %. Esse resultado evidencia uma melhoria significativa no tempo de formação da rede malha.

A Figura 7.5 apresenta a comparação entre os resultados da simulação e a análise teórica geral para uma rede malha com 90 canais, conforme discutido nas Seções 6.1 e 6.2, tanto para o Wi-SUN FAN quanto para o PR Wi-SUN FAN. Observa-se que os resultados da simulação com 90 canais situam-se entre os limites superior e inferior previstos pelos modelos teóricos de rede linear e totalmente conectada, respectivamente. Esse resultado confirma o comportamento híbrido característico da topologia malha.

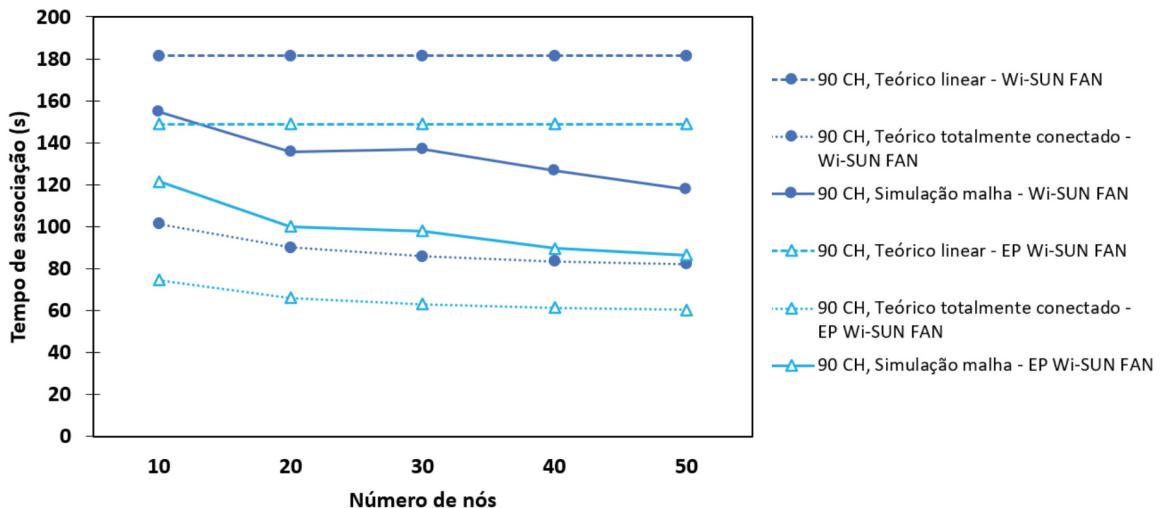


Figura 7.5: Resultados da simulação para as redes Wi-SUN FAN e PR Wi-SUN FAN em função do número de nós na rede malha (linhas contínuas com marcadores circulares e triangulares, respectivamente), comparados aos modelos teóricos para redes lineares (linhas tracejadas com marcadores circulares e triangulares, respectivamente) e totalmente conectadas (linhas pontilhadas com marcadores circulares e triangulares, respectivamente), considerando 90 canais.

7.3.4 Considerações sobre consumo de energia

A Figura 7.6 apresenta os resultados das simulações do consumo médio de energia durante a formação da rede para uma topologia linear com 11 nós (1 RB e 10 R) utilizando

90 canais. As barras verticais azuis indicam o consumo de energia do Wi-SUN FAN, e as barras verticais laranja representam o consumo do EP Wi-SUN FAN. Observa-se que o consumo de energia dos nós com a implementação do encontro paralelo é menor durante o processo de associação no EJ1, em razão da redução nos tempos de associação proporcionada no EP Wi-SUN FAN.

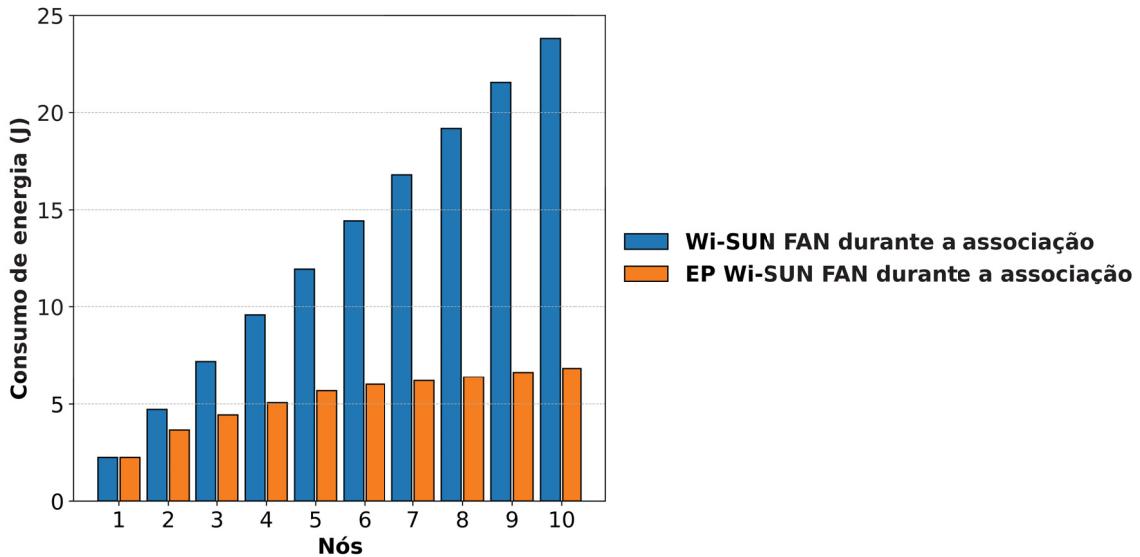


Figura 7.6: Consumo médio de energia do Wi-SUN FAN e do EP Wi-SUN FAN em uma rede linear.

O consumo de energia de cada nó foi calculado conforme à equação (7.1), a fim de determinar o valor de E_j para cada nó. O consumo total de energia dos dez nós R foi, então, obtido como a média das somas de seus consumos individuais. Os resultados encontrados foram 13,16 J para o Wi-SUN FAN e 5,32 J para o EP Wi-SUN FAN, representando uma redução de 59,56 % no consumo de energia com a abordagem proposta.

A Figura 7.7 ilustra o consumo total de energia para redes totalmente conectadas e em malha, com 10, 20, 30, 40 e 50 nós operando em 90 canais. Os resultados mostram que o consumo de energia durante o processo de associação, utilizando o método EP, é consistentemente menor em comparação com a abordagem convencional.

O consumo total de energia foi calculado como a média da soma do consumo em todos os nós. Por exemplo, em uma rede totalmente conectada com 50 nós, o consumo de energia foi de 1,19 J para o Wi-SUN FAN e de 0,75 J para o EP Wi-SUN FAN. Na

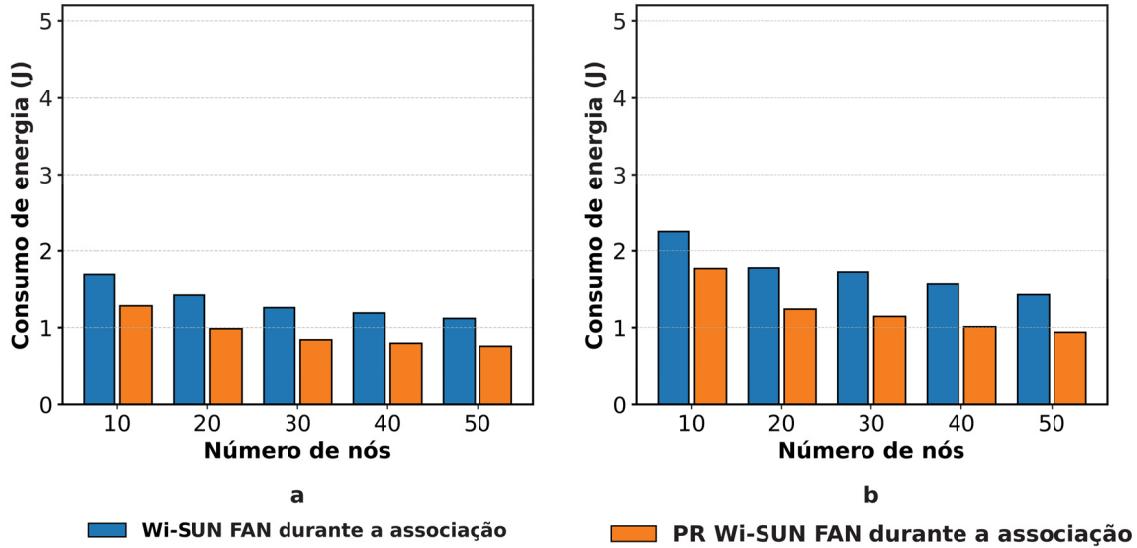


Figura 7.7: Consumo médio de energia do Wi-SUN FAN e do EP Wi-SUN FAN: (a) Totalmente conectado. (b) Malha.

rede malha, o consumo foi de 1,43 J para o Wi-SUN FAN e de 0,94 J para o EP Wi-SUN FAN. Esses valores representam uma redução de 37 % na rede totalmente conectada e de 34,3 % na rede em malha, demonstrando uma redução significativa no consumo de energia durante o processo de associação no EJ1.

7.3.5 Análise e discussão dos resultados

Os resultados apresentados demonstram que a proposta EP Wi-SUN FAN reduz significativamente o tempo de associação dos nós em diferentes topologias, especialmente em redes lineares, totalmente conectadas e em malha. Essas melhorias podem ser analisadas à luz das soluções discutidas na revisão bibliográfica.

Em redes lineares, os experimentos mostraram que o tempo de associação por nó no EJ1 diminuiu de 897,4 s para 258 s ao utilizar o EP Wi-SUN FAN, correspondendo a uma redução de 71,22 %. Esse resultado confirma a eficiência do encontro paralelo na redução do tempo de associação, aproximando-se dos ganhos observados em redes TSCH com estratégia de *clusters* (ALGORÁ et al., 2018), nas quais a criação de grupos cooperativos de nós não associados permitiu diminuições significativas no tempo de formação da rede

(até 79,8 % para dez nós). Embora o Wi-SUN FAN ainda não explore o conceito de *clusters* na literatura, os resultados obtidos indicam que a utilização do mecanismo EP cumpre papel semelhante, permitindo que nós mais distantes recebam informações antecipadas e realizem associações mais rápidas.

No caso das redes totalmente conectadas e em malha, os ganhos observados (reduções de até 29,87 % e 26,67 %, respectivamente) também evidenciam que o mecanismo EP melhora a eficiência da associação dos nós, reduzindo o tempo de espera e acelerando o envio de pacotes *PA_unicast*. Comparando com os estudos sobre otimização do algoritmo *trickle timer* (JUNJALEARNVONG et al., 2019; GHALEB et al., 2017; YASSEIN et al., 2017; AGHAEI et al., 2021), observa-se que a estratégia EP complementa essas abordagens: enquanto o ajuste do *trickle timer* reduz intervalos de transmissão e melhora a reatividade da rede, o EP Wi-SUN FAN adiciona um mecanismo cooperativo de antecipação, possibilitando ganhos adicionais, sobretudo em redes de maior densidade ou com múltiplos saltos.

Quanto ao consumo de energia, os resultados indicam reduções expressivas de até 59,56 % em redes lineares e de 34,3 % em redes em malha, em comparação com o Wi-SUN FAN convencional. Esses resultados são coerentes com o impacto do tempo de associação sobre o consumo de energia, uma vez que a diminuição do tempo de rádio ativo reduz proporcionalmente a energia consumida. Observa-se, portanto, que a proposta EP Wi-SUN FAN contribui não apenas para a eficiência temporal da associação, mas também para a otimização energética da rede, resultado ainda pouco explorado nos trabalhos anteriores sobre Wi-SUN FAN (JUNJALEARNVONG et al., 2019).

Em síntese, os resultados obtidos demonstram que:

- A proposta EP Wi-SUN FAN promove ganhos significativos, comparáveis aos de estratégias de clusterização em redes TSCH (ALGORÁ et al., 2018).
- A abordagem combina otimização do *trickle timer* e antecipação cooperativa, melhorando o desempenho em redes de diferentes topologias.

- O consumo de energia é reduzido, evidenciando que melhorias na fase de associação impactam diretamente a eficiência energética da rede.

Esses resultados reforçam a importância de investigar o comportamento dos nós não associados no Wi-SUN FAN. Conforme motivado pelo estado da arte, a estratégia EP consolida-se como uma solução promissora para otimizar tanto a conexão quanto o consumo de energia, especialmente em redes com grande número de saltos.

8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

8.1 Conclusões

Neste trabalho, foram realizados experimentos em redes multi-salto Wi-SUN FAN que confirmaram os tempos elevados de conexão dos nós quando se seguem as configurações recomendadas pelo padrão na versão 1.0. Verificou-se que a configuração do *trickle timer* exerce influência direta nesse processo. Além disso, constatou-se que, devido à necessidade de transitar por cinco estados de junção, a adoção da estratégia de Encontro Paralelo (EP) deve ocorrer logo no início, no EJ1, para que os pacotes PAS sejam aproveitados na formação de *clusters* entre nós ainda não associados.

Foi também desenvolvida e validada uma ferramenta de simulação no sistema operacional Contiki-NG, permitindo medir e analisar o tempo de formação de redes Wi-SUN FAN. Os resultados mostraram forte correlação entre os tempos de conexão medidos experimentalmente e aqueles obtidos por simulação. A ferramenta reproduziu ainda cenários já descritos na literatura, obtendo resultados consistentes e confirmando sua utilidade como ambiente confiável para o estudo do processo de associação de nós em redes Wi-SUN FAN. Essa base possibilitou a avaliação detalhada da proposta EP Wi-SUN FAN.

Por fim, o processo de associação de nós em EJ1 em redes Wi-SUN FAN 1.0 foi avaliado por meio de análises teóricos e simulações. Demonstrou-se que o tempo do processo de associação em EJ1 pode ser reduzido com a adoção do conceito de encontro paralelo, para o qual foi proposto um novo algoritmo, denominado EP Wi-SUN FAN. O desempenho da proposta foi comparado à versão original do padrão, com base no tempo médio de associação, evidenciando ganhos significativos em topologias lineares, totalmente conectadas e em malha, com destaque para redes lineares, nas quais se obteve uma redução de até 71,22 % no tempo de associação no EJ1. As medições de consumo energético indicaram que a implementação proposta também proporciona melhorias expressivas para

os nós R, alcançando uma redução de até 59,56 % no consumo de energia no EJ1, na topologia linear.

Diferentemente das propostas encontradas na literatura, que geralmente otimizam o EJ1 reduzindo os tempos por meio do ajuste de parâmetros do *trickle timer* para acelerar o envio de pacotes pela rede, o que pode causar congestionamentos e limitar a operação a redes pequenas, a proposta apresentada mantém os tempos recomendados do *trickle timer*, preservando as configurações sugeridas pelo padrão para redes de pequena e grande escala. A utilização da estratégia de encontro paralelo, com *clusters* operando de forma distribuída e considerando fatores como intensidade do sinal e remoção de nós, permitiu à rede reduzir de forma mais eficiente o processo de associação dos nós, um fator crítico, especialmente em redes com maior quantidade de nós.

8.2 Trabalhos Futuros

Diversas direções podem ser exploradas para aprimorar os resultados obtidos neste trabalho.

Uma possibilidade é aplicação de técnicas de inteligência artificial no processamento dos dados do processo de conexão dos nós na rede, permitindo ajustar dinamicamente os parâmetros de configuração e, assim, otimizar o controle do tráfego de pacotes em redes Wi-SUN FAN e, consequentemente, reduzir os tempos de conexão dos nós.

A implementação do estado de autenticação (EJ2) no Contiki-NG representa outra frente promissora. A inclusão do EJ2 permitiria investigar a resistência a ataques, a robustez dos mecanismos de segurança e os impactos da criptografia, da troca de chaves e dos procedimentos de autenticação sobre o tempo de conexão e o consumo energético do padrão.

Também pode ser investigado a aplicação do mecanismo de encontro paralelo nos outros estados de junção do padrão. Nesse contexto, algoritmos híbridos, combinando o encontro paralelo com controle adaptativo ou estratégias de escalonamento, podem ser

explorados para aprimorar o processo de associação.

Além disso, destaca-se que a versão mais recente do padrão, o Wi-SUN FAN 1.1, incorpora modulações OFDM, que aumenta a taxa de transmissão de dados. Isso abre caminho para estudos específicos sobre o processo de conexão dos nós nessa nova versão.

Outra direção importante para trabalhos futuros é o desenvolvimento de modelos ou simulações que considerem canais com ruído e efeitos de desvanecimento, permitindo avaliar de forma mais realista o desempenho do processo de conexão e a robustez da rede em condições práticas de propagação sem fio.

REFERÊNCIAS

AGHAEI, A.; TORKESTANI, J. A.; KERMAJANI, H.; KARIMI, A. La-trickle: A novel algorithm to reduce the convergence time of the wireless sensor networks. **Computer Networks**, Elsevier, v. 196, p. 108241, 2021.

ALGORA, C. M. G.; REGUERA, V. A.; FERNÁNDEZ, E. M. G.; STEENHAUT, K. Parallel rendezvous-based association for IEEE 802.15. 4 TSCH networks. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 18, n. 21, p. 9005–9020, 2018.

AMBROSIO, A.; RIELLA, R. J.; IANTORNO, L. M.; GOMES, V. B.; FERNÁNDEZ, E. M. Wi-SUN FAN interoperability: Verification through experiment test. **Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)**, 2021.

AMBROSIO, A.; RIELLA, R. J.; IANTORNO, L. M.; SANTOS, B. E. C.; RODRIGUES, D. d. H. C.; SILVA, G. T. A. da; BRITO, J. A.; FERNÁNDEZ, E. M. Avaliação experimental do tempo de formação de uma rede multi-salto do padrão Wi-SUN FAN. **Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)**, 2022.

ANANI, W.; OUDA, A.; HAMOU, A. A survey of wireless communications for IoT echo-systems. In: IEEE. **2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)**. 2019. p. 1–6.

BAE, B.-H.; CHUNG, S.-H. Fast synchronization scheme using 2-way parallel rendezvous in IEEE 802.15.4 TSCH. **Sensors**, MDPI, v. 20, n. 5, p. 1303, 2020.

BEECHER, P. **Wi-SUN Alliance: Leading the Way to Interoperability**. 2020. Accessed on 2024-05-21. Disponível em: <<https://wi-sun.org/blog/wi-sun-alliance-leading-the-way-to-interoperability/>>.

COMER, D.; KARANDIKAR, R. H.; RASTEGARNIA, A.; ROUZBEH, F.; SRUTHI, P. C. WIST: Wi-SUN FAN protocol emulation testbed. In: IEEE. **2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**. 2017. p. 1–6.

DIAS, C. F.; MENDONÇA, L. D. D.; TORNISIELLO, K. F.; GUERREIRO, A. S.; LIMA, E. R. D.; FRAIDENRAICH, G. A straightforward method to promote effective interoperability in Wi-SUN FAN smart grid networks. **IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)**, p. 1–5, 2022.

DJAMAA, B.; RICHARDSON, M. **The trickle algorithm: issues and solutions**. 2015. Disponível em: <<http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/9116>>.

FLORES, L. C.; REGUERA, V. A.; GUERRA, E. O.; MORA, D. R. S.; GARRIDO, F. B.; LOPEZ, E. A. Expected time to rendezvous in multi-hop cognitive radio networks. In: IEEE. **2017 IEEE 9th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)**. 2017. p. 1–5.

GHALEB, B.; AL-DUBAI, A.; ROMDHA, I.; NASSER, Y.; BOUKERCHE, A. Drizzle: Adaptive and fair route maintenance algorithm for low-power and lossy networks in IoT. In: IEEE. **2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. 2017. p. 1–6.

HADAYA, N. N.; ALABADY, S. A. Proposed RPL routing protocol in the IoT applications. **Concurrency and Computation: Practice and Experience**, Wiley Online Library, v. 34, n. 10, p. e6805, 2022.

HARADA, H.; MASAKI, H. Development of wireless emulator for large-scale IoT applications. In: **2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)**. 2022. p. 01–06.

HECK, G. C.; QUISPE, A. A.; FONSECA, P. H. da; JUNIOR, O. S.; HEXSEL, R. A.; ALBINI, L. C. FRR: a fast routing recovery mechanism minimizing network formation time in smart grids. **International Journal of Electrical Power**

& Energy Systems, v. 164, p. 110364, 2025. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061524005878>>.

HIRAKAWA, R.; MIZUTANI, K.; HARADA, H. Specification and performance analysis of Wi-SUN FAN. **IEEE Open Journal of Vehicular Technology**, IEEE, v. 4, p. 849–866, 2023.

HIRAKAWA, R.; OKUMURA, R.; MIZUTANI, K.; HARADA, H. A novel routing method with load-balancing in Wi-SUN FAN network. In: IEEE. **2021 IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)**. 2021. p. 362–367.

HOTTA, D.; OKUMURA, R.; MIZUTANI, K.; HARADA, H. Stabilization of multi-hop routing construction in Wi-SUN FAN systems. In: IEEE. **2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)**. 2020. p. 1–6.

IEEE Std 2857. IEEE standard for wireless smart utility network field area network (FAN). **IEEE Std 2857™-2021**, p. 1–182, 2021.

IEEE Std 802.15.4. IEEE standard for low-rate wireless networks. **IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)**, p. 1–800, 2020.

JUNJALEARNVONG, T.; HABARA, T.; OKUMURA, R.; MIZUTANI, K.; HARADA, H. A dynamic routing protocol supporting mobile nodes in Wi-SUN FAN systems. In: IEEE. **2017 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)**. 2017. p. 325–331.

JUNJALEARNVONG, T.; HABARA, T.; OKUMURA, R.; MIZUTANI, K.; HARADA, H. Experimental performance evaluation of multi-hop configuration and transmission in Wi-SUN FAN devices. **IEICE technical report**, v. 117, n. 458, p. 93–98, 2018.

JUNJALEARNVONG, T.; OKUMURA, R.; MIZUTANI, K.; HARADA, H. Performance evaluation of multi-hop network configuration for Wi-SUN FAN systems. In: IEEE. **2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)**. 2019. p. 1–6.

KURNIAWAN, A. Practical Contiki-NG. **Pract. Contiki-NG**, Springer, 2018.

LANDIS+GYR. TEPCO and Landis+Gyr Sign Agreement to Explore Future Options for Leveraging IoT Network. 2017. Disponível em: <<https://www.landisgyr.eu/news/tepco-landisgyr-sign-agreement-explore-future-options-leveraging-iot-network-2/>>.

LEE, H.-J.; CHUNG, S.-H. A scheduling method for reducing latency in Wi-SUN FAN networks. In: IEEE. **2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)**. 2023. p. 439–444.

LEVIS, P.; CLAUSEN, T.; HUI, J.; GNAWALI, O.; KO, J. **RFC 6206: The trickle algorithm**. RFC Editor, 2011.

MASADEH, R.; ALSAAIDAH, B.; MASADEH, E.; AL-HADIDI, M. R.; ALMOMANI, O. Elastic hop count trickle timer algorithm in internet of things. **Sustainability**, MDPI, v. 14, n. 19, p. 12417, 2022.

MIZUTANI, K.; OKUMURA, R.; MIZUTANI, K.; HARADA, H. Coexistence of synchronous and asynchronous MAC protocols for wireless IoT systems in sub-gigahertz band. In: IEEE. **2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)**. 2020. p. 1–6.

MOCHINSKI, M. A.; VIEIRA, M. L. d. S. C.; BICZKOWSKI, M.; CHUEIRI, I. J.; JAMHOUR, E.; ZAMBENEDETTI, V. C.; PELLENZ, M. E.; ENEMBRECK, F. Towards an efficient method for large-scale wi-sun-enabled ami network planning. **Sensors**, MDPI, v. 22, n. 23, p. 9105, 2022.

MOHAMADI, M.; DJAMAA, B.; SENOUCI, M. R. RAST: rapid and energy-efficient network formation in TSCH-based industrial internet of things. **Computer Communications**, Elsevier, v. 183, p. 1–18, 2022.

MOHAMADI, M.; DJAMAA, B.; SENOUCI, M. R.; MELLOUK, A. FAN: fast and active network formation in IEEE 802.15. 4 TSCH networks. **Journal of Network and Computer Applications**, Elsevier, v. 183, p. 103026, 2021.

MORIKAWA, Y.; MIZUTANI, K.; HARADA, H. Heterogeneous in-band full-duplex for simultaneous SUN-OFDM transmission and SUN-FSK reception. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 11, n. 4, p. 6652–6663, 2023.

NAGAO, R.; HOTTA, D.; MASAKI, H.; MIZUTANI, K.; HARADA, H. Stabilized Multi-Hop Route Construction Using a Modified Link Metric for Wi-SUN FAN Systems. **IEEE Open Journal of Vehicular Technology**, v. 6, p. 607–618, 2025.

NI, X.; BADDELEY, M.; JIANG, N.; JIN, Y. A self-configurable grouping method for integrated Wi-SUN FAN and TSCH-based networks. In: IEEE. **2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)**. 2021. p. 1079–1084.

OCHIAI, H.; MIZUTANI, K.; HARADA, H. Wi-SUN FAN multi-hop network in coexistence of IEEE 802.15. 4 FSK and OFDM transmission schemes. In: IEEE. **2021 24th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)**. 2021. p. 1–6.

OIKONOMOU, G.; DUQUENNOY, S.; ELSTS, A.; ERIKSSON, J.; TANAKA, Y.; TSIFTES, N. The Contiki-NG open source operating system for next generation IoT devices. **SoftwareX**, v. 18, p. 101089, 2022. ISSN 2352-7110. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711022000620>>.

PHUNG, G. **Field Area Communication in Urban Environment- Wi-SUN Protocol**. Vaasa, Finland, 2022.

QUISPE, A. A.; RIELLA, R. J.; IANTORNO, L. M.; MARIANI, L. S.; FERNANDEZ, E. M. G. Analysis of Wi-SUN FAN network formation time. **Sensors**, MDPI, v. 24, n. 4, p. 1142, 2024.

- REGUERA, V. A.; GUERRA, E. O.; ALGORA, C. M. G.; NOWÉ, A.; STEENHAUT, K. On the upper bound for the time to rendezvous in multi-hop cognitive radio networks. In: **IEEE. 2016 IEEE 21st International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)**. 2016. p. 31–36.
- SILICON LABORATORIES INC. **AN1330: Silicon Labs Wi-SUN Mesh Network Performance**. 2022. Disponível em: <<http://www.silabs.com/mesh-performance>>.
- SRINIVASAN, K.; LEVIS, P. RSSI is under appreciated. In: CAMBRIDGE, MA, USA. **Proceedings of the third workshop on embedded networked sensors (EmNets)**. 2006. v. 2006, p. 1–5.
- WAYONG, R.; OKUMURA, R.; MIZUTANI, K.; HARADA, H. A scheduling scheme for channel hopping in Wi-SUN FAN systems toward data throughput enhancement. In: **IEEE. 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)**. 2020. p. 1–5.
- WAYONG, R.; OKUMURA, R.; MIZUTANI, K.; HARADA, H. A routing protocol toward reliable mobile communication in Wi-SUN FAN. In: **IEEE. 2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)**. 2021. p. 1–6.
- Wi-SUN ALLIANCE. **Wi-SUN Alliance and FAN: Secure large-scale IoT networking for today and tomorrow**. 2018. Disponível em: <<https://wi-sun.org/wp-content/uploads/Wi-SUN-FAN-Article.pdf>>.
- WINTER, T.; THUBERT, P.; BRANDT, A.; HUI, J.; KELSEY, R.; LEVIS, P.; PISTER, K.; STRUIK, R.; VASSEUR, J. P.; ALEXANDER, R. RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. **Internet Engineering Task Force (IETF)**, RFC6550, Fremont, CA, USA, 2012.
- YAO, J.; JI, Z.; WANG, C.; WANG, K. Accelerating the commissioning process of Wi-SUN FAN nodes. In: **2024 10th International Conference on Computer and Communications (ICCC)**. 2024. p. 1805–1809.

YASSEIN, M. B.; ALJAWARNEH, S.; MASA'DEH, E. A new elastic trickle timer algorithm for internet of things. **Journal of Network and Computer Applications**, Elsevier, v. 89, p. 38–47, 2017.

YOO, D.; CHUNG, S.; PARK, J. Analysis and evaluation of channel-hopping-based MAC in industrial IoT environment. **J. Comput. Sci. Eng.**, v. 15, n. 4, p. 160–174, 2021.