

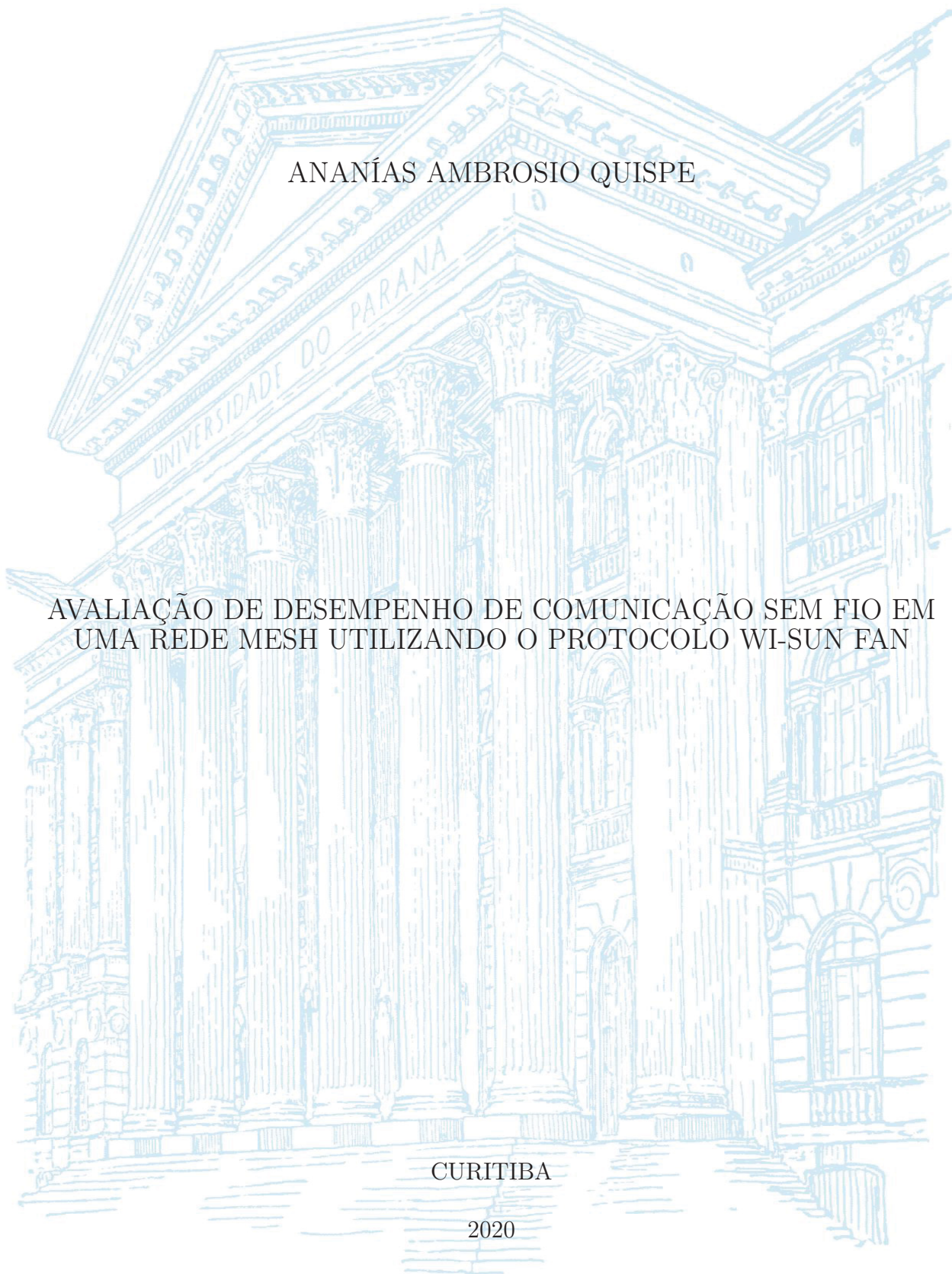
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANANÍAS AMBROSIO QUISPE

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE COMUNICAÇÃO SEM FIO EM
UMA REDE MESH UTILIZANDO O PROTOCOLO WI-SUN FAN

CURITIBA

2020



ANANÍAS AMBROSIO QUISPE

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE COMUNICAÇÃO SEM FIO EM
UMA REDE MESH UTILIZANDO O PROTOCOLO WI-SUN FAN

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre, na Área de Telecomunicações, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Evelio Martín García Fernández

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Jardim Rilla

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

Q8a

Quispe, Ananías Ambrosio

Avaliação de desempenho de comunicação sem fio em uma rede Mesh utilizando o protocolo WI-SUN FAN [recurso eletrônico] /Ananías Ambrosio Quispe. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

Orientador: Evelio Martín García Fernández. Coorientador: Rodrigo Jardim Riella.

1. Internet das coisas. 2. Internet - Controle de acesso. 3. Redes locais de computadores. 4. Comunicação e tecnologia. I. Universidade Federal do Paraná. II. Fernández, Evelio Martín García. III. Riella, Rodrigo Jardim. IV. Título.

CDD: 004.678

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E 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 em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ANANIAS AMBROSIO QUISPE** intitulada: **Avaliação de Desempenho da Comunicação sem Fio em uma Rede Mesh utilizando o Protocolo Wi-SUN FAN**, 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 mestre 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, 19 de Fevereiro de 2020.


RODRIGO JARDIM RIELLA

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)


KEIKO VERONICA ONO FONSECA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)


LUIS HENRIQUE ASSUMPÇÃO LOLIS

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

*Dedico todo esforço que tive para a finalização desta dissertação,
à minha querida família, sempre presente em meus pensamentos
apesar da distância.*

AGRADECIMENTOS

Em primeira instância, agradeço a Deus por me dar essa oportunidade de chegar a esta terra tão longe. Os caminhos são incompreensíveis e misteriosos, mas ao mesmo tempo cheio de oportunidades.

Agradeço à minha família, que sempre estava presente torcendo e enviando-me os melhores desejos.

Agradeço meu orientador, Evelio M. G. Fernández, pela oportunidade e a confiança para conseguir meu objetivo. Brindou-me a palavra precisa no momento indicado que me ajudou a melhorar e transitar o caminho da pesquisa.

Agradeço ao meu coorientador Rodrigo Jardim Riella e à Luciana Michelotto Iantorno do Lactec, que contribuíram imensamente na minha formação profissional para a realização deste trabalho, e ofereceram sua ajuda sempre.

Agradecimentos especiais são direcionados ao Centro de Pesquisa Lactec¹ para a área de Eletrônica, pela estadia como bolsista para a culminação deste trabalho.

¹Este trabalho foi financiado pelo projeto PD 0047 0080/2017 do programa de P&D Aneel do grupo Neoenergia.

RESUMO

Este trabalho avalia a tecnologia de comunicação Wi-SUN FAN que é um perfil que faz parte da aliança WI-SUN. Na literatura, são escassas as avaliações desta tecnologia em comparação com outras. Por isso, é importante conhecê-la e verificar sua aplicabilidade e limitações nos serviços para redes inteligentes. Para avaliação foram analisadas as métricas como o tempo de convergência, mensagens de controle, latência da rede e taxa de entrega de pacotes. Portanto, realizaram-se experimentos com um protótipo certificado do protocolo, conseguindo ter uma avaliação com a sequência completa da formação da rede. A metodologia desenvolvida permitiu realizar através do simulador Cooja, explorar o conceito da camada de rede em cenários para uma escala de rede menor, onde os nós têm profundidades definidas para ter uma avaliação inicial da formação da rede. Além disso, nos experimentos foi caracterizado o comportamento do protocolo, onde foram realizadas distribuições dos nós em três cenários, nos modos de operação 1b e 3 do protocolo, com funções de canal do tipo salto em frequência e canal fixo, utilizando a banda de 915 MHz-b atribuído para o Brasil. Os resultados da simulação mostram principalmente que o cenário com nós de maior profundidade na rede o tempo de convergência foi quase o dobro que os demais cenários, também que, para o envio dos pacotes de dados deve ser realizado depois da convergência da rede. Nos experimentos evidenciaram-se sobretudo o valor médio de convergência dos três cenários que foi de 1168 s, 2416,4 s e 1742,85 s, respectivamente, e a taxa de entrega de pacotes para alguns experimentos foi menor que 90%. Os dados mostram que o tempo de convergência é alto e precisam de um tempo adicional para diminuir a profundidade dos nós na topologia para melhorar a taxa de entrega de pacotes de dados e o modo de operação 1b com salto em frequência apresentou menor erro de pacotes uma vez estabelecida a rede.

Palavras-chave: Wi-SUN, Wi-SUN FAN, Cooja, tempo de convergência, mensagens de controle, latência da rede, taxa de entrega de pacotes.

ABSTRACT

This work evaluates the Wi-SUN FAN communication technology, which is a profile that is part of the WI-SUN alliance. In the literature, evaluations of this technology are scarce compared to others. Therefore, it is important to know it and verify its applicability and limitations in services for smart grids. For evaluation, metrics such as convergence time, control messages, network latency and packet delivery rate were analyzed. Therefore, experiments were carried out with a certified prototype of the protocol, managing to have an evaluation with the complete sequence of the network formation. The developed methodology allowed to carry out, through the Cooja simulator, to explore the concept of the network layer in scenarios for a smaller network scale, where the nodes have defined depths to have an initial assessment of the network formation. In addition, the behavior of the protocol was characterized in the experiments, where nodes were distributed in three scenarios, in the 1b and 3 protocol operating modes, with frequency hopping and fixed channel functions, using the 915 band. MHz-b assigned to Brazil. The results of the simulation mainly show that the scenario with nodes of greater depth in the network, the convergence time was almost double that of the other scenarios, also that, for the sending of the data packets it must be carried out after the convergence of the network. The experiments showed above all the average convergence value of the three scenarios, which was 1168 s, 2416.4 s and 1742.85 s, respectively, and the package delivery rate for some experiments was less than 90%. The data show that the convergence time is high and they need additional time to decrease the depth of the nodes in the topology to improve the rate of data packet delivery and the mode of operation 1b with frequency hopping showed less error of packets one once the network is established.

Keywords: Wi-SUN, Wi-SUN FAN, Cooja, network convergence time, control messages, network latency, packet delivery rate.

LISTA DE FIGURAS

2.1	ARQUITETURA DOS DISPOSITIVOS PARA IoT	28
2.2	PERFIS DE Wi-SUN	33
2.3	PILHA DO PERFIL Wi-SUN FAN	35
2.4	FLUXO DAS MENSAGENS NO NÓ DE JUNÇÃO	39
2.5	SALTO EM FREQUÊNCIA <i>UNICAST</i>	41
2.6	SALTO EM FREQUÊNCIA <i>BROADCAST</i>	42
2.7	EXEMPLO DE ROTEAMENTO NA CAMADA DE REDE Wi-SUN FAN	43
2.8	FORMAÇÃO DE GRAFO DODAG	45
3.1	LOCALIZAÇÃO DOS NÓS ROTEADOR DE BORDA E ROTEADOR	49
3.2	CENÁRIOS DA SIMULAÇÃO	50
3.3	NÓS EM CENÁRIOS DE TRANSMISSÃO NO SIMULADOR COOJA	51
3.4	NÓS EM CENÁRIOS SIMILARES NOS EXPERIMENTOS NO COOJA	52
3.5	SEQUÊNCIA DE SIMULAÇÃO	53
3.6	PROTÓTIPO EXPERIMENTAL Wi-SUN FAN	54
3.7	AMBIENTE <i>e²STUDIO</i> DE RENESAS	55
3.8	DISTRIBUIÇÃO DOS NÓS - PRIMEIRO CENÁRIO	58
3.9	EXEMPLO DE LOCALIZAÇÃO DOS NÓS - PRIMEIRO CENÁRIO	59
3.10	DISTRIBUIÇÃO DOS NÓS - SEGUNDO CENÁRIO	60
3.11	DISTRIBUIÇÃO DOS NÓS - TERCEIRO CENÁRIO	61

3.12	EXEMPLO DE LOCALIZAÇÃO DOS NÓS - TERCEIRO CENÁRIO . . .	62
3.13	SEQUÊNCIA DA METODOLOGIA	64
3.14	REGISTRO DA SEQUÊNCIA DOS DADOS DO PROTOCOLO	65
4.1	TEMPO DE CONVERGÊNCIA POR CENÁRIOS	68
4.2	TEMPO DE CONVERGÊNCIA DOS CENÁRIOS SIMILARES NOS EXPERIMENTOS DO AMBIENTE INTERNO	68
4.3	MENSAGENS DE CONTROLE POR CENÁRIOS	69
4.4	MENSAGENS DE CONTROLE DOS CENÁRIOS SIMILARES NOS EXPERIMENTOS DO AMBIENTE INTERNO	70
4.5	LATÊNCIA DA REDE POR CENÁRIOS	70
4.6	LATÊNCIA DA REDE DOS CENÁRIOS SIMILARES NOS EXPERIMENTOS DO AMBIENTE INTERNO	71
4.7	TAXA DE ENTREGA DE PACOTES POR CENÁRIOS	71
4.8	TAXA DE ENTREGA DE PACOTES DOS CENÁRIOS SIMILARES NOS EXPERIMENTOS DO AMBIENTE INTERNO	72
4.9	EXEMPLOS DA FORMAÇÃO DE REDE NO PRIMEIRO CENÁRIO . . .	73
4.10	EXEMPLOS DA FORMAÇÃO DE REDE NO SEGUNDO CENÁRIO . . .	74
4.11	EXEMPLOS DA FORMAÇÃO DE REDE NO TERCEIRO CENÁRIO . . .	75
4.12	TEMPO DE CONVERGÊNCIA DA REDE NOS TRÊS CENÁRIOS . . .	76
4.13	MENSAGENS DE CONTROLE DE CONVERGÊNCIA NOS TRÊS CENÁRIOS	77
4.14	MENSAGENS DE CONTROLE DEPOIS DE CONVERGÊNCIA NOS TRÊS CENÁRIOS	78
4.15	LATÊNCIA DA REDE NOS TRÊS CENÁRIOS	80

4.16 TAXA DE ENTREGA DE PACOTES NOS TRÊS CENÁRIOS	81
---	----

LISTA DE TABELAS

1.1	PESQUISA POR PALAVRA-CHAVE EM DIFERENTES BASES DE DADOS	20
1.2	COMPARAÇÃO DE TECNOLOGIAS ZIGBEE, LoRaWAN e WI-SUN FAN	21
2.1	ESTRUTURA DO DIRETORIO DE CONTIKI-NG	32
2.2	ESPECIFICAÇÕES FÍSICAS DE Wi-SUN FAN	35
2.3	ESPECIFICAÇÕES PRINCIPAIS DA CAMADA DE ENLACE DE DADOS	42
2.4	ESPECIFICAÇÕES PRINCIPAIS DA CAMADA DE REDE	47
3.1	ESPECIFICAÇÕES RPL WI-SUN FAN COM COOJA	52
3.2	COMPONENTES DA UNIDADE Wi-SUN FAN	54
3.3	FERRAMENTAS DE SOFTWARE PARA Wi-SUN FAN	55
3.4	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS UTILIZADAS NOS PROTÓTIPOS . . .	56
3.5	CONFIGURAÇÕES POR CENÁRIOS	57
3.6	ALINHAMENTO DE CANAL PARA FAIXA DE FREQUÊNCIA 902-907,5 MHz e 915-928 MHz COM ESPAÇAMENTO DE 400 kHz	57
3.7	ALINHAMENTO DE CANAL PARA FAIXA DE FREQUÊNCIA 902-907,5 MHz e 915-928 MHz COM ESPAÇAMENTO DE 200 kHz	57
3.8	DISTÂNCIAS ENTRE NÓS NO PRIMEIRO CENÁRIO	59
3.9	DISTÂNCIAS ENTRE NÓS NO SEGUNDO CENÁRIO	60
3.10	DISTÂNCIAS ENTRE NÓS NO TERCEIRO CENÁRIO	61

LISTA DE SIGLAS

6LoWPAN	<i>IPv6 over LowPower Wireless Personal Area Networks</i>
ACK	<i>Acknowledgment</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
CSL	<i>Coordinated Sampled Listening</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
DAG	<i>Direct Acyclic Graph</i>
DAO	<i>Destination Advertisement Object</i>
DH1CF	<i>Direct Hash Channel Function</i>
DIO	<i>DODAG Information Object</i>
DIS	<i>DODAG Information Solicitation</i>
DODAG	<i>Destination Oriented DAG</i>
EAPOL	<i>Extensible Authentication Protocol over LAN</i>
ECHONET	<i>Energy Conservation and Home Network</i>
ETX	<i>Expected Transmission Count</i>
FAN	<i>Field Area Network</i>
F-RIT	<i>Feathery-Receiver Initiated Transmission</i>
ICMPv6	<i>Internet Control Message Protocol Version 6</i>

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IEs	<i>Information Elements</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
JUTA	<i>Japan Utility Telemetering Association</i>
LLC	<i>Logical Link Control</i>
LLNs	<i>Low Power and Lossy Networks</i>
MAC	<i>Media Acces Control</i>
MHDS	<i>Multi-Hop Delivery Service</i>
MRHOF	<i>Minimum Rank with Hysteresis Objective Function</i>
NICT	<i>National Institute of Information and Communications Technology</i>
NLoS	<i>Non Line of Sight</i>
OCP	<i>Objetive Code Point</i>
OF	<i>Objective Function</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>
PER	<i>Packet Error Rate</i>

RLMM	<i>Resource Limited Monitoring and Management</i>
RPL	<i>IPv6 Routing Protocol for LLNs</i>
RSL	<i>Received Signal Level</i>
SO	Sistema Operacional
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TIA	<i>Telecommunications Industry Association</i>
TR51CF	<i>TR51 Channel Function</i>
UDGM	<i>Unit Disk Graph Medium</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
ULAD	<i>Upper Layer Application Data</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
Wi-SUN	<i>Wireless Smart Ubiquitous Network</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

F_C	Frequência central de canal
F_{C_0}	Primeira frequência central
N_C	Número de canal
S_C	Espaçamento de canal
m	Tempo de ativação do Roteador de Borda
n	Tempo do estado de junção 5 do n-ésimo Roteador
T_C	Tempo de convergência da rede
M_C	Mensagens de controle para a convergência da rede
DIO_{TC-}	Quantidade de mensagens DIO para a convergência da rede
DIS_{TC-}	Quantidade de mensagens DIS para a convergência da rede
DAO_{TC-}	Quantidade de mensagens DAO para a convergência da rede
M_D	Mensagens de controle depois de convergência da rede
DIO_{TC+}	Quantidade de mensagens DIO depois de convergência da rede
DIS_{TC+}	Quantidade de mensagens DIS depois de convergência da rede
DAO_{TC+}	Quantidade de mensagens DAO depois de convergência da rede
L_T	Latência total da rede
T_{pr}	Total de pacotes de dados
t_e	Tempo de envio do pacote

t_r	Tempo de recepção do pacote
L_M	Latência média
T_{ep}	Taxa de entrega de pacotes
N_{pe}	Número de pacotes de dados enviados
\bar{X}_i	Média da amostra
μ	Média população normal
s	Estimador do desvio padrão populacional
i	Tamanho da amostra

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Motivação e Justificativa	20
1.2	Objetivos	25
1.3	Estrutura da Dissertação	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	Internet das Coisas	27
2.1.1	Arquitetura básica dos dispositivos para IoT	27
2.1.2	Tecnologias de comunicação sem fio	28
2.1.3	SO para rede de objetos inteligentes	29
2.1.4	Simuladores	30
2.2	SO Contiki-NG	31
2.2.1	Estrutura do diretório de Contiki-NG	31
2.2.2	Simulador Cooja	32
2.3	Aliança Wi-SUN	33
2.4	Perfil Wi-SUN FAN	34
2.4.1	Camada Física	35
2.4.2	Camada de Enlace de Dados	36
2.4.2.1	Descoberta e Junção	37
2.4.2.2	Formato de quadros	37

2.4.2.3	Estados de junção	38
2.4.2.4	Salto em Frequência	40
2.4.3	Camada de Rede	42
2.4.3.1	Padrão RPL	43
2.4.3.2	Formação de DODAG	44
2.4.3.3	Função Objetivo	46
3	METODOLOGIA, CENÁRIOS E ANÁLISE DE REDE FAN	48
3.1	Metodologia	48
3.2	Modelo de simulação	49
3.2.1	Cenários de simulação	49
3.2.2	Especificações em Cooja	50
3.2.3	Sequência de simulação	52
3.3	Modelo experimental	54
3.3.1	Protótipo experimental	54
3.3.2	Especificações técnicas dos equipamentos	56
3.3.3	Cenários dos experimentos	58
3.3.3.1	Primeiro cenário	58
3.3.3.2	Segundo cenário	59
3.3.3.3	Terceiro cenário	61
3.3.4	Medição das métricas de desempenho	62
3.3.5	Sequência de metodologia	64
4	RESULTADOS	67

4.1	Introdução	67
4.2	Resultados de simulação	67
4.2.1	Tempo de convergência da rede	67
4.2.2	Mensagens de controle da rede	69
4.2.3	Latência da rede	70
4.2.4	Taxa de Entrega de Pacotes	71
4.3	Resultados experimentais	72
4.3.1	Tempo de convergência da rede	75
4.3.2	Mensagens de controle para a convergência da rede	77
4.3.3	Mensagens de controle depois da convergência da rede	78
4.3.4	Latência da rede	79
4.3.5	Taxa de entrega de pacotes	80
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	82
6	APÊNDICE A	84
	BIBLIOGRAFIA	91

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Justificativa

Na atualidade, várias alianças de tecnologia têm se formado para fornecer soluções de redes de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) para aplicações de larga escala em redes de sensores sem fio com padrões abertos e certificados. Como exemplo disso, têm-se as alianças LoRa e Zigbee, cujas soluções e tecnologia são muito pesquisadas e avaliadas, especialmente os protocolos LoRaWAN e Zigbee, respectivamente (QADIR et al., 2018; BARONTI et al., 2007). Na área de pesquisa em comunicações, é necessário avaliar as diferentes tecnologias para identificar a sua aplicabilidade e limitações em diferentes aplicações e cenários, visando verificar vantagens como baixa latência, baixo consumo de energia, aproveitamento do espectro radioelétrico, cobertura e custo. Portanto, neste trabalho foi estudada a tecnologia da aliança *Wireless Smart Ubiquitous Network* (Wi-SUN), especificamente a solução apresentada para Rede de Área de Campo (FAN, do inglês *Field Area Network*), chamada Wi-SUN FAN (HEILE et al., 2017). No estado da arte, se tem poucas avaliações em comparação com as outras tecnologias, de acordo com pesquisa realizada no mês de Novembro de 2019 nas bases de dados Capes, *Science Direct*, *IEEE Xplorer* e *SCOPUS*, cujos resultados são mostrados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: PESQUISA POR PALAVRA-CHAVE EM DIFERENTES BASES DE DADOS

Palavras-chave no título ou resumo	Capes	Science Direct	IEEE Xplorer	SCOPUS
Wi-SUN FAN	2	0	4	4
LoRaWAN	168	18	405	582
Zigbee	2258	444	7628	10499

FONTE: AUTOR (2019)

O perfil Wi-SUN FAN suporta especificações para Redes Sem Fio de Baixa Potência e com Perdas (LLNs do inglês *Low Power and Lossy Networks*). Nestas redes os dispositivos requerem sistemas operacionais otimizados para uso em um ambiente cujos equipamentos

são caracterizados por restrições em termos de capacidade de hardware (processamento, memória, etc). Na camada de rede, o perfil FAN é baseado no protocolo IPv6 com adaptação *IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks* (6LoWPAN) (SHELBY et al., 2012). Para a formação da rede, adota-se a função *IPv6 Routing Protocol for LLNs* (RPL) (KHAN, 2012), a qual permite a formação da rede mediante o intercâmbio das mensagens de controle usando *Internet Control Message Protocol Version 6* (ICMPv6). O RPL utiliza diversas métricas para melhorar o custo de caminho dos nós. O Perfil Wi-SUN FAN foi projetado para suportar redes com alta densidade de nós.

A tecnologia Wi-SUN FAN está direcionada para redes de tipo *mesh*, o que significa que cada dispositivo em uma rede pode comunicar-se com seus vizinhos, os nós têm a função de repetidores e cada nó está conectado a um ou mais dos outros nós, o que permite que suas mensagens possam viajar longas distâncias através deles. Diferente das redes *mesh* como ZigBee, o perfil FAN foi projetado especificamente para cobrir distâncias maiores de 100 metros, com uma escala maior na área de cobertura. Diferentes das redes *mesh*, as redes da tecnologia LoRaWAN são de tipo estrela (SANTOS et al., 2016), onde os dispositivos finais orbitam um nó central dentro da rede. Uma comparação entre as tecnologias mencionadas é apresentada na Tabela 1.2.

Tabela 1.2: COMPARAÇÃO DE TECNOLOGIAS ZIGBEE, LoRaWAN e WI-SUN FAN

Descrição	ZigBee	LoRaWAN	Wi-SUN FAN
MAC / PHY	802.15.4	Proprietário	802.15.4
Frequência	915 MHz / 2.4 GHz	915 MHz	915 MHz
Taxa máxima de dados	40 / 250 kbps	50 kbps	300 kbps
Latência	0.015 - 0.03 s	1 - 16 s	0.02 - 1 s
Máxima largura de canal	600 kHz / 2 MHz	125 kHz	600 kHz
Modulação	BPSK / OQPSK	CSS / FSK	2FSK
Topologia	Estrela; Árvore; <i>Mesh</i>	Estrela	Estrela; Árvore; <i>Mesh</i>
Alcance máximo	100 m	Urbano: 5 km Rural: 15 km	1 - 5 km

FONTE: Modificado Wi-SUN Alliance (2017), Harada et al. (2017) e Qadir et al. (2018)

Os principais trabalhos da tecnologia Wi-SUN revisados estão relacionados principalmente nos estudos da camada física e de rede.

Em Harada et al. (2017) foi avaliado o desempenho da tecnologia Wi-SUN, considerando as camadas PHY e MAC (do inglês *Media Access Control*), através de simulações computacionais e medições reais. Em relação à camada MAC, foi feita uma comparação de desempenho entre os protocolos CSL (do inglês *Coordinated Sampled Listening*) e F-RIT (do inglês *Feathery-Receiver Initiated Transmission*), com ativação/desativação do pre-CS (do inglês *pre-Carrier Sense*) que são do tipo assíncrono. A comparação é realizada em termos da taxa de sucesso versus a taxa de solicitação de estabelecimento do link de comunicação para os diferentes protocolos, realizados por simulações em computador e cálculos teóricos. No protocolo CSL com ou sem pre-CS, as colisões entre os quadros de ativação de vários dispositivos aumentam à medida que a taxa de solicitações de estabelecimento de link de comunicação aumenta, quanto a taxa de sucesso diminui. No protocolo F-RIT se o pre-CS não for usado, é difícil aumentar a taxa porque ocorrem colisões entre os quadros de dados, ao usar o pre-CS a taxa de sucesso de transmissão é próxima a 100%. Na camada física trabalharam com dois módulos de rádio e um emulador de desvanecimento para medir o desempenho do PER (do inglês *Packet Error Rate*), utilizando modelos de desvanecimento de um canal Rayleigh e urbano GSM no emulador. Para atingir PER=10% exigidos pelo padrão, foram necessários -102 dBm e -100 dBm de potência recebida para a taxa de transmissão de 50 kbps e 100 kbps, respectivamente. No ambiente de desvanecimento multi-percurso foi impossível atingir um PER=10% com uma frequência Doppler de 34 Hz a 920 MHz, mas atinge um PER=10% com uma frequência Doppler de 0,4 Hz a 920 MHz. Isso significa que os dispositivos de rádio Wi-SUN podem ser usados nos serviços elétricos (medidores, sensores de linha, etc) em uma área urbana onde os sensores sejam fixos.

Mochizuki et al. (2016) fizeram experimentos com o sistema Wi-SUN em um ambiente urbano, utilizando uma estação base de alto desempenho instalada a uma altura de 22 m, visando expandir a distância de comunicação direta dos dispositivos com a estação base, por sua vez evitando a comunicação multi-salto, e reduzindo a carga dos dispositivos movidos a bateria. Eles utilizaram, além da estação base, dois dispositivos instalados a uma altura de 1,2 m e espaçamento das antenas de 270 mm, realizando medições de níveis

de sinal com e sem linha de visada em diferentes pontos da cidade de Tokyo. Verificaram que o aumento da potência de transmissão DL (do inglês *Down link*) na estação base é eficaz para obter uma área de comunicação mais ampla e estável no ambiente urbano, com cobertura de 4,33 vezes mais ampla em comparação com uma potência de 20 mW (distâncias de 150 m com 20 mW e 650 m com 250 mW), especialmente nos ambientes com linha de visada, para uma taxa de transmissão de 100 kbps na frequência de 920,9 MHz.

Ma et al. (2015) implementaram um protótipo experimental Wi-SUN combinando TVWS (do inglês *TV White Space*), onde aproveita os benefícios de TVWS que trabalha nas bandas licenciadas compatível com o padrão IEEE802.15.4m, baseados que Wi-SUN opera principalmente nas bandas não licenciadas. O protótipo implanta as especificações do TVWS, que oferece muitos canais, tendo mais recursos de espectro que podem ser disponibilizados para o sistema Wi-SUN, reduzindo assim o impacto degradante do congestionamento e interferência. Foram realizados experimentos na banda de 470-710 MHz, especificamente na frequência 671,14 MHz. Neste trabalho conseguiram que o protótipo cobrisse mais de 1 km de alcance, com uma taxa máxima de dados que pode atingir 800 kbps.

Kato (2015) realizou um estudo sobre a descrição no processo de padronização e certificação da tecnologia Wi-SUN, dirigida especialmente para o perfil ECHONET. O autor mostra os processos usados pela aliança Wi-SUN para a validação do padrão e define testes de conformidade e inter-operabilidade para as camadas físicas, MAC, rede e segurança.

Junjalearnvong et al. (2019) apresentam um modelo experimental multi-salto composto de um nó roteador de borda e quatro nós roteadores, verificando que o tempo necessário para alcançar o tempo de configuração dos nós é mais de 5 min ocasionalmente por cada salto. Ainda, fazem uma análise do processo de configuração dos módulos Wi-SUN FAN atuais para descobrir os pontos críticos e fatores que causam a configuração lenta. Eles estudam a relação entre o tempo de configuração da rede e a porcentagem do

tempo que um canal está ocupado para transmitir os quadros necessários para o processo de configuração. Os autores conseguiram diminuir o tempo dos saltos até 1 min, o que ocasiona uma melhora no desempenho da configuração de rede.

Junjalearnvong et al. (2017) propõem um novo algoritmo de roteamento baseado em ETX (do inglês *Expected Transmission Count*) para um nó móvel dentro do sistema Wi-SUN FAN. As alterações no algoritmo para o custo do caminho do nó pai são consideradas como o principal critério para escolher o nó pai preferido. O cálculo do custo do caminho, o cálculo da classificação e o anúncio do custo do caminho são idênticos ao algoritmo de roteamento convencional; no entanto, a seleção dos nós pais é aprimorada para ser compatível com um terminal móvel. A mudança dos nós receptores no algoritmo proposto com base na transição ETX é mais lenta que o algoritmo convencional. Isso permite que a fonte móvel transfira suavemente e escolha o nó receptor adequado em cada salto, resultando na taxa de sucesso de transmissão aprimorada, melhorando o desempenho contínuo de transmissão do nó móvel.

Comer et al. (2017) implementaram um banco de testes (*testbed*) de emulação para testar o comportamento do protocolo Wi-SUN FAN numa rede *mesh*. Nos nós do *testbed* foram usados o mesmo processador, memória, Sistema Operacional (SO) e pilha de protocolos que nos nós de rádio. A diferença entre os nós de rádio e do *testbed* é que os pacotes são encapsulados em quadros da *ethernet* para o *testbed*.

Em resumo, a partir da revisão do estado de arte verifica-se que são poucas publicações do protocolo Wi-SUN FAN. Neste sentido, ainda falta avaliar o desempenho do protocolo em profundidade para a identificação de problemas e proposta de métodos para superar os pontos fracos do protocolo. Por esse motivo neste trabalho foram realizadas duas formas de avaliações.

Na primeira avaliação utiliza-se o simulador Cooja que é uma ferramenta do SO Contiki-NG (KURNIAWAN, 2018), que permitiu fazer uma configuração da função RPL para uma escala de rede menor, dirigida ao protocolo Wi-SUN FAN na camada de rede.

Foram realizadas diferentes simulações em cenários com profundidades de redes de-

finalizadas, que permitiram ter uma avaliação inicial da formação da rede com o protocolo Wi-SUN FAN. Foram estudados três cenários com diferentes posicionamentos de nós, avaliou-se o tempo de convergência e mensagens de controle, que permitiram avaliar inicialmente o tempo necessário para a formação da rede e o tempo para início de envio de pacotes de dados. Além disso, o tempo de latência da rede e taxa de dados de pacotes são avaliados para cada cenário.

A segunda avaliação foi experimental e tratou da comunicação de nós com uma distribuição de rede do tipo *mesh* usando o protocolo Wi-SUN FAN em ambientes internos e externos.

Foram utilizados protótipos experimentais com placas desenvolvidas pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) com certificação da aliança Wi-SUN para o perfil FAN, os nós foram configurados com a pilha completa de Wi-SUN FAN, apoiados com programação baseada na linguagem C/C++. A comunicação entre os nós é testada nos modos de operação do perfil FAN com configurações de espaçamento de canal de 200 KHz e 400 KHz para avaliações em canal fixo e salto em frequência, na banda de 915 MHz-b atribuída para o Brasil. Realizaram-se avaliações tendo em conta as métricas de tempo de convergência da rede e quantidade de mensagens de controle na rede. Além disso, um fluxo de mensagens de dados foi gerado para a avaliação do tempo de latência da rede e da taxa de entrega de dados.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do projeto foi o de avaliar o desempenho da comunicação sem fio em uma rede *mesh* utilizando o protocolo Wi-SUN FAN. Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Revisão bibliográfica do estado da arte relacionado aos principais conceitos abordados nesta dissertação, como são o protocolo Wi-SUN, perfil Wi-SUN FAN, camadas do protocolo e simulador Cooja;

- Utilização do simulador Cooja para uma avaliação inicial da formação da rede, configuração do RPL para uma escala de rede menor no protocolo Wi-SUN FAN.
- Escolha do protótipo de *hardware* mais adaptado, configuração da aplicação na pilha Wi-SUN FAN para carregar no protótipo e teste de funcionamento;
- Análise com medidas experimentais das métricas de desempenho da rede *mesh* de Wi-SUN FAN em ambientes internos e externos, como são o tempo de convergência da rede, quantidade de mensagens de controle na rede, latência da rede e taxa de entrega de dados;

1.3 Estrutura da Dissertação

O restante da dissertação está organizado da seguinte forma: No Capítulo 2 são descritos os fundamentos teóricos sobre a tecnologia Wi-SUN FAN. No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada neste trabalho, assim como o protótipo de *hardware* utilizado para os experimentos. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais e desafios futuros.

Por fim, apresentamos abaixo artigo publicado relacionado com o tema desta dissertação, o qual explora o conceito da camada de rede de Wi-SUN FAN.

1. A. Ambrosio, R. J. Riella, L. M. Iantorno e E.M.G. Fernández, "Avaliação de Métricas de Desempenho da Rede no Sistema Wi-SUN FAN usando Simulador Cooja", publicado **XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2019)**, Petrópolis RJ, Brasil, Set 29 - Oct 02, 2019

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Internet das Coisas

A Internet das Coisas, é um paradigma tecnológico concebido como uma rede global de máquinas e dispositivos de máquinas capazes de interagir entre si. A IoT é reconhecida como uma das áreas mais importantes da tecnologia futura e está ganhando grande atenção de uma gama de indústrias. A IoT é definida também como uma rede complexa que conecta milhares de dispositivos e/nós de sensores com seres humanos, com uma infraestrutura de várias tecnologias que usa vários protocolos para conectar diferentes elementos e plataformas.

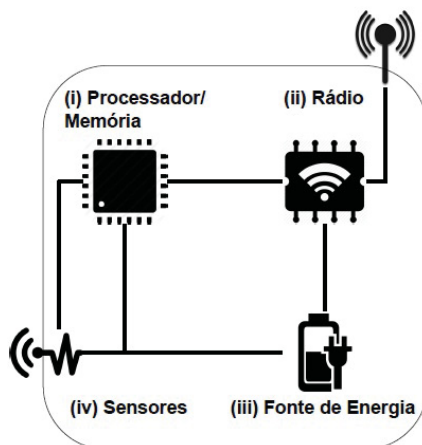
Neste cenário, a possibilidade de novas aplicações é crescente, e surgem os desafios de conectar à Internet objetos com restrições de processamento, memória, comunicação e energia. E enquanto são criadas novas aplicações para IoT, os dados providos pelos objetos agora podem apresentar imperfeições (calibragem do sensor), inconsistências (fora de ordem) e serem de diferentes tipos (gerados por pessoas, sensores físicos, fusão de dados). Assim, as aplicações e algoritmos devem ser capazes de lidar com esses desafios sobre os dados.

2.1.1 Arquitetura básica dos dispositivos para IoT

A arquitetura básica dos objetos inteligentes popularizados no ambiente de IoT é composta por quatro unidades como é indicado por Santos et al. (2016) e mostrada na Figura 2.1: (i) Processador/memória: composto de uma memória interna para armazenamento de dados e programas, um microcontrolador e um conversor analógico-digital para receber sinais dos sensores. A CPU não apresenta alto poder computacional, as características desejáveis para esta unidade são consumo reduzido de energia e ocupar menor

espaço. (ii) Comunicação: consiste em pelo menos um canal de comunicação com ou sem fio. (iii) Energia: responsável por fornecer energia aos componentes do objeto inteligente, normalmente é uma bateria e um conversor AC-DC e (iv) Sensores/atuadores: Realiza o monitoramento do ambiente no qual o objeto se encontra, os sensores capturam valores como temperatura, umidade, pressão e presença.

Figura 2.1: ARQUITETURA DOS DISPOSITIVOS PARA IoT



FONTE: Santos et al. (2016)

2.1.2 Tecnologias de comunicação sem fio

Apresentam-se de forma geral as tecnologias de comunicações sem fio que também formaram alianças visando soluções principalmente para aplicações no setor de serviços de utilidade pública, como são infraestrutura de medição avançada e automação de distribuição, bem como para aplicações em cidades inteligentes, iluminação de ruas, gerenciamento de tráfego e outras aplicações de infraestrutura urbana.

- **ZigBee**, é um padrão que pertence à aliança Zigbee, organização responsável por gerir o protocolo e garantir a interoperabilidade entre dispositivos. ZigBee é baseado na especificação do protocolo IEEE 802.15.4 para camada de enlace de dados. As suas principais características são a baixa vazão, baixa energia e baixo custo. O ZigBee opera principalmente na frequência 2,4 GHz, mais também pode operar nas frequências, 868 MHz e 915 MHz. Esta tecnologia pode alcançar uma taxa

máxima de 250 kbps. O ZigBee também tem a característica que os dispositivos entre em modo *sleep* para economizar energia, o qual permite estender a vida útil do dispositivo. Também pode ser usado com o protocolo IPv6 e usar a topologia *mesh*. Em referência com as aplicações é utilizado em soluções residenciais e comerciais.

- **LoRaWan**, é uma especificação que foi projetada para redes de longo alcance e baixa potência, formada por dispositivos operados por bateria e com capacidade de comunicação sem fio. Opera nas frequências não licenciadas, as mais usadas são: 109 Mhz, 433 MHz, 866 MHz e 915 MHz. Esta tecnologia pode alcançar taxas de comunicação entre 300 bps a 50 kbps. A topologia utilizada normalmente é tipo estrela.
- **Wi-SUN**, é um padrão que pertence à aliança Wi-SUN, organização responsável por gerir o protocolo e garantir a interoperabilidade entre dispositivos desta tecnologia. As suas características principais são baixa energia e baixo custo. Pode trabalhar em topologias de rede tipo estrela e *mesh*. Pode alcançar velocidades de taxas de comunicação entre 50 kbps a 300 kbps. Os dispositivos podem ser configurados em diferentes faixas de frequência de acordo à regulação de cada região, por exemplo: Estados Unidos nas frequências 863-870 MHz e 870-876 MHz, Japão nas frequências 920-928 MHz, Brasil nas frequências 902-907,5 e 915-928 MHz, etc. O Wi-SUN será abordado em detalhes mais adiante.

2.1.3 SO para rede de objetos inteligentes

Assim como os computadores, os objetos inteligentes para estas redes também precisam de sistemas operacionais apropriados à sua capacidade de hardware que é limitada. Os sistemas operacionais devem ser muito menores e consumir menos recursos computacionais. A continuação, descrevem-se dois SOs: Contiki e TinyOS que são de código aberto.

- **Contiki**, é um SO leve para sistemas embarcados de rede, que fornece mecanismos

para o desenvolvimento de softwares para IoT e mecanismos de comunicação que permitem a comunicação dos dispositivos inteligentes. Além disso, o Contiki também fornece bibliotecas para a alocação de memória, abstrações de comunicação e mecanismos de redes de rádios de baixa potência. O SO e suas aplicações são implementados na linguagem C.

- **TinyOS**, é um SO para redes de sensores e objetos inteligentes. TinyOS possui um modelo de programação baseado em componentes, codificado pela linguagem NesC, um dialeto da linguagem C. O modelo de programação fornecido em NesC se baseia em componentes que encapsulam um conjunto específico de serviços, e se comunicam por meio de interfaces, otimiza os limites das memórias das redes de sensores.

2.1.4 Simuladores

Os simuladores são muito úteis durante a avaliação de arquitetura e protocolos para redes em geral. Um simulador pode modelar diferentes cenários, especificando características de cada elemento da rede, bem como enlace de comunicação. Nesta seção descrevem-se alguns simuladores que possuem suporte para IoT.

- **Cooja**, mais que um simulador é um emulador, parte do SO Contiki, desenvolvido na linguagem Java. As simulações consistem em cenários onde cada nó possui um tipo de memória e um número de interfaces. Um nó Cooja é um sistema Contiki real compilado e executado.
- **NS-2/NS-3**, ns-2 é um simulador de eventos discretos para rede de computadores de código aberto. As simulações para ns-2 são compostas por código em C++ e scripts Otcl. O código é usado para modelar o comportamento dos nós, enquanto os scripts controlam a simulação e especificam aspectos adicionais, como a topologia da rede. O ns-3 também é um simulador de eventos discretos, mas não é uma extensão de seu antecessor, ns-2. Assim como o ns-2, o ns-3 adota a linguagem C++ para a

implementação dos códigos, mas não usa mais scripts Otcl. Com isso, as simulações podem ser implementadas em C++, com partes opcionais implementadas usando Python.

- **Tossim**, é um simulador de eventos discretos do SO TinyOS. Ao invés de compilar uma aplicação TinyOS para um sensor, os usuários podem compilá-los para o Tossim, que é executado em um PC.

2.2 SO Contiki-NG

O SO Contiki, é uma plataforma que foi criada por Adam Dunkels em 2002. Contiki utiliza *Protothread*, que combina programação de multi-processo e programação orientada a eventos. Foi desenvolvida em código C e suas aplicações utilizam a linguagem C para escrever os programas. Contiki tem dois versões: Contiki-OS e Contiki-NG, a nova versão Contiki-NG autodenominada “SO para dispositivos de IoT para a seguinte geração”. Ele fornece as pilhas de comunicação e protocolos de padrão de baixo consumo de energia como: IPv6/6LoWPAN e RPL. O Contiki-NG pode ser encontrado em seu repositório². Na documentação de Contiki utiliza-se a terminologia "mote" para os dispositivos inteligentes, que são formados principalmente por microcontrolador (MCU), sensor/atuador e módulo sem fio.

2.2.1 Estrutura do diretório de Contiki-NG

Contiki-NG contém os diretórios chamados (ZIKRIA et al., 2018): *arch*, *examples*, *os*, *tests* e *tools*. O diretório *arch* contém as pastas *cpu*, *dev* e *plafform* que contém as especificações dos MCUs, listas de todos os dispositivos e chips externos, listas de todas as especificações das plataformas e *drivers*, respectivamente. O diretório *examples* consiste em uma lista de arquivos prontos para construir exemplos. O diretório *os* contém as principais pastas e bibliotecas que conforma o núcleo de Contiki-NG que suporta os

²No sítio da Internet <https://github.com/contiki-ng/contiki-ng>

diferentes processos tais como *dev*, *lib*, *net*, *services*, *storage* e *sys*. O diretório *tests* incorpora todos os testes de regressão noturno. O diretório *tools* contém ferramentas intermitentes, depuração e simulação, nesta pasta encontra-se a ferramenta Cooja. Na Tabela 2.1 é mostrada a estrutura do diretório de Contiki-NG.

Tabela 2.1: ESTRUTURA DO DIRETORIO DE CONTIKI-NG

Diretório	Descrição
<i>arch</i>	Especificações MCU, dispositivos e chips externos, especificações das plataformas e drivers
<i>examples</i>	Arquivos para construir exemplos
<i>os</i>	Núcleo de Contiki-NG que suporta os diferentes processos
<i>tests</i>	Vários testes de programas
<i>tools</i>	Intermitentes, depuração e simulação

FONTE: Modificado Zikria et al. (2018)

2.2.2 Simulador Cooja

O simulador Cooja é uma ferramenta que permite construir uma simulação em Contiki-NG. Este simulador tem arquivos como exemplos. Os exemplos tomados como referência que utilizam o protocolo RPL foram:

- **Arquivo *rpl-udp***: este exemplo utiliza uma comunicação broadcast via protocolo UDP, o que fornece uma comunicação em uma área local entre um servidor e um cliente. Este exemplo é uma rede independente de RPL.
- **Arquivo *rpl-border-router***: este exemplo utiliza o padrão 6LoWPAN, este padrão permite que os dispositivos dentro da rede local se comuniquem com outros sistemas externos. O 6LoWPAN usa IPv6 como identidade para todos os dispositivos.

Nos dois exemplos, o protocolo RPL é usado para a formação da rede. A responsabilidade do 6LoWPAN é a comunicação entre a rede interna e externa. 6LoWPAN registrará todos os endereços dos dispositivos da rede conectados.

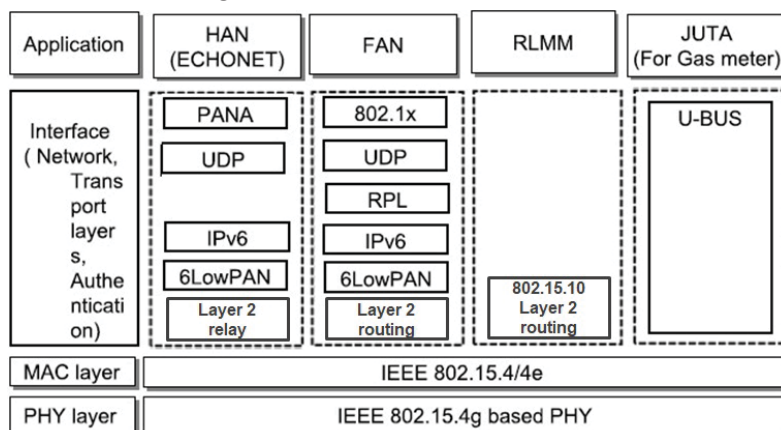
Assim, seja um sistema externo como um servidor e precise enviar uma mensagem para um dispositivo na rede local, o roteador com 6LoPWAN encaminhará a mensagem para o dispositivo.

2.3 Aliança Wi-SUN

A aliança Wi-SUN foi estabelecida em Abril de 2012 em Tokyo, como iniciativa do Instituto Nacional para Tecnologia de Comunicações e Informações (NICT, do inglês *National Institute of Information and Communications Technology*). A aliança Wi-SUN procura promover padrões certificados para diferentes aplicações de redes sem fio, oferecendo soluções para serviços públicos, cidades inteligentes e IoT.

Na Figura 2.2, são mostrados os perfis da aliança Wi-SUN descritos por Harada et al. (2017), os quais são: ECHONET (do inglês *Energy Conservation and Home Network*), FAN, RLMM (do inglês *Resource Limited Monitoring and Management*) e JUTA (do inglês *Japan Utility Telemetry Association*).

Figura 2.2: PERFIS DE Wi-SUN



FONTE: Harada et al. (2017)

- **ECHONET**, perfil que desenvolve especificações de um aplicativo oficial japonês de gerenciamento de energia elétrica, atualmente é dirigido para soluções de medidores inteligentes e para criar casas inteligentes;
- **FAN**, que desenvolve especificações para redes de campo e suporta LLNs.

- **RLMM**, que é um perfil em desenvolvimento para aplicação em sistemas tais como agricultura e monitoramento de desastres. A diferença com o perfil FAN está baseada em comunicações non-IP para reduzir o consumo de energia;
- **JUTA**, que está dirigido para uma aplicação oficial do Japão, como é a comunicação de medidores inteligentes de gás chamado sistema U-BUS Air baseados no padrão do mesmo nome.

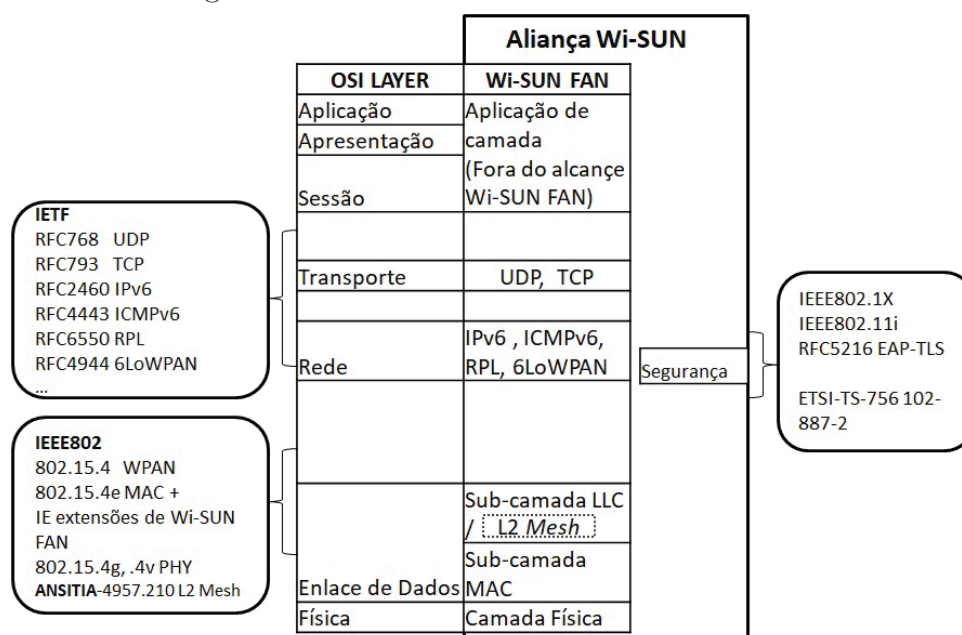
2.4 Perfil Wi-SUN FAN

As especificações do perfil Wi-SUN FAN são baseadas em vários protocolos do IETF (do inglês *Internet Engineering Task Force*), IEEE (do inglês *Institute of Electrical and Electronic Engineers*) (IEEE802.15.4, 2015) e ANSI (do inglês *American National Standards Institute*)/TIA (do inglês *Telecommunications Industry Association*), suportando LLNs.

A Figura 2.3 apresenta a pilha do perfil Wi-SUN FAN, comparada com o modelo OSI (do inglês *Open System Interconnection*). A camada física é baseada nos padrões IEEE802.15.4, .4g e .4v, que fornece comunicação bidirecional com alta taxa de dados (até 300 kbps) e baixa latência. A subcamada MAC baseia-se no IEEE 802.15.4e, com elementos de informação (IEs) que são definidos pelo Wi-SUN FAN e a subcamada LLC (do inglês *Logical Link Control*) fornece o serviço de despacho com suporte para 6LoWPAN e serviço opcional L2 *mesh* baseado no MHDS (do inglês *Multi-Hop Delivery Service*) que é uma alternativa de roteamento o qual não será desenvolvido neste trabalho. A camada de rede é IPv6 com adaptação 6LoWPAN, suporta RPL e utiliza ICMPv6 para as mensagens de controle. O WiSUN FAN oferece suporte a topologias estrela e *mesh*, assim como implementações híbridas de estrela/*mesh*. As especificações FAN fornecem serviços na camada de transporte baseados em IPv6 para UDP (do inglês *User Datagram Protocol*) e TCP (do inglês *Transmission Control Protocol*). Em termos de segurança, o controle de acesso está baseado no padrão IEEE802.1X e EAP-TLS. As camadas superiores, como

sessão, apresentação e aplicação, estão fora do alcance do perfil Wi-SUN FAN.

Figura 2.3: PILHA DO PERFIL Wi-SUN FAN



FONTE: Modificado Wi-SUN Alliance (2017)

2.4.1 Camada Física

A camada física se deriva das especificações do IEEE802.15.4g e .4v, dirigidas para as especificações físicas para os dispositivos SUN (do inglês *Smart Ubiquitous Network*) com diferentes taxas de dados para diferentes regiões. No caso do Brasil, de acordo com o ente regulador, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), podem ser utilizadas sem exclusividade as faixas de frequências de 902 - 907,50 MHz e 915 - 928 MHz. Na Tabela 2.2 apresentam-se as especificações físicas de acordo com cinco modos de operação.

Tabela 2.2: ESPECIFICAÇÕES FÍSICAS DE Wi-SUN FAN

Faixa de Frequência (MHz)	Modo de operação	Symbol Rate (ksymbol/s)	Modulação	Índice de Modulação	Espaçamento de canal (kHz)	Total de canais	Primeira frequência (MHz)	Sensibilidade de recepção* (dBm)	Potência máxima** (dBm)
902-907,5 e 915-928	1b	50	2FSK	1.0	200	90	902.2	-97	30
	2a	100	2FSK	0.5	200	90	902.2	-94	30
	3	150	2FSK	0.5	400	43	902.4	-92	30
	4a	200	2FSK	0.5	400	43	902.4	-91	30
	5	300	2FSK	0.5	600	27	902.6	-89	24

* Cálculo teórico de acordo com a IEEE802.15.4-2015 seção 20.6.7

**Publicado no Ato nº 14448 - ANATEL de 04 de dezembro de 2017, seção 10.2.5

FONTE: Modificado Wi-SUN Alliance (2017)

As frequências centrais da faixa para o Brasil, definem-se de acordo com:

$$F_C = F_{C_0} + N_C S_C, \quad (2.1)$$

onde F_C é a frequência central de canal, F_{C_0} é a primeira frequência central, N_C é o número de canal e S_C é o espaçamento de canal. No caso de Wi-SUN FAN, se pode trabalhar com espaçamento de canal de 200 kHz para os canais de 0-25 e 65-128 fazendo um total de 90 canais, tendo a exclusão por indicação do perfil dos canais 26 e 64. O espaçamento de canal de 400 kHz é aplicado aos canais de 0-11 e 33-63 fazendo um total de 43 canais, tendo a exclusão dos canais 12 e 32. Por último o espaçamento de canal de 600 kHz é considerado para os canais de 0-6 e 22-41 fazendo um total de 27 canais, tendo a exclusão dos canais 7 e 21.

2.4.2 Camada de Enlace de Dados

A camada de enlace de dados fornece o controle e gerenciamento da camada física e serviços de transferência e gerenciamento para a camada de rede. Esses serviços no perfil Wi-SUN FAN são subdivididos na sub-camada MAC e LLC.

A sub-camada LLC fornece o serviço de despacho de protocolo que suporta 6LoWPAN e serviço opcional L2 *mesh*. A sub-camada MAC opera no modo não-*beacon*, que não faz uso de *beacons* (sinalizadores), as comunicações são assíncronas e um dispositivo se comunica com o coordenador apenas quando precisa. A diferença do modo de operação de *beacon* habilitado, que faz uso periódico de quadros chamados *beacons*, que são pacotes de controle que delimitam os quadros utilizados pelo coordenador para sincronizar com os demais dispositivos da rede.

No modo não-*beacon* não existe o período livre de contenção, todo o acesso ao canal opera usando o modo do período de acesso à contenção, baseados no *unslotted CSMA/CA* (do inglês *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), o qual não requer a transmissão de beacon (GUGLIELMO et al., 2014). Os nós usam o endereço MAC

baseado em EUI-64 como está definido no IEEE802.15.4 (2015). Os *frames* ou quadros de dados e de reconhecimento são usados e estendidos com um conjunto de IEs definidos pelo perfil Wi-SUN FAN.

2.4.2.1 Descoberta e Junção

A sub-camada MAC utiliza dois mecanismos principais para suportar as funções descobertas e junção no perfil Wi-SUN FAN baseadas no *Trickle Timer* (LEVIS; CLAUSEN, 2011):

- A transmissão de quadros de Anúncio/Solicitação da Rede de Área Pessoal (PAN, do inglês *Personal Area Network*) fornece informações mínimas de texto puro (não criptografado), permitindo que o nó de junção descubra e escolha entre possíveis PAN disponíveis.
- A transmissão de quadros Configuração/Solicitação da PAN contém informações completas sobre o PAN: chaves de segurança ativas, programação de transmissão, detecção e alteração, etc.

2.4.2.2 Formato de quadros

No processo de descoberta e junção, um nó deve executar um processo de configuração para descobrir seus vizinhos e participar de um PAN apropriado. O mecanismo de descoberta e junção é suportado pela troca dos quadros cujas transmissões são controladas pelo *Trickle Timer*. Na sub-camada MAC, o perfil Wi-SUN FAN define sete formatos de quadros.

- a) **Anúncio de PAN (PA, do inglês *PAN Advertisement*)**, que é transmitido pelos nós para fornecer as informações mínimas necessárias para que um nó de junção possa descobrir e selecionar um dos PANs disponíveis.

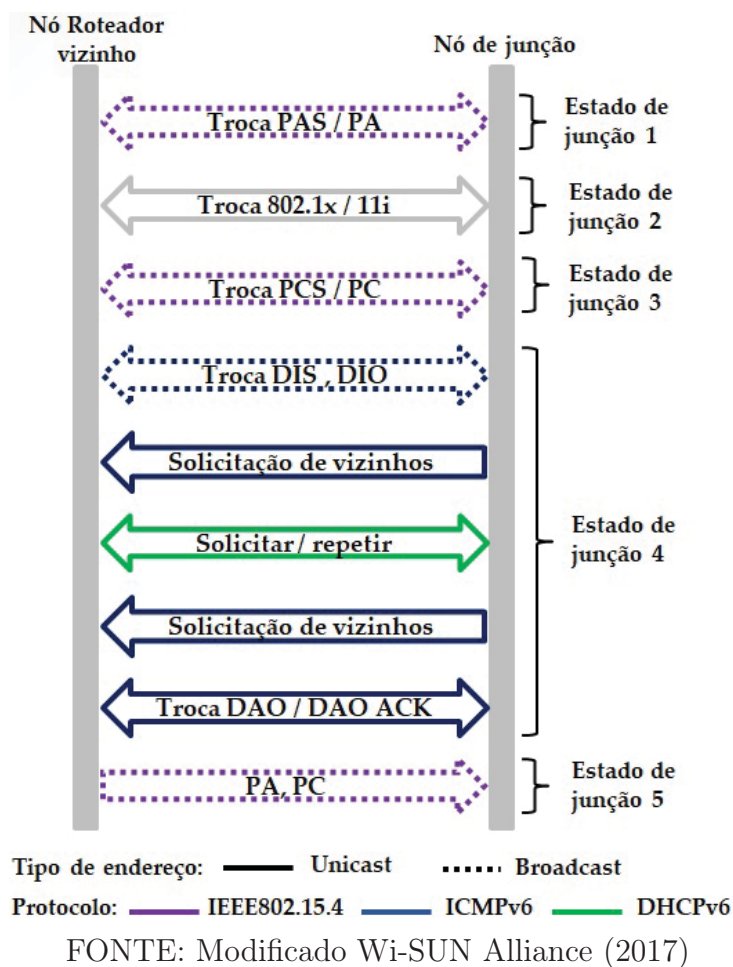
- b) **Solicitação de Anúncio de PAN (PAS, do inglês *PAN Advertisement Solicit*)**, que é transmitida por um nó de junção para limitar a taxa na qual, os nós vizinhos transmitem PAs. O quadro PAS é transmitido como texto não criptografado, pois o nó ainda não estabelece uma associação de segurança com o PAN.
- c) **Configuração de PAN (PC, do inglês *PAN Configuration*)**, que é transmitida por um nó para informar a seus vizinhos os agendamentos de salto de canal, chaves de grupo ativo, hora atual e outros detalhes relacionados à operação segura do PAN.
- d) **Solicitação de Configuração de PAN (PCS, do inglês *PAN Configuration Solicit*)**, que é usada por um nó para regular a taxa na qual os nós vizinhos transmitem seus PCs.
- e) **Dados de Aplicação de Camada Superior (ULAD, do inglês *Upper Layer Application Data*)**, que é usado para transportar dados de aplicativos de nível superior entre nós FAN. Tem configuração para *Unicast* e *Broadcast*.
- f) **Reconhecimento (ACK, do inglês *Acknowledgment*)**, é usado para confirmar a recepção de um quadro de dado.
- g) **EAPOL (do inglês *Extensible Authentication Protocol over LAN*)**, que é usado para transportar mensagens de PDU EAPOL, que são usados para processamento de autenticação adicional.

2.4.2.3 Estados de junção

Os nós na rede Wi-SUN FAN, após a ativação, fazem a transição entre cinco estados de junção para sua operação na rede, como mostrado na Figura 2.4 e descrito a seguir.

- a) **Estado de junção 1 (Seleção da PAN)**, o nó não possui informações sobre vizinhos ou PANs disponíveis. Para descobrir os PANs disponíveis, um nó transmite

Figura 2.4: FLUXO DAS MENSAGENS NO NÓ DE JUNÇÃO



e escuta quadros PASs e PAs respectivamente. O nó deve selecionar o destino EAPOL e fazer a transição para ingressar no estado de junção 2.

- b) **Estado de junção 2 (Autenticação)**, o nó executa autenticação, aquisição da chave do grupo (GTK) e fluxo de segurança IEEE802.1x/802.11i proporcionado pelo Roteador de Borda na PAN para ingressar no seguinte estado de junção 3. Se a autenticação e a aquisição de chave não forem executadas com êxito, o nó deverá fazer a transição novamente para ingressar no estado de junção 1.
- c) **Estado de junção 3 (Adquirir configuração da PAN)**, após o recebimento da descryptografia bem-sucedida de um quadro de PC, o nó deve designar a fonte do quadro de PC como sua fonte inicial para a transmissão *broadcast*, deve fazer a transição para o estado de junção 4. No entanto, se o nó não puder receber e des-

criptografar uma estrutura de PC, então deverá retornar novamente para ingressar no estado de junção 1.

- d) **Estado de junção 4 (Configuração de roteamento)**, o nó ao entrar neste estado é um membro protegido em sua PAN e adquiriu a configuração da PAN. O nó deve estabelecer a conectividade na camada 3 ou camada 2 (de acordo com o roteamento de pacotes elegido). A operação da conectividade da camada 3 é especificada pelo protocolo RPL. O nó deve fazer a transição para ingressar no estado de junção 5.
- e) **Estado de junção 5 (Operacional)**, o nó está no modo operacional na rede FAN, mas deve transmitir quadros de PA e PC em um intervalo direcionado pelo *trickle timer* para manter a conexão com sua PAN. Deve-se considerar que o nó Roteador de Borda sempre é residente nesse estado.

2.4.2.4 Salto em Frequência

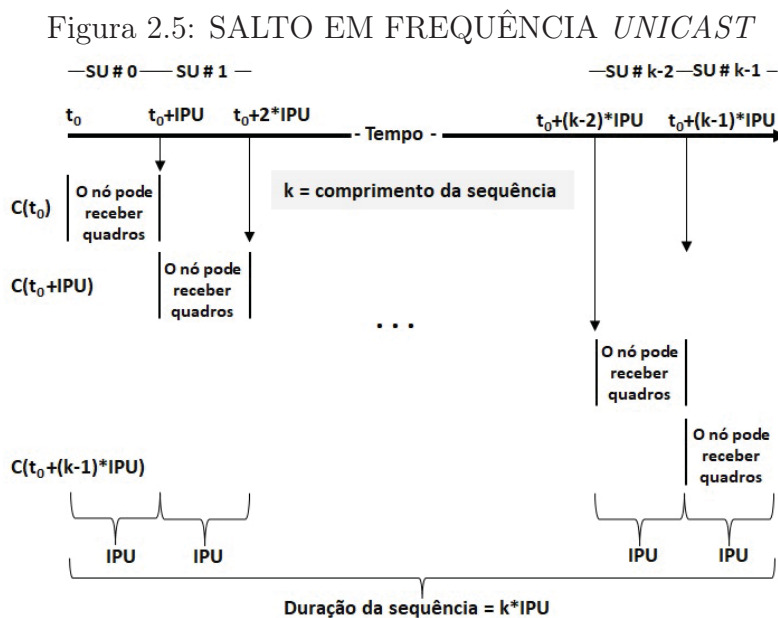
A sub-camada MAC suporta saltos de canais vizinhos sincronizados para transmissões de *frames* em *Unicast* e *Broadcast* que são sequências pseudoaleatória definidas pelo tipo de função de canal. O número total de canais PHY disponíveis depende da banda regional selecionada e do espaçamento entre canais. A utilização do salto em frequência oferece três vantagens principais como: resistência a interferências, dificuldade de interceptação e compartilhamento de banda com diversos tipos de transmissores convencionais de interferência mínima.

Uma função de canal define o método usado para determinar que a partir da lista de canais PHY disponíveis, o canal específico no qual um nó está operando em um determinado momento. Múltiplas funções de canal são suportadas na subcamada MAC (ALLIANCE, 2017): TR51CF (do inglês *TR51 Channel Function*), DH1CF (do inglês *Direct Hash Channel Function*), canal fixo e canais definidos pelo fornecedor os quais podem suportar as operações *unicast* e *broadcast*.

Um nó pode adicionalmente anunciar um conjunto de canais a serem excluídos de

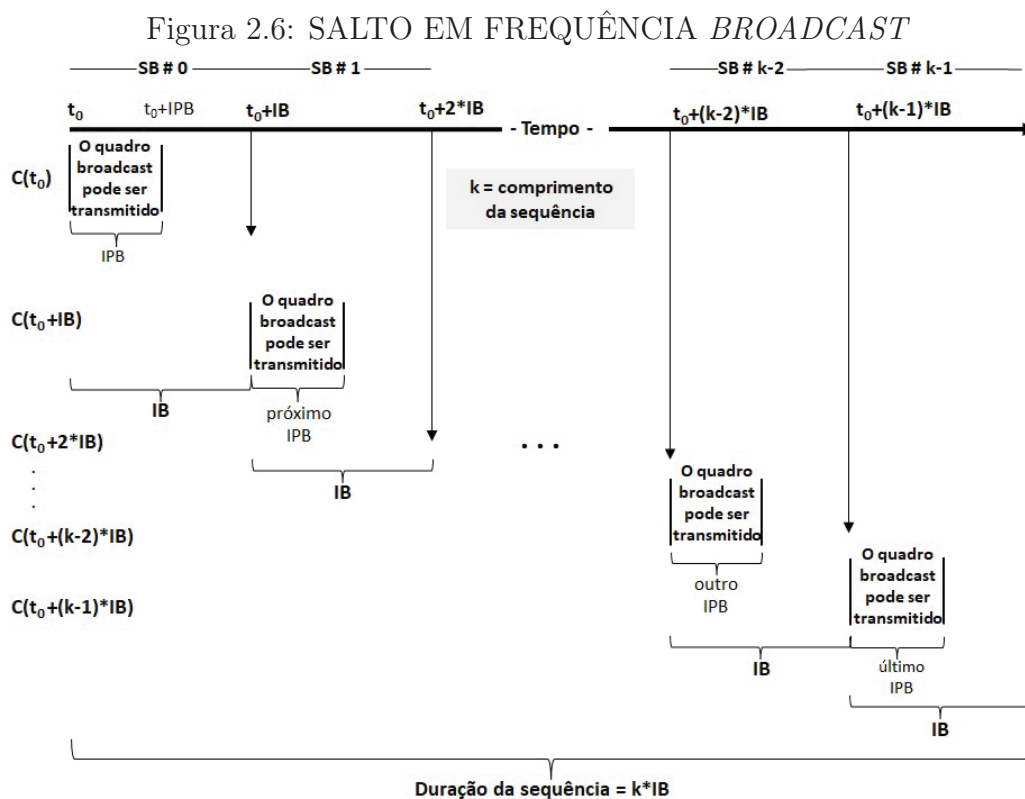
sua sequência de salto. Cada nó anuncia seus agendamentos de canal com informações necessárias para que o nó vizinho determine com que canal um nó estará operando a qualquer momento. O modo de operação de canal fixo é suportado para situações em que o salto de canal não é desejado.

O salto em frequência *unicast* é direcionado ao receptor, com a sequência de salto em frequência *unicast* derivada do endereço EUI-64 do nó e do conjunto de canais disponíveis. Um nó aprende uma programação de escuta *unicast* do vizinho recebendo as informações da programação *unicast* anunciadas por esse vizinho. A programação de escuta *unicast* define quando um nó poderá receber informação em cada canal em sequência. O tempo durante o qual o nó estará escutando é chamado "intervalo de permanência". A sequência de salto em frequência *unicast* pode ser pensada como uma sequência repetida de intervalos de permanência ou *slot*. O relacionamento entre o *slot unicast* (SU), o intervalo de permanência *unicast* (IPU), a função de canal $C(t)$ e a duração da sequência é mostrada na Figura 2.5.



O salto em frequência de *broadcast* pode ser pensado como uma sequência repetida de intervalos de *broadcast* ou *slots*. O relacionamento entre o *slot broadcast* (SB), o intervalo de permanência *broadcast* (IPB), o intervalo de *broadcast* (IB), a função de canal $C(t)$ e

a duração da sequência é mostrada na Figura 2.6.



FONTE: Modificado Wi-SUN Alliance (2017)

Na Tabela 2.3 são mostrados os parâmetros principais, que devem ser tidos em consideração na configuração da camada de enlace de dados do perfil Wi-SUN FAN.

Tabela 2.3: ESPECIFICAÇÕES PRINCIPAIS DA CAMADA DE ENLACE DE DADOS

Função ou Método	Especificação selecionada
Endereço MAC	EUI-64
Controle de acesso	Modo não beacon (Comunicações assíncronas)
Método de acesso	<i>unslotted</i> CSMA-CA
Função de canal	TR51CF, DH1CF, Canal fixo, definida pelo fornecedor

FONTE: Autor (2019)

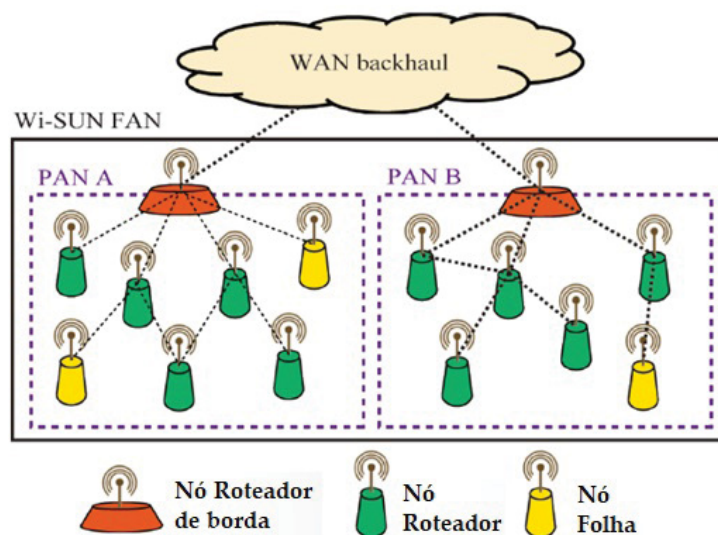
2.4.3 Camada de Rede

A especificação Wi-SUN FAN define para o roteamento de pacotes IPv6: o RPL obrigatório na camada de rede, e similar a outras tecnologias, o Wi-SUN FAN classifica os dispositivos de acordo com a sua função dentro da rede, classificando-os em três modos (JUNJALEARNVONG et al., 2017):

- a) **Roteador de Borda**, é o nó que permite a interconexão da PAN com a WAN (do inglês *Wide Area Network*), onde cada PAN contém um Roteador de Borda que mantém as informações de roteamento de origem para os outros nós. Fornece a informação de autenticação de nós e gerenciamento de chaves.
- b) **Roteador**, é o nó que fornece o encaminhamento de pacotes para cima e para baixo, e que também fornece os serviços de gerenciamento de segurança e endereço.
- c) **Folha**, é o nó que fornece capacidades mínimas como: descobrir e entrar na PAN, enviar e receber pacotes de dados.

No roteamento da camada de rede, que contém um ou mais PANs, os dispositivos da rede assumem uma das três funções indicadas. Na Figura 2.7 ilustra-se um exemplo de roteamento na camada rede do perfil Wi-SUN FAN, onde duas PANs com seu respectivo nó Roteador de Borda fazem a interconexão dos nós Roteadores e Folhas com a WAN.

Figura 2.7: EXEMPLO DE ROTEAMENTO NA CAMADA DE REDE Wi-SUN FAN



FONTE: JUNJALEARNVONG et al. (2017)

2.4.3.1 Padrão RPL

Os nós no Perfil Wi-SUN FAN utilizam principalmente o padrão RPL, o qual é flexível para permitir a construção e manutenção de rotas na rede. No RPL a rede é organizada em

forma de grafos criando uma topologia chamada DAG (do inglês *Direct Acyclic Graph*), composto por um ou mais nós raízes (Roteador de Borda), onde a partir deles, os grafos serão divididos em nós filhos (Roteador ou Folha) que se comunicarão com o nó raiz através de mensagens DODAG (do inglês *Destination Oriented DAG*). Para criar o grafo de topologia, o RPL usa as seguintes mensagens de controle de tipo ICMPv6:

- a) **DIO** (do inglês *DODAG Information Object*), é o portador de informações sobre a instância RPL e suas configurações.
- b) **DIS** (do inglês *DODAG Information Solicitation*), são emitidas por nós que desejam conectar-se a uma rede para solicitar a mensagem DIO de um nó RPL.
- c) **DAO** (do inglês *Destination Advertisement Object*), é usado para propagar as informações sobre o destino para os nós ascendentes.

2.4.3.2 Formação de DODAG

Para a formação de um grafo RPL deve construir-se o DODAG seguindo o processo seguinte:

- a) Escolha dos nós que serão configurados como raízes DODAG e possuirão a configuração DODAG.
- b) Esses nós devem anunciar sua configuração, sua afiliação a um DODAG e seu custo de roteamento por meio da difusão de mensagens DIO. As informações mínimas que uma mensagem DIO deve transmitir são as seguintes:

RPLInstanceID, é um identificador exclusivo para uma instância RPL que identifica um ou mais DODAGs. Uma rede pode ser formada por múltiplas instâncias onde cada uma delas identifica um DODAG e terá definido sua própria Função Objetivo (OF, do inglês *Objective Function*). O conjunto de DODAGs identificado por um *RPLInstanceID* é conhecido como *RPLInstance* e todos os DODAGs da mesma instância RPL terão o mesmo OF.

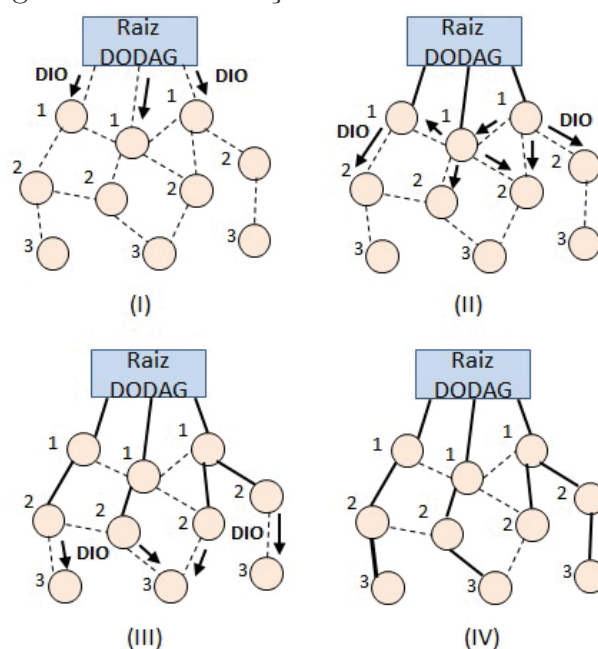
DODAGID, parâmetro que é uma instância RPL na qual a combinação de *RPLInstanceID* e *DODAGID* identifica exclusivamente um DODAG dentro da rede. Uma instância RPL pode conter vários DODAGs, nos quais cada um tem seu próprio ID.

DODAG Version Number, que é um parâmetro usado pelo nó raiz para reconstruir o DODAG.

Rank, que permite conhecer a posição de cada nó em relação ao DODAG raiz ou ao nó raiz, para que seu valor aumente se ele se mover do nó raiz para os nós filhos. Essa classificação é calculada a partir de uma OF, que usa uma métrica para determinar a conveniência do nó, por exemplo, para escolher o próximo melhor salto para alcançar o nó raiz e minimizar seu gasto de energia.

- c) Para iniciar a formação do DODAG, o nó raiz envia os DIOS do tipo *broadcast* aos seus vizinhos, sendo o único capaz de realizar este processo e nenhum outro nó poderá fazê-lo, como é ilustrado na Figura 2.8 (I). Durante este processo de disseminação da mensagem, os campos *RPLInstanceID* e *DODAGID* permanecerão inalterados durante a formação da topologia, enquanto o único campo que será alterado cada vez que uma mensagem DIO atravessa a rede, será o *rank*.

Figura 2.8: FORMAÇÃO DE GRAFO DODAG



FONTE: Modificado JUNJALEARNVONG et al. (2017)

Quando um nó na rede recebe a mensagem DIO, ele mantém um conjunto de nós vizinhos candidatos escolhendo aqueles que têm um valor de *rank* igual ou menor do que o dele, de modo que eles se tornem "nós pais". Se houver mais de um "nó pai", um deles será escolhido com base no OF, permitindo que o próximo salto seja atribuído para rotear os dados para o nó raiz.

Cada entrada na tabela de roteamento dos nós registra os destinos especificados de acordo com a mensagem DIO, bem como o pai DODAG da versão DODAG. Os nós que decidem aderir a este DODAG devem escolher um ou mais pais do DODAG como próximos saltos para a rota padrão daquela instância. Uma vez calculado o *rank* de um nó, ela propaga a mensagem DIO atualizada para o restante de seus vizinhos, como é ilustrado na Figura 2.8 (II). Este processo é repetido até a construção completa da topologia DAG, como se mostra na Figura 2.8 (III e IV).

Após a formação do DODAG, cada nó deve selecionar um nó pai ou nós pais de todos os seus vizinhos e calcular a sua própria posição, cujo valor deve ser maior do que o dos nós pais para evitar um *looping* ao realizar o roteamento.

O Perfil FAN implementa o modo não-armazenamento do RPL (TSVETKOV; KLEIN, 2011), no qual o Roteador de Borda é o único nó que mantém informações de roteamento descendente para o DODAG. Os pacotes são encaminhados para um nó de destino usando o roteamento de origem determinado pela raiz.

2.4.3.3 Função Objetivo

Cada nó da rede RPL deve ser definido por uma Função Objetivo que permite selecionar e otimizar as rotas dentro de uma instância RPL. A OF é identificada pelo OCP (do inglês *Objective Code Point*), que é parte da configuração de uma mensagem DIO, e permite calcular quais rotas são mais vantajosas para um nó. Com isso, se inicia o processo de *rank* e assim ocorrem as escolhas dos nós pais de cada roteador, e por fim o nó raiz daquela instância RPL. A OF está baseada em um conjunto de métricas que são usadas

nos métodos de roteamento para permitir encontrar o melhor caminho até o seu destino, ou seja, aquele com menor custo baseado nas regras da OF.

Wi-SUN FAN utiliza o método de roteamento de MRHOF (do inglês *Minimum Rank with Hysteresis Objective Function*) como OF, onde ETX e RSL (do inglês *Received Signal Level*) é adotado como a métrica de roteamento para calcular o valor do rank. O ETX é uma métrica de confiabilidade de link, que é definido com um número de transmissões de pacotes esperados necessários para a recepção sem erros no destino. O RSL é outra métrica de link usada para determinar os nós pais candidatos. O RSL é calculado como o nível do sinal recebido em relação ao ruído térmico padrão (290°K) na largura de banda de 1 Hz ou -174 dBm, isso fornece um intervalo de -174 dBm a +80 dBm (JUNJALEARNVONG et al., 2017).

Na Tabela 2.4 são mostrados os principais parâmetros a ser tidos em conta para a configuração da camada de rede do perfil Wi-SUN FAN.

Tabela 2.4: ESPECIFICAÇÕES PRINCIPAIS DA CAMADA DE REDE

Função ou Método	Especificação selecionada
Protocolo de roteamento	Não-armazenamento do RPL
Funções de nós	Roteador de borda, Roteador e Folha
Interface	IPv6 com adaptação 6LoWPAN
Protocolo de mensagens	ICMPv6
Função objetivo	MRHOF
Métrica de roteamento	ETX e RSL

FONTE: Autor (2019)

Nesta seção foi feita uma breve descrição do simulador Cooja e os conceitos do protocolo Wi-SUN FAN, com ênfase nas camadas físicas, enlace de dados e de rede. A aliança Wi-SUN apresenta o perfil FAN como um protocolo destinado para LLNs que pode trabalhar na faixa de frequência de 915 MHz do Brasil. Verifica-se que o protocolo têm definidos modos de operação na camada física, tipo de funções do canal definidas na camada de enlace e o padrão RPL para roteamento dos nós na camada de rede. Também é mostrado o fluxo das mensagens nos estados de junção dos nós para a operacionalidade na rede FAN. No próximo capítulo serão apresentadas a metodologia, cenários e análise de rede.

3 METODOLOGIA, CENÁRIOS E ANÁLISE DE REDE FAN

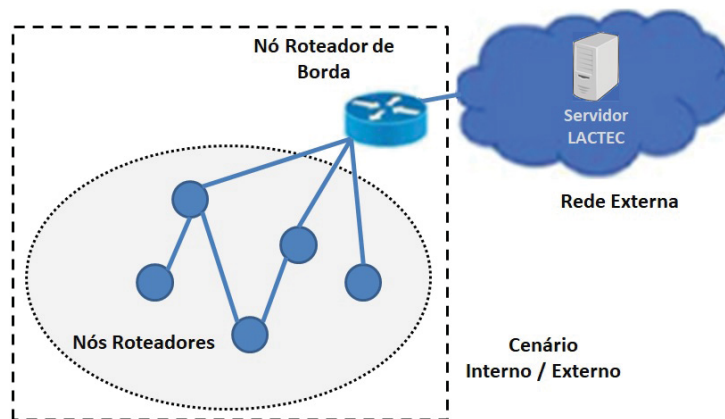
3.1 Metodologia

Para a avaliação da tecnologia Wi-SUN FAN, na primeira parte do trabalho foram realizadas simulações com a ferramenta Cooja do SO Contiki-NG, adotaram-se as especificações RPL definidas no Wi-SUN FAN na camada de rede, além de um atraso inicial para que o aplicativo comece a transmitir mensagens de dados do nó Roteador de Borda até os nós Roteadores de acordo com cenários definidos para este caso. Também foram realizadas as medições das métricas de tempo de convergência da rede, mensagens de controle, latência da rede e taxa de entrega de dados, para cada cenário simulado.

Na segunda parte do trabalho, os experimentos realizados para a avaliação da tecnologia WI-SUN FAN consistiram em medições práticas do tempo de convergência da rede e quantidade de mensagens de controle. Além disso, gerou-se um fluxo de mensagens de dados de tipo UDP para a avaliação do tempo de latência da rede e a taxa de entrega de dados. Foram realizados experimentos utilizando as configurações com espaçamentos de canal de 200 kHz e 400 kHz, modos de operação 1b e 3 respectivamente, e para cada um utilizaram-se as funções de canal fixo e salto em frequência. O objetivo foi estabelecer parâmetros de configuração dos dispositivos usados e realizar avaliações nos cenários internos e externos. Todas as medições foram feitas no nó Roteador de Borda.

Na Figura 3.1 são mostrados a localização dos nós para o recolhimento dos dados e medição das métricas. Configurou-se só um nó Roteador de Borda que permitiu fazer a comunicação com os nós Roteadores na rede.

Figura 3.1: LOCALIZAÇÃO DOS NÓS ROTEADOR DE BORDA E ROTEADOR



FONTE: Autor (2019)

3.2 Modelo de simulação

Para a simulação, utilizou-se a ferramenta Cooja para construir uma simulação em Contiki-NG para a camada de rede, tomando como modelo o padrão Wi-SUN FAN. Para isto, geraram-se dois tipos de scripts, chamados rpl-udp e rpl-border-router; (i) rpl-udp, configura o nó no modo Roteador e (ii) rpl-border-router de acordo, configura o nó no modo Roteador de Borda. Este script utiliza o padrão 6LoWPAN o qual permite que os dispositivos se comuniquem tanto dentro da rede como com outros sistemas externos (Apêndice A).

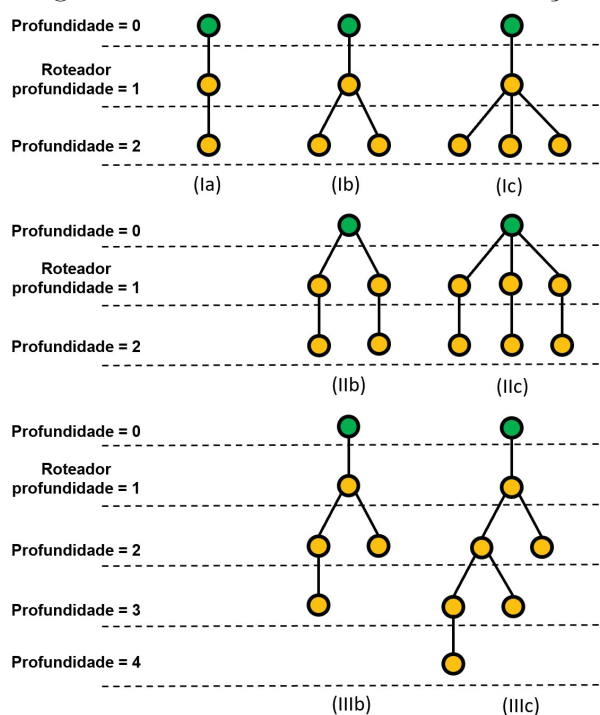
3.2.1 Cenários de simulação

Para a simulação foram definidos três cenários distintos, todos contendo apenas um Roteador de Borda. Os cenários foram escolhidos para possibilitar a comparação dos dados de topologias diferentes utilizando o mesmo número de nós.

- **Cenário I:** Este cenário considera um sistema no qual apenas um roteador se conecta diretamente ao Roteador de Borda e os nós finais conectam-se a esse roteador. Na primeira simulação apenas um nó foi conectado ao roteador, e em cada simulação subsequente acresceu-se um novo nó final à rede. Esse cenário está ilustrado na Figura 3.2 (Ia, Ib e Ic).

- **Cenário II:** Neste cenário definiu-se um conjunto roteador/nó final, no qual cada nó final está conectado ao seu roteador e o roteador está conectado diretamente ao Roteador de Borda. A primeira simulação foi realizada apenas com um conjunto roteador/nó final e para cada simulação subsequente um novo conjunto foi adicionado ao sistema. Esse cenário está ilustrado na Figura 3.2 (IIb e IIc).
- **Cenário III:** Neste cenário foi utilizado o mesmo conjunto roteador/nó final utilizado no segundo cenário, porém, apenas o primeiro roteador foi conectado ao Roteador de Borda e em cada nova simulação o novo roteador foi conectado ao roteador da simulação anterior. Esse cenário está apresentado na Figura 3.2 (IIIb e IIIc).

Figura 3.2: CENÁRIOS DA SIMULAÇÃO



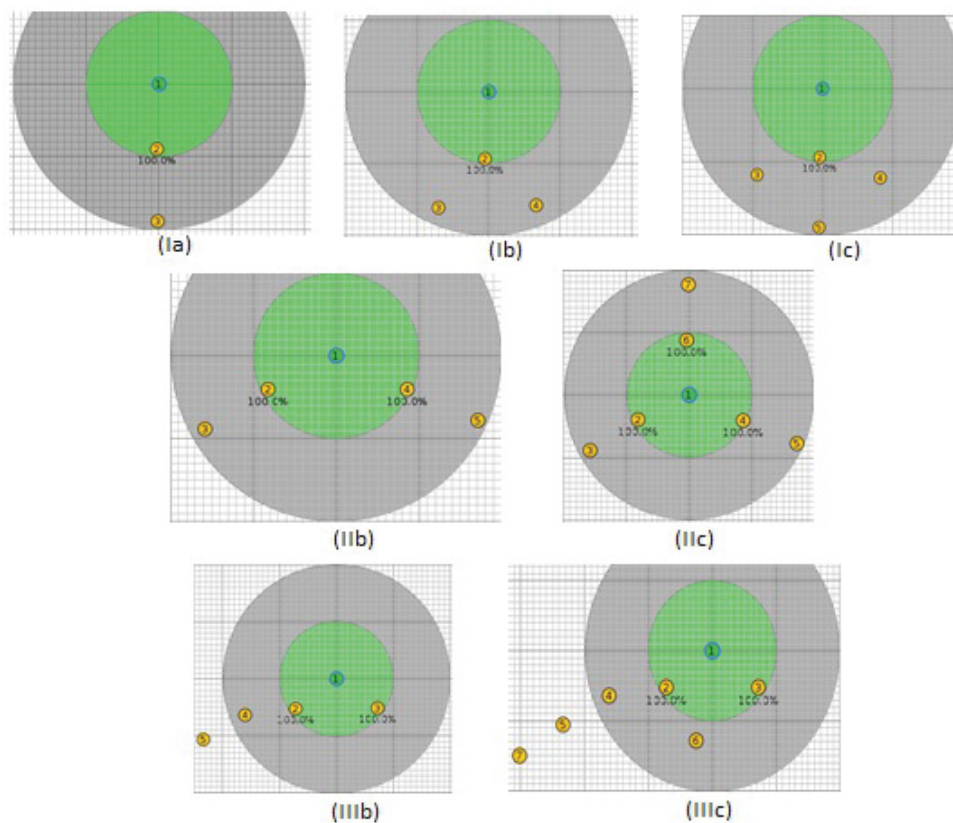
FONTE: Autor (2019)

3.2.2 Especificações em Cooja

Na simulação em Cooja, a fim de adicionar as perdas no meio sem fio, foi utilizado o modelo de propagação UDGM (o inglês *Unit Disk Graph Medium*), que adiciona as perdas

em relação às distâncias relativas dos nós, com base nas distribuições dos nós de acordo com os diferentes cenários indicados na seção anterior para o simulador Cooja, replicado no simulador e mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3: NÓS EM CENÁRIOS DE TRANSMISSÃO NO SIMULADOR COOJA

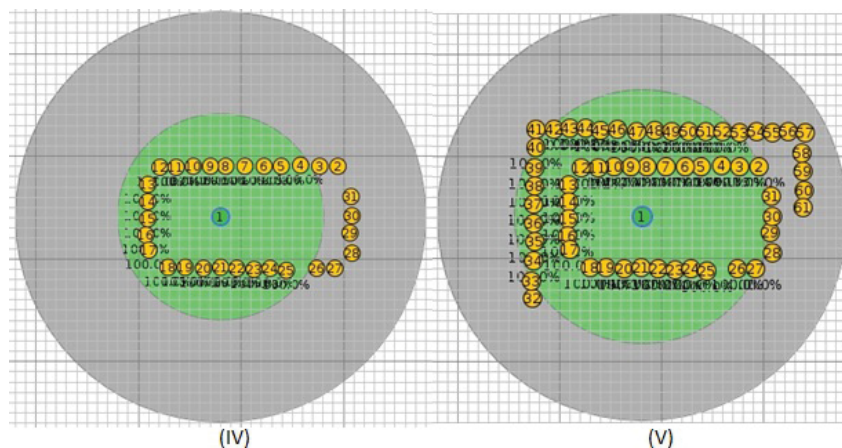


FONTE: Autor (2019)

Adicionalmente, realizaram-se simulações com os cenários similares aos realizados nos experimentos do ambiente interno, como é mostrado na Figura 3.4 (IV e V) com as distribuições dos nós de acordo na Figura 4.9 (V) e Figura 4.10 (V), respectivamente, no capítulo seguinte.

Os parâmetros para a simulação e seu ambiente para os cenários indicados são mostrados na Tabela 3.1. Nessa configuração, adotaram-se as especificações RPL definidas no Wi-SUN FAN, além de um atraso inicial para que o aplicativo comece a transmitir mensagens para o nó Roteador de Borda. Este atraso foi definido com base no tempo aproximado para a convergência inicial da rede e garante que o pacote enviado ao servidor não seja perdido devido à falta de conectividade de rede. Realizou-se para cada cenário

Figura 3.4: NÓS EM CENÁRIOS SIMILARES NOS EXPERIMENTOS NO COOJA



FONTE: Autor (2019)

uma simulação de 20 min, com envio de pacotes de dados de 96 bytes em intervalos aleatórios.

Tabela 3.1: ESPECIFICAÇÕES RPL WI-SUN FAN COM COOJA

Parâmetro	Valor/Especificação
RPL	Modo não-armazenamento
OF	ETX
DIO min	15
DIO doublings	2
DIO redundancy	Habilitado
Send Interval	32 s
Tx radio	100%
Rx radio	100%
Tx range	100 m
INT range	200 m
Tempo da simulação	20 min

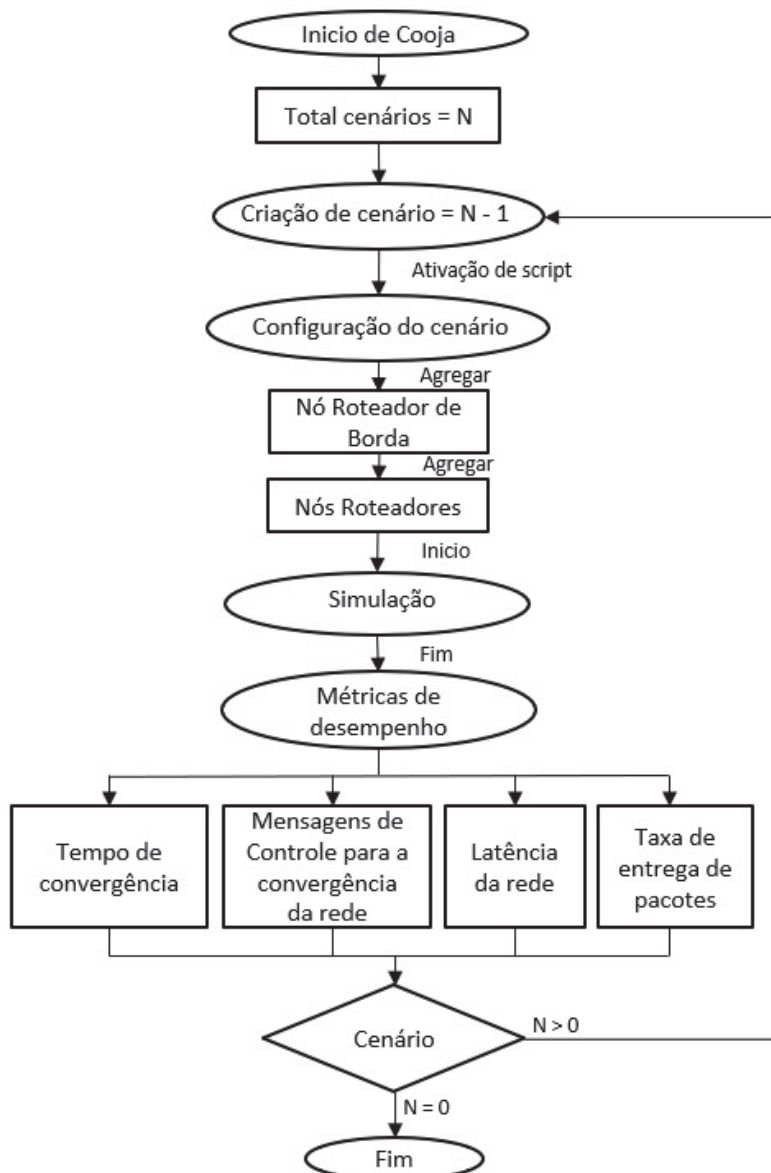
FONTE: Autor (2019)

3.2.3 Sequência de simulação

As simulações realizadas para a avaliação do desempenho do protocolo Wi-SUN FAN, foram de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 3.5.

Primeiramente, a ferramenta Cooja é inicializada para a criação da simulação com o modelo de propagação UDGM, ativação dos scripts que configura os nós Roteador de Borda e Roteador. Nesta parte o Roteador de Borda é o dispositivo responsável por configurar um prefixo de rede e iniciar a construção de roteamento do RPL. Em

Figura 3.5: SEQUÊNCIA DE SIMULAÇÃO



FONTE: Autor (2019)

outras palavras, o Roteador de Borda é a raiz de roteamento e interlocutor entre a rede interna e a rede externa. Habilitou-se no nó Roteador de Borda a opção do servidor para que o Cooja gere uma porta local, em seguida, pode-se iniciar a simulação durante 20 min para depois finalizar a simulação. Realizou-se o procedimento para cada cenário da simulação. Os dados das simulações foram obtidos da ferramenta de Wireshark disponível no SO Contiki, que foi habilitada previamente e permitiu registrar os dados do protocolo durante as simulações. Finalmente o último passo foi a consolidação dos resultados, isto é, o processamento da informação para sua apresentação, feita no programa R.

3.3 Modelo experimental

Para realização dos experimentos utilizou-se um protótipo que foi conformado por uma placa baseada no microcontrolador RX65NE do grupo RX de Renesas³, onde foi carregada a pilha de protocolo Wi-SUN FAN para os nós com as funções de Roteador de Borda e Roteadores. Na seção a seguir, serão apresentados o protótipo e a pilha utilizada.

3.3.1 Protótipo experimental

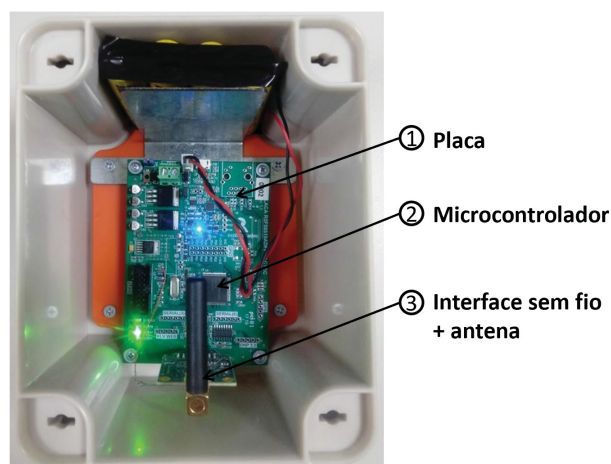
O protótipo utilizado para os experimentos foi desenvolvido no LACTEC com suporte de Renesas, provedor que tem a certificação da aliança Wi-SUN para o perfil FAN, com uma pilha do protocolo baseada na linguagem C/C++. Os protótipos foram configurados com as funções: Roteador de Borda e Roteador. Na Tabela 3.2 são mostrados os componentes da placa utilizada para os nós.

Tabela 3.2: COMPONENTES DA UNIDADE Wi-SUN FAN

Item	Descrição	Código	Provedor
1	Placa	R5F56519ADFP	LACTEC
2	Microcontrolador	RX65NE	Renesas
3	Interface sem fio + antena	RAA604S00	LACTEC

FONTE: Autor (2019)

Figura 3.6: PROTÓTIPO EXPERIMENTAL Wi-SUN FAN



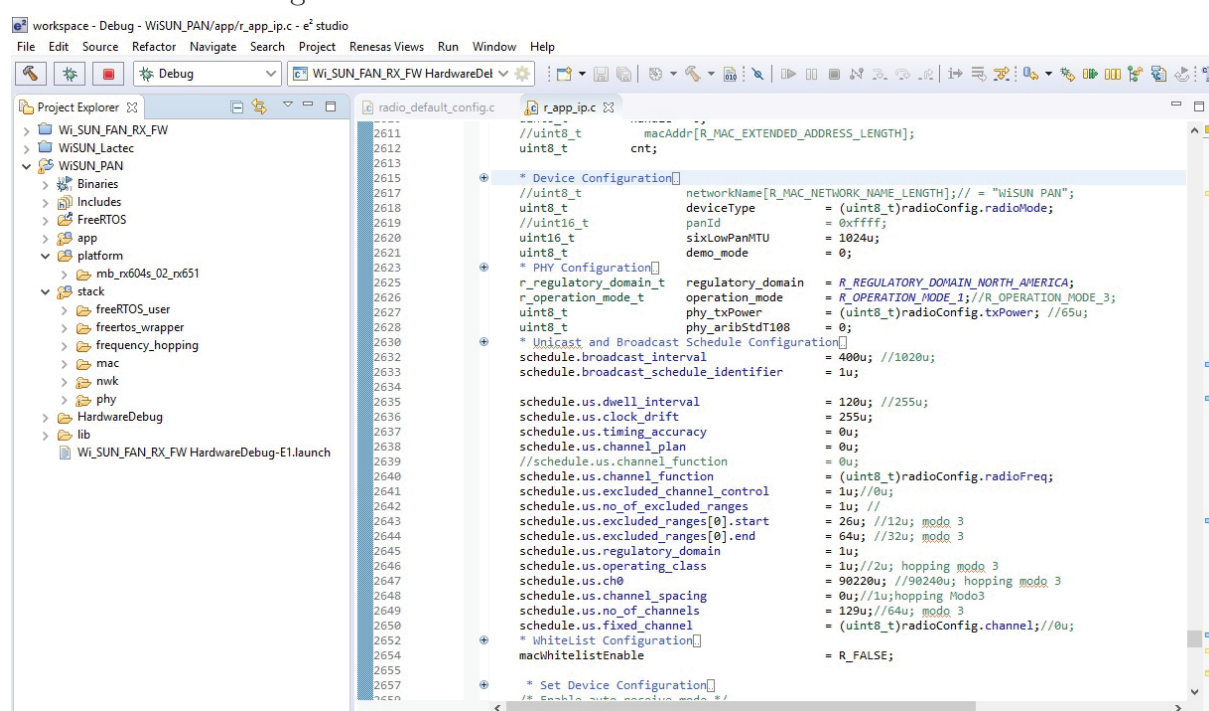
FONTE: Autor (2019)

³Microcontrolador da família RX65N, informação disponível em www.renesas.com

A placa R5F56519ADFP desenvolvida no LACTEC está conformada pelo microcontrolador RX65NE e o componente de comunicação sem fio RAA604S00, o qual possui o componente de RF que suporta IEEE802.15.4g e v. Na Figura 3.6 é mostrado o protótipo final utilizado para carregar a pilha FAN em todos os nós nos experimentos.

Contudo, a pilha do protocolo Wi-SUN FAN foi desenvolvida por Renesas usando o ambiente e^2 studio como é mostrada na Figura 3.7, o instalador correspondente pode ser obtido no site de Renesas.

Figura 3.7: AMBIENTE e^2 STUDIO DE RENESAS



FONTE: Autor (2019)

As ferramentas de *software* utilizadas para a configuração e carregado na pilha do protocolo no protótipo é mostrada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: FERRAMENTAS DE SOFTWARE PARA Wi-SUN FAN

Nome de produto	Descrição	Versão
e^2 studio	Ambiente de desenvolvimento integrado, baseado em Eclipse	v6.30
CC-RX	Pacote do compilador para o grupo RX de Renesas	v2.07
RFP	Programador <i>flash</i> para Renesas	v3.05
Wi-SUN_FAN_RX_FW	Pilha Wi-SUN FAN	v1.0

FONTE: Autor (2019)

3.3.2 Especificações técnicas dos equipamentos

Os equipamentos devem ter habilitadas as especificações do protocolo Wi-SUN FAN, na Tabela 3.4 são mostradas as especificações utilizadas para os experimentos.

Tabela 3.4: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS UTILIZADAS NOS PROTÓTIPOS

Descrição	Especificação técnica
<i>Camada física</i>	
Modulação	2-FSK
Espaçamento de canal	200 / 400 kHz
Symbol Rate	50 / 150 ksymbol/s
Faixa de Frequência	902-907.5 e 915-928 MHz (Brasil)
Total de canais	90 / 43
<i>Camada de enlace de dados</i>	
Método de acesso	<i>Unslotted</i> CSMA-CA
Função de canal	Canal fixo e salto em frequência (DH1CF)
Intervalo de <i>Broadcast</i>	400 ms
Intervalo de permanência <i>Broadcast/Unicast</i>	120 ms/100 ms
<i>Camada de rede</i>	
Protocolo de roteamento	RPL modo não-armazenamento
Função objetivo	MRHOF
Métrica de roteamento	ETX e RSL
Protocolo de mensagens de controle	ICMPv6
Interface	IPv6 com adaptação 6LoWPAN
<i>Camada de transporte</i>	
Tipo de mensagens	UDP

FONTE: Autor (2019)

Para cada cenário quatro configurações foram consideradas, realizando modificações basicamente no espaçamento de canal, tipo de função de canal e potência de transmissão. Na Tabela 3.5 são mostradas as configurações realizadas nos experimentos para os ambientes interno e externo.

No experimento 1 foi utilizado o alinhamento de canais como mostrado na Tabela 3.6, no experimento 2 foi utilizado o alinhamento de canais como mostrado na Tabela 3.7, no experimento 3 foi utilizado $N_C = 0$ que leva a $F_C = 902,4$ MHz como mostrado na Tabela 3.6 e no experimento 4 foi utilizada $N_C = 0$ resultando em $F_C = 902,2$ MHz como mostrado na Tabela 3.7.

Para cada experimento foram realizadas cinco repetições por experimento nos três cenários.

Tabela 3.5: CONFIGURAÇÕES POR CENÁRIOS

Descrição	# Canais	Função de canal	Potência	Espaçamento de canal	Taxa de dados
Experimento 1 (Modo 3 - Salto)	43	Salto em frequência	Roteador de Borda: 15,3 dBm Roteador: 5 dBm (Ambiente interno) e 14,5 dBm(Ambiente externo)	400 kHz	150 kbps
Experimento 2 (Modo 1b - Salto)	90	Salto em frequência	Roteador de Borda: 15,3 dBm Roteador: 5 dBm (Ambiente interno) e 14,5 dBm(Ambiente externo)	200 kHz	50 kbps
Experimento 3 (Modo 3 - Fixa)	1	Canal fixo	Roteador de Borda: 15,3 dBm Roteador: 5 dBm (Ambiente interno) e 14,5 dBm(Ambiente externo)	400 kHz	150 kbps
Experimento 4 (Modo 1b - Fixa)	1	Canal fixo	Roteador de Borda: 15,3 dBm Roteador: 5 dBm (Ambiente interno) e 14,5 dBm(Ambiente externo)	200 kHz	50 kbps

FONTE: Autor (2019)

Tabela 3.6: ALINHAMENTO DE CANAL PARA FAIXA DE FREQUÊNCIA 902-907,5 MHz e 915-928 MHz COM ESPAÇAMENTO DE 400 kHz

N _C	F _C (MHz)	N _C	F _C (MHz)	N _C	F _C (MHz)	N _C	F _C (MHz)	N _C	F _C (MHz)
0	902,4	9	906	39	918	48	921,6	57	925,2
1	902,8	10	906,4	40	918,4	49	922	58	925,6
2	903,2	11	906,8	41	918,8	50	922,4	59	926
3	903,6	33	915,6	42	919,2	51	922,8	60	926,4
4	904	34	916	43	919,6	52	923,2	61	926,8
5	904,4	35	916,4	44	920	53	923,6	62	927,2
6	904,8	36	916,8	45	920,4	54	924	63	927,6
7	905,2	37	917,2	46	920,8	55	924,4		
8	905,6	38	917,6	47	921,2	56	924,8		

FONTE: Autor (2019)

Tabela 3.7: ALINHAMENTO DE CANAL PARA FAIXA DE FREQUÊNCIA 902-907,5 MHz e 915-928 MHz COM ESPAÇAMENTO DE 200 kHz

N _C	F _C (MHz)	N _C	F _C (MHz)	N _C	F _C (MHz)	N _C	F _C (MHz)	N _C	F _C (MHz)
0	902,2	18	905,8	75	917,2	93	920,8	111	924,4
1	902,4	19	906	76	917,4	94	921	112	924,6
2	902,6	20	906,2	77	917,6	95	921,2	113	924,8
3	902,8	21	906,4	78	917,8	96	921,4	114	925
4	903	22	906,6	79	918	97	921,6	115	925,2
5	903,2	23	906,8	80	918,2	98	921,8	116	925,4
6	903,4	24	907	81	918,4	99	922	117	925,6
7	903,6	25	907,2	82	918,6	100	922,2	118	925,8
8	903,8	65	915,2	83	918,8	101	922,4	119	926
9	904	66	915,4	84	919	102	922,6	120	926,2
10	904,2	67	915,6	85	919,2	103	922,8	121	926,4
11	904,4	68	915,8	86	919,4	104	923	122	926,6
12	904,6	69	916	87	919,6	105	923,2	123	926,8
13	904,8	70	916,2	88	919,8	106	923,4	124	927
14	905	71	916,4	89	920	107	923,6	125	927,2
15	905,2	72	916,6	90	920,2	108	923,8	126	927,4
16	905,4	73	916,8	91	920,4	109	924	127	927,6
17	905,6	74	917	92	920,6	110	924,2	128	927,8

FONTE: Autor (2019)

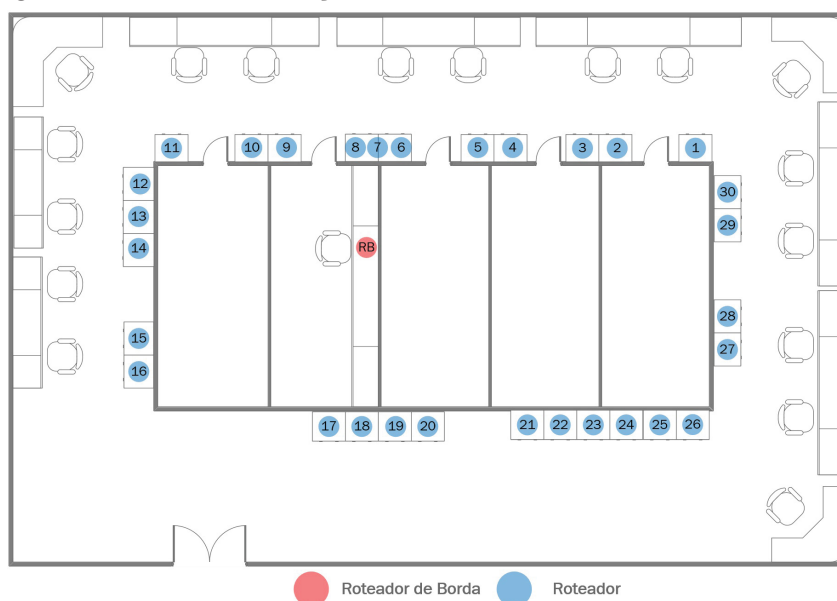
3.3.3 Cenários dos experimentos

Os módulos experimentais foram protegidos com uma caixa de plástico para os experimentos nos ambientes interno e externo. Os experimentos foram realizados em três cenários distintos, o primeiro e o segundo cenário tiveram distribuições dos nós no ambiente interno na sede principal de LACTEC, segundo e terceiro andar no bloco de Eletrônica. O terceiro cenário teve distribuições dos nós nos espaços do estacionamento externo e frente da sede principal no LACTEC. O nó Roteador de Borda para todos os experimentos foi sem linha de visada (NLoS, do inglês *Non Line of Sight*), os obstáculos foram as paredes e teto das salas no ambiente interno e a parede da edificação da sede principal no ambiente externo.

3.3.3.1 Primeiro cenário

O primeiro cenário para a avaliação da tecnologia Wi-SUN FAN foi realizado no ambiente interno do bloco de Eletrônica no segundo andar do LACTEC. A Figura 3.8 apresenta a distribuição dos nós, que é composta de 1 Roteador de Borda e 30 Roteadores.

Figura 3.8: DISTRIBUIÇÃO DOS NÓS - PRIMEIRO CENÁRIO



FONTE: Autor (2019)

Os nós foram distribuídos ao redor do Roteador de Borda, a separação aproximada

entre os nós Roteadores é mostrada na Tabela 3.8, com uma altura de aproximadamente 1,2 m em relação ao chão.

Tabela 3.8: DISTÂNCIAS ENTRE NÓS NO PRIMEIRO CENÁRIO

Nós	Distância (m)	Nós	Distância (m)	Nós	Distância (m)	Nós	Distância (m)	Nós	Distância (m)
RB→1	2	6→7	0,8	12→13	1	18→19	0,8	24→25	0,8
1→2	2,5	7→8	0,8	13→14	1	19→20	0,8	25→26	0,8
2→3	1	8→9	0,8	14→15	2	20→21	2	26→27	1,5
3→4	2	9→10	1	15→16	1	21→22	0,8	27→28	1
4→5	1	10→11	2	16→17	3,5	22→23	0,8	28→29	2
5→6	2	11→12	1	17→18	0,8	23→24	0,8	29→30	1

FONTE: Autor (2019)

Na Figura 3.9 são mostrados os nós 1, 2 e 3 como exemplo no primeiro cenário.

Figura 3.9: EXEMPLO DE LOCALIZAÇÃO DOS NÓS - PRIMEIRO CENÁRIO



FONTE: Autor (2019)

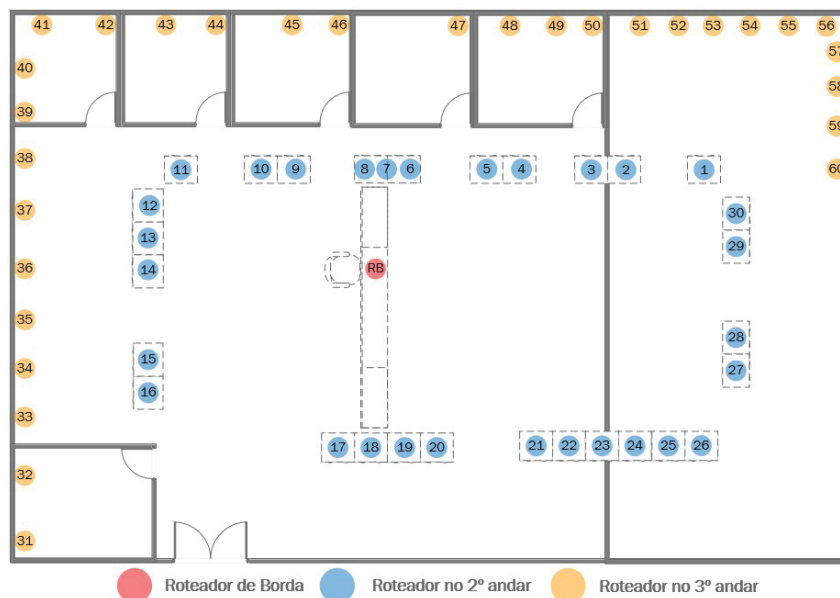
Neste primeiro cenário procurou-se um ambiente interno para aplicações que estejam dentro de uma construção para conexões sem fio de dispositivos com distâncias curtas.

3.3.3.2 Segundo cenário

O segundo cenário para a avaliação da tecnologia Wi-SUN FAN foi configurado utilizando o mesmo primeiro cenário com seus equipamentos no segundo andar, mais um segundo cenário com localização no terceiro andar no bloco de Eletrônica. Na Figura 3.10

é mostrada a distribuição dos nós no terceiro cenário, composta de 1 Roteador de Borda e 60 Roteadores.

Figura 3.10: DISTRIBUIÇÃO DOS NÓS - SEGUNDO CENÁRIO



FONTE: Autor (2019)

Os nós distribuídos são 1 Roteador de Borda e 30 Roteadores no segundo andar mais 30 Roteadores no terceiro andar. Os nós Roteadores do segundo andar estavam ao redor do nó Roteador de Borda e os nós Roteadores do terceiro andar acima do nó Roteador de Borda. A separação aproximada entre os nós Roteadores é mostrada nas Tabela 3.8 e Tabela 3.9 com uma altura de 1,2 m aproximadamente com relação ao chão no andar respectivo.

Tabela 3.9: DISTÂNCIAS ENTRE NÓS NO SEGUNDO CENÁRIO

Nós	Distância (m)	Nós	Distância (m)	Nós	Distância (m)	Nós	Distância (m)	Nós	Distância (m)
31→32	1,2	37→38	1,2	43→44	1,2	49→50	1	55→56	1,2
32→33	1,2	38→39	1,2	44→45	1,2	50→51	1	56→57	1
33→34	1,2	39→40	1,2	45→46	1,2	51→52	1,2	57→58	1,2
34→35	1,2	40→41	1	46→47	2,5	52→53	1,2	58→59	1,2
35→36	1,2	41→42	1,2	47→48	1	53→54	1,2	59→60	1,2
36→37	1,2	42→43	1,2	48→49	1	54→55	1,2		

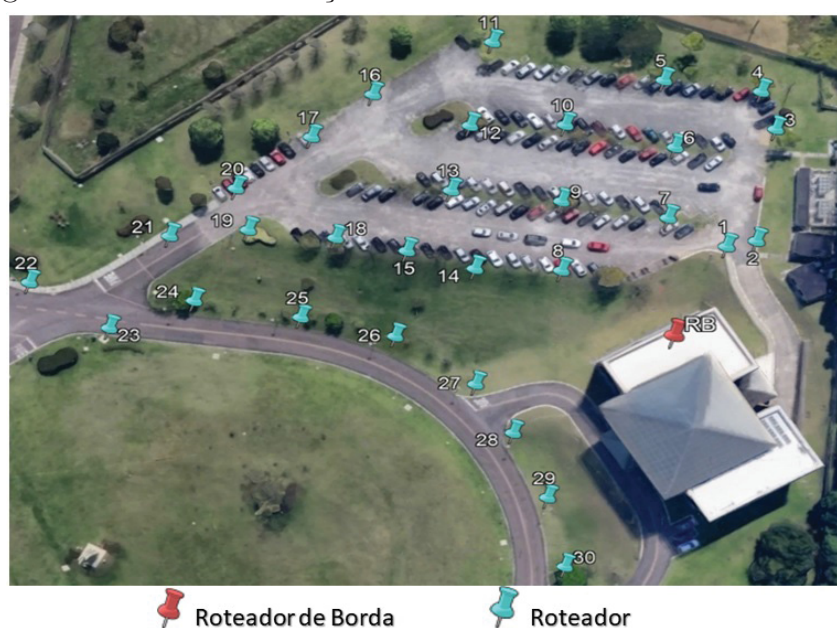
FONTE: Autor (2019)

Neste segundo cenário procurou-se estressar a rede do primeiro cenário, para verificar o aumento do tempo de convergência, mensagens de controle e a verificação de uma menor taxa de sucesso da transmissão dos pacotes como mais nós.

3.3.3.3 Terceiro cenário

No Terceiro cenário, para a avaliação da tecnologia Wi-SUN FAN no ambiente externo, foram utilizados os espaços do estacionamento externo em frente à sede principal do LACTEC. Com imagem retirada do aplicativo Google Earth, na Figura 3.11 é mostrada a distribuição dos nós no cenário externo, totalizando 1 Roteador de Borda e 30 Roteadores.

Figura 3.11: DISTRIBUIÇÃO DOS NÓS - TERCEIRO CENÁRIO



FONTE: Autor (2019)

O nó Roteador de Borda permaneceu no prédio do LACTEC no segundo andar (a mesma localização do primeiro e segundo cenários) e os Roteadores foram instalados nos postes de iluminação pública numa altura de aproximadamente 1,6 m com relação ao chão e as distâncias aproximadas entre os nós é mostrada na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: DISTÂNCIAS ENTRE NÓS NO TERCEIRO CENÁRIO

Nós	Distância (m)	Nós	Distância (m)	Nós	Distância (m)	Nós	Distância (m)	Nós	Distância (m)
RB→1	25	6→7	17	12→13	16	18→19	18	24→25	21
1→2	6	7→8	23	13→14	19	19→20	11	25→26	20
2→3	28	8→9	17	14→15	14	20→21	17	26→27	19
3→4	10	9→10	19	15→16	39	21→22	30	27→28	14
4→5	19	10→11	25	16→17	16	22→23	20	28→29	18
5→6	16	11→12	18	17→18	26	23→24	18	29→30	18

FONTE: Autor (2019)

Na Figura 3.12 é mostrado o nó 24 como exemplo no terceiro cenário.

Figura 3.12: EXEMPLO DE LOCALIZAÇÃO DOS NÓS - TERCEIRO CENÁRIO



FONTE: Autor (2019)

Neste terceiro cenário, as provas têm um cenário externo orientado para uma aplicação de medidores de energia inteligentes. As distâncias também simulam as frentes de casas com uma densidade razoável do espaço ocupado.

3.3.4 Medição das métricas de desempenho

As métricas de desempenho para a avaliação dos resultados nos experimentos foram: o tempo de convergência ou tempo de configuração da rede (JUNJALEARNVONG et al., 2019), mensagens de controle da rede, sobrecarga de mensagens de controle da rede, latência da rede e taxa de entrega de pacotes (ALI, 2012).

a) Tempo de convergência da rede

A medição desse parâmetro inicia quando o nó Roteador de Borda é ativado e termina quando todos os nós Roteadores ingressam na rede FAN. No caso da rede Wi-SUN FAN este tempo inicia quando o nó Roteador de Borda é ativado no tempo m e termina no tempo do estado de junção 5 do n -ésimo Roteador n :

$$T_C = n - m. \quad (3.1)$$

b) Mensagens de controle para a convergência da rede

As mensagens de controle para a convergência da rede é a quantidade de mensagens de tipo DIO, DIS e DAO entre o nó Roteador de Borda e os nós Roteadores dentro do tempo de convergência da rede e é dada por:

$$M_C = DIO_{TC^-} + DIS_{TC^-} + DAO_{TC^-}, \quad (3.2)$$

onde DIO_{TC^-} , DIS_{TC^-} e DAO_{TC^-} é a quantidade das mensagens de tipo DIO, DIS gerados respectivamente.

c) Mensagens de controle depois de convergência da rede

As mensagens de controle depois de convergência da rede é a quantidade de mensagens de tipo DIO, DIS e DAO entre o nó Roteador de Borda e os nós Roteadores depois do tempo de convergência da rede e é dada por:

$$M_D = DIO_{TC^+} + DIS_{TC^+} + DAO_{TC^+}, \quad (3.3)$$

onde DIO_{TC^+} , DIS_{TC^+} e DAO_{TC^+} é a quantidade das mensagens de tipo DIO, DIS e DAO gerados respectivamente.

d) Latência da rede

A latência total da rede pode ser calculada como:

$$L_T = \sum_{k=1}^{T_{pr}} (t_r(k) - t_e(k)), \quad (3.4)$$

onde T_{pr} é o número total de pacotes de dados recebidos com sucesso, cuja contagem é realizada no nó coletor, t_e e t_r , é o tempo de envio e recepção do pacote respectivamente. A latência média é dada por:

$$L_M = \frac{L_T}{T_{pr}}. \quad (3.5)$$

e) Taxa de Entrega de Pacotes

A taxa de entrega de pacotes pode ser calculada como:

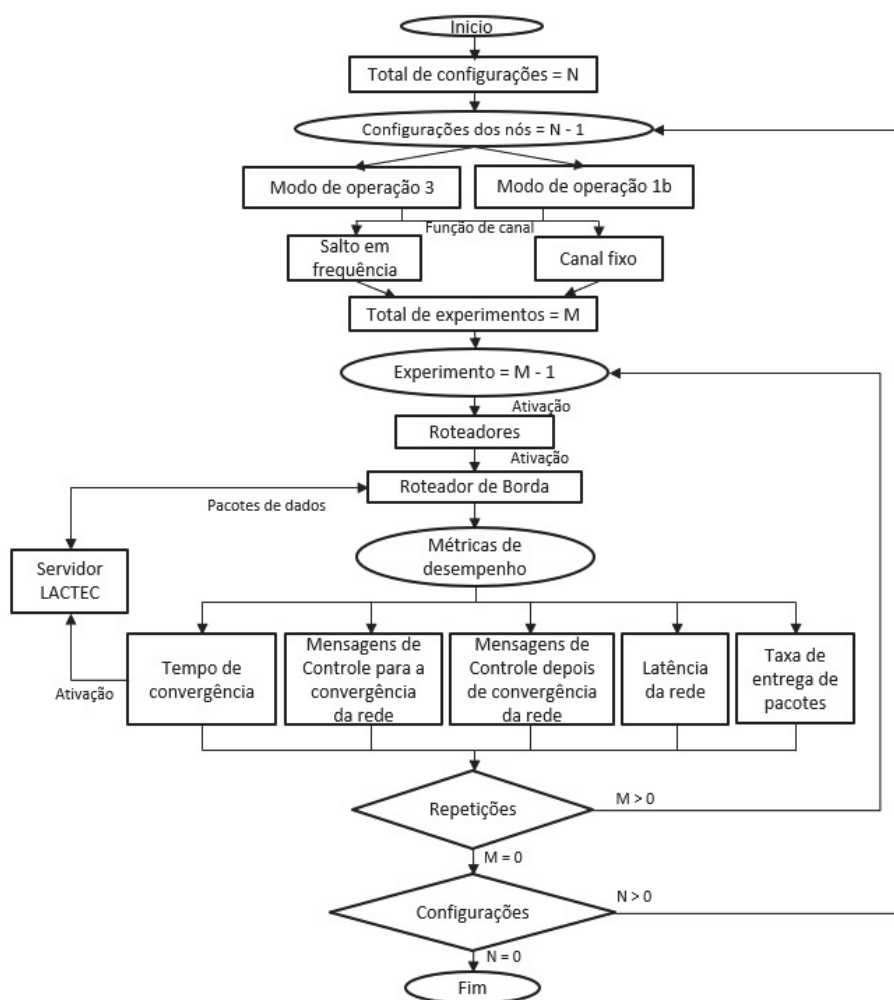
$$T_{ep} = \frac{T_{pr}}{N_{pe}}, \quad (3.6)$$

onde N_{pe} é o número de pacotes de dados enviados de todos os nós para o coletor.

3.3.5 Sequência de metodologia

Os experimentos para a avaliação do desempenho do protocolo Wi-SUN FAN, foram configurados de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 3.13.

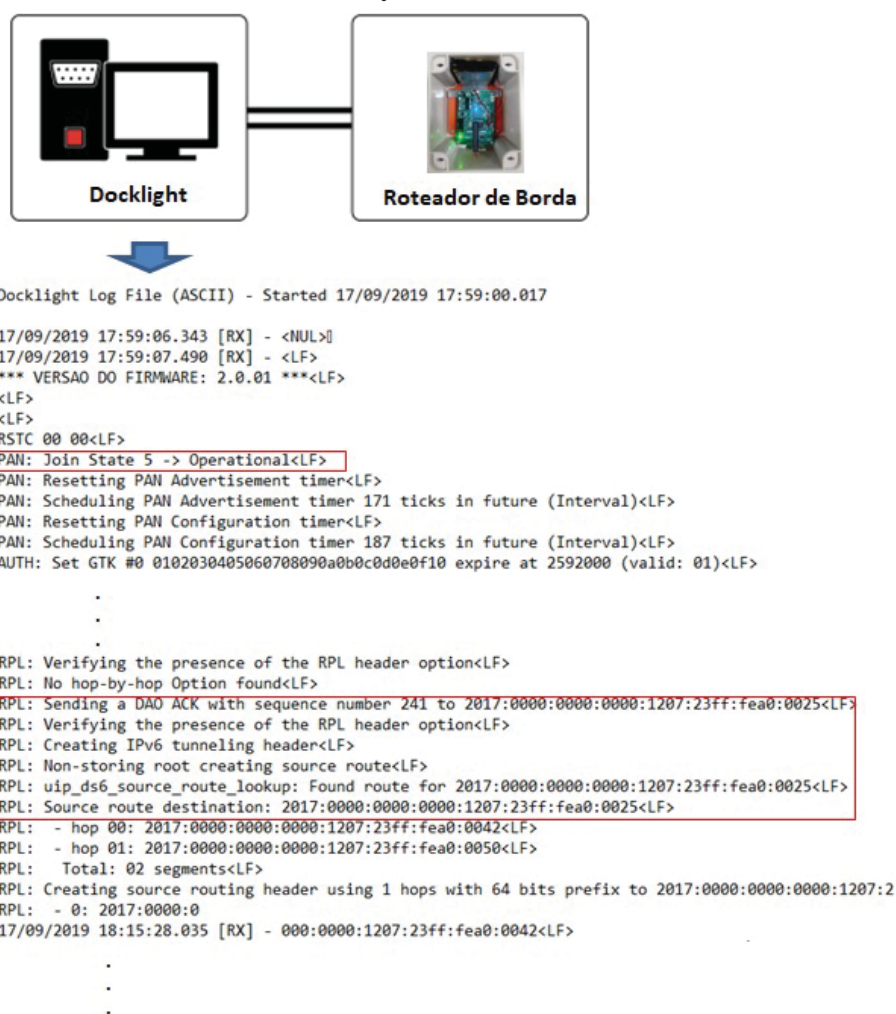
Figura 3.13: SEQUÊNCIA DA METODOLOGIA



FONTE: Autor (2019)

O primeiro passo inicia com as configurações dos nós com os modos de operação 3 ou 1b, modos que têm as opções de funções de canais de frequência fixa e salto em frequência, totalizando quatro configurações para os experimentos. O passo seguinte foi o experimento, onde se ativam os Roteadores e depois o Roteador de Borda para cada uma das repetições dos experimentos. Neste passo, os equipamentos realizam o processo de comunicação utilizando o protocolo Wi-SUN FAN, as medições só foram realizadas no nó Roteador de Borda, utilizou-se o programa *Docklight* que detecta e registra a sequência dos dados do protocolo através da porta RS232 que é conectado ao nó como é mostrado na Figura 3.14, onde o nó Roteador de Borda inicia no estado de junção 5 e recebe a informação do primeiro roteamento de cada um dos nós Roteadores, isso acontece no tempo quando eles conseguiram o estado de junção 5.

Figura 3.14: REGISTRO DA SEQUÊNCIA DOS DADOS DO PROTOCOLO



FONTE: Autor (2019)

O seguinte passo foi recolher a informação para as métricas de desempenho, na métrica de convergência registrou-se no nó Roteador de Borda o tempo de início do teste e o tempo do último nó Roteador que foi registrado na sua tabela de roteamento (estado de junção 5 para o nó Roteador). Para as métricas das mensagens de controle foram obtidas dentro do tempo de convergência e depois do tempo de convergência. Nas métricas de latência e taxa de entrega de dados da rede, o servidor do LACTEC deverá ser ativado com uma sequência de pacotes de dados, o que ocorre depois da finalização do tempo de convergência da rede. A informação das métricas é armazenada em arquivos de texto para as cinco repetições por cada um dos experimentos nos três cenários, cada experimento foi realizado em um ou dois dias.

Como a amostra foi pequena por experimento utilizou-se para o cálculo do intervalo de confiança a distribuição t de *Student*, que é resumido a seguir:

Seja X_1, X_2, \dots, X_i , uma amostra aleatória pequena com média amostral $\bar{X}_i = (X_1 + \dots + X_i)/i$, colhida de uma população com distribuição normal cuja média é μ . Então, um intervalo de confiança no nível $100(1-\alpha)\%$ para μ é

$$\bar{X}_i - t_{i-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{i}} < \mu < \bar{X}_i + t_{i-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{i}}, \quad (3.7)$$

onde s é o estimador do desvio padrão populacional, i é tamanho da amostra e $t_{i-1, \alpha/2}$ é o valor que corta uma área de $\alpha/2$ nas caudas esquerda e direita da distribuição t de *Student*.

Finalmente, no último passo foram realizados o processamento da informação e apresentação dos resultados utilizando as ferramentas estatísticas do programa R.

4 RESULTADOS

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados de avaliação de desempenho obtidos de análise da comunicação entre as unidades dos nós Roteador de Borda e Roteadores que formam a rede *mesh* do protocolo Wi-SUN FAN. Apresentam-se os resultados conseguidos no simulador Cooja e os resultados experimentais nos ambientes interno e externo, que contém os cenários definidos para cada caso. Nas medições realizadas na rede utilizamos as métricas de desempenho, que são o tempo de convergência, mensagens de controle para e depois da convergência da rede, latência da rede e taxa de entrega de pacotes. Os resultados foram tratados com ferramentas estatísticas, sendo mostrados com intervalos de confiança nos gráficos de acordo ao caso.

4.2 Resultados de simulação

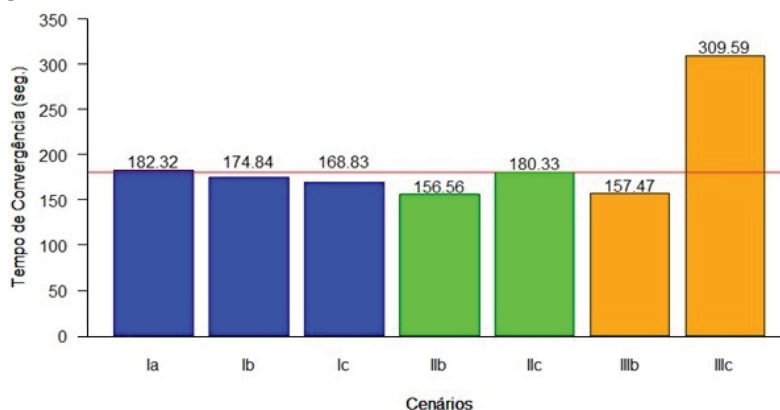
No simulador Cooja foram realizadas simulações em três cenários, que tiveram um total de sete distribuições de nós como é mostrado na Figura 3.2 e realizadas as configurações de acordo na Tabela 3.1. Os resultados são apresentados a seguir de acordo com a métrica utilizada.

4.2.1 Tempo de convergência da rede

Na Figura 4.1 são mostrados os resultados do tempo de convergência para cada cenário. Observou-se um tempo de convergência para os cenários Ib, Ic, IIb e IIIb menor que 180 s, indicando que não há perda de pacotes de dados, porque está dentro do intervalo de tempo inicial *offset*. Já nos cenários: Ia, IIc e IIIc, observou-se um tempo de convergência superior a 180 s para concluir a formação da rede, o que gera perdas dos pacotes de

dados. O cenário IIIc apresentou um tempo consideravelmente maior, principalmente porque este cenário possui mais profundidade da rede e precisa de mais tempo para a troca de mensagens de controle. No cenário menor Ia, precisa-se de um tempo superior a 182,32 s. É possível concluir, de acordo com a comparação dos cenários IIc e IIIc, que o tempo de convergência da rede é menor para o tipo de topologia estrela.

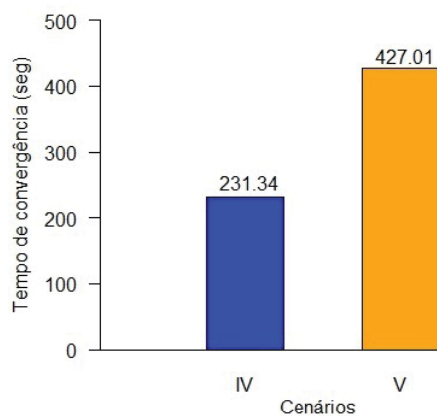
Figura 4.1: TEMPO DE CONVERGÊNCIA POR CENÁRIOS



FONTE: Autor (2019)

Adicionalmente, na Figura 4.2 são mostrados os resultados da simulação dos cenários IV e V, que são cenários similares aos dos experimentos no ambiente interno, verificou-se que o tempo de convergência do cenário IV é menor do cenário IIIc, portanto, o tempo de convergência é maior nos cenários que têm nós com maior profundidade.

Figura 4.2: TEMPO DE CONVERGÊNCIA DOS CENÁRIOS SIMILARES NOS EXPERIMENTOS DO AMBIENTE INTERNO

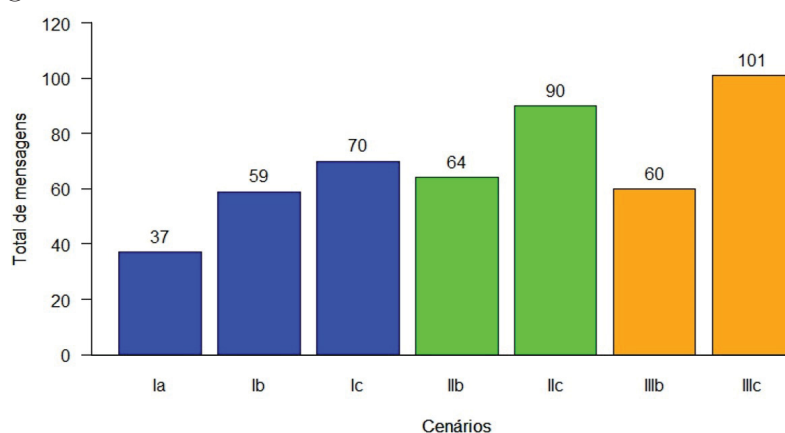


FONTE: Autor (2019)

4.2.2 Mensagens de controle da rede

Na Figura 4.3 é mostrada a quantidade de mensagens de controle em cada cenário simulado. Conforme esperado, os cenários Ic, Iic e IIIc têm mais mensagens de controle, já que os mesmos possuem um número maior de nós em sua topologia. Com relação aos cenários Iic e IIIc é interessante notar que, mesmo possuindo igual número de nós, o cenário IIIc precisa trocar um número maior de mensagens de controle. Esse comportamento é devido à maior profundidade da rede no cenário IIIc. Já quando comparados os cenários IIb e IIIb nota-se que ambos possuem a mesma quantidade de nós, mas o cenário IIb necessita de um número um pouco menor de mensagens de controle. Como o cenário IIb possui dois nós de drenagem na mesma profundidade, diferente do cenário IIIb que tem os dois nós de drenagem em série e um nó final comunicado direto no raiz, o número de mensagens de controle é reduzido.

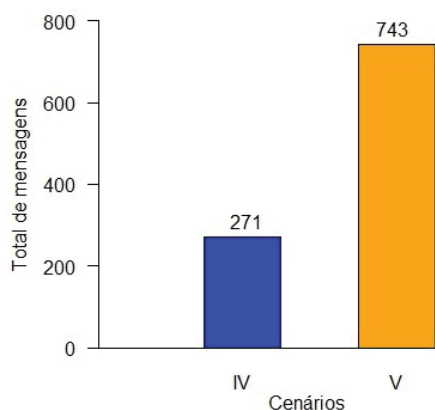
Figura 4.3: MENSAGENS DE CONTROLE POR CENÁRIOS



FONTE: Autor (2019)

Adicionalmente, na Figura 4.4 são mostrados os resultados da simulação dos cenários V e VI, verificou-se que a maior quantidade de nós o intercâmbio de mensagens de controle aumenta.

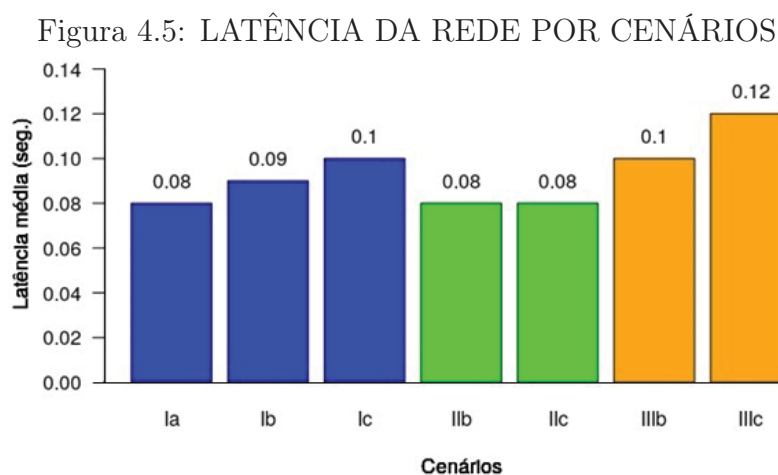
Figura 4.4: MENSAGENS DE CONTROLE DOS CENÁRIOS SIMILARES NOS EXPERIMENTOS DO AMBIENTE INTERNO



FONTE: Autor (2019)

4.2.3 Latência da rede

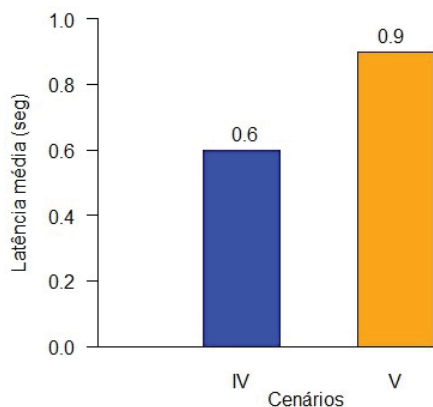
A Figura 4.5 mostra a latência da rede em cada cenário. Observou-se que a latência se incrementa pela quantidade de nós e profundidade da rede. De acordo com a comparação dos cenários IIc e IIIc, verificou-se que a latência da rede é menor para o tipo de topologia estrela.



FONTE: Autor (2019)

Adicionalmente, na Figura 4.6 são mostrados os resultados da simulação dos cenários V e VI, verificou-se também que a maior quantidade de nós a latência aumenta.

Figura 4.6: LATÊNCIA DA REDE DOS CENÁRIOS SIMILARES NOS EXPERIMENTOS DO AMBIENTE INTERNO

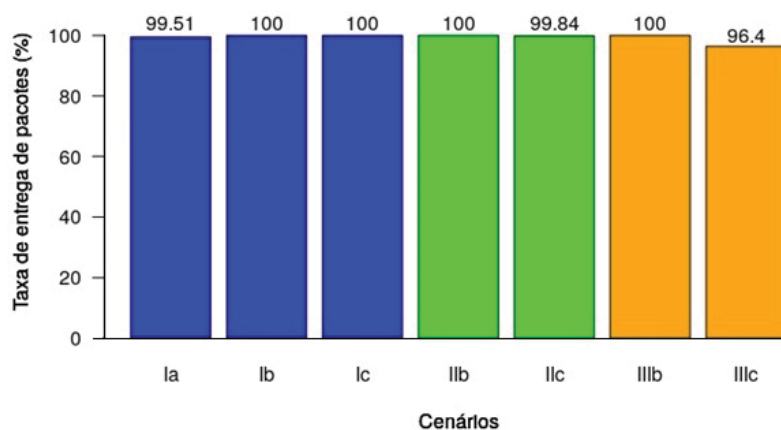


FONTE: Autor (2019)

4.2.4 Taxa de Entrega de Pacotes

A Figura 4.7 mostra a taxa de entrega de pacotes da rede em cada cenário. Conforme indicado nas análises de convergência, os cenários Ia, IIc e IIIc, tiveram perdas de pacotes de dados no início da transmissão de dados, já que o tempo inicial, *offset*, foi menor que o tempo de convergência.

Figura 4.7: TAXA DE ENTREGA DE PACOTES POR CENÁRIOS



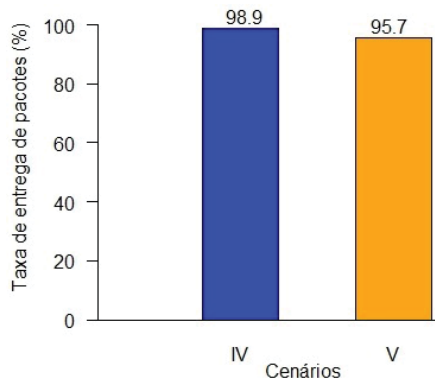
FONTE: Autor (2019)

Adicionalmente, na Figura 4.8 são mostrados os resultados da simulação dos cenários V e VI, verificou-se também que houve perda de pacotes de dados no início da transmissão de dados, já que o tempo inicial, *offset*, foi menor que o tempo de convergência.

Finalmente, nos resultados da simulação verifica-se que o tempo de convergência da

rede é mais alto em uma rede de nós Roteadores de maior profundidade.

Figura 4.8: TAXA DE ENTREGA DE PACOTES DOS CENÁRIOS SIMILARES NOS EXPERIMENTOS DO AMBIENTE INTERNO



FONTE: Autor (2019)

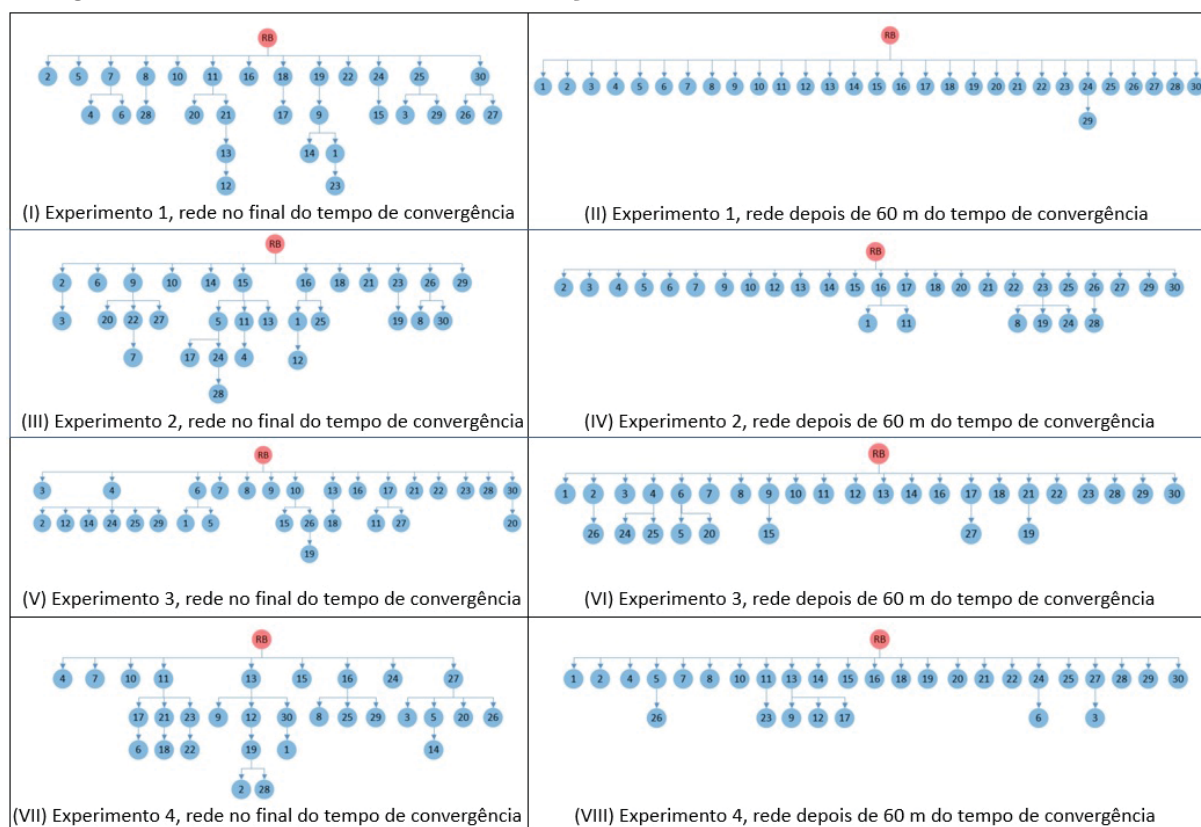
4.3 Resultados experimentais

Como foi descrito no Capítulo 3, os experimentos se realizaram em três cenários, primeiro e segundo cenário no ambiente interior e terceiro cenário no ambiente exterior. Os experimentos no primeiro cenário foram realizados com 1 Roteador de Borda e 30 Roteadores. No segundo cenário a quantidade de Roteadores foi aumentada, mantendo o primeiro cenário com os equipamentos e adicionando 30 Roteadores, conseguindo um total de 1 Roteador de Borda e 60 Roteadores. No terceiro cenário os experimentos foram realizados com 1 Roteador de Borda que foi situado no laboratório de Eletrônica e 30 Roteadores distribuídos nos postes de iluminação pública ao redor do prédio principal do LACTEC. Para os três cenários, foram realizadas as configurações de acordo com a Tabela 3.5; todas as medições das métricas foram realizadas no Roteador de Borda.

Para verificar, que as topologias formam diferentes formações, toma-se de cada cenário uma mostra dos experimentos realizados, e verificou-se que as topologias das redes no protocolo Wi-SUN FAN irão mudando através do tempo, procurando a melhor rota entre os nós, isso devido as métricas usadas no protocolo. Na Figura 4.9 são mostradas as formações das topologias dos experimentos no primeiro cenário. As Figuras 4.9 (I, III, V e VII) mostram as formações das redes no final do tempo de convergência dos expe-

rimentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente, enquanto que as Figuras 4.9 (II, IV, VI e VIII) mostram as formações das redes desde o tempo de convergência até depois de uma hora dos experimentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Figura 4.9: EXEMPLOS DA FORMAÇÃO DE REDE NO PRIMEIRO CENÁRIO

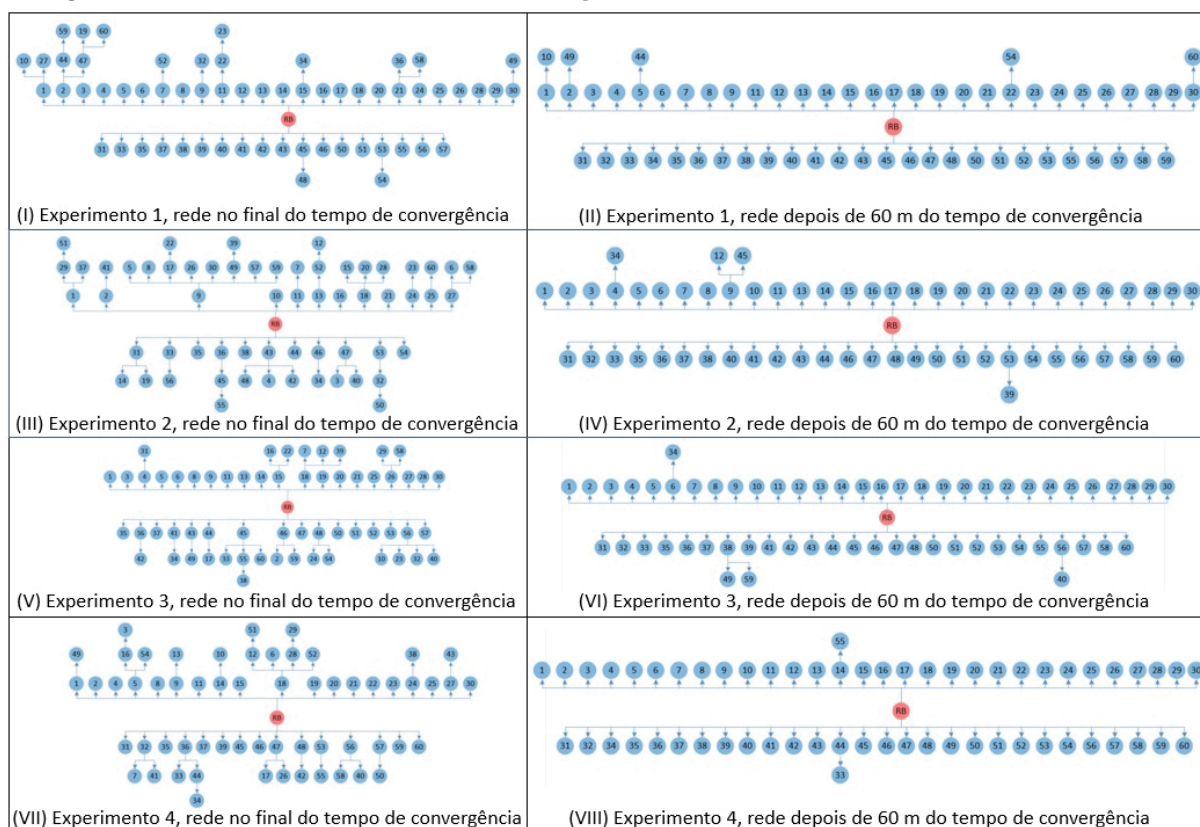


FONTE: Autor (2019)

Na formação na topologia no segundo cenário, igualmente os caminhos dos nós com respeito ao nó Roteador de Borda irão mudando ao longo do tempo. Na Figura 4.10 mostram as formações das topologias dos experimentos no segundo cenário, as Figuras 4.10 (I, III, V e VII) mostram as formações das redes no final do tempo de convergência dos experimentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente. As Figuras 4.10 (II, IV, VI e VIII) mostram as formações das redes desde o tempo de convergência até depois de uma hora dos experimentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Nas comparações dos cenários do ambiente interno, verificou-se que no final do tempo de convergência da rede, formou-se uma topologia com profundidades de rede de três a quatro saltos para alguns nós Roteadores com respeito à raiz. Depois de uma hora do

Figura 4.10: EXEMPLOS DA FORMAÇÃO DE REDE NO SEGUNDO CENÁRIO



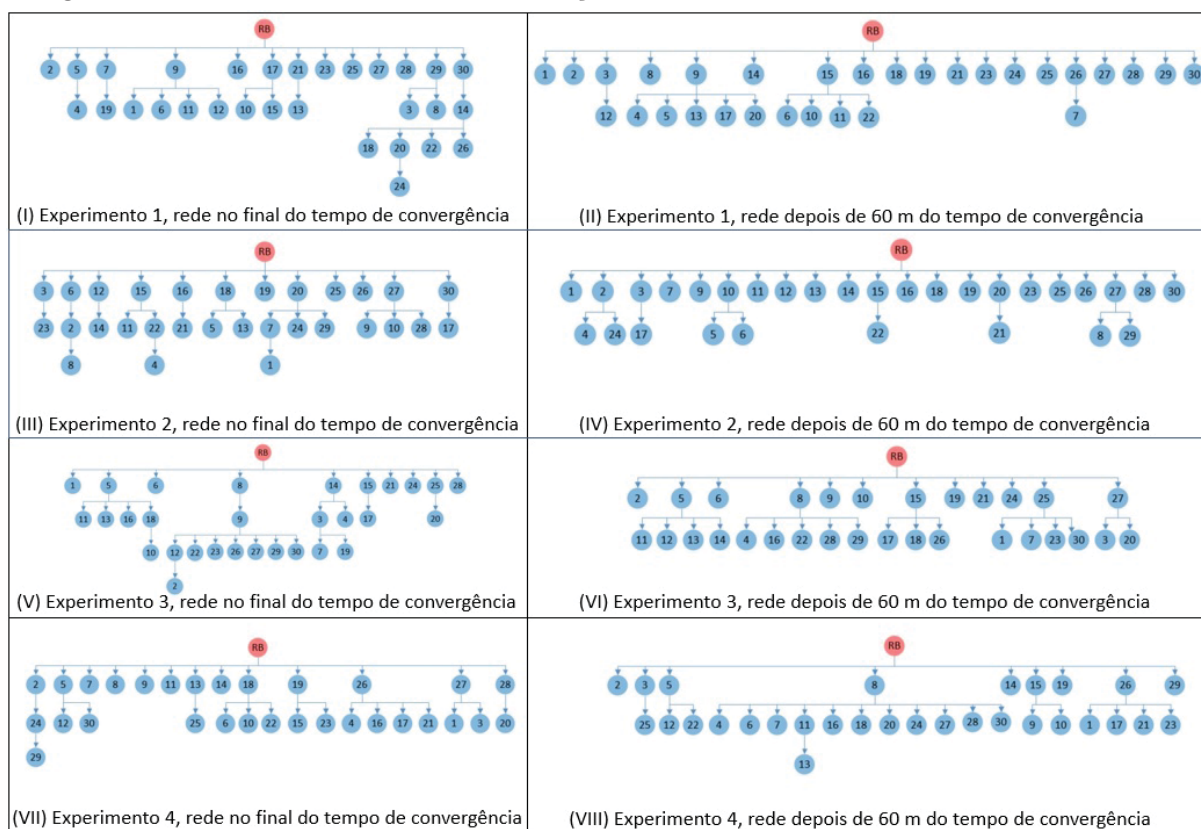
FONTE: Autor (2019)

tempo de convergência a topologia foi mudando até chegar ao ponto em que alguns poucos nós apresentam uma profundidade de rede de dois saltos, fazendo uma rede do tipo estrela nesse momento, isso devido principalmente a que os nós estão distribuídos ao redor do Roteador de Borda.

No terceiro cenário, na Figura 4.11 (I, III, V e VII) mostram as formações das redes no final do tempo de convergência dos experimentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente, as Figuras 4.11 (II, IV, VI e VIII) são as formações das redes desde o tempo de convergência até depois de uma hora dos experimentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

No caso do terceiro cenário, verificou-se que no final do tempo de convergência da rede, tem uma topologia na rede com profundidades máximas de três a quatro saltos nos Roteadores, depois de uma hora do tempo de convergência, a topologia foi mudando e conseguiram profundidades máximas de dois a três saltos. Verificou-se que existem algumas aglomerações de nós que utilizam uma mesma rota até o nó Roteador de Borda como

Figura 4.11: EXEMPLOS DA FORMAÇÃO DE REDE NO TERCEIRO CENÁRIO



FONTE: Autor (2019)

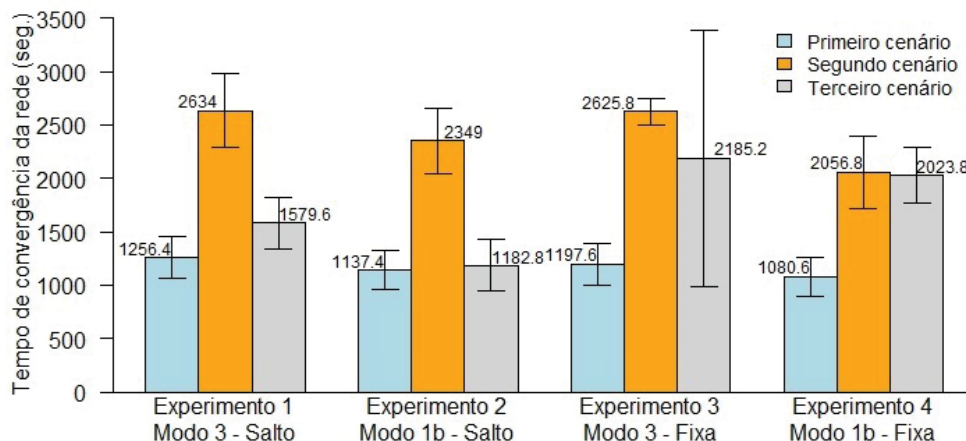
pode-se ver especialmente no nó oito na Figura 4.11 (VIII), isso devido principalmente porque os nós Roteadores estão mais distantes do Roteador de Borda a diferença dos cenários do ambiente interior.

A seguir, são apresentados os resultados dos experimentos nos três cenários para cada métrica.

4.3.1 Tempo de convergência da rede

O tempo de convergência da rede foi medido desde o tempo que é ligado Roteador de Borda até que o Roteador de Borda se consegue comunicar com todos os nós Roteadores, isso acontecerá quando todos os nós Roteadores consigam chegar até o estado de junção 5. Na Figura 4.12 mostram os tempos de convergência da rede dos experimentos nos três cenários.

Figura 4.12: TEMPO DE CONVERGÊNCIA DA REDE NOS TRÊS CENÁRIOS



FONTE: Autor (2019)

No primeiro cenário verificou-se que o modo de operação 1b em suas duas configurações apresenta menor tempo de convergência em comparação com o modo de operação 3.

No segundo cenário verificou-se também que o modo de operação 1b em suas duas configurações têm menor tempo de convergência em comparação com o modo de operação 3. O tempo médio de convergência dos resultados nos primeiro e segundo cenários é de 1168 s (19,5 min) e 2416,4 s (40,3 min) respectivamente, para o caso do ambiente interior.

No terceiro cenário verificou-se que para um ambiente externo o modo de operação 1b com a função de canal de salto em frequência têm melhor desempenho. Os tempos nos experimentos com a função de canal fixo são mais flutuantes devido aos fatores externos do ambiente. Neste cenário o promédio dos resultados dos experimentos foi de 1742,85 s (29 min).

Nos três cenários verificou-se que existe uma demora até a convergência da rede, Junjalearnvong et al. (2019) já haviam verificado um tempo de configuração alto da rede de equipamentos Wi-SUN FAN, com tempos do salto de profundidade de comunicação entre os nós de 5 min ocasionalmente, um motivo foi a porcentagem do tempo em que um canal está ocupado, para transmitir os quadros no processo de configuração da rede.

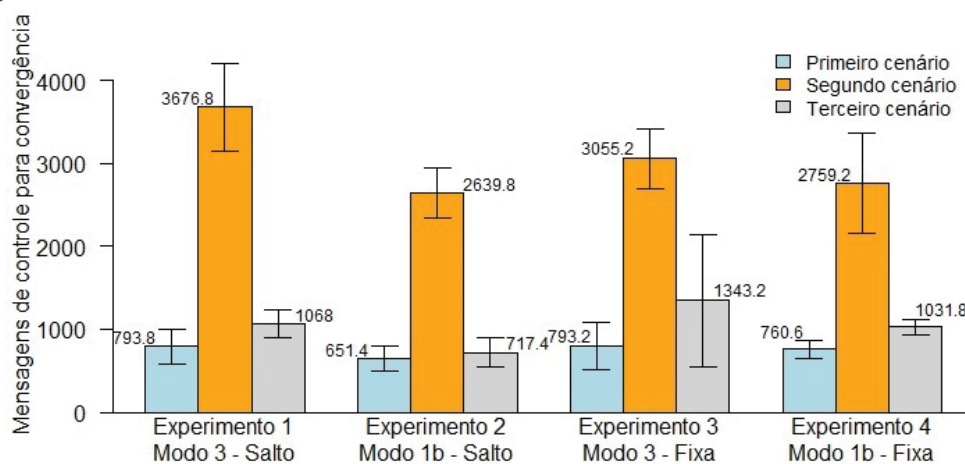
Por outro lado, nos resultados das simulações neste trabalho para a formação da rede, no cenário da Figura 4.1 (V) mostra um tempo de convergência de 427 s (7 min), isto

provavelmente devido ao tipo de topologia e profundidade da rede.

4.3.2 Mensagens de controle para a convergência da rede

As mensagens de controle para a convergência da rede medidas são a quantidade de mensagens do tipo DIO, DIS e DAO recebidos e enviados pelo Roteador de Borda com os Roteadores (30 Roteadores no primeiro cenário e 60 Roteadores no segundo cenário) durante o tempo de convergência da rede. Na Figura 4.13 são mostrados a quantidade de mensagens de controle para os três cenários.

Figura 4.13: MENSAGENS DE CONTROLE DE CONVERGÊNCIA NOS TRÊS CENÁRIOS



FONTE: Autor (2019)

No primeiro cenário verificou-se que a quantidade das mensagens de controle será maior nos experimentos que têm maior tempo de convergência da rede. O modo de operação 1b têm menor quantidade de mensagens comparado ao modo de operação 3 e tendo o mínimo com a função do canal de salto em frequência.

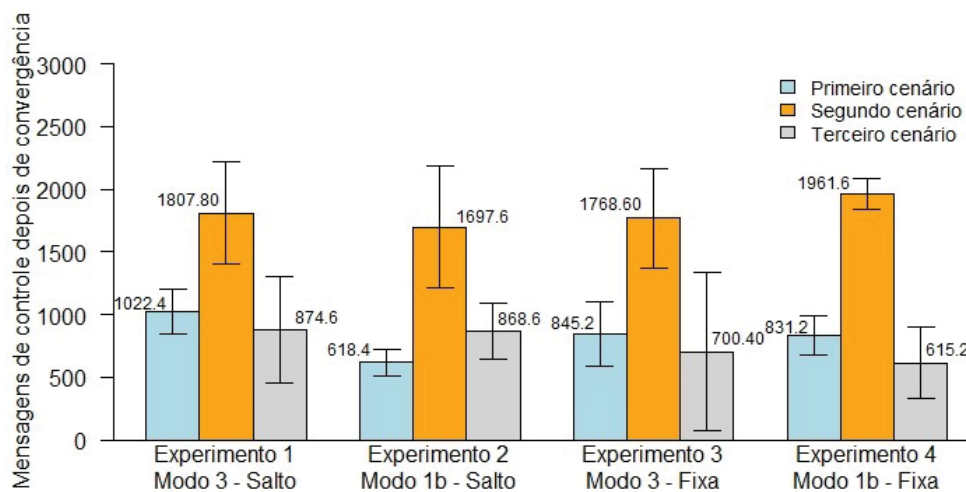
No segundo cenário verificou-se que os experimentos com maior tempo de convergência têm maior quantidade de mensagens de controle e o modo de operação 1b têm menor quantidade das mensagens e tendo o mínimo com a função do canal de salto em frequência. Como foi de se esperar, a maior quantidade de nós as mensagens de controle aumentaram, o segundo cenário é quase quatro vezes maior que o primeiro cenário.

No terceiro cenário verificou-se que igualmente a quantidade das mensagens de controle será maior nos experimentos que têm maior tempo de convergência da formação da rede. O modo de operação 1b com a função de canal de salto em frequência têm melhor desempenho. As quantidades das mensagens serão flutuantes pelos fatores externos e a topologia da rede, em especial as interferências para configurações de canal fixo e maior espaçamento de canal.

4.3.3 Mensagens de controle depois da convergência da rede

As mensagens de controle depois da convergência da rede é a quantidade de mensagens dos tipos DIO, DIS e DAO recebidos e enviados pelo Roteador de Borda, desde o tempo de convergência da rede até 15 min em cada experimento. Na Figura 4.14 são mostrados a quantidade de mensagens de controle para os três cenários.

Figura 4.14: MENSAGENS DE CONTROLE DEPOIS DE CONVERGÊNCIA NOS TRÊS CENÁRIOS



FONTE: Autor (2019)

No primeiro cenário verificou-se que o modo de operação 1b tem menor quantidade das mensagens e tendo o mínimo com a função de canal de salto em frequência. As mensagens de controle depois do tempo de convergência continuam intercambiando-se e a topologia da rede vai se atualizando, encontrando os nós Roteadores melhores caminhos para o envio de dados.

No segundo cenário verificou-se que a função de canal de salto em frequência para os modos de operação 3 e 1b tem menor quantidade das mensagens, ou seja, a quantidade de mensagens de controle é definida pela complexidade da topologia da rede, conseguindo menor quantidade na função de canal de salto em frequência para redes mais densas. Além disso, as mensagens de controle encontradas nos dois cenários foram dos tipos DIO e DAO, com ausência da mensagem DIS, isto devido que não existem mais solicitações de ingresso de nós na rede.

No terceiro cenário verificou-se que as mensagens de controle são flutuantes em especial no experimento 3. No modo de operação 1b com canal fixo tem menor quantidade de mensagens de controle. No entanto, não é um indicativo final de melhor desempenho nas medições, as quantidades das mensagens dependerão da topologia da rede e o sucesso da chegada das mensagens intercambiadas entre os nós.

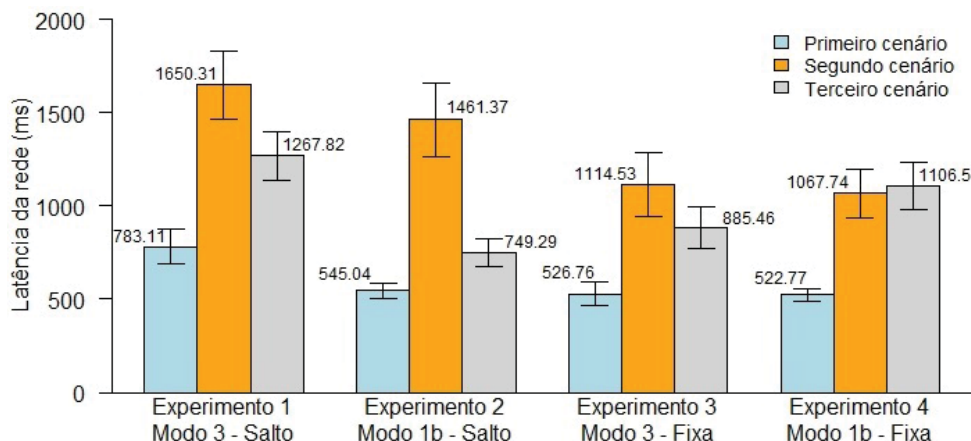
Portanto, depois do tempo de convergência os nós continuam intercambiando mensagens de controle atualizando o custo de roteamento, até diminuir a profundidade da rede.

4.3.4 Latência da rede

A latência da rede foi computada a partir do tempo entre as mensagens enviadas pelo servidor através do Roteador de Borda para todos os nós Roteadores e o retorno das mensagens dos nós Roteadores para o mesmo servidor. As mensagens são geradas e enviadas depois do tempo de convergência da rede com um intervalo de 4 s de envio para cada nó. Finalizado o envio para todos os nós, iniciou-se novamente o envio das mensagens depois de 60 s até finalizar o teste, o tempo do teste foram de 60 min com pacotes de dados de 65 bytes do tipo UDP. Na Figura 4.15 mostram a latência da rede dos experimentos nos três cenários.

No primeiro cenário verificou-se que o modo de operação 1b têm menor tempo de latência e tendo melhor desempenho na função de canal fixo.

Figura 4.15: LATÊNCIA DA REDE NOS TRÊS CENÁRIOS



FONTE: Autor (2019)

No segundo cenário verificou-se também que o modo de operação 1b têm menor tempo de latência e tendo melhor desempenho na função de canal fixo. Os promédios dos tempos de latência do primeiro e segundo cenários dos experimentos é de 0,6 s e 1,3 s respectivamente.

No terceiro cenário verificou-se que a latência também é melhor para o modo de operação 1b na função de canal fixo. O intervalo de confiança da latência será flutuante pelo motivo principal da topologia da rede. O promédio da latência no terceiro cenário dos experimentos é de 1 s.

Os resultados estão próximos das especificações do protocolo Wi-SUN FAN.

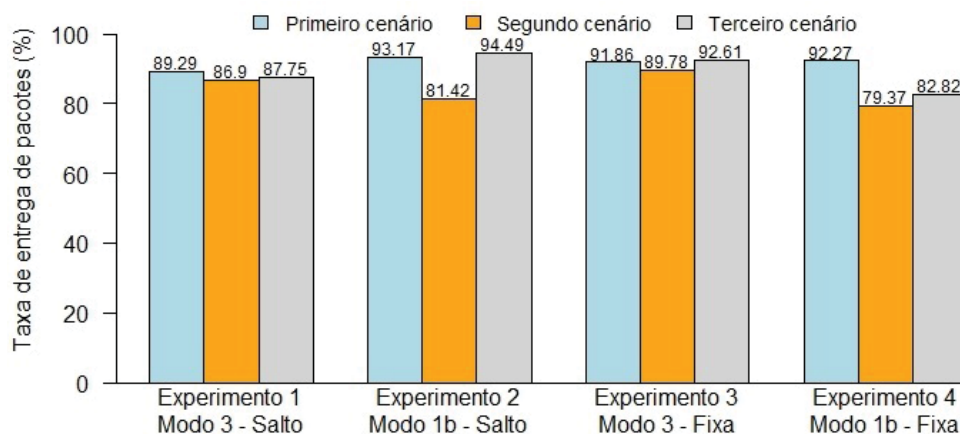
4.3.5 Taxa de entrega de pacotes

A taxa de entrega de pacotes foi medida durante o tempo de medição da latência da rede sobre os pacotes de dados gerados durante o teste. Na Figura 4.16 mostram a taxa de entrega de pacotes da rede para os três cenários.

No primeiro cenário verificou-se que o modo de operação 1b têm melhor percentual e melhor desempenho na função de canal de salto em frequência.

No segundo cenário verificou-se que o modo de operação 3 têm melhor percentual e

Figura 4.16: TAXA DE ENTREGA DE PACOTES NOS TRÊS CENÁRIOS



FONTE: Autor (2019)

tendo melhor desempenho na função de canal fixo.

No terceiro cenário verificou-se que o modo de operação 1b com função de canal de salto em frequência têm melhor desempenho no ambiente externo.

Os resultados tiveram uma taxa menor a 90% em alguns experimentos. A taxa de entrega de pacotes vai melhorando no transcurso do tempo.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O objetivo principal desta dissertação foi avaliar o desempenho de um sistema de comunicação em uma rede *mesh* utilizando a tecnologia do perfil Wi-SUN FAN. As LLNs é uma alternativa de uso para aplicações de IoT, para soluções onde centraliza a coleta de informação, como por exemplo as redes de medidores inteligentes de energia. Baseado nisso, foi apresentado o perfil WI-SUN FAN, que tem como característica principal o padrão RPL para a formação da rede e trabalha no modo de não-armazenamento, no qual o Roteador de Borda é o que mantém a informação do roteamento da rede.

A partir dos resultados das simulações conclui-se que os cenários Ia, Ib, Ic, IIb e IIIb simulados para Wi-SUN FAN devem iniciar com um tempo de offset superior a 182,32 s, para evitar a perda de pacotes iniciais ao aguardar o tempo de convergência da rede. Comparando o cenário IIc, tipo estrela, com relação ao cenário IIIc, tipo árvore, o primeiro precisa de menor tempo de convergência e tem menor quantidade das mensagens e latência na rede. Assim, é importante considerar as métricas analisadas nas simulações tanto no dimensionamento quanto na expansão da rede, já que o balanceamento adequado para a escolha da melhor posição do Roteador de Borda impacta diretamente no desempenho da rede.

A partir dos resultados experimentais, o perfil FAN apresenta modos de operação que se diferenciam em especial pela quantidade de canais disponíveis de acordo ao espaçamento de canal. Os modos de operação 1b e 3, que trabalharam nas funções de salto em frequência e canal fixo, de acordo com os resultados verificou-se que o modo de operação 1b na função de canal de salto em frequência têm melhor desempenho nos três cenários apresentados.

Verificou-se que os tempos de formação da rede chegaram ao valor médio de convergência da rede de 1168 s (19,5 min) e 2416,4 s (40,3 min) no primeiro e segundo cenários, respectivamente, e o terceiro cenário foi de 1742,85 s (29 min), considerando que todos

os equipamentos se ligam ao mesmo tempo. Isso indica que o tempo da convergência do perfil FAN será definido especialmente pela quantidade de equipamentos e profundidade na rede, verificando-se que o tempo da formação da rede será maior em redes mais densas.

No primeiro e segundo cenários, os resultados demonstraram menores flutuações na informação das métricas, porque foram controlados os fatores externos do ambiente. No terceiro cenário, os fatores externos do ambiente demonstraram flutuações dos resultados nas métricas, especialmente no experimento com canal fixo.

Verificou-se que o protocolo FAN em alguns experimentos tiveram uma taxa de entrega de dados menor a 90%, também, a formação da rede vai melhorando os níveis de profundidade dos nós no transcurso do tempo depois do tempo de convergência. Portanto, o protocolo FAN precisa de um tempo maior que o tempo de convergência da rede, para conseguir diminuir a profundidade na topologia.

Para trabalhos futuros, recomenda-se propor um novo método para melhorar os tempos dos estados de junção, para diminuir o tempo da formação da rede no protocolo Wi-SUN FAN. Além disso, fazer simulações com uma pilha completa de Wi-SUN FAN, realizando a integração dos elementos de informação e os estados de junção próprio do protocolo Wi-SUN FAN, utilizando os SO livres, o que permitirá incentivar novas alternativas de pesquisas neste protocolo.

6 APÊNDICE A

CÓDIGO FONTE DO SIMULADOR

```

/*----- SCRIPT rpl-udp -----*/
#include <stdlib.h>
#include "contiki.h"
#include "net/routing/routing.h"
#include "random.h"
#include "net/netstack.h"
#include "net/ipv6/simple-udp.h"
#include "sys/log.h"
#define LOG_MODULE "App"
#define LOG_LEVEL LOG_LEVEL_INFO
#define WITH_SERVER_REPLY 0
#define UDP_CLIENT_PORT 8765
#define UDP_SERVER_PORT 5678
/*-----*/
#define START_INTERVAL (3 * 60 * CLOCK_SECOND)
#define SEND_INTERVAL (60* CLOCK_SECOND)
#define DELTA_INTERVAL 3250
static struct simple_udp_connection udp_conn;
/*-----*/
PROCESS(udp_client_process, "UDP client");
AUTOSTART_PROCESSES(&udp_client_process);
/*-----*/
/*RECEPTOR*/

```

```

static void
udp_rx_callback(struct simple_udp_connection *c,
                const uip_ipaddr_t *sender_addr,
                uint16_t sender_port,
                const uip_ipaddr_t *receiver_addr,
                uint16_t receiver_port,
                const uint8_t *data,
                uint16_t datalen)
{
    unsigned count = *(unsigned *)data;
    LOG_INFO("Received response %u from ", count);
    LOG_INFO_6ADDR(sender_addr);
    LOG_INFO_("\n");
}

/*-----*/
/*PROCESSOS*/
PROCESS_THREAD(udp_client_process, ev, data)
{
    static struct etimer periodic_timer;
    static unsigned count;
    uip_ipaddr_t dest_ipaddr;
    char tun_addr[16] = {0xfd, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
                        0x01, 0x01, 0x00, 0x10, 0x03, 0x00, 0x03, 0x03, 0x03};
    uip_ipaddr_t m_dest_ipaddr;
    memcpy(&m_dest_ipaddr, tun_addr, 16);
    unsigned max_size = 96;
    char payload[max_size];
    PROCESS_BEGIN();
    /* Initialize UDP connection */

```

```

simple_udp_register(&udp_conn, UDP_CLIENT_PORT, NULL,
                  UDP_SERVER_PORT, udp_rx_callback);

int ft = 0;
if(ft == 0) {
    etimer_set(&periodic_timer, START_INTERVAL);
    ft=1;
}
else {
    etimer_set(&periodic_timer, random_rand() % SEND_INTERVAL);
}

while(count < 1000) {
    PROCESS_WAIT_EVENT_UNTIL(etimer_expired(&periodic_timer));
    if(NETSTACK_ROUTING.node_is_reachable() &&
        NETSTACK_ROUTING.get_root_ipaddr(&dest_ipaddr)) {
        /* Send to DAG root */
        LOG_INFO("Sending request %u to ", count);
        LOG_INFO_6ADDR(&dest_ipaddr);
        LOG_INFO_6ADDR(&m_dest_ipaddr);
        LOG_INFO_("\n");

        int i;
        for(i = 0; i < max_size-1; ++i) {
            if(i == 0) {
                payload[i] = count;
                ++i;
                payload[i] = count>>8;
            }
            else {
                payload[i] = (random_rand() % (122 + 1 - 48) + 48);
            }
        }
    }
}

```

```

    }

    payload[max_size-1] = '\n';

    simple_udp_sendto(&udp_conn, &payload[0], max_size,
        &m_dest_ipaddr);

    count++;

} else {

    LOG_INFO("Not reachable yet\n");

}

/* Add some jitter */

unsigned next_packet = random_rand() % ((SEND_INTERVAL +
DELTA_INTERVAL) + 1 - (SEND_INTERVAL - DELTA_INTERVAL)) +
(SEND_INTERVAL - DELTA_INTERVAL);

etimer_set(&periodic_timer, next_packet);

LOG_INFO("Next_packet in %ums\n", next_packet);

}

PROCESS_END();

}

/*----- SCRIPT rpl-border-router -----*/
#include "contiki.h"

/* Log configuration */
#include "sys/log.h"

#define LOG_MODULE "RPL BR"

#define LOG_LEVEL LOG_LEVEL_INFO

/* Declare and auto-start this file's process */
PROCESS(contiki_ng_br, "Contiki-NG Border Router");
AUTOSTART_PROCESSES(&contiki_ng_br);

/*-----*/
PROCESS_THREAD(contiki_ng_br, ev, data)

```

```
{  
    PROCESS_BEGIN();  
#if BORDER_ROUTER_CONF_WEBSERVER  
    PROCESS_NAME(webserver_nogui_process);  
    process_start(&webserver_nogui_process, NULL);  
#endif /* BORDER_ROUTER_CONF_WEBSERVER */  
    LOG_INFO("Contiki-NG Border Router started\n");  
    PROCESS_END();  
}
```

BIBLIOGRAFIA

ALI, H. **A performance evaluation of rpl in contiki**. 2012.

ALLIANCE, W. **Technical Profile Specification, Field Area Network**. WiSUN Alliance, San Ramon, CA, USA, 2017.

BARONTI, P. et al. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and zigbee standards. **Computer communications**, Elsevier, v. 30, n. 7, p. 1655–1695, 2007.

COMER, D. et al. Wist: Wi-sun fan protocol emulation testbed. In: IEEE. **2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**. 2017. p. 1–6.

GUGLIELMO, D. D.; ANASTASI, G.; SEGHETTI, A. From ieee 802.15. 4 to ieee 802.15. 4e: A step towards the internet of things. In: **Advances onto the Internet of Things**. Springer, 2014. p. 135–152.

HARADA, H. et al. Ieee 802.15. 4g based wi-sun communication systems. **IEICE Transactions on Communications**, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, v. 100, n. 7, p. 1032–1043, 2017.

HEILE, B. et al. Wi-sun fan overview. **draft-heile-lpwan-wisun-overview-00, Internet-Draft, IETF**, 2017.

IEEE802.15.4. Ieee standard for low-rate wireless personal area networks (wpans). **IEEE Computers Society**, 2015.

JUNJALEARNVONG, T. et al. 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. et al. 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.

KATO, T. Standardization and certification process for “wi-sun” wireless communication technology. **Anritsu, Technical Review**, n. 23, p. 23–04, 2015.

KHAN, M. R. **Performance and route stability analysis of RPL protocol**. 2012.

KURNIAWAN, A. **Practical Contiki-NG: Programming for Wireless Sensor Networks**. Apress, 2018.

LEVIS, P.; CLAUSEN, T. H. The trickle algorithm. 2011.

MA, J.; HARADA, H.; KOJIMA, F. Proposal and performance evaluation of tvws-wi-sun system. In: IEEE. **2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)**. 2015. p. 2002–2007.

MOCHIZUKI, K. et al. Development and field experiment of wide area wi-sun system based on iee 802.15. 4g. In: IEEE. **2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)**. 2016. p. 76–81.

QADIR, Q. M. et al. Low power wide area networks: a survey of enabling technologies, applications and interoperability needs. **IEEE Access**, IEEE, v. 6, p. 77454–77473, 2018.

SANTOS, B. P. et al. Internet das coisas: da teoria à prática. **Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**, p. 31, 2016.

SHELBY, Z. et al. Neighbor discovery optimization for ipv6 over low-power wireless personal area networks (6lowpans). **Standard Track**, v. 6775, 2012.

TSVETKOV, T.; KLEIN, A. Rpl: Ipv6 routing protocol for low power and lossy networks. **Network**, v. 59, 2011.

ZIKRIA, Y. B. et al. A survey on routing protocols supported by the contiki internet of things operating system. **Future Generation Computer Systems**, Elsevier, v. 82, p. 200–219, 2018.