

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GIANCARLO COVOLO HECK

OTIMIZAÇÃO DO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO RPL  
PARA AS SMART GRIDS, SMART CITIES E IOT

CURITIBA PR

2025

GIANCARLO COVOLO HECK

OTIMIZAÇÃO DO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO RPL  
PARA AS SMART GRIDS, SMART CITIES E IOT

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Ciência da Computação no Programa de Pós-Graduação em Informática, Setor de Ciências Exatas, da Universidade Federal do Paraná.

Área de concentração: *Computação*.

Orientador: Luiz Carlos Pessoa Albini.

Coorientador: Roberto André Hexsel.

CURITIBA PR

2025

# Ficha catalográfica

Substituir o arquivo `0-iniciais/catalografica.pdf` pela ficha catalográfica fornecida pela Biblioteca da UFPR (PDF em formato A4).

**Instruções para obter a ficha catalográfica e fazer o depósito legal da tese/dissertação (contribuição de André Hochuli, abril 2019. Links atualizados Wellton Costa, Nov 2022):**

1. Estas instruções se aplicam a dissertações de mestrado e teses de doutorado. Trabalhos de conclusão de curso de graduação e textos de qualificação não precisam segui-las.
2. Verificar se está usando a versão mais recente do modelo do PPGInf e atualizar, se for necessário (<https://gitlab.c3sl.ufpr.br/maziero/tese>).
3. conferir o *checklist* de formato do Sistema de Bibliotecas da UFPR, em <https://bibliotecas.ufpr.br/servicos/normalizacao/>
4. Enviar e-mail para "[referencia.bct@ufpr.br](mailto:referencia.bct@ufpr.br)" com o arquivo PDF da dissertação/tese, solicitando a respectiva ficha catalográfica.
5. Ao receber a ficha, inseri-la em seu documento (substituir o arquivo `0-iniciais/catalografica.pdf` do diretório do modelo).
6. Emitir a Certidão Negativa (CND) de débito junto a biblioteca, em <https://bibliotecas.ufpr.br/servicos/certidao-negativa/>
7. Avisar a secretaria do PPGInf que você está pronto para o depósito. Eles irão mudar sua titulação no SIGA, o que irá liberar uma opção no SIGA pra você fazer o depósito legal.
8. Acesse o SIGA (<http://www.prppg.ufpr.br/siga>) e preencha com cuidado os dados solicitados para o depósito da tese.
9. Aguarde a confirmação da Biblioteca.
10. Após a aprovação do pedido, informe a secretaria do PPGInf que a dissertação/tese foi depositada pela biblioteca. Será então liberado no SIGA um link para a confirmação dos dados para a emissão do diploma.

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação INFORMÁTICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **GIANCARLO COVOLO HECK**, intitulada: **OTIMIZAÇÃO DO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO RPL PARA AS SMART GRIDS, SMART CITIES E IOT**, sob orientação do Prof. Dr. LUIZ CARLOS PESSOA ALBINI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

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

CURITIBA, 02 de Junho de 2025.

Assinatura Eletrônica

04/06/2025 17:18:44.0

LUIZ CARLOS PESSOA ALBINI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

05/06/2025 10:18:03.0

EDUARDO TODT

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

04/06/2025 14:33:11.0

CARLOS MARCELO PEDROSO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

25/06/2025 08:01:28.0

EDUARDO DA SILVA

Avaliador Externo (INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE)

Assinatura Eletrônica

04/06/2025 12:11:51.0

CARLOS ALBERTO MAZIERO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

02/07/2025 16:22:50.0

ROBERTO ANDRÉ HEXSEL

Coorientador(a) (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



*À minha esposa, Elisane Belniaki,  
minha companheira incansável, que  
está sempre ao meu lado nos mo-  
mentos que preciso. Sua paciência,  
compreensão e amor me sustentaram  
para a realização deste desafio.  
Às minhas filhas, Fernanda e Helena,  
que me deram os motivos mais puros  
para seguir em frente. O brilho nos  
olhos de vocês é a maior conquista  
que posso ter.  
Este doutorado também é de vocês!*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao amigo e professor Roberto André Hexsel pelos ensinamentos, dedicação e pela companhia nos inúmeros almoços transformados em reuniões de orientação.

Ao professor Luiz Carlos Pessoa Albini por todas as contribuições e por conduzir com maestria a reta final deste trabalho.

À minha querida esposa Elisane e às minhas lindas filhas Fernanda e Helena pelos momentos em que me liberaram das tarefas de casa e permitiram que eu me dedicasse à conclusão deste projeto.

Aos familiares e amigos pelo apoio fornecido e pela compreensão nos momentos em que estive ausente.

Ao professor Lourival Lippmann Junior pelo incentivo à realização deste doutoramento.

A todos os colegas que contribuíram de alguma forma.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Programa de Excelência Acadêmica (PROEX).

## RESUMO

As tecnologias de Internet das Coisas têm sido adotadas em diversas aplicações. Destaca-se seu uso em redes elétricas inteligentes, incluindo medição de energia, recomposição automática de falhas e integração da geração distribuída. Além disso, essas tecnologias também são aplicadas em cidades inteligentes, como na iluminação pública, no controle de semáforos e no monitoramento ambiental. Estas aplicações possuem características muito específicas, mas existe um ponto em comum, todas necessitam de comunicação para funcionarem ou serem monitoradas. Uma tecnologia que tem ganhado destaque nesse contexto é a rede sem fio conhecida como Wi-SUN FAN, sigla para *Wireless Smart Ubiquitous Network – Field Area Network*. A especificação desta rede define a implementação e o comportamento de uma rede interoperável baseada em padrões abertos. Os padrões de projeto de redes sem fio utilizados para definir as redes Wi-SUN FAN permitem que estas usufruam de características como segurança, salto de canais de rádio, endereçamento IPv6, dentre outros. Apesar de todas as boas práticas adotadas, estas redes possuem pontos a serem melhorados, tais como: tempo gasto na formação e recuperação da rede após desligamentos, dificuldade de interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes diferentes e questões inerentes à mobilidade dos dispositivos na rede. O protocolo de roteamento RPL é um dos padrões adotados nas redes Wi-SUN FAN, sendo responsável pelo roteamento de pacotes na camada de rede. Este trabalho tem como objetivo principal propor e avaliar um mecanismo que otimize o tempo de convergência do protocolo RPL e consequentemente reduza o tempo de formação da rede. As questões de interoperabilidade e de mobilidade não são abordadas neste trabalho. Este trabalho foi motivado inicialmente pelos estudos e desenvolvimentos efetuados sobre a rede inteligente da Copel em Ipiranga-PR. Sobre a rede de Ipiranga são desenvolvidas e demonstradas algumas soluções de software para viabilizar o uso compartilhado das redes inteligentes de última milha com aplicações de cidades inteligentes e Internet das Coisas. Em seguida, motivado por dados da bibliografia revisada e do elevado tempo de inicialização verificado na rede de Ipiranga, é conduzida uma investigação para verificar a influência dos parâmetros de configuração do protocolo de roteamento RPL no seu tempo de convergência e é idealizado o mecanismo de otimização. O mecanismo de otimização proposto neste trabalho é avaliado por meio de simulações e experimentos. Os resultados obtidos indicam que o mecanismo pode reduzir o tempo de convergência do protocolo RPL original em até 50%. Ainda, possui baixa complexidade de implementação e contribui para reduzir o ciclo de trabalho e o consumo de energia da rede, visto que reduz o número de mensagens transmitidas. Por fim, os resultados das investigações indicam que a seleção adequada de parâmetros de configuração do protocolo RPL também contribui com a redução do tempo de formação das redes que fazem uso deste protocolo.

Palavras-chave: Otimização. RPL. Redes Inteligentes.

## ABSTRACT

Internet of Things technologies have been adopted in various applications. Their use stands out in smart power grids, including energy metering, automatic fault recovery, and distributed generation integration. Additionally, these technologies are also applied in smart cities, such as public lighting, traffic light control, and environmental monitoring. These applications have very specific characteristics, but they share a common point: all require communication to function or be monitored. A technology that has gained prominence in this context is the wireless network known as Wi-SUN FAN, an acronym for *Wireless Smart Ubiquitous Network – Field Area Network*. The specification of this network defines the implementation and behavior of an interoperable network based on open standards. The wireless network design standards used to define Wi-SUN FAN networks allow them to benefit from features such as security, radio channel hopping, IPv6 addressing, among others. Despite all the good practices adopted, these networks have points that need to be improved, such as time spent on network formation and recovery after shutdowns, difficulties in interoperability between equipment from different manufacturers, and challenges inherent to device mobility within the network. The RPL routing protocol is one of the standards adopted in Wi-SUN FAN networks, being responsible for packet routing at the network layer. The main objective of this work is to propose and evaluate a mechanism that optimizes the convergence time of the RPL protocol and consequently reduces network formation time. Interoperability and mobility issues are not addressed in this work. This work was initially motivated by the studies and developments carried out on Copel's smart grid in Ipiranga-PR. Based on the Ipiranga network, some software solutions are developed and demonstrated to enable the shared use of last-mile smart grids with smart city and IoT applications. Subsequently, motivated by data from the reviewed literature and the high initialization time observed in the Ipiranga network, an investigation is conducted to assess the influence of RPL routing protocol configuration parameters on its convergence time, leading to the design of the optimization mechanism. The optimization mechanism proposed in this work is evaluated through simulations and experiments. The results obtained indicate that the mechanism can reduce the convergence time of the default RPL protocol by up to 50%. Furthermore, it has low implementation complexity and contributes to reducing the network's duty cycle and energy consumption, since it reduces the number of transmitted messages. Finally, the results of investigation indicates that the appropriate selection of RPL protocol configuration parameters also contributes to reducing the formation time of networks that use this protocol.

Keywords: Optimization. RPL. Smart Grids.

## LISTA DE FIGURAS

|      |                                                                                                                                                                                             |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | Camadas de potência e de comunicação das <i>Smart Grids</i> . Figura extraída de (Rajalingham et al., 2014). . . . .                                                                        | 16 |
| 2.1  | Faixas de frequência iniciais do padrão IEEE 802.15.4. . . . .                                                                                                                              | 25 |
| 2.2  | Pilha de protocolos Wi-SUN FAN (figura extraída da especific. Wi-SUN FAN (IEEE Std 2857, 2021)). . . . .                                                                                    | 28 |
| 2.3  | Tipos de dispositivos Wi-SUN FAN (figura extraída da especific. Wi-SUN FAN (IEEE Std 2857, 2021)). . . . .                                                                                  | 29 |
| 2.4  | Escalonamento do salto de canais (IEEE Std 2857, 2021).. . . . .                                                                                                                            | 31 |
| 2.5  | Fluxo de mensagens de descoberta e conexão. . . . .                                                                                                                                         | 32 |
| 2.6  | Exemplo de DODAG criado pelo protocolo de roteamento RPL. . . . .                                                                                                                           | 34 |
| 4.1  | Cenários de rede avaliados. Raios de alcance de 110, 170, 230, 330 e 400 metros. . . . .                                                                                                    | 45 |
| 4.2  | Árvore de conexão com 9 saltos, resultante do cenário com 110 metros de RA.. . . .                                                                                                          | 45 |
| 4.3  | Influência do $DIO\_Imin$ no tempo do RPL. Cenário com RA de 110 m. $DIO\_Imax=2$ e $DIO\_k=0$ . . . . .                                                                                    | 47 |
| 4.4  | Duty cycle para $DIO\_Imin$ 13 (topo) e 10 (embaixo). Cenário com RA de 110 m. $DIO\_Imax=2$ e $DIO\_k=0$ . . . . .                                                                         | 48 |
| 4.5  | Todos os cenários, alcance de 110 m (topo) e 400 m (embaixo), $DIO\_Imin$ de 9 a 16, $DIO\_Imax=2$ e $DIO\_k=0$ . . . . .                                                                   | 49 |
| 4.6  | Influência do $DIO\_Imax$ no tempo do RPL. Cenário com RA de 110 m. $DIO\_Imin=10$ e $DIO\_k=0$ . . . . .                                                                                   | 50 |
| 4.7  | Influência do $DIO\_Imax$ no ciclo de trabalho da rede. $DIO\_Imax=1$ (topo), $DIO\_Imax=4$ (meio), $DIO\_Imax=8$ (embaixo). Cenário com RA de 110 m. $DIO\_Imin=10$ e $DIO\_k=0$ . . . . . | 51 |
| 4.8  | Influência do $DIO\_k$ no tempo de conexão. Cenário com RA de 110 m. $DIO\_Imin=10$ e $DIO\_Imax=4$ . . . . .                                                                               | 52 |
| 4.9  | Influência do $DIO\_k$ na ocupação do meio de transmissão. $DIO\_k=0$ no topo e $DIO\_k=1$ embaixo. Cenário com RA 110 metros, $DIO\_Imin=10$ e $DIO\_Imax=4$ . . . . .                     | 52 |
| 4.10 | Avaliação do número de testes de LP ( <i>Link Probe</i> ). Cenário com RA de 110 metros. $DIO\_Imin=10$ , $DIO\_Imax=4$ e $DIO\_k=1$ . . . . .                                              | 54 |
| 5.1  | Representação da tabela de vizinhos com o campo indicador FRR. . . . .                                                                                                                      | 57 |
| 5.2  | Diagrama da lógica de avaliação dos enlaces com o mecanismo FRR. . . . .                                                                                                                    | 58 |
| 5.3  | Tempo de formação do FRR. Cenário com RA de 110 m. . . . .                                                                                                                                  | 62 |
| 5.4  | Tempo de formação do FRR. Cenários com RA de 230 m (topo) e 400 m (embaixo). . . . .                                                                                                        | 63 |
| 5.5  | Cenário da área urbana da cidade de Ipiranga. . . . .                                                                                                                                       | 64 |

|      |                                                                                                             |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.6  | Resultado da simulação do cenário de Ipiranga, FRR 128 <i>versus</i> o tempo de inicialização (RPL padrão). | 65 |
| 5.7  | Montagem do <i>testbed</i> para os experimentos com o FRR.                                                  | 66 |
| 5.8  | Cenário da configuração de rede para simulação e comparação com os experimentos.                            | 66 |
| 5.9  | Resultados dos experimentos e simulações. FRR 16 <i>versus</i> tempo das inicializações (RPL padrão).       | 67 |
| A.1  | Localização da cidade de Ipiranga.                                                                          | 80 |
| A.2  | Ilustração da rede <i>Smart Grid</i> de Ipiranga.                                                           | 81 |
| A.3  | Estação Meteorológica para monitoramento do clima.                                                          | 82 |
| A.4  | Dados visualizados no software da estação meteorológica.                                                    | 83 |
| A.5  | Equipamentos da aplicação de medição de água.                                                               | 83 |
| A.6  | Dados visualizados na aplicação de monitoramento de medições de água.                                       | 84 |
| A.7  | Diagrama e equipamento da aplicação de iluminação pública.                                                  | 84 |
| A.8  | Tela de posicionamento georreferenciado da aplicação de gestão da iluminação pública.                       | 85 |
| A.9  | Arquitetura do compartilhamento da rede SG com as aplicações de <i>Smart City</i> .                         | 86 |
| A.10 | Arquitetura da integração do Gateway LoRaWAN.                                                               | 88 |
| A.11 | Montagem do <i>gateway</i> LoRaWAN e local da instalação em campo.                                          | 89 |
| A.12 | Localização dos 26 relés de IP instalados na SG de Ipiranga.                                                | 91 |

## LISTA DE TABELAS

|     |                                                                                 |    |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Bandas de frequência e parâmetros dos canais . . . . .                          | 29 |
| 2.2 | Modos de operação da camada física. . . . .                                     | 30 |
| 3.1 | Tabela sumário dos trabalhos relacionados. . . . .                              | 42 |
| 4.1 | Parâmetros de configuração utilizados no simulador Cooja. . . . .               | 46 |
| 4.2 | Resumo da influência dos parâmetros do RPL no seu tempo de convergência. . .    | 53 |
| 4.3 | Resultados da variação do número de avaliações do enlace . . . . .              | 54 |
| 5.1 | Parâmetros de configuração utilizados no simulador Cooja para avaliação do FRR. | 61 |
| 5.2 | Tempo de formação <i>versus</i> tamanho da cache do FRR. . . . .                | 62 |
| 5.3 | Tabela comparativa do FRR com os principais trabalhos relacionados. . . . .     | 68 |
| A.1 | Volume de dados produzidos por tipo de aplicação. . . . .                       | 82 |
| A.2 | Avaliação do ciclo de trabalho da rede por coletor.. . . .                      | 89 |
| A.3 | Impacto no tráfego da rede com os novos dispositivos.. . . .                    | 91 |



## LISTA DE ACRÔNIMOS

|          |                                                                                          |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2-FSK    | <i>2-level Frequency Shift Keying</i>                                                    |
| 4G       | <i>4th-Generation Wireless</i>                                                           |
| 5G       | <i>5th-Generation Wireless</i>                                                           |
| ACK      | <i>Acknowledgment</i>                                                                    |
| AES-CCM  | <i>Advanced Encryption Standard in the Counter and CBC-MAC Mode</i>                      |
| AMCA     | <i>Asymmetric/Asynchronous Multi-Channel Adaptation</i>                                  |
| AMI      | <i>Advanced Metering Infrastructure</i>                                                  |
| ANEEL    | <i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>                                              |
| ANSI/TIA | <i>American National Standards Institute / Telecommunications Industries Association</i> |
| BDI      | <i>Broadcast Dwell Interval</i>                                                          |
| BI       | <i>Beacon Interval ou Broadcast Interval</i>                                             |
| CAP      | <i>Contention Access Period</i>                                                          |
| CCA      | <i>Clear Channel Assessment</i>                                                          |
| CH       | <i>Channel Hopping</i>                                                                   |
| COPEL    | <i>Companhia Paranaense de Energia</i>                                                   |
| CMB      | <i>China Medical Band</i>                                                                |
| CSMA-CA  | <i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>                            |
| CSS      | <i>Chirp Spread Spectrum</i>                                                             |
| DAG      | <i>Directed Acyclic Graph</i>                                                            |
| DAO      | <i>Destination Advertisement Object</i>                                                  |
| DINF     | <i>Departamento de Informática</i>                                                       |
| DIO      | <i>DODAG Information Object</i>                                                          |
| DIS      | <i>DODAG Information Solicitation</i>                                                    |
| DH1CF    | <i>Direct Hash Channel Function</i>                                                      |
| DODAG    | <i>Destination Oriented Directed Acyclic Graph</i>                                       |
| DSME     | <i>Deterministic Synchronous Multichannel Extension</i>                                  |
| DSSS     | <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>                                                   |
| EAP-TLS  | <i>Extensible Authentication Protocol - Transport Layer Security</i>                     |
| EB       | <i>Enhanced Beacons</i>                                                                  |
| EJ       | <i>Estado de Junção</i>                                                                  |
| ETX      | <i>Expected Transmission Count</i>                                                       |
| FAN      | <i>Field Area Network</i>                                                                |
| FRR      | <i>Fast Routing Recovery</i>                                                             |
| FFD      | <i>Full Function Devices</i>                                                             |

|         |                                                             |
|---------|-------------------------------------------------------------|
| FSK     | <i>Frequency Shift Keying</i>                               |
| GFSK    | <i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>                      |
| GPRS    | <i>General Packet Radio Service</i>                         |
| GSM     | <i>Global System for Mobile Communications</i>              |
| GTK     | <i>Group Temporal Key</i>                                   |
| HAN     | <i>Home Area Networks</i>                                   |
| IE      | <i>Information Element</i>                                  |
| IED     | <i>Intelligent Electronic Device</i>                        |
| IEEE    | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>    |
| IETF    | <i>Internet Engineering Task Force</i>                      |
| IoT     | <i>Internet of Things</i>                                   |
| IPv6    | <i>Internet Protocol version 6</i>                          |
| ISM     | <i>Industrial Scientific and Medical</i>                    |
| LE      | <i>Low Energy</i>                                           |
| LECIM   | <i>Low-Energy Critical Infrastructure Monitoring</i>        |
| LLC     | <i>Logical Link Control</i>                                 |
| LLDN    | <i>Low Latency Deterministic Network</i>                    |
| LLN     | <i>Low Power and Lossy Networks</i>                         |
| LoRaWAN | <i>Long Range Wide Area Network</i>                         |
| LP      | <i>Link Probe</i>                                           |
| LPWAN   | <i>Low Power Wide Area Network</i>                          |
| LR-WPAN | <i>Low-Rate Wireless Personal Area Network</i>              |
| LTE     | <i>Long Term Evolution</i>                                  |
| MAC     | <i>Medium Access Control layer</i>                          |
| MD      | <i>Multi-superframe Duration</i>                            |
| MDC     | <i>Meter Data Collection</i>                                |
| MHDS    | <i>Multi-Hop Delivery Specification</i>                     |
| MQTT    | <i>Message Queuing Telemetry Transport</i>                  |
| MQTT-SN | <i>Message Queuing Telemetry Transport - Sensor Network</i> |
| MRHOF   | <i>Minimum Rank with Hysteresis Objective Function</i>      |
| MTU     | <i>Maximum Transmission Unit</i>                            |
| NAN     | <i>Neighborhood Area Networks</i>                           |
| NS      | <i>Network Server</i>                                       |
| OF      | <i>Objective Function</i>                                   |
| OFDM    | <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>           |
| OSI     | <i>Open System Interconnection</i>                          |
| PA      | <i>PAN Advertisement</i>                                    |
| PAN     | <i>Personal Area Networks</i>                               |
| PAS     | <i>PAN Advertisement Solicit</i>                            |

|         |                                                               |
|---------|---------------------------------------------------------------|
| PC      | <i>PAN Configuration</i>                                      |
| PCS     | <i>PAN Configuration Solicit</i>                              |
| PDR     | <i>Packet Delivery Ratio</i>                                  |
| P&D     | Pesquisa e Desenvolvimento                                    |
| PHY     | <i>Physical layer</i>                                         |
| PPGINF  | Programa de Pós-Graduação em Informática                      |
| PTK     | <i>Pairwise Transient Key</i>                                 |
| RA      | Raio de Alcance                                               |
| RAM     | <i>Random Access Memory</i>                                   |
| RCC     | <i>Rail Communications and Control</i>                        |
| RFC     | <i>Request For Comments</i>                                   |
| RFD     | <i>Reduced Function Devices</i>                               |
| RFID    | <i>Radio Frequency Identification</i>                         |
| RI      | Raio de Interferência                                         |
| RPL     | <i>IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks</i> |
| RS-GFSK | <i>Rate Switch Gaussian Frequency Shift Keying</i>            |
| SD      | <i>Superframe Duration</i>                                    |
| SG      | <i>Smart Grid</i>                                             |
| TASK    | <i>Ternary Amplitude Shift Keying</i>                         |
| TCP     | <i>Transmission Control Protocol</i>                          |
| TR51CF  | <i>TR51 Channel Function</i>                                  |
| TSCH    | <i>Time Slotted Channel Hopping</i>                           |
| TVWS    | <i>Television White Space</i>                                 |
| UDGM    | <i>Unit Disk Graph Medium</i>                                 |
| UDI     | <i>Unicast Dwell Interval</i>                                 |
| UDP     | <i>User Datagram Protocol</i>                                 |
| UFPR    | Universidade Federal do Paraná                                |
| UWB     | <i>Ultra-Wide Band</i>                                        |
| VPN     | <i>Virtual Private Networks</i>                               |
| WAN     | <i>Wide Area Network</i>                                      |
| Wi-Fi   | <i>Wireless Fidelity</i>                                      |
| Wi-SUN  | <i>Wireless Smart Ubiquitous Networks</i>                     |
| WPAN    | <i>Wireless Personal Area Networks</i>                        |
| WSN     | <i>Wireless Sensor Network</i>                                |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|           |                                                     |
|-----------|-----------------------------------------------------|
| BR        | <i>Border Router</i>                                |
| R         | <i>Router</i>                                       |
| $I_{min}$ | Tamanho do intervalo mínimo do <i>trickle timer</i> |
| $I_{max}$ | Tamanho do intervalo máximo do <i>trickle timer</i> |
| $k$       | Constante de redundância do <i>trickle timer</i>    |
| $I$       | Tamanho do intervalo atual                          |
| $c$       | Contador de mensagens consistentes recebidas        |
| $t$       | Tempo do novo intervalo                             |
| $time$    | Tempo decorrido                                     |

## SUMÁRIO

|          |                                                                 |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>                                     | <b>16</b> |
| 1.1      | QUESTÕES DE PESQUISA . . . . .                                  | 19        |
| 1.2      | OBJETIVOS . . . . .                                             | 20        |
| 1.3      | CONTRIBUIÇÕES . . . . .                                         | 20        |
| 1.4      | ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO . . . . .                              | 22        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA. . . . .</b>                           | <b>23</b> |
| 2.1      | O PADRÃO IEEE 802.15.4. . . . .                                 | 23        |
| 2.1.1    | Tipos de Dispositivos . . . . .                                 | 24        |
| 2.1.2    | Camada Física (PHY). . . . .                                    | 24        |
| 2.1.3    | Camada de Enlace (MAC) . . . . .                                | 25        |
| 2.2      | AS REDES WI-SUN FAN . . . . .                                   | 27        |
| 2.2.1    | Pilha de Protocolos . . . . .                                   | 27        |
| 2.2.2    | Salto de Frequências . . . . .                                  | 29        |
| 2.2.3    | Processo de Descoberta e Conexão de Novos Dispositivos. . . . . | 31        |
| 2.3      | O ALGORITMO <i>TRICKLE</i> . . . . .                            | 32        |
| 2.4      | PROTOCOLO DE ROTEAMENTO RPL . . . . .                           | 33        |
| 2.4.1    | Seleção do Pai Preferencial . . . . .                           | 35        |
| 2.4.2    | Parâmetros de Configuração do Protocolo RPL . . . . .           | 36        |
| 2.5      | CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .                                  | 36        |
| <b>3</b> | <b>TRABALHOS RELACIONADOS . . . . .</b>                         | <b>38</b> |
| 3.1      | MELHORIAS NO TEMPO DE FORMAÇÃO DA REDE. . . . .                 | 38        |
| 3.2      | REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS NA ÁREA. . . . .                        | 41        |
| 3.3      | SUMÁRIO DOS TRABALHOS RELACIONADOS . . . . .                    | 42        |
| 3.4      | CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .                                  | 42        |
| <b>4</b> | <b>O TEMPO DE CONVERGÊNCIA DO PROTOCOLO RPL . . . . .</b>       | <b>44</b> |
| 4.1      | ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO PROTOCOLO RPL . . . . .               | 44        |
| 4.1.1    | Parâmetro DIO_Imin . . . . .                                    | 45        |
| 4.1.2    | Parâmetro DIO_Imax . . . . .                                    | 48        |
| 4.1.3    | Parâmetro DIO_k . . . . .                                       | 50        |
| 4.1.4    | Parâmetro DIS_I . . . . .                                       | 52        |
| 4.1.5    | Resumo da Análise dos Parâmetros. . . . .                       | 53        |
| 4.2      | ANÁLISE DO PROCESSO DE SELEÇÃO DE PAI PREFERENCIAL. . . . .     | 53        |
| 4.3      | CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .                                  | 54        |

|          |                                                                 |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5</b> | <b><i>FAST ROUTING RECOVERY (FRR).</i></b>                      | <b>56</b> |
| 5.1      | O MECANISMO FRR                                                 | 56        |
| 5.2      | AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO.                                        | 60        |
| 5.2.1    | Simulações com Cenários Uniformes.                              | 60        |
| 5.2.2    | Simulações com Cenário de Ipiranga.                             | 64        |
| 5.2.3    | Resultados dos Experimentos.                                    | 65        |
| 5.3      | COMPARAÇÃO DO FRR COM OS TRABALHOS RELACIONADOS                 | 68        |
| 5.4      | CONSIDERAÇÕES FINAIS                                            | 69        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÃO</b>                                                | <b>71</b> |
| 6.1      | LIMITAÇÕES                                                      | 71        |
| 6.2      | TRABALHOS FUTUROS                                               | 71        |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>                                              | <b>73</b> |
|          | <b>APÊNDICE A – COMPARTILHAMENTO DAS REDES SMART GRIDS</b>      | <b>79</b> |
| A.1      | ESTUDO DA REDE SMART GRID DE IPIRANGA                           | 80        |
| A.2      | PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÕES                        | 81        |
| A.2.1    | Estação Meteorológica                                           | 82        |
| A.2.2    | Medidor de Consumo de Água                                      | 82        |
| A.2.3    | Relé de Iluminação Pública                                      | 83        |
| A.3      | FRAMEWORK DE INTEGRAÇÃO DAS NOVAS APLICAÇÕES                    | 84        |
| A.4      | COMUNICAÇÃO LORAWAN SOBRE AS REDES WI-SUN                       | 86        |
| A.5      | AVALIAÇÃO DO COMPARTILHAMENTO DA REDE SMART GRID.               | 87        |
| A.5.1    | Análise da Disponibilidade                                      | 87        |
| A.5.2    | Análise do Impacto no Tráfego da Rede com os Novos Dispositivos | 90        |
| A.6      | CONSIDERAÇÕES FINAIS                                            | 92        |

# 1 INTRODUÇÃO

As grandes cidades brasileiras e mundiais são bem servidas de opções de meios de comunicação públicos e/ou privados. Pode-se citar dentre algumas opções as tecnologias celulares (GPRS, GSM, LTE, 4G e 5G) (Zontou, 2023), de redes sem fio de curto alcance (ZigBee (Baronti et al., 2007), Z-wave (Paetz, 2015), Thread (Thread Group, 2024), Bluetooth (Bluetooth SIG, 2024) e Wi-Fi (802.11, 2021)) e de redes sem fio de médio e longo alcances (M-Bus (Meter-Bus, 2020), NB-IoT (Wang et al., 2017), LoRaWAN (Semtech Corporation, 2024), Sigfox (Sigfox, 2024) e Wi-SUN (Wi-SUN, 2024)). No entanto, nas cidades de menor porte ou nas áreas rurais, não há viabilidade econômica para as operadoras de telecomunicações implantarem e operarem grande parte destas redes de comunicação. Nestes casos as opções se restringem ao uso de rádios ponto a ponto de longo alcance e às coberturas via satélite, como Bgan (Bgan, 2024), Inmarsat (Inmarsat, 2018) e VSAT (Maral et al., 2020).

Para as concessionárias de energia elétrica que pretendem melhorar a eficiência de suas operações nas localidades que atendem, existe a alternativa de implantarem as suas próprias infraestruturas de comunicação utilizando o conceito das redes elétricas inteligentes, mais conhecidas por *Smart Grids* (SGs). As SGs englobam tanto a camada de potência quanto a camada de comunicação, conforme ilustrado na Figura 1.1 (Rajalingham et al., 2014).

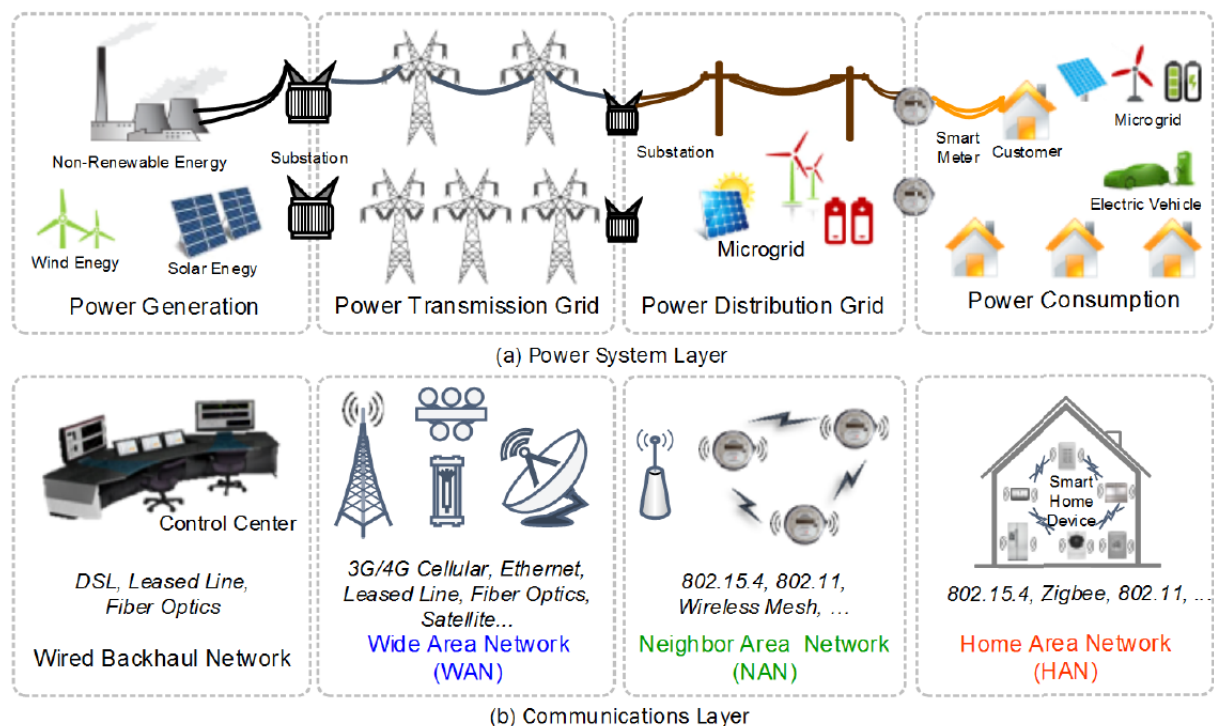


Figura 1.1: Camadas de potência e de comunicação das *Smart Grids*. Figura extraída de (Rajalingham et al., 2014)

A camada de potência, representada na Figura 1.1(a), tradicionalmente inicia nas grandes usinas geradoras de energia, as quais podem ser dos tipos hidroelétricas, termoeletricas, nucleares, aerogeradoras, fotovoltaicas, biodigestoras, etc. Das grandes usinas segue pelos circuitos de transmissão e distribuição de energia, formados por torres, postes, cabos, subestações, transformadores, reguladores de tensão, bancos de capacitores, além de uma diversidade de equipamentos de proteção e medição. Por fim, chega aos consumidores, normalmente conectados

por meio de um medidor de energia. Atualmente a camada de potência forma uma grande malha de interligação dos componentes citados. Ela incorpora, também, os pequenos e micro geradores de energia, os quais são ligados ao longo dos circuitos de distribuição de energia, ou mesmo nas empresas e casas dos consumidores, conforme ilustrado por desenhos de painéis fotovoltaicos e de aerogeradores colocados nos dois quadros à direita da Figura 1.1(a).

A camada de comunicação, representada na Figura 1.1(b), abrange desde a comunicação dos centros de controle e operação com os equipamentos eletrônicos inteligentes (IED - *Intelligent Electronic Device*) até a comunicação dos sistemas comerciais com as infraestruturas avançadas de medição (AMI - *Advanced Metering Infrastructure*). Devido à sua abrangência, esta camada necessita de uma grande variedade de tecnologias na sua implementação. Na estrutura física, a camada de comunicação é formada por redes cabeadas, redes celulares e redes sem fio de várias topologias (ponto a ponto, estrela e malha). No nível lógico, a camada de comunicação é formada por enlaces *ethernet*, redes virtuais privadas (VPNs - *Virtual Private Networks*), bem como uma grande variedade de padrões e protocolos de comunicação. As extremidades da camada de comunicação, ainda gerenciadas pelas empresas concessionárias, são chamadas no setor elétrico de última milha (*last mile*) e formam as redes de vizinhança (NAN - *Neighborhood Area Networks*). As redes NAN conectam os sistemas de controle e medição com as redes residenciais ou pessoais (HAN / PAN - *Home / Personal Area Networks*) dos clientes. O equipamento utilizado como elo de conexão entre as redes NAN e HAN normalmente é um medidor de energia inteligente. Este, além de prover a conexão entre as redes de dados, torna possível automatizar as seguintes operações remotas: (1) leitura do consumo de energia; (2) corte e religamento do fornecimento de energia; (3) monitoramento do estado da rede elétrica de distribuição (energizada ou desenergizada). Várias tecnologias foram experimentadas na implementação das redes NAN das SGs, na maioria dos casos utilizando redes sem fio, tais como ZigBee (Baronti et al., 2007), LoRaWAN (Semtech Corporation, 2024), Wi-Fi (802.11, 2021), WiMAX (802.16, 2018) e Wi-SUN (Wi-SUN, 2024), e em outros casos a própria rede elétrica física, como é o caso da tecnologia PLC (*Power Line Communication*) (Lampe et al., 2016).

Atualmente o protocolo Wi-SUN (*Wireless Smart Ubiquitous Networks*) (Wi-SUN, 2024) tem ganhado destaque como solução de comunicação para as NANs, e não somente para as SGs ou empresas de utilidades como energia, água e gás, mas também para as cidades inteligentes (*Smart Cities*) e a internet das coisas (IoT - *Internet of Things*). As redes formadas pelo protocolo Wi-SUN possuem como características alta escalabilidade, comunicação em malha (*mesh*), segurança avançada e grande alcance, tornando-as ideais para aplicações de IoT e infraestrutura urbana que demandam baixas taxas de transmissão. O protocolo Wi-SUN é baseado no padrão IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15.4-2015, 2016) e é promovido pela Wi-SUN Alliance (Wi-SUN, 2024), um consórcio de corporações e empresas dos mercados envolvidos, formado para elaborar e manter o protocolo. Esta aliança produziu uma especificação de rede de área de campo (FAN - *Field Area Network*), objetivando padronização e interoperabilidade de produtos entre os fabricantes que seguirem a especificação (IEEE Std 2857, 2021), de modo semelhante ao realizado por outros padrões, como por exemplo o Wi-Fi.

O estado da arte das pesquisas sobre as redes Wi-SUN FAN abrange aspectos como roteamento de pacotes (Solimini et al., 2020, 2021), tempo de formação da rede (Hotta et al., 2020; Duenas Santos et al., 2024), mobilidade (Junjalearnvong et al., 2017; Morikawa et al., 2023), dentre outros. A maior parte dos trabalhos está concentrada nas especificações utilizadas como base para a definição da Wi-SUN FAN, como a IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15.4-2015, 2016), o protocolo de roteamento RPL (*IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*) (Winter et al., 2012) e o algoritmo Trickle (Levis et al., 2011). As especificações acima mencionadas tratam respectivamente sobre: a definição de redes de área pessoal sem fio (WPANs - *Wireless*



*Personal Area Networks*) com foco em dispositivos de baixo consumo de energia e baixo custo; o protocolo de roteamento projetado especificamente para redes de dispositivos com recursos limitados, alta perda de pacotes e topologias dinâmicas; e o protocolo de controle de propagação de mensagens usado para coordenar a disseminação de informações em redes distribuídas. No entanto, vários aspectos ainda não foram completamente explorados, propiciando oportunidades de pesquisa. Por exemplo, um relatório de avaliação de desempenho de redes Wi-SUN FAN, produzido por um fabricante, indica que redes de média a larga escala, com mais de 100 e 800 nós respectivamente, demoram mais de 30 minutos para serem completamente estabelecidas (Silicon Labs, 2023). Isto pode ser aceitável para determinados tipos de aplicações mas pode inviabilizar outros. Abaixo segue uma listagem não exaustiva de oportunidades de pesquisa identificadas durante a revisão da literatura:

- **Elevado tempo de formação da rede.** A reinicialização completa da rede pode ocorrer em dois momentos, após a ocorrência de um desligamento de energia (*blackout*) ou quando o protocolo de roteamento de pacotes efetua uma ação de reparo global;
- **Congestionamento da rede.** Ocorre quando muitos equipamentos tentam reportar um mesmo evento de maneira simultânea, como no caso do envio da mensagem de último suspiro (*last gasp*) ao acontecer um *blackout*;
- **A inexistência de padronização para execução de experimentos** de avaliação das redes de comunicação Wi-SUN FAN. Existe uma oportunidade de criação de um plano de experimentação padronizado (*level playing field*);
- **Avaliar as últimas emendas propostas no padrão IEEE 802.15.4** por meio de simulações e experimentos para identificar eventuais ganhos destas novas características em relação às versões anteriores;
- **Questões inerentes à mobilidade dos nós na rede.** Estudo de protocolos que permitam reduzir o tempo dispendido com o ingresso (*join*) de um nó na rede e consequentemente viabilizar o rastreamento de nós móveis;
- **Falta de interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes distintos.** Mesmo seguindo o padrão IEEE 802.15.4, que define as camadas física e de enlace, os fabricantes de equipamentos para as *Smart Grids* não seguem um mesmo padrão na implementação das camadas superiores da rede de comunicação.

No decorrer dos estudos realizados para aprofundamento dos conhecimentos sobre as redes Wi-SUN FAN, verificou-se que a inicialização da tabela de roteamento do protocolo RPL é parte significativa do tempo de formação da rede (Ambrosio et al., 2022). O protocolo RPL, sigla para Protocolo de Roteamento IPv6 para Redes de Baixo Consumo e com Perdas (*IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*), é um protocolo de roteamento projetado para redes com restrições de recursos, como as redes de sensores sem fio (WSN - *Wireless Sensor Networks*). Baseado em um modelo hierárquico, o RPL constrói um grafo acíclico direcionado (DAG - *Directed Acyclic Graph*) para organizar a topologia da rede. Para a construção do DAG os nós da rede escolhem as rotas com base em uma função objetivo (OF - *Objective Function*), a qual pode levar em consideração métricas como a qualidade do enlace, o consumo de energia e a latência. O RPL suporta diferentes modos de operação, incluindo o modo ascendente (rotas *upward*), onde os pacotes são enviados em direção ao nó raiz, e o modo descendente (rotas *downward*), a qual permite a comunicação do nó raiz para os dispositivos na rede. O protocolo RPL é descrito em maiores detalhes na Seção 2.4.

O elevado tempo de formação da rede foi verificado também durante reinicializações provocadas por *blackouts* na rede *Smart Grid* existente no município de Ipiranga - PR. A rede SG de Ipiranga é uma rede de AMI do tipo Wi-SUN FAN formada pelos dispositivos medidores de energia inteligentes instalados nos clientes da Companhia Paranaense de Energia (Copel), bem como por dispositivos roteadores e coletores de dados (Pedretti et al., 2020). Como pesquisador do Lactec desde 2007, durante o desenvolvimento deste trabalho, tive a oportunidade de participar no projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) intitulado *Aplicações Smart City Sobre a Rede Smart Grid de Ipiranga (Smart City Ipiranga)* da Copel<sup>1</sup>. O objetivo do projeto é validar a viabilidade técnica, econômica e de desempenho de compartilhar a infraestrutura da rede de dados SG com novas aplicações voltadas aos conceitos das *Smart Cities* e IoT. Este trabalho de doutoramento faz parte do esforço em capacitação de pessoal do referido projeto de P&D e contribui com parte da pesquisa científica e o caráter inovativo do mesmo, mas não é restrito somente aos objetivos daquele projeto. O projeto de P&D teve início em outubro de 2019 e motivou a execução deste trabalho de doutoramento. A previsão inicial de execução do projeto era de 24 meses, mas, devido à pandemia de 2020, foi estendida para 40 meses, sendo concluído em janeiro de 2023. Além das produções puramente técnicas, o projeto propiciou o desenvolvimento de soluções inovadoras que auxiliam na ampliação do uso compartilhado das redes inteligentes. As contribuições e publicações resultantes do referido projeto são listadas na Seção 1.3, visto que sou um dos principais autores das produções. Os detalhes do desenvolvimento do projeto são apresentados no Apêndice A.

Este trabalho é motivado pelos inúmeros casos verificados de demora no processo de formação das redes Wi-SUN FAN e de que o tempo de convergência do protocolo RPL contribui de maneira significativa neste processo. Decidiu-se investigar uma forma de aprimorar o funcionamento do protocolo RPL para reduzir o seu tempo de convergência após a ocorrência de reinicializações das redes, quer sejam provocadas por *blackouts* ou pela ocorrência periódica de reparos globais. A modificação proposta neste trabalho atua sobre o processo de seleção de pai preferencial do protocolo RPL, mais especificamente no instrumento de sondagem dos enlaces (*LP - Link Probe*), o qual é usado para avaliar a qualidade dos enlaces na topologia de rede. A solução completa e a avaliação do seu desempenho são apresentadas no Capítulo 5.

O resultado esperado da otimização proposta é que obtenha-se uma redução de ao menos 30% no tempo de convergência do protocolo RPL. A solução proposta neste trabalho de doutoramento visa contribuir com o avanço científico na área de redes de comunicação sem fio. Especificamente sobre a otimização do protocolo de roteamento RPL, o qual é utilizado nas redes Wi-SUN FAN e em algumas especificações de redes sem fio industriais tais como: WirelessHART (FieldComm Group, 2024), Thread (Thread Group, 2024) e 6TiSCH (Vilajosana et al., 2020).

## 1.1 QUESTÕES DE PESQUISA

Considere uma rede de comunicação sem fio *Smart Grid* de grande porte instalada em uma cidade ou planta industrial. Em caso de *blackout*, a recuperação completa da rede pode demorar horas. O elevado tempo necessário para a formação das redes de comunicação sem fio que utilizam o protocolo RPL, como as redes Wi-SUN FAN das *Smart Grids*, incentivaram a elaboração das seguintes questões:

**Questão principal:** *Pode-se reduzir o tempo de convergência do protocolo RPL e consequentemente melhorar o tempo de formação das redes que fazem o seu uso?*

---

<sup>1</sup>Código do projeto PD-2866-0515/2019.

**Questão complementar:** *Como os parâmetros de configuração do protocolo RPL influenciam no seu tempo de convergência?*

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é otimizar o tempo de convergência do protocolo RPL. Alcançando este objetivo, espera-se reduzir o tempo de formação das redes sem fio padrão Wi-SUN FAN das *Smart Grids*. Os resultados também beneficiam as *Smart Cities* e as aplicações de IoT em geral, pois estas também fazem uso deste padrão ou podem ser executadas de modo compartilhado.

A hipótese elaborada é que a otimização pode ser alcançada ou realizada com a implementação de um novo algoritmo de preenchimento da tabela de roteamento que permita acelerar o processo e reduzir o tempo total dispendido. O algoritmo pode ser auxiliado pela inclusão de uma pequena memória local, em cada nó roteador, para o armazenamento de informações de roteamento sobre os nós vizinhos, aqueles com quem o nó já se comunicou anteriormente alguma vez. Ademais, o algoritmo pode trabalhar utilizando temporizações diferenciadas para o envio de mensagens, de acordo com o estado de conexão do nó.

Como objetivos específicos do trabalho são previstos:

- Projetar novo algoritmo ou mecanismo para otimizar a inicialização da tabela de roteamento do protocolo RPL;
- Implementar e avaliar o novo algoritmo ou mecanismo com o auxílio de ferramentas de simulação como o COOJA (Osterlind et al., 2006) e por meio de experimentos;
- Dar publicidade aos resultados em periódicos e congressos de boa qualidade nas áreas envolvidas, tais como comunicação e *Smart Grids*;
- Aplicar os resultados das pesquisas nos projetos de P&D em desenvolvimento no Lactec.

Adicionalmente, este trabalho pretende verificar e avaliar quantitativamente a viabilidade técnica do compartilhamento das redes SGs com aplicações de *Smart Cities* e IOT no âmbito do projeto de P&D *Smart City Ipiranga* (ver Apêndice A).

## 1.3 CONTRIBUIÇÕES

Como resultados da pesquisa e desenvolvimento efetuados neste trabalho destacam-se as seguintes contribuições, listadas na ordem temporal em que foram realizadas:

- Desenvolvimento de um *framework* para viabilizar a conexão de aplicações de cidades inteligentes e seus dispositivos em redes *Smart Grids*. Ver Seção A.3.
- Desenvolvimento de uma solução inovadora que permite a utilização das redes Wi-SUN FAN como base (*backhaul*) para redes do tipo LoRaWAN. Esta solução consiste de uma série de modificações na troca de mensagens entre *gateways LoRaWAN* e seus servidores de rede. Isto permite ampliar a possibilidade da implantação de aplicações de *Smart Cities* e de IoT sobre regiões com pouca oferta de meios de comunicação, como em áreas rurais e pequenas cidades. Esta solução é viabilizada visto que as redes *Smart Grids* das concessionárias de energia possuem ampla cobertura territorial. Ver Seção A.4.

- Execução de estudo sobre a influência dos parâmetros de configuração do protocolo RPL sobre o tempo de convergência do mesmo por meio de simulações. Ver Capítulo 4.
- Proposição do mecanismo FRR (*Fast Routing Recovery*) para memorização de pais preferenciais e aceleração do processo de formação de redes que utilizam o protocolo de roteamento RPL. Ver Capítulo 5.

Cabe citar que os dois primeiros desenvolvimentos mencionados foram validados em testes de laboratório, no Lactec, e posteriormente de campo, na rede *Smart Grid* da Copel no município de Ipiranga. Para a avaliação de desempenho do sistema foram integrados módulos de rádio compatíveis com a rede SG em estações meteorológicas, medidores de consumo de água e relés de controle de iluminação pública. Estas aplicações foram escolhidas porque possuem diferentes características de transmissão de dados (quantidade e frequência de envio) e trazem benefícios para a população e as empresas envolvidas (ver Apêndice A).

A lista a seguir apresenta as referências bibliográficas das publicações produzidas e divulgadas no decorrer da realização deste trabalho, as quais amparam as contribuições relatadas acima.

1. **GRID-CITY: A Framework to Share Smart Grids Communication with Smart City Applications.** Giancarlo Covolo Heck, Roberto A. Hexsel, Victor B. Gomes, Luciana Iantorno, Lourival Lippmann Junior, Tiago Santana. Em *2021 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, páginas 1-4, Manchester, Reino Unido. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISC253183.2021.9562794>
2. **Enabling LoRaWAN Communication Over Wi-SUN Smart Grid Networks.** Geovana Scaramella, Giancarlo Covolo Heck, Lourival Lippmann Jr, Roberto A. Hexsel, Tiago Santana, Victor B. Gomes. Em *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, páginas 1-6, Seul, Coreia do Sul. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICC45855.2022.9838959>
3. **Estudos de Viabilidades Técnica e Econômica Sobre o Compartilhamento de Infraestrutura de Comunicação Smart Grid com Aplicações de Smart Cities e IoT.** Giancarlo Covolo Heck, Lourival Lippmann Junior, Luciana M. Iantorno, Victor B. Gomes, Adriel G. Lima, Tiago Santana, Roberto A. Hexsel. Em *XXVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE*, páginas 1-8, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2022. Trabalho premiado em terceiro lugar dentre os trabalhos do grupo de estudos de sistemas de informação e telecomunicação para sistemas elétricos.
4. **Soluções para a Integração de Aplicações de Smart Cities e IoT nas Smart Grids.** Giancarlo Covolo Heck, Victor Barpp Gomes, Lourival Lippmann Junior, Luciana Michelotto Iantorno, Adriel G. de Lima, Diego S. Bertolini, Roberto A. Hexsel, Tiago A. S. Santana. Em *SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, páginas 1-8, Vitória, ES, Brasil. 2023.
5. **FRR: a Fast Routing Recovery mechanism minimizing network formation time in smart grids.** Giancarlo C. Heck, Ananias A. Quispe, Patryk H. da Fonseca, Osni S. Junior, Roberto A. Hexsel, Luiz C. P. Albini. Em *International Journal of Electrical Power and Energy Systems (JEPE)*, Volume 164, Elsevier. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110364>

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Os próximos Capítulos estão organizados da seguinte forma. No Capítulo 2 são apresentadas as características das redes IEEE 802.15.4 e Wi-SUN FAN, com destaque para o processo de descoberta e conexão de novos dispositivos e o roteamento de pacotes RPL. No Capítulo 3 são discutidos os trabalhos relacionados à área das redes IEEE 802.15.4 com foco principal no tempo de formação da rede. No Capítulo 4 são exibidos os resultados das avaliações sobre a influência dos parâmetros de configuração do protocolo RPL no seu tempo de convergência. No Capítulo 5 é detalhado o mecanismo de recuperação rápida do roteamento (FRR - *Fast Routing Recovery*) e são exibidos e discutidos os resultados da avaliação de desempenho. No Capítulo 6 é destacada a relevância da pesquisa, suas limitações e as oportunidades de trabalhos futuros. No Apêndice A são apresentados os estudos e desenvolvimentos efetuados sobre a rede *Smart Grid* de Ipiranga, os quais permitiram validar soluções para o compartilhamento da rede SG da Copel com aplicações diversas e inclusive para servir de infraestrutura para redes da tecnologia LoRaWAN.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado um breve histórico da evolução do padrão IEEE 802.15.4, desde sua primeira publicação em 2003 até o corrente, pois este padrão serve de base de implementação para diversas tecnologias de comunicação sem fio. São apresentados os princípios de funcionamento das redes Wi-SUN FAN, suas principais características e protocolos base da especificação, como o protocolo de roteamento RPL.

### 2.1 O PADRÃO IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 foi publicado em outubro de 2003 com o objetivo de definir uma forma de comunicação de dados entre equipamentos de baixa taxa de transmissão, baixa potência e baixa complexidade, utilizando-se redes pessoais sem fio (LR-WPANs - *Low-Rate Wireless Personal Area Networks*). Na versão inicial foram definidas duas opções de camadas físicas (PHY - *physical layer*) baseadas no método de modulação DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), para trabalhar nas frequências de 868, 915 e 2450 MHz, com taxas de transmissão de dados de 20, 40 e 250 Kbps, bem como foi definida uma camada de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Control*) (IEEE 802.15.4-2003, 2003).

Em 7 de setembro de 2006 foi publicada uma revisão da norma que contém requisitos específicos para expandir a aplicabilidade e remover ambiguidades da versão anterior. Nesta edição foram melhoradas as taxas de transmissão de dados para as frequências de 868 e 915 MHz, passando a suportar também as taxas de 100 e 250 Kbps. As camadas físicas definidas passaram para quatro, três delas ainda utilizando a modulação DSSS. Nos anos de 2007 e 2009 foram lançadas novas "emendas" (*amendments*), as quais adicionaram mais quatro definições de camada física, utilizando-se os métodos de modulação UWB (*Ultra-Wide Band*) e CSS (*Chirp Spread Spectrum*), sendo adicionadas novas faixas de frequências às camadas físicas, dentre as quais faixas específicas para China e Japão (IEEE 802.15.4-2006, 2006). Em 5 de setembro de 2011 foi publicada nova revisão que serviu para agrupar as emendas de 2007 e 2009, bem como reorganizar a estrutura do documento para que cada camada física tenha uma cláusula separada, e a camada de enlace fosse dividida em descrição funcional e especificações de interface e de segurança (IEEE 802.15.4-2011, 2011).

Em 22 de abril de 2016 foi publicada a revisão 2015, que agrupou as emendas lançadas após a revisão de 2011, as quais definiram seis novas camadas físicas e uma nova camada de enlace dentre outras importantes melhorias tais como: elementos de informação (IEs - *Information Elements*), opções estendidas de *superframe*, mecanismo de baixo consumo (LE - *Low Energy*), bem como uma variedade de modulações na camada física, codificações e opções de bandas para suportar uma grande variedade de necessidades de aplicações incluindo a rede SUN (*Smart Utility Network*), o RFID (*Radio Frequency Identification*), a operação da TVWS (*Television White Space*), a LECIM (*Low-Energy Critical Infrastructure Monitoring*) e a RCC (*Rail Communications and Control*) (IEEE 802.15.4-2015, 2016).

Em 23 de julho de 2020 foi publicada a revisão 2020, que agrupou as emendas aprovadas após a versão de 2015. Mais uma vez foram efetuados avanços na camada física, como a que utiliza a banda da área médica da China (CMB - *China Medical Band*), a banda de 865 à 867 MHz na Índia, o suporte a taxas de transmissão de até 2,4 Mbps e as modulações TASK (*Ternary Amplitude Shift Keying*) e RS-GFSK (*Rate Switch Gaussian Frequency Shift Keying*), bem como avanços na camada MAC (IEEE 802.15.4-2020, 2020). Em 26 de julho de 2024 foi

publicada a revisão 2024, a qual agrupou cinco emendas aprovadas após a versão de 2020 (IEEE 8802.15.4-2024, 2024). As emendas agrupadas adicionaram as seguintes definições:

- 802.15.4z-2020 - Novas camadas físicas para as redes UWB (*Ultra Wideband*);
- 802.15.4w-2020 - Extensão da camada física para as redes LECIM (*Low-Energy Critical Infrastructure Monitoring*);
- 802.15.4y-2021 - Adição da criptografia AES-256 e extensões de segurança;
- 802.15.4aa-2022 - Extensões para a taxa de transmissão de dados na camada física, modulação FSK (*Frequency Shift Keying*), para as redes SUN nas bandas de frequências Japonesas.
- 802.15.4-2020-Cor 1-2022 - Conjunto de correções de erros que impedem a compatibilidade com versões anteriores.

A partir das camadas física (PHY) e de enlace (MAC) definidas pelo padrão IEEE 802.15.4 se originaram diversas implementações de protocolos para as camadas superiores, tais como: Wi-SUN, ZigBee, 6LowPAN e Thread.

### 2.1.1 Tipos de Dispositivos

Os dispositivos do padrão IEEE 802.15.4 são classificados em dois tipos, os de função completa (*Full Function Devices* - FFD) e os de função reduzida (*Reduced Function Devices* - RFD). Os dispositivos do tipo FFD possuem as funcionalidades de formação da rede, associação e roteamento de pacotes. Para a formação de uma rede o dispositivo FFD que atua como coordenador principal é chamado de PAN *coordinator*, e este é responsável pela sincronização de tempo da rede inteira. Algumas vezes um dispositivo FFD pode atuar como coordenador, provendo os serviços de sincronização local e roteamento para os seus vizinhos. Todo coordenador deve estar associado a um PAN *coordinator* e ele forma sua própria rede se não achar outras redes nas proximidades.

O dispositivo RFD é tipicamente um nó final da rede, mais conhecido como “*end node*” ou mesmo “*leaf device*”. Dispositivos RFD são indicados para aplicações simples de sensoramento ou controle, nas quais não é necessário o envio de grandes quantidades de dados, e operam com bateria, a qual pode durar vários anos, sem manutenção. Devido às suas funções reduzidas, o dispositivo RFD pode se associar a um único coordenador por vez.

### 2.1.2 Camada Física (PHY)

A primeira versão da camada física do padrão IEEE 802.15.4 operava nas faixas de frequência de 868 MHz, 915 MHz e 2,4 GHz, cada uma possuindo 1, 10 e 16 canais respectivamente e trabalhando com taxas de transmissão de dados de 20 Kbps, 40 Kbps e 250 Kbps respectivamente, como ilustra a Figura 2.1. Estas frequências de operação são conhecidas como bandas ISM (*Industrial Scientific and Medical*) porque são faixas do espectro de frequências de rádio reservadas internacionalmente para uso industrial, científico e médico, o que permite seu uso sem a necessidade de licenciamento. A camada física é responsável por ligar e desligar o transceptor de rádio, medir a qualidade do *link*, avaliar o ruído do canal e selecionar o canal de rádio a ser utilizado.

Com o lançamento de inúmeras emendas que adicionaram novas faixas de frequência ao longo dos últimos anos, atualmente o padrão permite que os dispositivos trabalhem em faixas

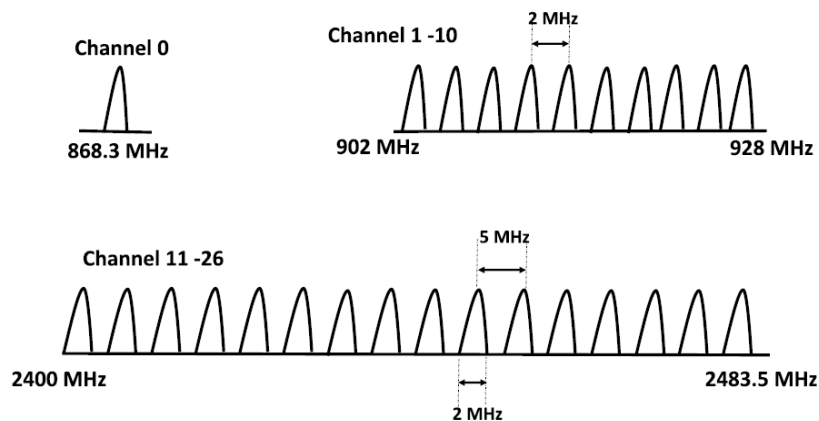


Figura 2.1: Faixas de frequência iniciais do padrão IEEE 802.15.4.

que vão desde os 169 até os 2450 MHz, isto sem considerar as aplicações de banda ultralarga (*UWB - Ultra-Wideband*) que trabalham em frequências de até 10 GHz.

### 2.1.3 Camada de Enlace (MAC)

A camada de enlace do padrão IEEE 802.15.4 foi projetada para trabalhar em dois modos principais, o *beacon* e o *non-beacon*. Se habilitado o modo *beacon*, toda a rede é sincronizada utilizando-se *beacons* periódicos, os quais fazem parte de uma estrutura denominada de *superframe*.

A versão IEEE 802.15.4e do padrão definiu diversos avanços sobre as versões anteriores, dentre os quais podemos destacar os elementos de informação (*IE - Information Elements*), o acesso multicanais, funções de baixo consumo de energia (*LE - Low Energy*), *beacons* avançados (*EB - Enhanced Beacons*) e a associação rápida. Além dos avanços acima citados, foram definidos vários modos de operação para a camada de enlace, são eles:

- ***DSME - Deterministic Synchronous Multichannel Extension***

O coordenador da PAN de uma rede DSME define um ciclo de superframes repetido chamado de estrutura Multi-Superframe. Neste modo de operação da camada de enlace (MAC) um único canal é utilizado para efetuar as associações, para transmitir os quadros EB (*Enhanced Beacon*) e os quadros transmitidos durante o período de contenção de acesso (CAP - *Contention Access Period*). Os demais canais são utilizados nos enlaces entre os dispositivos. Devido à utilização de vários canais este modo de operação é indicado para a formação de redes de topologias ponto-a-ponto e *mesh*. Os parâmetros que definem a estrutura de um superframe são: *Superframe Duration* (SD), *Multi-superframe Duration* (MD) e o *Beacon Interval* (BI).

- ***LLDN - Low Latency Deterministic Network***

Este modo de operação da camada de enlace utiliza exclusivamente a topologia estrela, permitindo que mais de 100 nós se comuniquem com o coordenador em um único salto (*hop*). Este modo possui dois tipos de dispositivos, os que podem transmitir dados para o coordenador (sensores) e os que podem transmitir e receber dados do coordenador (sensores e atuadores) utilizando *timeslots* bidirecionais. A camada de rede superior é responsável por determinar o número de *timeslots* e o tipo de cada dispositivo. O coordenador da LLDN utiliza superframes de baixa latência (LL - *Low Latency*) para



transferir os dados. Este tipo de superframe é composto de quatro partes, são elas: *beacon*, *timeslot* de *uplink*, *timeslot* de gerenciamento e *timeslot* bidirecional.

- ***TSCH - Time Slotted Channel Hopping***

No modo de operação TSCH o conceito de *superframe* foi substituído pelo conceito de *slotframes*. Cada *slotframe* é uma coleção de *timeslots*. Cada *timeslot* acomoda uma transmissão e uma eventual confirmação (ACK - *acknowledgment*). O TSCH é independente de topologia, suportando uma grande variedade de topologias, desde estrela até *mesh* completas. Este modo de operação suporta *slotframes* concorrentes, sendo esta função chamada de *slotframes* múltiplos. Os *slotframes* múltiplos possuem diferentes programações e matrizes de conectividade para trabalhar em paralelo. Todos os *slotframes* são alinhados às fronteiras dos *timeslots*. O número de canais físicos de comunicação utilizados pelo TSCH depende da seleção da banda e das restrições regulatórias de cada região. Para controlar o canal utilizado, o TSCH utiliza uma variável *offset* que varia de 0 até o número de canais menos um. O salto de canais é controlado pela sub-camada MAC. O modo de operação *TSCH* desperta muito interesse dos pesquisadores por prover alta confiabilidade e garantias críticas de tempo, sendo adequado para implementar redes industriais sem fio de sensores e atuadores, em locais que possuem requisitos críticos de segurança pessoal e patrimonial. Na Seção ?? são discutidos alguns trabalhos desenvolvidos sobre este modo de operação.

- ***AMCA - Asymmetric/Asynchronous Multi-Channel Adaptation***

A adaptação de múltiplos canais assimétricos, ou assíncronos (como também é chamada), foi definida para atender aos casos nos quais a utilização de um canal único de transmissão e recepção de mensagens não é capaz de conectar todos os pares de dispositivos em uma determinada rede. Este modo de operação foi projetado para ser empregado nas redes que não utilizam mensagens de sincronismo periódico (*beacon*). O funcionamento é simples. Quando dois dispositivos adjacentes possuem canais designados de escuta diferentes um do outro e um dos dispositivos deseja efetuar uma transmissão de dados para o outro, eles devem seguir estes passos: (i) o dispositivo transmissor muda para o canal de escuta do vizinho, efetua a transmissão da mensagem e retorna para o seu canal de escuta; (ii) o dispositivo receptor, por sua vez, processa a mensagem e descobre quem foi o transmissor, muda para o canal de escuta do transmissor, transmite a mensagem de reconhecimento ACK (caso requisitada) e retorna para o seu próprio canal de escuta. Este modo de operação aparece descrito somente na versão 802.15.4e-2012 da norma. Nas versões posteriores da norma verificou-se que o envio do ACK, como resposta ao envio de uma mensagem assíncrona, foi modificado para ocorrer no mesmo canal de transmissão da mensagem. Para isto, foi definido que o transmissor deve permanecer por um intervalo escutando no mesmo canal em que efetuou a transmissão da sua mensagem.

- ***BLINK***

O modo de operação BLINK, como o modo AMCA, também aparece descrito somente na versão 802.15.4e-2012 da norma. Foi idealizado para que os dispositivos possam transmitir os seus identificadores únicos e opcionalmente algum dado para outros dispositivos, sem que passem previamente pelos processos de associação e autenticação da rede e sem a necessidade de envio de mensagens de reconhecimento do tipo ACK. Uma característica que provavelmente inviabiliza a utilização deste modo de operação e determinou sua retirada da norma é a definição de que outros dispositivos da rede

não são obrigados a efetuar o encaminhamento deste tipo de mensagem. Portanto, não há garantia de que este modo de operação funcione adequadamente em uma rede com dispositivos diversos.

## 2.2 AS REDES WI-SUN FAN

A tecnologia de rede sem fio Wi-SUN (*Wireless Smart Ubiquitous Networks*) foi projetada inicialmente para atender as empresas dos setores elétrico, de água e de gás (*utilities*), mas sua aplicabilidade foi expandida para as *Smart Cities* e a IoT. O protocolo é fundamentado em vários padrões IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), IETF (*Internet Engineering Task Force*) e ANSI/TIA (*American National Standards Institute / Telecommunications Industries Association*) que dão suporte às redes pessoais de baixa taxa de transmissão (LR-WPANs - *Low-Rate Wireless Personal Area Networks*) e é promovido pela Wi-SUN Alliance, um consórcio de corporações e empresas dos mercados envolvidos, as quais definem o protocolo Wi-SUN com base em padrões abertos visando a interoperabilidade de produtos (Wi-SUN, 2024).

A primeira versão do protocolo Wi-SUN seguiu as definições das normas IEEE 802.15.4e e IEEE 802.15.4g, ambas publicadas no ano de 2012. A versão atual, denominada de FAN (*Field Area Network*) (IEEE Std 2857, 2021) incorpora as atualizações lançadas até a versão de 2015 da norma IEEE 802.15.4. Algumas características do protocolo são: alcance dos enlaces de comunicação na faixa dos quilômetros, suporte ao IPv6 (*Internet Protocol version 6*), topologias de rede em estrela e em malha (*mesh*), adoção de protocolo de segurança multicamadas baseado nos padrões IEEE 802.1X e EAP-TLS (Simon et al., 2008), várias opções de largura de banda e emprego do protocolo RPL, um protocolo de roteamento em malha resiliente e escalável que suporta a conexão de dispositivos distantes até 24 saltos do dispositivo raiz (Winter et al., 2012).

### 2.2.1 Pilha de Protocolos

O protocolo Wi-SUN FAN abrange quatro camadas do modelo de referência OSI (*Open System Interconnection*) como ilustra a Figura 2.2 (figura extraída da especificação Wi-SUN FAN (IEEE Std 2857, 2021)).

A camada física (PHY), definida a partir da norma IEEE 802.15.4g, provê comunicação bidirecional com taxas de transferência de 50 a 300 kbps. Apresenta baixo consumo de energia no modo de escuta e atende aos requisitos regionais de frequências de transmissão, ciclo de trabalho e modos de operação.

A camada de enlace (*Data Link*), definida a partir da norma IEEE 802.15.4e, controla e gerencia o acesso à camada física e provê serviços para a camada de rede. A camada de enlace é formada pelas sub-camadas LLC (*Logical Link Control*) e MAC (*Media Access Control*).

A sub-camada MAC opera no modo *non-beacon*, não utiliza *frames* periódicos de sincronização, controla os saltos de canais (ver Seção 2.2.2), tanto para transmissões em *unicast* como em *broadcast*, e faz o controle de acesso ao meio utilizando o algoritmo CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) com CCA (*Clear Channel Assessment*), para minimizar as colisões de transmissão. No modo *non-beacon*, quando um dispositivo deseja enviar uma mensagem ele observa o meio de transmissão usando o CSMA-CA com CCA e, se o meio estiver livre, transmite o pacote de dados.

A sub-camada LLC fornece o serviço de despacho de mensagens para a camada de rede e, opcionalmente, o serviço de roteamento L2 MESH. Esta camada garante uma interface padronizada entre os dispositivos da rede e suporta comunicação multi-saltos. Inclui ainda mecanismos para lidar com erros e retransmissões, garantindo integridade e confiabilidade nas transmissões.

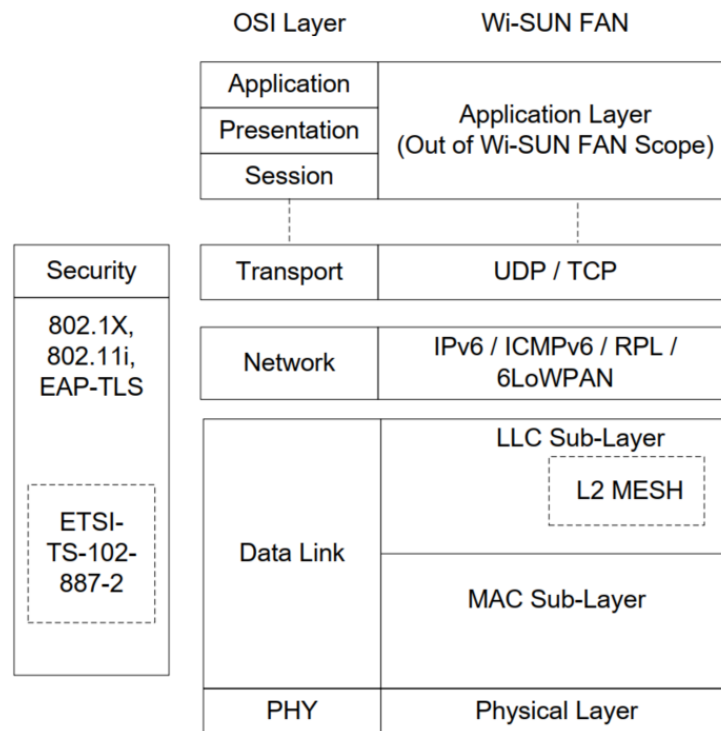


Figura 2.2: Pilha de protocolos Wi-SUN FAN (figura extraída da especific. Wi-SUN FAN (IEEE Std 2857, 2021)).

A camada de rede (*Network*) suporta o endereçamento de dispositivos e o roteamento de pacotes do protocolo IPv6 com a adaptação 6LoWPAN (*IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*), o que reduz o *overhead* dos cabeçalhos dos pacotes IPv6 completos. Requer-se, assim, pouco código e memória para processamento, tornando-os adequados para as redes sem fio de dispositivos com poucos recursos. O roteamento de pacotes pode ser efetuado de duas formas: na camada de rede pelo uso do protocolo RPL (*IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*) (Winter et al., 2012), ou na sub-camada LLC seguindo o protocolo MHDS (*Multi-Hop Delivery Specification*) (TIA-4957.210, 2013).

A camada de transporte provê suporte ao protocolo UDP (*User Datagram Protocol*) e, opcionalmente, ao TCP (*Transmission Control Protocol*). Em termos de segurança a especificação Wi-SUN FAN adota o padrão multi camadas, dando suporte às funções de autenticação, autorização, criptografia e a verificação de integridade de pacotes transmitidos.

As redes Wi-SUN FAN podem funcionar em qualquer faixa de frequências regionais definidas nas especificações da camada física, por exemplo: 470-510 MHz, 779-787 MHz e 920,5-924,5 MHz na China, 863-870 MHz e 870-876 MHz na Europa, 920-928 MHz nos Estados Unidos, Canadá e Japão, e 902-907,5 MHz e 915-928 MHz no Brasil.

Uma rede Wi-SUN FAN é constituída por uma ou mais redes PAN (*Personal Area Networks*), sendo que os dispositivos de cada PAN podem ser de três tipos distintos: (a) Roteador de Borda (RB), dispositivo único que dissemina os dados básicos da rede para a conexão de novos dispositivos, mantém todas as informações de roteamento para os outros dispositivos e gerencia os serviços de autenticação e controle de chaves de segurança; (b) Roteador (R), dispositivo que fornece o encaminhamento de mensagens e mantém a tabela de roteamento para os seus vizinhos; (c) Folha (F), dispositivo que possui as capacidades mínimas de descobrir a PAN, conectar, enviar e receber mensagens. A Figura 2.3 ilustra uma rede de comunicação Wi-SUN FAN com os diferentes tipos de equipamentos.

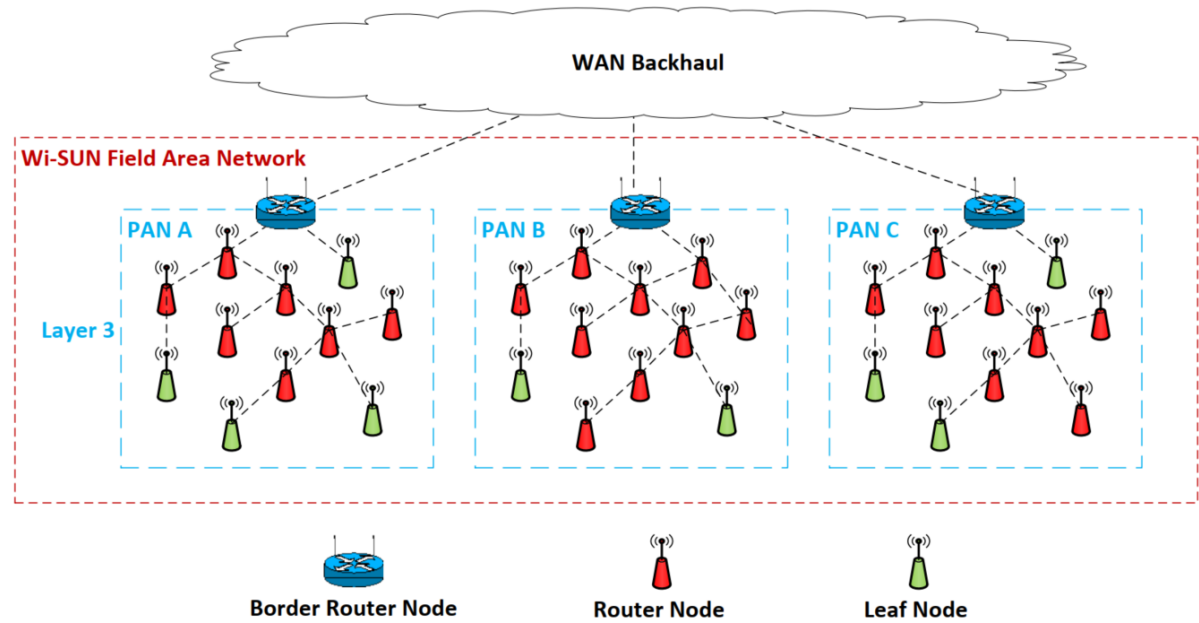


Figura 2.3: Tipos de dispositivos Wi-SUN FAN (figura extraída da especific. Wi-SUN FAN (IEEE Std 2857, 2021)).

### 2.2.2 Salto de Frequências

O salto de frequências, ou salto de canais, é a mudança periódica da frequência da portadora de um sinal transmitido. Esta funcionalidade é utilizada para conferir ao sistema de comunicação uma grande imunidade contra interferências, além de aumentar o desempenho da rede ao propiciar que enlaces próximos possam comunicar simultaneamente, uma vez que cada dispositivo utiliza uma sequência diferente de frequências para se comunicar com os demais dispositivos. A sub-camada MAC do protocolo Wi-SUN FAN utiliza o salto de canais sincronizado para a transmissão de mensagens entre nós vizinhos, tanto em modo *unicast* como em modo *broadcast*. Os pacotes de descoberta e junção de nós na rede fogem à regra, sendo transmitidos de forma assíncrona para acelerar o processo de conexão de novos nós na rede.

Múltiplas bandas de frequência são definidas segundo as normas das diferentes regiões, sendo o número de canais disponíveis dependente da banda e do modo de operação da camada física selecionados. As bandas de frequências definidas para a região do Brasil (BZ) e seus respectivos parâmetros dos canais são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Bandas de frequência e parâmetros dos canais

| Banda (MHz) | Região | Classe | Modos PHY   | Espaçamento (kHz) | Núm. de Canais | Canal Central Freq. 0 (MHz) |
|-------------|--------|--------|-------------|-------------------|----------------|-----------------------------|
| 902-907,5   | BZ     | 1      | # 1b e # 2a | 200               | 90             | 902,2                       |
| 915-928     |        | 2      | # 3 e # 4a  | 400               | 43             | 902,4                       |
|             |        | 3      | # 5         | 600               | 27             | 902,6                       |

A camada física do protocolo Wi-SUN FAN utiliza a modulação 2-FSK (*2-level Frequency Shift Keying*) com espaçamento de canais variando de 100 a 600 kHz, o que resulta em taxas de transmissão de dados de 50 a 300 kbps. Os modos de operação da camada física são exibidos na Tabela 2.2.

Para descobrir em qual canal específico um nó está ouvindo em um determinado tempo é utilizada uma *função de canal*. Segundo a especificação do protocolo, a função de seleção de

Tabela 2.2: Modos de operação da camada física.

| Modo de Operação | Taxa de Símbolos (ksymbol/s) | Índice de Modulação |
|------------------|------------------------------|---------------------|
| # 1a             | 50                           | 0,5                 |
| # 1b             | 50                           | 1,0                 |
| # 2a             | 100                          | 0,5                 |
| # 2b             | 100                          | 1,0                 |
| # 3              | 150                          | 0,5                 |
| # 4a             | 200                          | 0,5                 |
| # 4b             | 200                          | 1,0                 |
| # 5              | 300                          | 0,5                 |

canais DH1CF (*Direct Hash Channel Function*) é de implementação obrigatória, bem como a possibilidade de operação em canal fixo. Opcionalmente pode ser utilizada a função TR51CF (*TR51 Channel Function*). Cada nó divulga suas informações de escalonamento de canais entre os seus vizinhos de modo que estes possam determinar em qual canal ele estará ouvindo em um certo tempo. Por sua vez, todo nó deve permanecer ouvindo o meio de transmissão, de acordo com o seu escalonamento, caso não esteja transmitindo uma mensagem ou ouvindo mensagens de *broadcast*.

A Figura 2.4 ilustra um exemplo de escalonamento dos saltos de canais dos modos *unicast* (U-cast) e *broadcast* (B-cast) para diferentes nós. O período em que um nó permanece ouvindo em cada canal no modo *unicast* é chamado de intervalo de permanência de *unicast* (UDI - *Unicast Dwell Interval*). As linhas exibidas na Figura 2.4 simbolizam as sequências de canais nas quais os nós 1, 2 e 3 estão ouvindo o meio de transmissão no modo *unicast*. Pode-se observar que os momentos de início de escuta de cada intervalo entre diferentes nós não são alinhados, pois não há dependência de sincronização de tempo entre os nós da rede.

No modo *broadcast* são definidos dois períodos de tempo, o intervalo de permanência de *broadcast* (BDI - *Broadcast Dwell Interval*) e o intervalo de *broadcast* (BI - *Broadcast Interval*). Após um nó divulgar suas informações de escalonamento de canais e configurações de temporização de *broadcast* para seus nós vizinhos, todos os vizinhos que receberam estas definições devem ouvir os canais determinados durante o período BDI. No restante do intervalo de *broadcast* eles podem retornar a ouvir nas suas próprias sequências de *unicast* ou efetuarem transmissões. As colunas em azul claro na Figura 2.4 ilustram os períodos de *broadcast* do nó X, momentos em que o nó X pode efetuar transmissões de mensagens em *broadcast* para os nós 1, 2 e 3.

Segundo a especificação Wi-SUN FAN, o BI deve ser suficientemente longo em relação ao BDI para permitir a adequada comunicação do modo *unicast*. O esquema inicial de *broadcast* é definido pelo nó raiz da rede, o qual transmite esta informação para os seus filhos, os quais, por sua vez, devem repassar o esquema para os próximos níveis da rede, seguindo os mesmos parâmetros de escalonamento de canais e temporização recebidas, ou um novo esquema, desde que este não se sobreponha ao do seu nó pai. Segundo a documentação de um fabricante o UDI pode variar de 15 a 250 milissegundos (ms), o BDI pode variar de 0 a 250 ms e o BI pode variar de 15 a 16777215 ms, sendo utilizados os valores de 250, 250 e 4250 ms como valores *default*, respectivamente (Texas Instruments, 2018).

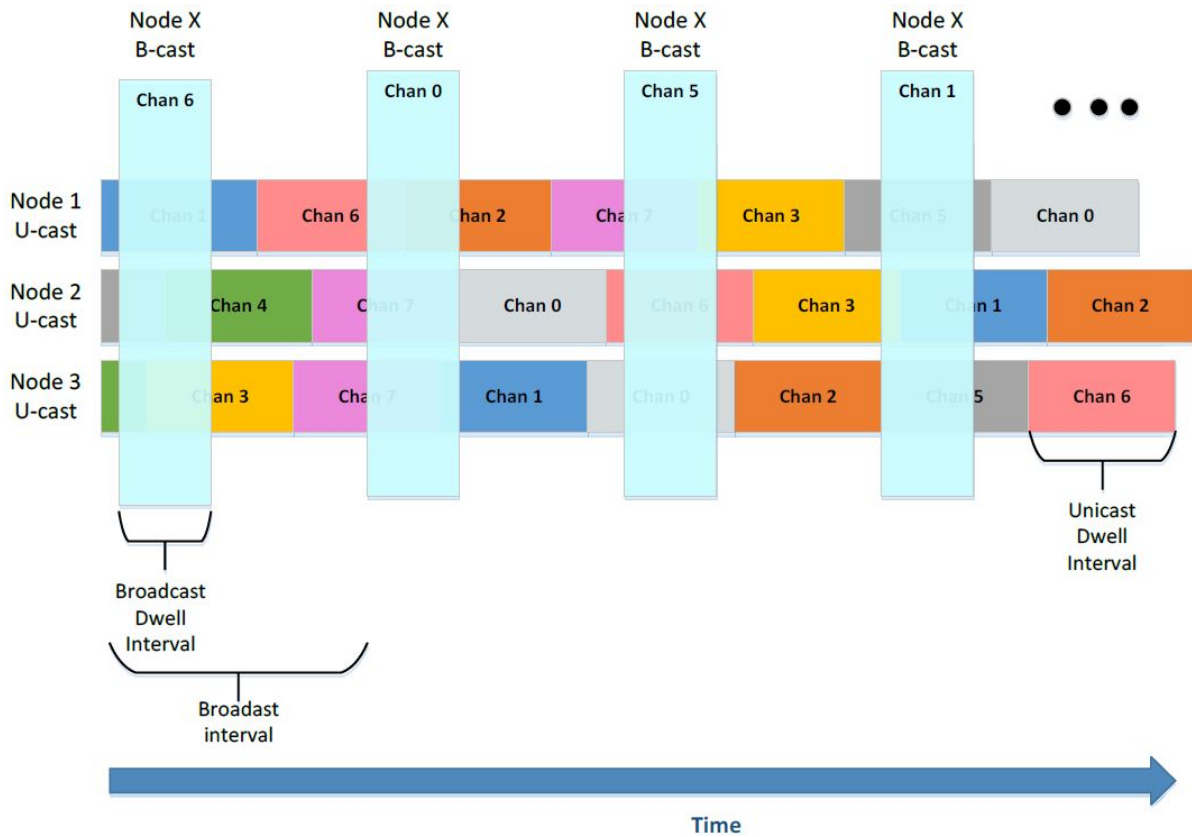


Figura 2.4: Escalonamento do salto de canais (IEEE Std 2857, 2021).

### 2.2.3 Processo de Descoberta e Conexão de Novos Dispositivos

Para a formação de uma rede Wi-SUN FAN é necessário um dispositivo do tipo RB e ao menos um dispositivo do tipo R ou F. Todo dispositivo que deseja se conectar à uma rede PAN inicia no estado de junção 1, no qual um RB ou outros dispositivos R, já conectados na rede, anunciam a presença da rede transmitindo periodicamente mensagens do tipo *PAN Advertisement* (PA) via *broadcast*.

As mensagens PA contém os parâmetros mínimos da rede para permitir a conexão dos novos dispositivos, sendo seu intervalo de transmissão controlado por um *trickle timer*. Além disso, os *nós de junção* (dispositivos que desejam se conectar à uma rede) podem forçar o envio de PAs pelos seus vizinhos (antes do tempo previsto pelo *trickle timer*), através da transmissão de mensagens do tipo *PAN Advertisement Solicit* (PAS). No estado de junção 1 (EJ 1), os dispositivos ainda não estabeleceram uma associação de segurança com a rede. Portanto, nas mensagens PA são expostas apenas as informações mínimas necessárias para que o nó de junção valide a PAN e possa incluir o dispositivo de quem recebeu o PA como um nó candidato a pai.

Após a descoberta da rede, o nó de junção entra no estado de junção 2 (EJ 2), no qual realiza o processo de autenticação. No próximo estado, o de junção 3 (EJ 3), são transmitidas as mensagens do tipo *PAN Configuration* (PC), momento em que é compartilhada a configuração completa da rede, já de forma segura (criptografada). A transmissão do PC também é controlada por um *trickle timer* e, de forma semelhante ao caso do PA, os nós de junção podem forçar seu envio antecipado através da transmissão de mensagens do tipo *PAN Configuration Solicit* (PCS).

No estado de junção 4 (EJ 4) é realizada a configuração do roteamento, descrito na seção 2.4 que trata do protocolo RPL, e então o dispositivo passa para o estado de junção 5 (EJ 5),

que representa o estado operacional. A Figura 2.5 mostra o fluxo das mensagens PA, PAS, PC e PCS no processo de conexão de um dispositivo na rede.

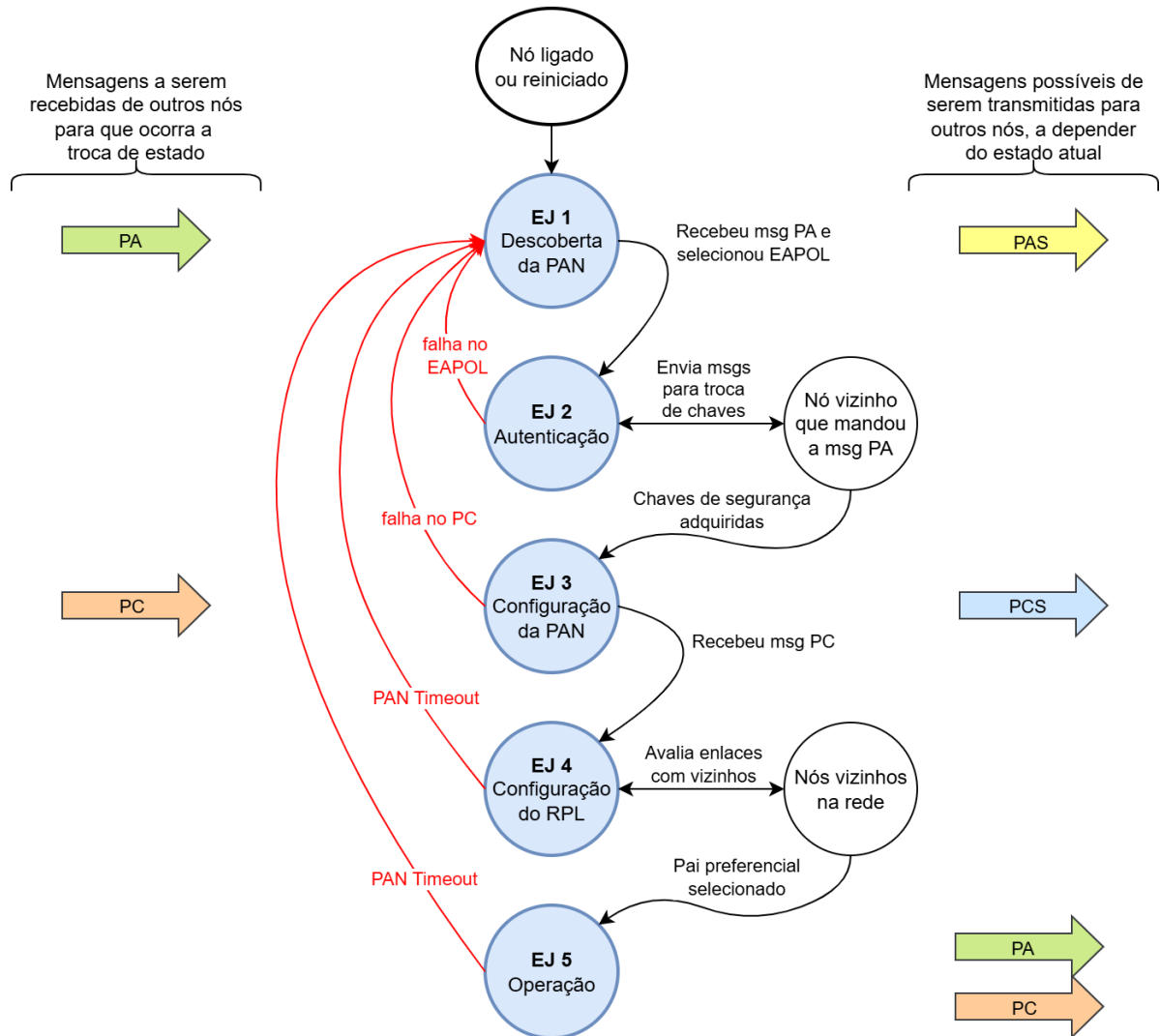


Figura 2.5: Fluxo de mensagens de descoberta e conexão.

### 2.3 O ALGORITMO *TRICKLE*

O algoritmo *Trickle* é utilizado para controlar os intervalos de transmissão de mensagens em dispositivos de comunicação que compartilham o meio de propagação. Este algoritmo ajusta dinamicamente as janelas de transmissão de acordo com suas regras de controle, o que permite a troca de informações de forma robusta e com baixo gasto de energia, além de ser escalável e de fácil implementação (Levis et al., 2011).

O algoritmo utiliza os conceitos de transmissão consistente e inconsistente para reduzir ou aumentar a frequência de envio de mensagens. Uma mensagem é considerada consistente quando ela contém informações que não diferem do estado atual ou das informações já conhecidas pelo nó. Quando novas informações são detectadas, o nó recebe uma mensagem inconsistente, o algoritmo acelera a transmissão ou o encaminhamento destas, mas quando as informações não

mudam o intervalo entre as transmissões cresce exponencialmente. Além disto, ele permite que os nós ouçam as transmissões uns dos outros e possam evitar o envio de mensagens redundantes. Estas ações constituem os dois principais mecanismos de controle do algoritmo, o período de adaptação e o de supressão.

O algoritmo controla a janela de transmissão de mensagens utilizando três parâmetros de configuração, são eles:

- $I_{min}$  – tamanho do intervalo mínimo; definido em uma unidade de tempo. Por exemplo, 100 milissegundos ou 15 segundos;
- $I_{max}$  – tamanho do intervalo máximo; definido como o número de duplicações que podem ser efetuadas sobre o  $I_{min}$ . Por exemplo, para um  $I_{min}$  igual a 15 segundos e um  $I_{max}$  igual a 6 duplicações, o intervalo máximo será de 960 segundos ou 16 minutos;
- $k$  – constante de redundância; um número inteiro maior do que zero.

Adicionalmente aos parâmetros listados acima são utilizadas três variáveis de controle, são elas:  $I$  o tamanho do intervalo atual;  $t$  o tempo dentro do intervalo atual para envio de uma mensagem e  $c$  o contador de mensagens consistentes recebidas.

Quando o algoritmo inicia sua execução ele carrega a variável  $I$  com um valor entre o  $I_{min}$  e o  $I_{max}$ , começando o primeiro intervalo. Sempre que é iniciado um intervalo o *trickle* carrega a variável  $c$  com o valor 0 (zero) e carrega a variável  $t$  com um valor aleatório no intervalo que vai de  $I/2$  até um valor menor do que  $I$ , pois o intervalo de espera termina quando o tempo decorrido (*time*) atingir o valor de  $I$ .

A primeira metade do intervalo, que vai do tempo 0 até o tempo  $I/2$ , é reservada para a escuta de mensagens. Sempre que é recebida uma mensagem consistente, o algoritmo incrementa a variável  $c$ . Ao atingir o tempo  $t$  é transmitida uma mensagem somente se o contador  $c$  for menor do que a constante de redundância  $k$ .

Quando um intervalo expira, o tempo decorrido é igual a  $I$ , o algoritmo dobra o tamanho do intervalo, até o limite definido pelo  $I_{max}$ , e inicializa um novo intervalo.

Se for recebida uma mensagem inconsistente e  $I$  for maior que  $I_{min}$ , o algoritmo reinicializa. Carrega o  $I$  com  $I_{min}$ , o  $c$  com zero e o  $t$  com o valor entre  $[I/2, I)$ . A especificação do algoritmo permite ainda que ele seja configurado para reinicializar em função da ocorrência de eventos externos, definidos de acordo com a aplicação.

Uma característica do algoritmo *trickle* é que a resposta à detecção de uma inconsistência não ocorre imediatamente, ela é atrasada pelo tempo de um novo intervalo  $t$ , com  $I$  igual a  $I_{min}$ . Isto é feito intencionalmente para evitar uma avalanche de transmissões caso vários nós detectem uma inconsistência ao mesmo tempo.

## 2.4 PROTOCOLO DE ROTEAMENTO RPL

A especificação Wi-SUN FAN determina que seja obrigatoriamente implementado o roteamento de pacotes na camada de rede, na qual é adotado o protocolo RPL (Winter et al., 2012). Opcionalmente, pode ser implementado o roteamento na sub-camada LLC de enlace, na qual é utilizado o protocolo MHDS (TIA-4957.210, 2013).

O protocolo RPL (*IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*) foi projetado por um grupo de trabalho do IETF chamado ROLL (*Routing over Low power and Lossy networks*) para atender às redes LLN (*Low Power and Lossy Networks*), as quais são constituídas por dispositivos com restrições de processamento, memória e energia. O RPL foi proposto porque nenhum dos protocolos de roteamento conhecidos atendia aos requisitos das redes LLN.



O RPL cria e mantém rotas formando um grafo acíclico direcionado e orientado ao destino (*Destination Oriented Directed Acyclic Graph - DODAG*), conforme o exemplo ilustrado pela Figura 2.6. Em uma rede Wi-SUN FAN o nó raiz do DODAG é o roteador de borda (RB), o qual é responsável por conectar a PAN com uma rede externa.

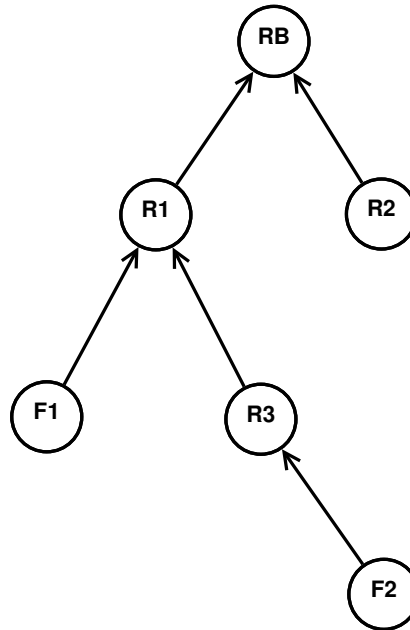


Figura 2.6: Exemplo de DODAG criado pelo protocolo de roteamento RPL.

A formação do DODAG do RPL é orientada pelos seguintes conceitos:

- Função objetivo – é a métrica a ser otimizada na construção do grafo, como o número de saltos, a latência, a energia restante, entre outros;
- *Rank* – valor resultante do cálculo da função objetivo em relação à posição em que o nó está ocupando no grafo; cresce à medida em que os nós se afastam da raiz; evita a ocorrência de laços (*loops*);
- Rotas *upward* – rotas no sentido dos nós para a raiz, utilizam o processo de seleção de pai preferencial, o qual é descrito em detalhes na Subseção 2.4.1;
- Rotas *downward* – rotas no sentido da raiz para as folhas;
- RPLInstanceID – identificador único de uma instância RPL;
- Instância RPL – conjunto de grafos DODAG que possuem o mesmo RPLInstanceID e utilizam a mesma função objetivo;
- Sub-DODAG – sub-árvore do DODAG.

O algoritmo *Trickle* (Levis et al., 2011) é utilizado para controlar os intervalos de transmissão dos diversos tipos de mensagens do protocolo RPL. Os *trickle timers* ajustam dinamicamente os tempos de transmissão das mensagens de acordo com suas regras de controle, o que permite a troca de informações de forma robusta e com baixo gasto de energia, além de serem escaláveis e de fácil implementação.

O protocolo RPL funciona da seguinte maneira. Em um primeiro momento o RPL cria as rotas de *upward*. Para isto, o nó raiz envia uma mensagem de informação chamada DIO

(*DODAG Information Object*). A mensagem DIO contém diversas informações, dentre elas o *rank* do transmissor da mensagem. Os nós que recebem as mensagens DIO, de um ou mais vizinhos, analisam os dados recebidos, escolhem o seu pai preferencial – o qual é utilizado para o envio das mensagens de *upward* – e mantém os dados dos demais em uma lista de pais alternativos – os quais são utilizados em caso de falha do pai preferencial. A continuidade do descobrimento das rotas se dá pelos nós roteadores, os quais calculam o seu *rank*, utilizando a função objetivo, e iniciam a transmissão das suas mensagens DIO para os próximos vizinhos. O intervalo de envio das mensagens DIO é controlado por *trickle timers* e seu envio pode ser explicitamente solicitado por vizinhos com o uso de mensagens do tipo DIS (*DODAG Information Solicitation*). Por sua vez, os nós do tipo folha não transmitem mensagens do tipo DIO.

Em um segundo momento, para criar as rotas de *downward*, todos os nós que participam do DODAG, exceto o RB, enviam mensagens do tipo DAO (*Destination Advertisement Object*) para os seus pais, os quais sucessivamente encaminham as mensagens até que estas cheguem ao nó raiz. Isto permite que os nós construam as rotas *downward* ou de origem (*source routes*) para quaisquer nós participantes do DODAG.

Para o roteamento *downward* existem dois modos de operação nos quais o RPL pode operar, com e sem armazenamento. No modo com armazenamento (*storing*) todos os roteadores da rede mantêm uma lista de rotas para os dispositivos que estão na sua sub-DODAG, os seus filhos. No modo sem armazenamento (*non-storing*), o RB, que está na raiz do grafo, coleta e mantém a lista de rotas para todo o DODAG. No modo sem armazenamento, para uma mensagem ser transmitida entre dois nós quaisquer da rede, primeiramente ela deve ser transmitida para o nó raiz, o qual carrega as rotas de *downward* na mensagem e permite que ela siga para o nó de destino. Por outro lado, no modo *storing*, a mensagem só precisa subir no grafo até encontrar um nó que contenha a informação da rota para o destino desejado. Uma determinada instância do RPL deve operar apenas em um dos modos, nunca em ambos. A especificação das redes Wi-SUN FAN determina o uso do RPL no modo sem armazenamento, pois este modo exige menos memória dos dispositivos que atuam como roteadores na rede.

#### 2.4.1 Seleção do Pai Preferencial

A seleção do pai preferencial do protocolo RPL é determinada por meio do processo de avaliação do enlace (*Link Probe - LP*). Para efetuar a avaliação dos enlaces e construir a melhor topologia da rede até o nó raiz da DODAG, utiliza-se uma função objetivo (*Objective Function - OF*) e calcula-se o *rank* do nó para os seus vizinhos candidatos a pai preferencial.

O protocolo RPL utiliza por padrão a função objetivo zero (*Objective Function Zero - OF0*), a qual define o *rank* de um nó com base na métrica do número mínimo de saltos. Contudo, a especificação Wi-SUN FAN adota a função objetivo de mínimo *rank* com histerese (*Minimum Rank with Hysteresis Objective Function - MRHOF*) (Gnawali e Levis, 2012) e a métrica ETX (*Expected Transmission Count*) para avaliar a qualidade do enlace e eleger o melhor caminho em direção ao nó raiz.

O ETX é calculado pela divisão do número de tentativas de transmissão pelo número de transmissões confirmadas. Desta maneira, um ETX com valor igual a 1 indica um enlace sem falhas. O *rank* é calculado multiplicando-se o valor do ETX por 128. As atualizações do ETX e do *rank* são efetuadas após a ocorrência de ao menos quatro transmissões de mensagens sobre o enlace e que tenha se passado ao menos um minuto da última atualização.

Após concluída uma rodada do processo de LP com o(s) vizinho(s) do nó, o RPL seleciona o vizinho/caminho com menor *rank* como pai preferencial. Novas rodadas do processo de LP são executadas periodicamente, permitindo a adaptação dinâmica da rede em reação a mudanças nas condições dos enlaces, como interferências ou movimentação dos nós.

## 2.4.2 Parâmetros de Configuração do Protocolo RPL

Os quatro principais parâmetros que determinam o funcionamento do protocolo RPL são descritos a seguir.

### 2.4.2.1 *DIO\_INTERVAL\_MIN* ou *DIO\_Imin*

O parâmetro *DIO\_INTERVAL\_MIN* (*DIO\_Imin*) determina o intervalo mínimo utilizado no *trickle timer* de envio de mensagens DIO. É calculado segundo a Equação 2.1, com unidade de ms. Como exemplo, o valor 12 resulta em 4.096 ms, ou pouco mais de 4 segundos.

$$Imin\ time = 2^{DIO\_Imin} \quad (2.1)$$

### 2.4.2.2 *DIO\_INTERVAL\_DOUBLINGS* ou *DIO\_Imax*

O parâmetro *DIO\_INTERVAL\_DOUBLINGS* (*DIO\_Imax*) define o tempo máximo do *trickle timer* de envio de mensagens DIO. O valor do tempo é calculado segundo a Equação 2.2, com unidade de ms. Esse parâmetro determina o tempo máximo em função do número de duplicações em relação ao tempo mínimo, o que dá origem ao seu nome.

$$Imax\ time = 2^{DIO\_Imin+DIO\_Imax} \quad (2.2)$$

### 2.4.2.3 *DIO\_REDUNDANCY* ou *DIO\_k*

O parâmetro *DIO\_REDUNDANCY* (*DIO\_k*) determina o valor para a constante de redundância do *trickle timer* que controla o envio de mensagens DIO. A constante de redundância é usada para suprimir o envio de mensagens semelhantes na rede, reduzindo o congestionamento em redes densas. A pilha RPL (versão Lite) implementada no simulador COOJA, por *default*, desabilita a supressão de mensagens utilizando o valor 0 no parâmetro *DIO\_k*.

### 2.4.2.4 *DIS\_INTERVAL* ou *DIS\_I*

O parâmetro *DIS\_INTERVAL* (*DIS\_I*) determina o intervalo de envio de mensagens DIS (*DODAG Information Solicitation*) para os roteadores que ainda não ingressaram no roteamento RPL.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O avanço das tecnologias de fabricação de circuitos eletrônicos – miniaturização, redução de consumo de energia, entre outros – em conjunto com a evolução das técnicas de comunicação em geral – modulação, paralelismo, entre outros – permitem que a área de telecomunicações esteja em permanente evolução.

Neste capítulo foram apresentados os conceitos essenciais relacionados ao funcionamento das redes de comunicação sem fio, em especial para as redes do tipo Wi-SUN FAN. Contudo, este é um conteúdo que está em constante desenvolvimento, como pode ser observado pela recente publicação de uma nova versão da especificação IEEE 802.15.4 (IEEE 8802.15.4-2024, 2024). O mesmo deve ocorrer com a especificação Wi-SUN FAN, pois o respectivo grupo de estudos da aliança Wi-SUN está editando uma nova versão da mesma, a qual deve trazer taxas de transmissão de pacotes de até 2,4 Mbps na modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division*

*Multiplexing*) e a sincronização com dispositivos folha que funcionam com bateria e o modo *sleep*, dentre outras modificações.

No próximo Capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre os trabalhos relacionados à otimização do tempo de formação das redes IEEE 802.15.4 e Wi-SUN FAN.

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Várias propostas para melhorar o desempenho das redes IEEE 802.15.4 são apresentadas na literatura, com trabalhos explorando aspectos como tempo de formação de rede, consumo de energia, balanceamento de carga, segurança e interoperabilidade. Neste capítulo é apresentada a análise crítica dos trabalhos relacionados à área das redes IEEE 802.15.4 com foco nas propostas que visam melhorar o tempo de formação das redes. Adicionalmente, foi incluído um segundo conjunto de trabalhos que tratam de revisões bibliográficas na área, os quais apresentam problemas comumente abordados e oportunidades de pesquisa, bem como reforçam a necessidade de utilização de cenários reais em simulações e a execução de experimentos para a validação de propostas.

#### 3.1 MELHORIAS NO TEMPO DE FORMAÇÃO DA REDE

Os autores em (Romaniello et al., 2013) propõem o algoritmo *Multi-Channel Beacon Train* (MCBT), no qual nós coordenadores enviam rajadas de mensagens *beacon* em todos os canais físicos de comunicação disponíveis de maneira aleatória e utilizando os períodos inativos dos superframes. Implementam o algoritmo no sistema operacional Contiki e avaliam o desempenho por meio de simulações com o simulador Cooja. A proposta foi avaliada em redes IEEE 802.15.4 com o modo *beacon* habilitado. Esta solução é adotada atualmente no processo de descoberta e conexão de nós nas redes Wi-SUN FAN, contudo, traz benefício somente para o estado de junção 1, a descoberta de nós vizinhos.

Kermajani et al. avaliam a influência dos parâmetros de configuração do algoritmo *trickle* no tempo de convergência das redes padrão IEEE 802.15.4 e propõem o método DIS-Trickle de escalonamento de mensagens do tipo DIS (*DODAG Information Solicitation*) (Kermajani e Gomez, 2014). Os autores medem o desempenho nas simulações por meio do tempo de convergência e da contagem das colisões de pacotes, mas não avaliam o ciclo de trabalho da rede. Identificam que pequenos valores de  $k$  produzem tempos de convergência maiores em todos os tamanhos de rede avaliados e que, ao aumentar o tamanho do  $k$  para valores médios, o tempo de convergência diminui, pois um número menor de mensagens DIO são suprimidas. O método proposto pelos autores resulta em tempos de convergência das redes de duas a três vezes menores em cenários de baixas a altas densidades. No entanto, todos os experimentos efetuados pelos autores utilizam valores de intervalos mínimos para o envio de mensagens DIO muito pequenos, de 4 a 16 milissegundos, o que provoca uma alta ocupação do meio de transmissão.

Balmau et al. exploram a necessidade crítica de comunicação eficiente em aplicações de *Smart Grid*, nas quais minimizar o tempo de entrega de mensagens e garantir a recuperação rápida de falhas são primordiais (Balmau et al., 2014). O trabalho destaca os desafios impostos pelo protocolo RPL, que, embora projetado para redes de baixa potência e com perdas (LLNs), muitas vezes é ineficaz ao equilibrar a sobrecarga de controle com a agilidade necessária para recuperação rápida. Os autores investigam o mecanismo de reparo local de falhas e propõem modificações para melhorar os tempos de recuperação. As principais estratégias incluem sondagem para avaliar a qualidade do enlace, limpeza da lista de pais e utilização de coletores virtuais para facilitar a coleta de dados. Além disso, os autores enfatizam a importância de ajustar as configurações de mensagens DIO para aumentar a eficiência da recuperação. Por meio de simulações, os autores demonstram que a combinação desses mecanismos pode reduzir significativamente os tempos de recuperação, fornecendo sugestões para a implantação do RPL em ambientes de *Smart Grid*.

No entanto, a técnica de sondagem proposta pelos autores aumenta o tráfego de mensagens e consequentemente a utilização da rede.

Uma modificação no algoritmo *Trickle*, batizada de E-*Trickle* (*Enhanced Trickle*), é proposta em (Ghaleb et al., 2015). Os resultados de simulação indicam que a proposta reduz o tempo de convergência do protocolo RPL em até 43%. Dentre as alterações sugeridas estão a remoção do período exclusivo de escuta, a mudança no momento da reinicialização do contador de mensagens consistentes recebidas e o ajuste adaptativo do fator de redundância. Os resultados apresentados são baseados em simulações variando-se o número de nós, o fator de redundância e a taxa de perda de pacotes. Nos anos seguintes, os mesmos autores propuseram um novo mecanismo de controle para a duplicação dos intervalos de processamento e o chamaram de *Trickle-plus*. O objetivo do novo mecanismo é obter um melhor balanceamento entre o tempo de convergência e o consumo de energia do algoritmo *Trickle* (Ghaleb et al., 2016). Ainda, apresentam um controle adaptativo de supressão de envio de mensagens que utiliza o histórico de transmissão dos nós para ajustar suas novas probabilidades de transmissão (Ghaleb et al., 2017), batizado de algoritmo *Drizzle*. Os autores, contudo, não avaliaram as propostas em redes de larga escala e nem por meio de experimentos.

Vogli et al. desenvolvem e implementam quatro novos mecanismos para acelerar a junção de novos nós em redes industriais do tipo TSCH. Efetuam avaliações com base em experimentos e em modelos analíticos (Vogli et al., 2015, 2018). No entanto, avaliam a influência dos seus desenvolvimentos quanto à junção de novos nós somente a partir de redes já estabilizadas, não apresentando estudos sobre o tempo total de formação das redes, e suas propostas são específicas para as redes TSCH.

Uma adaptação que ajusta o período exclusivo de escuta do algoritmo *trickle* de acordo com o número de vizinhos de cada nó da rede é proposta em (Yassein et al., 2017). Esta modificação, chamada de *elastic trickle*, controla o envio de mensagens DIO do protocolo RPL e propicia redução no tempo de convergência. Contudo, o estudo não avalia a proposta sobre redes de larga escala. O algoritmo *Trickle Flexível* (FL-*Trickle*) é proposto em (Lamaazi e Benamar, 2020) como uma forma de reduzir o tempo de convergência do protocolo RPL sobre redes LLNs. Duas modificações são sugeridas: (i) fixar o tempo de transmissão; e (ii) modificar o mecanismo de aumento do intervalo de transmissão. Embora tenham apresentado ganhos no tempo de convergência do protocolo RPL, o uso de valores fixos para o tempo de transmissão acarreta no aumento das colisões de mensagens.

Hotta et al. propõem dois mecanismos para estabilizar a construção da tabela de roteamento de pacotes para as redes Wi-SUN FAN, evitando as variações frequentes na tabela de roteamento. Avaliam os mecanismos propostos sobre uma rede de 13 roteadores utilizando módulos de rádio instalados na Universidade de Kyoto (Hotta et al., 2020). No entanto, os mecanismos propostos pelos autores não resultam em ganho de desempenho quanto ao tempo de formação da rede.

Hauweele et al. efetuam uma avaliação de desempenho da função de escalonamento MSF (*Minimal Scheduling Function*) e demonstram que a maioria das perdas de pacotes observadas nas redes TSCH são provocadas pelo padrão de convergência da função MSF (Hauweele et al., 2020, 2021). Ainda, propõem um modelo matemático para prever o padrão de convergência e investigam o comportamento da função de escalonamento ao se variar seus parâmetros. A avaliação é conduzida por meio de simulações usando uma topologia linear com apenas cinco nós, o que pode não capturar totalmente as complexidades dos ambientes de rede do mundo real.

Solimini et al. apresentam dois mecanismos para melhorar a confiabilidade da comunicação de redes Wi-SUN, o *Re-Transmission Shaping* (RTS) e o *Adaptive Modulation Selection* (AMS) (Solimini et al., 2020, 2021). O primeiro faz adaptações dinâmicas no número de

retransmissão de pacotes e o segundo permite a troca das modulações de frequência para a transmissão dos pacotes. Resultados de simulação são apresentados para um simulador que os autores implementaram utilizando linguagem Python e mostram que a combinação dos mecanismos permite atingir uma taxa de entrega de pacotes (PDR - *Packet Delivery Ratio*) de 99% com uma taxa de transmissão de pacotes de 1,7. Embora os autores tenham indicado os mecanismos para uso em redes Wi-SUN, efetuaram a avaliação de desempenho utilizando somente a topologia em estrela. Portanto, a proposta pode ser ineficaz para uso em redes *mesh*.

Em (Aghaei et al., 2021) os autores equipam o algoritmo *trickle* com um autômato de aprendizagem (LA-Trickle) que calcula quantas vezes o mesmo deve ser repetido com intervalo mínimo durante a resolução de uma inconsistência. O autômato ajusta o número de repetições a serem utilizadas de maneira independente para cada nó. As simulações indicam que o melhor número de repetições para os cenários avaliados é de 5. Os resultados apontam ainda que o uso do autômato sobre redes que utilizam o protocolo de roteamento RPL reduz o tempo de convergência da rede e o consumo de energia. Por outro lado, a solução proposta aumenta o número de colisões quando comparado ao *trickle* original e a outras duas variantes propostas na literatura, o que prejudica o desempenho em redes de média e grande escalas.

Rojas et al. propõem um novo algoritmo de roteamento, chamado de IoTorii, como alternativa ao algoritmo RPL (Rojas et al., 2021). O algoritmo proposto emprega uma abordagem hierárquica que utiliza endereços HLMAC (*Hierarchical Local MAC*) para facilitar o estabelecimento de múltiplos caminhos entre nós, melhorando a resiliência e reduzindo a complexidade do gerenciamento de rotas. O desempenho do protocolo foi validado por meio de implementações no simulador OMNeT++ (OMNeT++, 2021) e Contiki-NG (Oikonomou et al., 2022), demonstrando sua capacidade de atingir tempos de formação mais rápidos e menores demandas de recursos quando comparado ao RPL. Embora a proposta simplifique a manutenção do roteamento, ela apresenta complexidade na fase inicial de construção da tabela de roteamento, principalmente em redes de larga escala ou com topologia muito dinâmica.

Safaei et al. elaboram e avaliam uma função objetivo para reduzir o consumo de energia no roteamento de pacotes do protocolo RPL (Safaei et al., 2021). A nova função atua reduzindo o número de grupos de pacotes (*strokes*) transmitidos pela camada de enlace em redes padrão IEEE 802.15.4 que utilizam o modo *sleep* nos rádios e seguem algum protocolo de redução do ciclo de trabalho do rádio (RDC - *Radio Duty Cycling*), como o ContikiMAC (Dunkels, 2011). Os autores avaliam a proposta por meio de simulações no ambiente Cooja sobre o sistema operacional Contiki. No entanto, eles testam a proposta somente em redes de pequeno porte, portanto, a efetividade da solução é incerta em cenários de rede de grande porte ou com alta densidade de nós.

Ambrosio et al. avaliam por meio de experimentos a influência da variação de parâmetros de configuração dos estados de junção 1 e 3 (descoberta e configuração da rede) sobre os tempos dispendidos para o agrupamento de nós em redes Wi-SUN FAN (Ambrosio et al., 2022). Os experimentos indicam que o tempo total de formação de redes Wi-SUN FAN de larga escala (mais de 100 nós) e que necessitem de 6 a 7 saltos para comunicar com todos os dispositivos da rede, é da ordem de 29 a 34 minutos. Estes resultados condizem com as informações obtidas sobre a operação da rede *Smart Grid* instalada em Ipiranga, ver Seção A.1. Contudo, como as configurações dos estados de junção 2 e 4 (segurança e roteamento RPL) não foram alteradas, os resultados de temporizações para estes estados apresentam pouca variação dentre os cenários avaliados. Este trabalho foi um dos motivadores para a realização do estudo apresentado no Capítulo 4.

Duenas Santos et al. propõem o protocolo Q-RPL, que otimiza decisões de roteamento com base em condições de rede em tempo real e padrões de tráfego, assimiladas por um algoritmo

de aprendizagem por reforço (Duenas Santos et al., 2024). O estudo avalia o desempenho do Q-RPL por meio de simulações em cenários urbanos, incluindo implantações em Montreal e Barcelona, com variadas cargas de tráfego e tipos de aplicação, como leituras de medidores, eventos de alarme e monitoramento de qualidade de energia. Os resultados demonstram que o Q-RPL melhora significativamente a escalabilidade e reduz o congestionamento da rede em comparação aos protocolos de roteamento tradicionais. No entanto, o protocolo proposto pelos autores introduz um atraso médio de 100 a 200 milissegundos na entrega das mensagens trafegadas na rede, devido à incorporação do mecanismo de aprendizagem, e não avaliam o tempo de formação da rede.

### 3.2 REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS NA ÁREA

No trabalho (Raza et al., 2017) os autores efetuam uma revisão bibliográfica sobre as redes LPWAN (*Low Power Wide Area Networks*) apresentando seus aspectos técnicos de implementação tais como faixa de frequências utilizadas, técnicas de modulação dos sinais, topologias, ciclo de trabalho, e uma relação de tecnologias privadas e públicas desenvolvidas para a implementação destas redes. Também discorrem sobre os desafios e as possíveis áreas de pesquisa tais como escalabilidade, interoperabilidade, localização, ferramentas, berços de teste, segurança e técnicas de modulação. Embora apresentem diversas tecnologias baseadas no padrão IEEE 802.15.4, não falam sobre a especificação Wi-SUN FAN.

Ghaleb et al. apresentam uma pesquisa abrangente e uma análise aprofundada das limitações e melhorias do protocolo RPL (Ghaleb et al., 2019). Os autores enfatizam a necessidade de mais pesquisas para tratar de questões não resolvidas e delinear futuras direções de pesquisa para melhorar o desempenho do RPL em redes com perdas e de baixa potência (LLNs - *Low-power and Lossy Networks*). Alguns desafios encontrados nas soluções propostas na literatura são discutidos, como condições operacionais irrealistas, falta de avaliações de teste em larga escala e aumento da complexidade. Os autores apontam algumas direções de pesquisa e questões em aberto, como balanceamento de carga, tráfego *downstream* e avaliação de cenários reais.

Outra ampla pesquisa sobre como a IoT auxilia as *Smart Grids* é apresentada em (Saleem et al., 2019). Os autores comentam sobre as deficiências das pesquisas anteriores na área, contrapondo com as suas contribuições, as tecnologias utilizadas, as aplicações comuns e destacam uma ampla lista de desafios e oportunidades futuras de pesquisa, tais como o congestionamento de dados, a interoperabilidade e integração de equipamentos, o aprendizado de máquina, a análise de dados e as diversas questões de segurança.

Ekpenyong et al. fornecem uma análise dos avanços no protocolo RPL dentro do contexto de aplicações de Internet das Coisas (IoT) (Ekpenyong et al., 2022). Sua revisão destaca os desafios inerentes apresentados pelo RPL, incluindo restrições de energia, perda de pacotes e a necessidade de soluções de roteamento eficientes. Os autores exploram vários aprimoramentos para o RPL, com foco em técnicas de otimização para seleção de pais, roteamento multicaminho e a integração de abordagens de aprendizado de máquina para melhorar as decisões de roteamento e o desempenho da rede. A revisão também enfatiza a importância das avaliações de teste do mundo real para validar os resultados da simulação e aprimorar a aplicabilidade prática dos aprimoramentos do RPL.

Darabkh et al. apresentam uma revisão bibliográfica e um estudo minucioso sobre o protocolo RPL, analisando trabalhos recentes da literatura (Darabkh et al., 2022). Mostram de forma sumarizada as melhorias propostas em cada trabalho, os desafios existentes e as áreas com demandas de aprimoramento. Os autores fornecem uma descrição detalhada da especificação do



protocolo RPL, do seu funcionamento e das nomenclaturas utilizadas, o que é útil como ponto de partida para novos pesquisadores. Os autores não abordam o aspecto do tempo de formação da rede.

### 3.3 SUMÁRIO DOS TRABALHOS RELACIONADOS

Os trabalhos apresentados neste capítulo estão sumarizados na Tabela 3.1, a qual exhibe os trabalhos agrupados de acordo com seus tópicos e mostra as informações de referência, uma breve descrição sobre a proposta de cada um ou que se trata de revisão, seguido de indicadores para o tipo de enlace de rede abordado no trabalho, se CSMA ou TSCH, e indicadores para o tipo de especificação de rede, se IEEE 802.15.4 e/ou Wi-SUN.

Tabela 3.1: Tabela sumário dos trabalhos relacionados.

| Tópico            | Referência                   | Proposta                                        | CSMA | TSCH | IEEE 802.15.4 | Wi-SUN |
|-------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|------|------|---------------|--------|
| Tempo de Formação | (Romaniello et al., 2013)    | Multi-Channel Beacon Train (MCBT)               | ✓    |      | ✓             |        |
|                   | (Kermajani e Gomez, 2014)    | DIS-Trickle                                     | ✓    |      | ✓             |        |
|                   | (Balmau et al., 2014)        | Ajuste no envio de mensagens DIO                | ✓    |      | ✓             |        |
|                   | (Ghaleb et al., 2015)        | Enhanced Trickle Algorithm (E-Trickle)          | ✓    |      | ✓             |        |
|                   | (Ghaleb et al., 2016)        | Trickle-Plus                                    | ✓    |      | ✓             |        |
|                   | (Ghaleb et al., 2017)        | Drizzle algorithm                               | ✓    |      | ✓             |        |
|                   | (Vogli et al., 2015)         | Melhorias nos Enhanced Beacons (EBs)            |      | ✓    | ✓             |        |
|                   | (Vogli et al., 2018)         | Melhorias nos Enhanced Beacons (EBs)            |      | ✓    | ✓             |        |
|                   | (Yassein et al., 2017)       | Elastic Trickle Timer Algorithm                 | ✓    |      | ✓             |        |
|                   | (Lamaazi e Benamar, 2020)    | Flexible Trickle Algorithm (FL-Trickle)         | ✓    |      | ✓             |        |
|                   | (Hotta et al., 2020)         | Otimização do RSL e filtragem de endereços MAC  | ✓    |      | ✓             | ✓      |
|                   | (Hauweele et al., 2020)      | Análise da função 6TiSCH MSF                    |      | ✓    | ✓             |        |
|                   | (Hauweele et al., 2021)      | Análise da função 6TiSCH MSF                    |      | ✓    | ✓             |        |
|                   | (Aghaei et al., 2021)        | LA-Trickle                                      | ✓    |      | ✓             |        |
|                   | (Solimini et al., 2020)      | Re-Transmission Shaping (RTS)                   | ✓    |      | ✓             | ✓      |
|                   | (Solimini et al., 2021)      | Adaptive Modulation Selection (AMS) + RTS       | ✓    |      | ✓             | ✓      |
|                   | (Rojas et al., 2021)         | Protocolo IoTorii                               | ✓    |      | ✓             |        |
|                   | (Safaei et al., 2021)        | Função objetivo ELITE                           | ✓    |      | ✓             |        |
|                   | (Ambrosio et al., 2022)      | Avaliação da inicialização das redes Wi-SUN FAN | ✓    |      | ✓             | ✓      |
|                   | (Duenas Santos et al., 2024) | Função objetivo com aprend. por reforço (Q-RPL) | ✓    |      | ✓             | ✓      |
| Revisões          | (Raza et al., 2017)          | Revisão sobre as redes LPWAN                    |      |      | ✓             |        |
|                   | (Ghaleb et al., 2019)        | Revisão sobre o RPL                             |      |      | ✓             |        |
|                   | (Saleem et al., 2019)        | Revisão de tecnologias utilizadas nas SGs       |      |      | ✓             |        |
|                   | (Ekpenyong et al., 2022)     | Revisão sobre o RPL para as redes LLNs          |      |      | ✓             |        |
|                   | (Darabkh et al., 2022)       | Revisão geral sobre o RPL                       |      |      | ✓             |        |

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os trabalhos revisados abrangem diversos aspectos das redes padrão IEEE 802.15.4 e das redes Wi-SUN, como destacado nos tópicos apresentados na Tabela 3.1. Dentre os trabalhos de otimização do tempo de formação das redes, pode-se destacar os esforços em otimizar o algoritmo de temporização de envio de mensagens *trickle timer* e em aprimorar os algoritmos de

roteamento de pacotes, por meio de melhorias no RPL, nas funções objetivo ou na proposição de novos protocolos de roteamento. Todos os trabalhos apresentando um objetivo em comum, o aprimoramento do funcionamento das redes de comunicação sem fio. No entanto, nota-se que em diversos casos os ganhos obtidos vêm associados com algumas perdas inerentes. Como exemplo podemos citar: a redução do tempo de formação da rede com o aumento no tráfego de pacotes de controle; e o melhor roteamento e balanceamento de carga de pacotes com o aumento da complexidade de implementação dos algoritmos e consequentemente do consumo de memória e de energia.

O estudo destes trabalhos direcionou esta pesquisa para o desenvolvimento de um mecanismo de otimização que pudesse além de obter ganho de desempenho, também mantivesse características como simplicidade de implementação e baixo consumo de recursos. A comparação do mecanismo proposto nesta pesquisa com os trabalhos aqui descritos é apresentada na Seção 5.3.

No próximo Capítulo é apresentado o estudo que analisa por meio de simulações a influência dos principais parâmetros de configuração do protocolo RPL sobre o seu tempo de convergência.

## 4 O TEMPO DE CONVERGÊNCIA DO PROTOCOLO RPL

Neste Capítulo é apresentado o estudo sobre a influência dos principais parâmetros de configuração do protocolo RPL sobre o seu tempo de convergência. Entende-se por tempo de convergência o tempo dispendido entre o momento em que a rede é ligada ou reiniciada (*global repair*) até o momento em que todos os dispositivos estejam presentes na tabela de roteamento do roteador de borda.

Este estudo foi motivado pelo elevado tempo necessário para a formação das redes de comunicação sem fio que utilizam a especificação Wi-SUN FAN (Silicon Labs, 2023), as quais fazem uso do protocolo de roteamento RPL.

### 4.1 ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO PROTOCOLO RPL

Este estudo foi realizado por meio de simulações utilizando-se o simulador Cooja (Osterlind et al., 2006). O Cooja é um simulador de redes de sensores integrado ao sistema operacional Contiki-NG (Oikonomou et al., 2022) e amplamente utilizado pela comunidade científica para a avaliação de algoritmos e protocolos em redes sem fio (Romaniello et al., 2013; Safaei et al., 2021; Hadaya e Alabady, 2022; Rojas et al., 2021).

O simulador foi configurado para utilizar o protocolo RPL sem armazenamento na camada de rede e efetuar o envio de pacotes usando o CSMA/CA na camada de enlace, pois estas são as configurações utilizadas nas redes Wi-SUN FAN. A camada física utiliza o rádio virtual denominado *Cooja mote*, permitindo a conexão dos processos do Contiki-NG com o simulador Cooja. A camada física controla a temporização de envio e recebimento de pacotes e foi configurada para utilizar um único canal de rádio com taxa de transmissão de 250 kbps. Esta taxa de transmissão foi escolhida por representar um equipamento mais moderno, valor próximo do máximo definido na especificação Wi-SUN FAN que é de 300 kbps.

A topologia de rede simulada é composta por um Roteador de Borda (BR - *Border Router*) e 100 nós Roteadores (R - *Routers*), posicionados uniformemente de modo a formar um quadrado de 900 por 900 metros, conforme ilustrado na Figura 4.1. Os Roteadores foram dispostos 100 metros de distância um do outro e o BR foi posicionado no centro do arranjo. Sobre esta topologia, foram definidos 5 cenários de teste variando-se os raios de alcance (RA) dos rádios para os valores de 110, 170, 230, 330 e 400 metros. O uso de diferentes raios de alcance nos testes permite variar a densidade de dispositivos entre os cenários e resulta em redes com diferentes números de saltos (*hops*) na comunicação. A Figura 4.2 ilustra um exemplo de topologia de rede formada pelo cenário com alcance de 110 metros, a qual necessita de 9 saltos para conectar todos os dispositivos.

Cada simulação foi executada 30 (trinta) vezes utilizando-se sementes de inicialização diferentes, geradas aleatoriamente, para o cálculo dos valores médios, de desvio padrão e de intervalo de confiança, considerando-se um nível de confiança de 95%. A Tabela 4.1 exhibe os detalhes das configurações utilizadas no simulador de redes Cooja.

Os principais parâmetros que determinam o funcionamento do protocolo RPL, conforme descrito na Seção 2.4.2, foram avaliados e suas influências no tempo de formação da rede são discutidos a seguir.

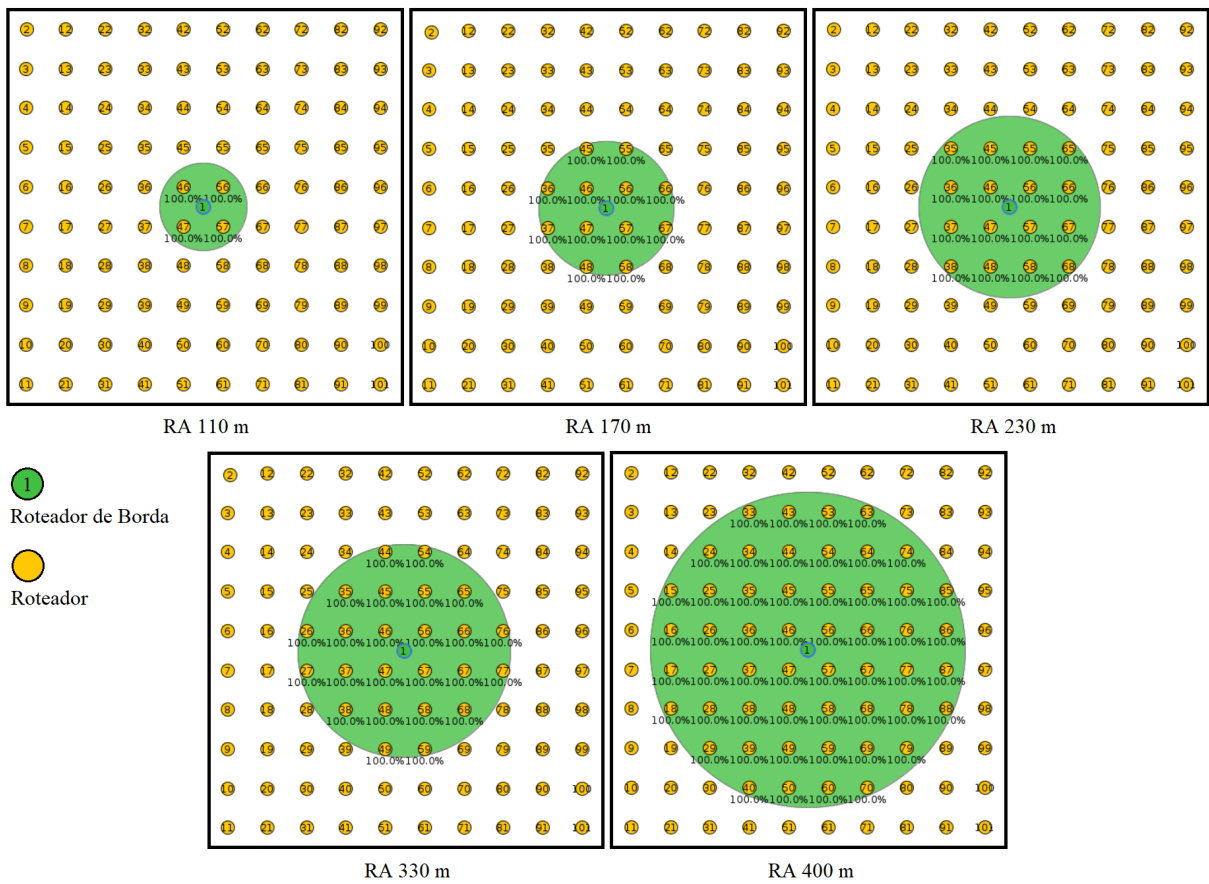


Figura 4.1: Cenários de rede avaliados. Raios de alcance de 110, 170, 230, 330 e 400 metros.

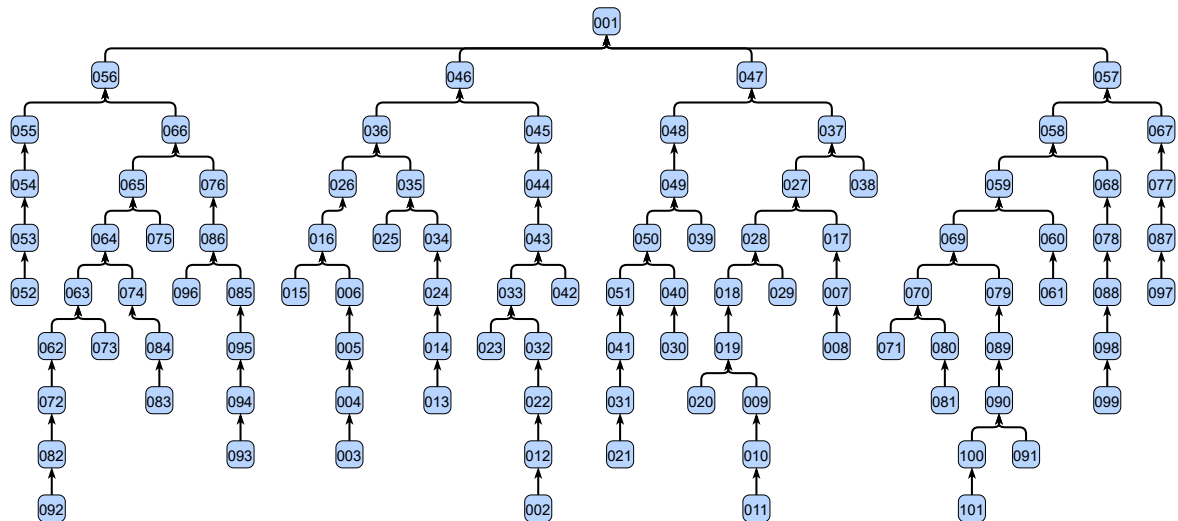


Figura 4.2: Árvore de conexão com 9 saltos, resultante do cenário com 110 metros de RA.

#### 4.1.1 Parâmetro $DIO\_Imin$

O parâmetro  $DIO\_Imin$  determina o intervalo mínimo do envio de mensagens DIO, como descrito na Subseção 2.4.2.1. Para avaliar a influência deste parâmetro no tempo de convergência do RPL foram efetuadas simulações variando o seu valor de 9 até 18, o que corresponde a tempos mínimos de 0,5 a 256 segundos. Para o parâmetro  $DIO\_Imax$  foram utilizados os valores de 1 à 8, e para o parâmetro  $DIO\_k$  foram utilizados os valores de 0 à 3. Cabe lembrar aqui que o valor 0

Tabela 4.1: Parâmetros de configuração utilizados no simulador Cooja.

|                                                                                     |                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Duração da Simulação                                                                | 14400 segundos                         |
| Número de Roteadores de Borda                                                       | 1                                      |
| Número de Roteadores                                                                | 100 (distribuição uniforme)            |
| Área da Simulação                                                                   | 900 x 900 metros                       |
| Raio de Alcance (RA)                                                                | 110, 170, 230, 330 e 400 metros        |
| Bit Rate                                                                            | 250 kbps                               |
| Taxa de Sucesso                                                                     | TX=100% e RX=100%                      |
| Função Objetivo                                                                     | MRHOF + ETX                            |
| Valor da Histerese<br>RPL_MRHOF_CONF_RANK_THRESHOLD                                 | 192 (ETX * 128)                        |
| Modelo do Canal de Rádio                                                            | UDGM ( <i>Unit Disk Graph Medium</i> ) |
| Semente de simulação                                                                | Gerada aleatoriamente                  |
| Habilita a avaliação dos enlaces<br>RPL_CONF_WITH_PROBING                           | 1                                      |
| Intervalo para envio da msg DAO<br>RPL_CONF_DAO_DELAY                               | 4 seg.                                 |
| Número de retransmissões do DAO<br>RPL_CONF_DAO_MAX_RETRANSMISSIONS                 | 5                                      |
| Tempo esperado antes da retransmissão do DAO<br>RPL_CONF_DAO_RETRANSMISSION_TIMEOUT | 15 seg.                                |

no parâmetro *DIO\_k* desabilita a supressão de mensagens semelhantes, conforme funcionamento do algoritmo *trickle*. Todas as combinações de parâmetros resultantes foram simuladas utilizando os 5 cenários de teste.

A Figura 4.3 ilustra o efeito da variação do parâmetro *DIO\_Imin* no tempo de convergência do RPL para o cenário com RA igual a 110 metros, *DIO\_Imax*=2 e *DIO\_k*=0. As curvas resultantes para os valores de *DIO\_Imin* iguais a 9, 15 e 17 foram suprimidos da Figura 4.3 para facilitar a visualização dos demais resultados. Este cenário e valores de parâmetros foram escolhidos para a visualização porque deixam mais evidente o efeito da variação do parâmetro *DIO\_Imin*. As linhas dos gráficos apresentam os valores médios do tempo de convergência e os pequenos traços horizontais na cor preta ilustram o intervalo de confiança para um nível de confiança de 95%, calculados sobre os resultados das 30 rodadas de simulação. O intervalo de confiança representa a faixa de valores dentro da qual a média provavelmente está situada, é usado para indicar a variabilidade dos dados. Note-se que na maioria dos pontos os valores do intervalo de confiança estão próximos da(s) média(s).

Na parte superior da Figura 4.3 são exibidos os resultados para valores do *DIO\_Imin* de 10 a 13, enquanto na parte inferior são exibidas as curvas para os *DIO\_Imin* com valores 12, 14, 16 e 18. Note que as escalas de tempo dos gráficos são diferentes pois foram ajustadas para melhor visualização dos dados, e que o resultado para o *DIO\_Imin* igual a 12 (linha azul) é exibido nos dois gráficos para fins de comparação com os demais resultados.

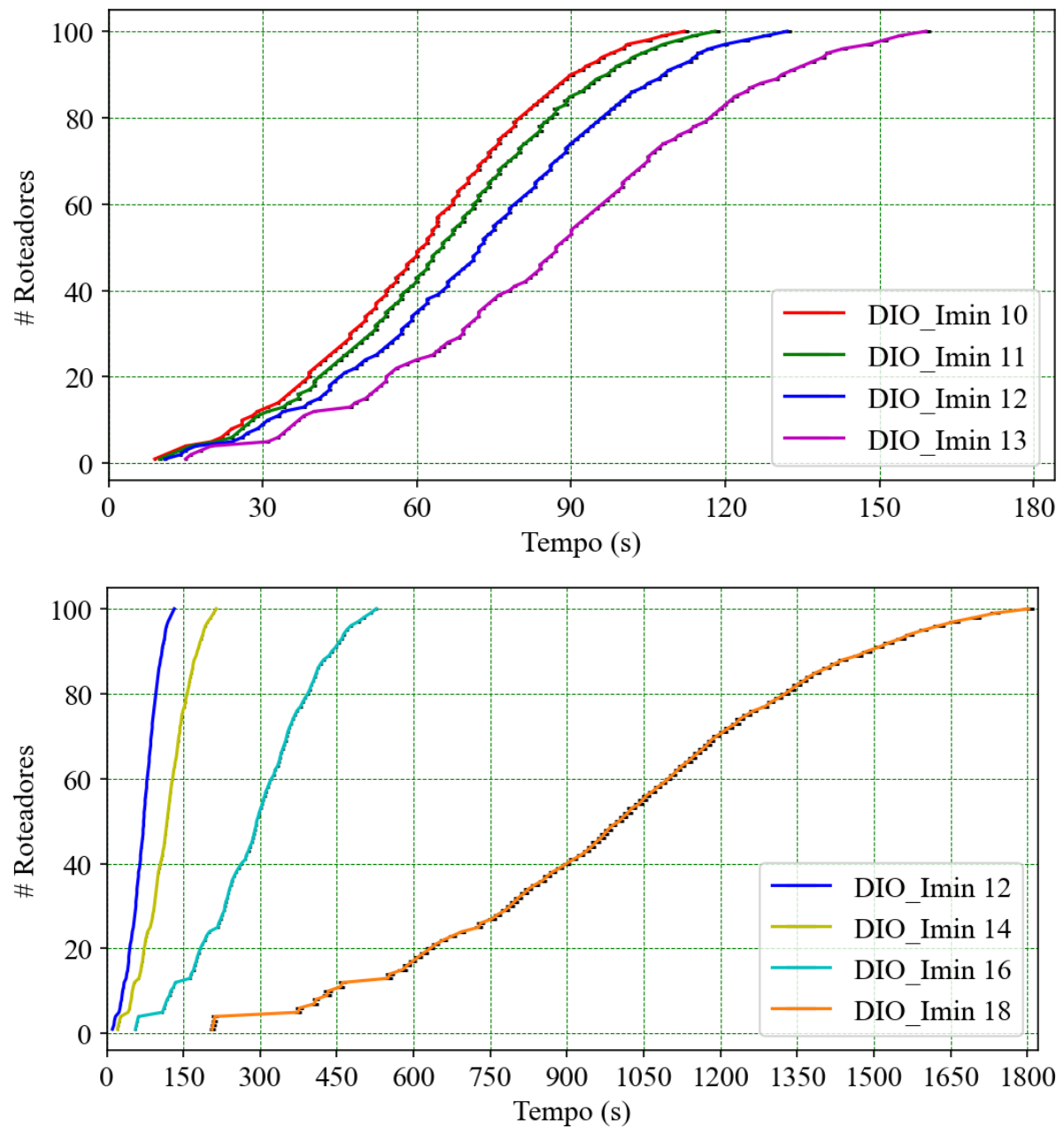


Figura 4.3: Influência do  $DIO\_Imin$  no tempo do RPL. Cenário com RA de 110 m.  $DIO\_Imax=2$  e  $DIO\_k=0$ .

Os dados indicam que o uso de menores valores no parâmetro  $DIO\_Imin$  resultam em menores tempos de conexão dos nós e menor tempo total de convergência do RPL. Por exemplo, alterando o valor do  $DIO\_Imin$  de 13 para 10, resulta em uma redução de aproximadamente 37% no tempo final de convergência. No entanto, esta mesma alteração no valor do  $DIO\_Imin$  provoca um aumento na taxa de ocupação do meio de transmissão (*duty cycle*), que passa do valor médio de 0.024% para 0.089%, conforme ilustrado na Figura 4.4.

Ainda analisando-se a Figura 4.4, os picos na ocupação ocorrem para os dispositivos Roteadores topologicamente mais próximos do BR (ID = 0), pois eles precisam transportar todo o tráfego extra entre o BR e os dispositivos mais remotos.

A Figura 4.5 ilustra resultados de  $DIO\_Imin$  de 9 a 16 para os 5 cenários avaliados, cenário de 110 m no topo e de 400 m embaixo. Cabe lembrar que redes com menores raios de alcance necessitam de mais saltos para comunicar com todos os dispositivos.

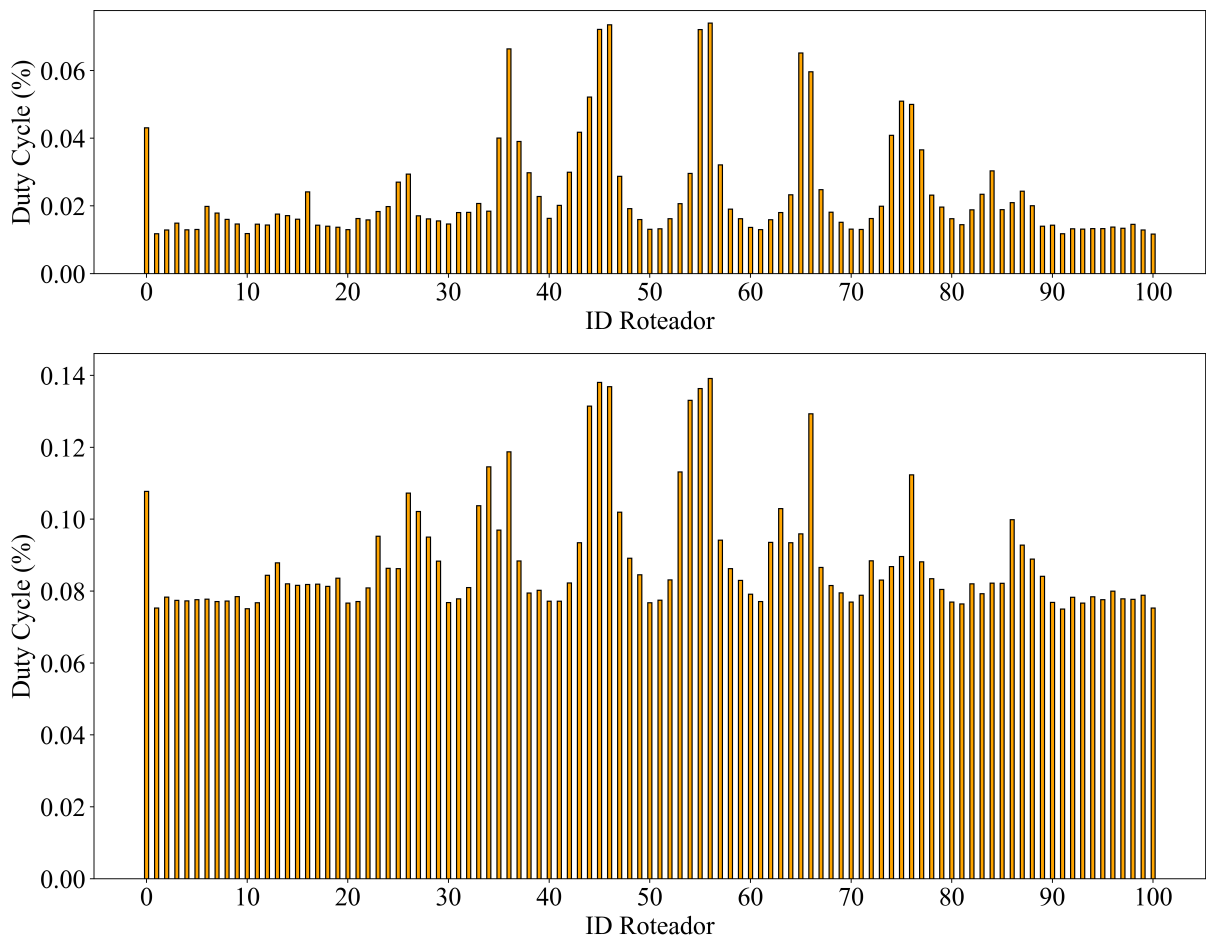


Figura 4.4: Duty cycle para  $DIO\_Imin$  13 (topo) e 10 (embaixo). Cenário com RA de 110 m.  $DIO\_Imax=2$  e  $DIO\_k=0$ .

Conforme ilustrado na Figura 4.5, a redução no tempo final de convergência para os valores de  $DIO\_Imin$  iguais a 9 e 10 é perceptível somente no cenário de raio 110 metros, gráfico do topo. Nos demais gráficos, os resultados do tempo de convergência para os  $DIO\_Imin$  iguais a 9 e 10 são semelhantes aos dos valores 11 ou mesmo 12. Portanto, o ganho de tempo para valores menores do que 11 no parâmetro  $DIO\_Imin$  é pequeno. Ainda, estes valores pequenos de  $DIO\_Imin$  provocam o aumento na taxa de ocupação, devido ao envio frequente de mensagens de controle. A Figura 4.5 permite ainda outras duas observações. A primeira é que os valores de  $DIO\_Imin$  maiores do que 12 provocam um maior atraso na conexão dos dispositivos. O atraso é identificado pelos patamares horizontais que ocorrem nos gráficos, como pode ser observado nas curvas de  $DIO\_Imin$  de 14 a 16 e cenários com maiores raios de alcance. A segunda observação é que o tempo final de convergência do protocolo RPL é diretamente proporcional ao número de saltos necessários para a formação da rede. Os cenários com maior número de saltos, raio de alcance menor, resultaram nos maiores tempos de convergência.

Devido à sobreposição das linhas de resultados das Figuras 4.5, 4.6 e 4.8, não foram mostrados os intervalos de confiança, o que permite uma melhor visualização dos resultados.

#### 4.1.2 Parâmetro $DIO\_Imax$

O parâmetro  $DIO\_Imax$  determina o tempo máximo do envio de mensagens DIO, como descrito na Subseção 2.4.2.2. Na avaliação do parâmetro  $DIO\_Imax$  foram utilizados os valores

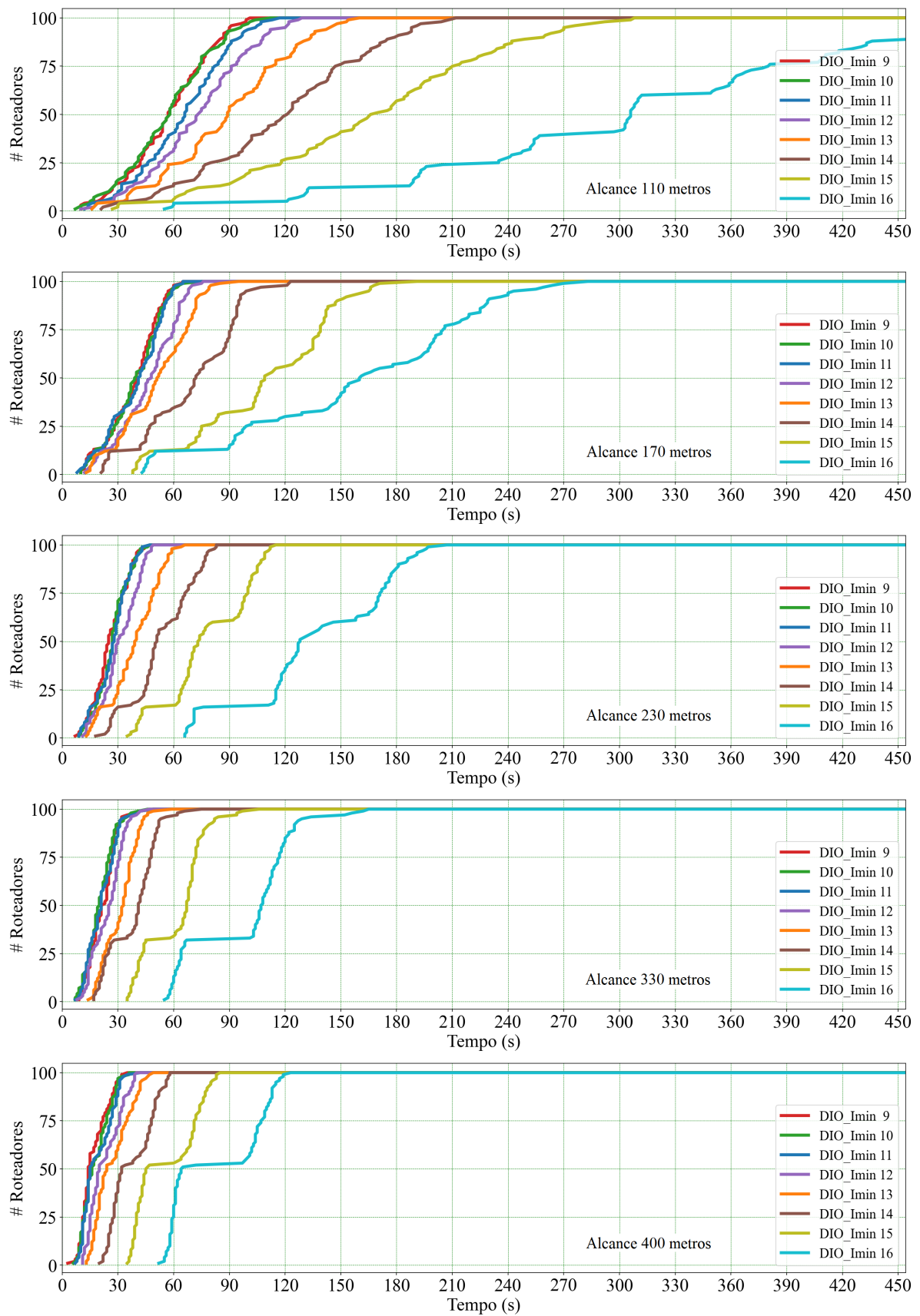


Figura 4.5: Todos os cenários, alcance de 110 m (topo) e 400 m (embaixo),  $DIO\_Imin$  de 9 a 16,  $DIO\_Imax=2$  e  $DIO\_k=0$ .



de 1 à 8, mantendo-se o valor do  $DIO\_Imin$  igual a 10, pois é o valor que apresenta melhor resultado, e o  $DIO\_k$  igual a 0. A constante de redundância foi desabilitada para que ela não interferisse na avaliação do parâmetro  $DIO\_Imax$ . A Figura 4.6 ilustra os resultados da variação do parâmetro  $DIO\_Imax$  para os valores de 1 à 4. Os valores de 5 a 8 no  $DIO\_Imax$  foram suprimidos na Figura 4.6 para facilitar a visualização, visto que ocorria a sobreposição de curvas e não resultavam em ganhos efetivos no tempo de convergência do RPL.

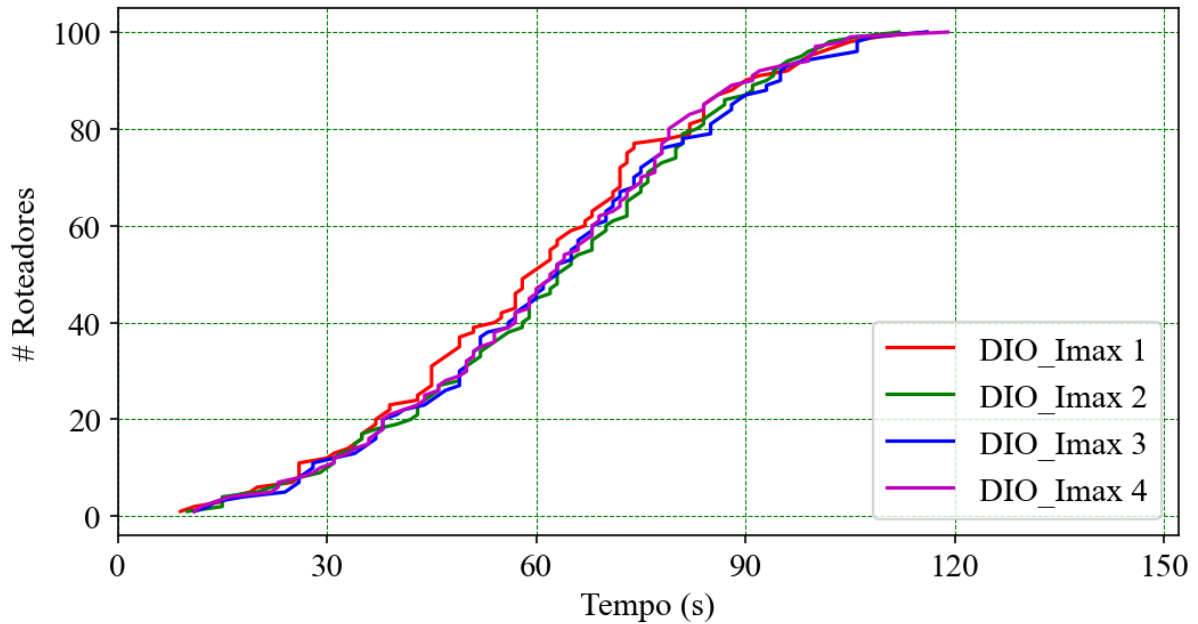


Figura 4.6: Influência do  $DIO\_Imax$  no tempo do RPL. Cenário com RA de 110 m.  $DIO\_Imin=10$  e  $DIO\_k=0$ .

Conforme ilustra a Figura 4.6 a variação no valor deste parâmetro não resulta em alteração significativa no tempo de conexão dos roteadores. O tempo de convergência do RPL é praticamente o mesmo em todas as simulações dentro de um mesmo cenário, para todos os cenários investigados.

Contudo, o aumento no valor do parâmetro  $DIO\_Imax$  reduz o ciclo de trabalho (*duty cycle*) da rede, pois reduz o envio de mensagens de controle. Os gráficos da Figura 4.7 ilustram o *duty cycle* da rede para as simulações com  $DIO\_Imax$  iguais a 1 (em cima), 4 (meio) e 8 (em baixo), resultados que correspondem aos valores médios de 0,155%, 0,027% e 0,014%, respectivamente. A redução na ocupação da rede ao passar o  $DIO\_Imax$  de 1 para 4 é de 5,7 vezes e chega a um fator de 11 vezes ao passar de 1 para 8.

#### 4.1.3 Parâmetro $DIO\_k$

O parâmetro  $DIO\_k$  determina o valor da constante de redundância do envio de mensagens DIO, conforme descrito na Subseção 2.4.2.3. Os resultados das simulações apresentados a seguir correspondem à avaliação do parâmetro  $DIO\_k$  variando o seu valor de 0 até 3. Para o parâmetro  $DIO\_Imin$  foi selecionado o valor 10, e para o parâmetro  $DIO\_Imax$  foi selecionado o valor 4. Esses valores foram escolhidos com base nos melhores resultados prévios.

A Figura 4.8 ilustra o efeito da variação do parâmetro  $DIO\_k$  no tempo de convergência do RPL para o cenário com RA igual a 110 metros. Neste caso houve uma piora de 15,5% no tempo final de formação da rede para o cenário com  $DIO\_k$  igual a 1. Para os valores de 2 em diante o tempo ficou praticamente idêntico ao de desabilitar a supressão (valor 0).

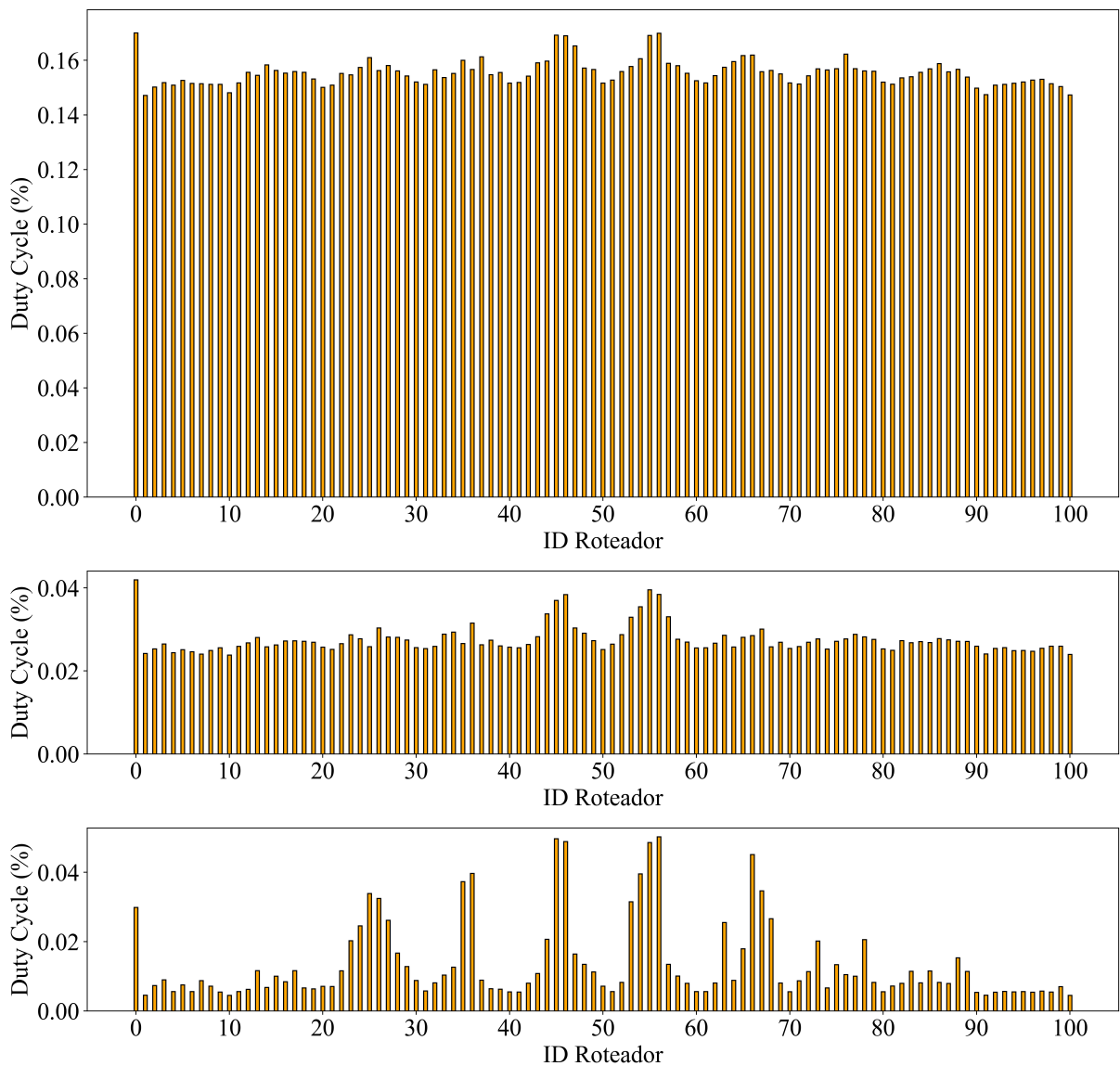


Figura 4.7: Influência do  $DIO\_I_{max}$  no ciclo de trabalho da rede.  $DIO\_I_{max}=1$  (topo),  $DIO\_I_{max}=4$  (meio),  $DIO\_I_{max}=8$  (embaixo). Cenário com RA de 110 m.  $DIO\_I_{min}=10$  e  $DIO\_k=0$ .

Este caso particular de piora no tempo de formação da rede é explicado pelo pequeno raio de alcance utilizado no cenário de 110 metros. No cenário de 110 metros ocorre a supressão do envio de mensagens DIO nos Roteadores vizinhos a um que acabou de enviar uma mensagem DIO. Isto posterga a formação da rede na direção dos nós suprimidos, visto que a rede deste cenário é dependente de praticamente todos os roteadores para estabelecer o roteamento.

Em todos os demais cenários simulados as variações no parâmetro  $DIO\_k$  resultaram em tempos semelhantes de formação de rede em relação ao da supressão desabilitada. No entanto, a habilitação da supressão é efetiva na redução da ocupação do meio no momento da formação da rede, apresentando diminuições médias de 37% a 66% dentre os cenários avaliados ao utilizar o  $DIO\_k$  igual a 1.

A Figura 4.9 ilustra a redução na ocupação do meio de comunicação ao alterar o valor do  $DIO\_k$  de 0 (topo) para 1 (embaixo), valores médios de ocupação de 0.08% e 0.04%, respectivamente. Configurações utilizadas neste resultado, cenário com RA de 110 metros,  $DIO\_I_{min}=10$  e  $DIO\_I_{max}=4$ .

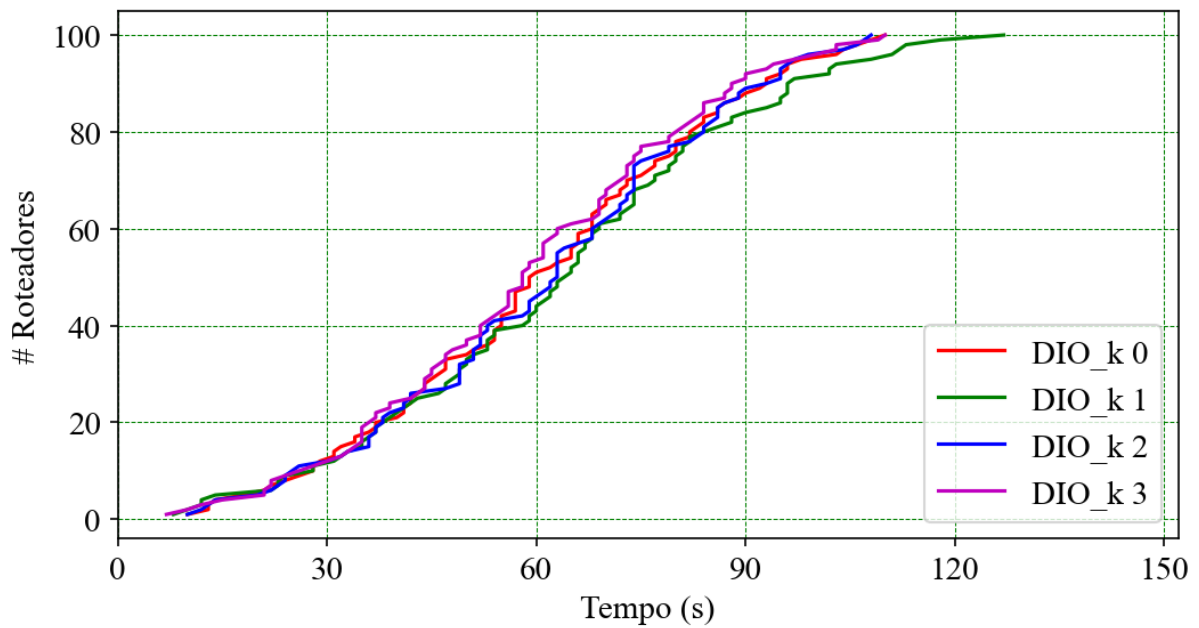


Figura 4.8: Influência do  $DIO\_k$  no tempo de conexão. Cenário com RA de 110 m.  $DIO\_Imin=10$  e  $DIO\_Imax=4$ .

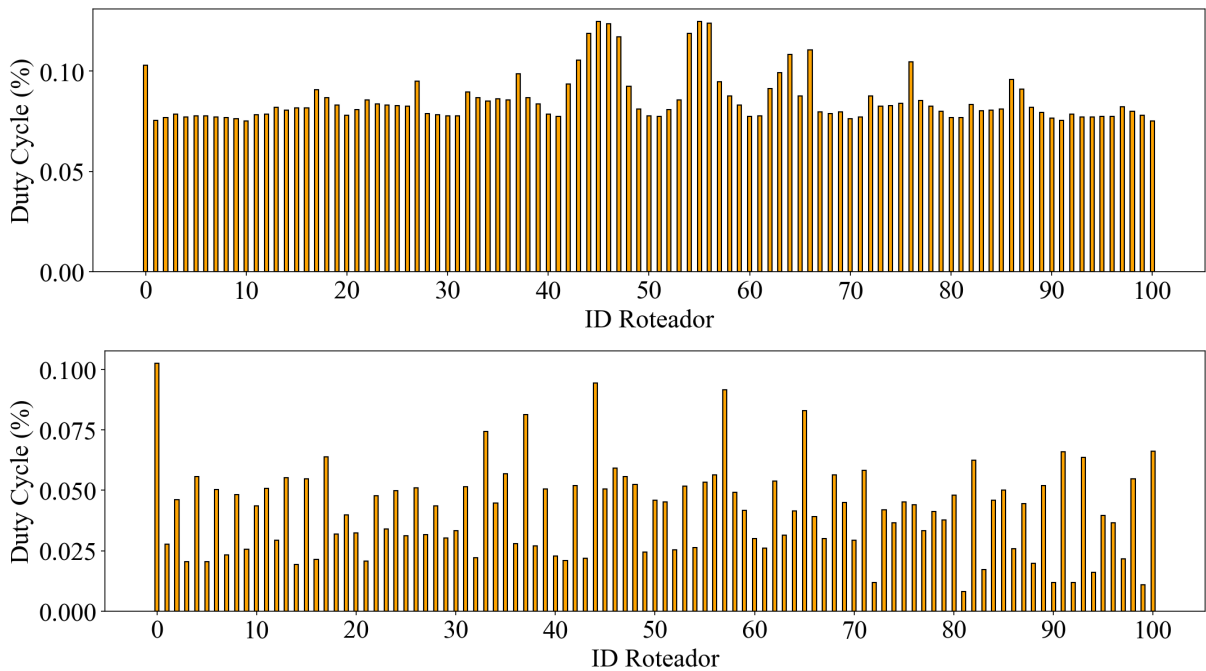


Figura 4.9: Influência do  $DIO\_k$  na ocupação do meio de transmissão.  $DIO\_k=0$  no topo e  $DIO\_k=1$  embaixo. Cenário com RA 110 metros,  $DIO\_Imin=10$  e  $DIO\_Imax=4$ .

#### 4.1.4 Parâmetro DIS\_I

O valor *default* do parâmetro  $DIS\_I$  é de 60 segundos, o qual foi utilizado em todas as simulações anteriores. Testou-se aqui os valores de 2, 10 e 30 segundos para verificar se haveria influência no tempo de formação da rede. Os parâmetros  $DIO\_Imin$  e  $DIO\_Imax$  foram mantidos iguais a 10 e 4, respectivamente, e com o  $DIO\_k$  igual a 1.

Conforme os resultados das simulações, a variação dos valores do parâmetro  $DIS\_I$  não resultou em melhora no tempo de convergência do RPL para os cenários avaliados. Quanto à

taxa de ocupação do meio de transmissão, o teste com o valor de 2 segundos no *DIS\_I* provocou um aumento de 37.4% a 106.7% no *duty cycle* médio, comparando-se ao uso do valor *default*. A ocupação da rede cresce com o número de mensagens DIS transmitidas. Como exemplo, para o cenário com raio de alcance de 110 metros, o número de mensagens DIS transmitidas, durante o período de formação da rede, passou de 54 para 3327 ao alterar-se o valor do parâmetro *DIS\_I* de 60 para 2 segundos.

#### 4.1.5 Resumo da Análise dos Parâmetros

A Tabela 4.2 resume a influência da variação dos parâmetros de configuração no tempo de formação da rede e na taxa de ocupação do meio de transmissão (*Duty Cycle*). Ela mostra que menores valores de *DIO\_Imin* ajudam a reduzir o tempo de convergência do protocolo RPL. No entanto, valores muito pequenos de *DIO\_Imin* aumentam consideravelmente a taxa de ocupação do meio de transmissão. Para os cenários analisados, valores de *DIO\_Imin* entre 10 e 12 resultaram nos melhores desempenhos.

Tabela 4.2: Resumo da influência dos parâmetros do RPL no seu tempo de convergência.

| Parâmetro       | Valor    | Tempo de Convergência | <i>Duty Cycle</i> |
|-----------------|----------|-----------------------|-------------------|
| <i>DIO_Imin</i> | menor    | diminui               | aumenta           |
| <i>DIO_Imax</i> | maior    | mantém                | diminui           |
| <i>DIO_k</i>    | $\geq 1$ | mantém                | diminui           |
| <i>DIS_I</i>    | menor    | diminui               | aumenta           |

Por outro lado, valores maiores de *DIO\_Imax* não interferem no tempo de formação da rede mas contribuem na redução da taxa de ocupação do meio de transmissão. Os melhores resultados nas simulações efetuadas foram obtidos para *DIO\_Imax* iguais ou maiores do que 2.

Quanto ao parâmetro *DIO\_k*, observou-se que o uso de valores maiores ou iguais a 1 ajudam a reduzir a taxa de ocupação da rede. Quanto ao parâmetro *DIS\_I*, este pode ser reduzido em relação ao seu valor padrão que é de 60 segundos, todavia, não se deve utilizar valores menores do que 10 segundos a fim de se evitar um aumento excessivo na taxa de ocupação.

## 4.2 ANÁLISE DO PROCESSO DE SELEÇÃO DE PAI PREFERENCIAL

Durante as análises efetuadas sobre os parâmetros de configuração do protocolo RPL verificou-se que uma parte considerável do tempo de formação da rede é dispendido no processo de avaliação do enlace (*Link Probe* - LP) para seleção do pai preferencial, descrito na Seção 2.4.1.

Esse processo é crítico durante a formação da rede: quando um dispositivo descobre seu primeiro vizinho por meio de uma mensagem DIO, essa mensagem não carrega informações suficientes sobre a qualidade do enlace para que o valor ETX seja definido. Assim, o dispositivo inicia o que é chamado de “sondagem urgente” (*urgent probing*) enviando mensagens DIO (uni-cast a cada poucos segundos), para avaliar a qualidade do enlace e, então, decidir se um determinado vizinho é um pai preferencial adequado. O cálculo da qualidade do enlace é realizado somente após o dispositivo receber pelo menos 4 mensagens e pelo menos 1 minuto ter passado desde o cálculo anterior.

Para avaliar o impacto do LP no tempo de formação da rede, foram efetuadas simulações alterando-se o número de avaliações necessárias para habilitação do cálculo da qualidade do enlace. Foram utilizados os cinco cenários de teste, com os parâmetros *DIO\_Imin*=10, *DIO\_Imax*=4,

$DIO\_k=1$  e  $DIS\_I=60$  s. Variou-se o número de avaliações do LP de 1 até 4 e foram medidos o tempo de conexão dos dispositivos e a taxa de ocupação do meio de transmissão. A Figura 4.10 ilustra os tempos de conexão médios dos dispositivos, com intervalos de confiança, para o cenário com raio de alcance de 110 metros. A Tabela 4.3 apresenta os resultados do tempo de conexão dos dispositivos e o percentual de redução do tempo, quando comparado ao resultado de 4 testes, para todos os cenários de teste.

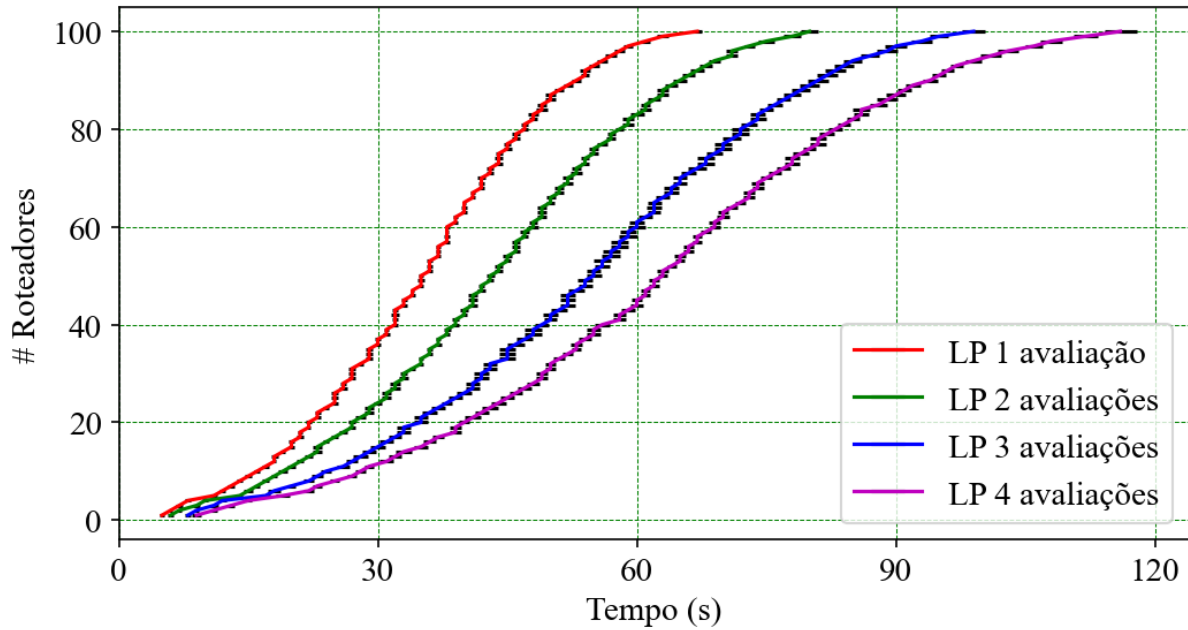


Figura 4.10: Avaliação do número de testes de LP (*Link Probe*). Cenário com RA de 110 metros.  $DIO\_Imin=10$ ,  $DIO\_Imax=4$  e  $DIO\_k=1$ .

Tabela 4.3: Resultados da variação do número de avaliações do enlace

|         |          | Número de avaliações |           |       |           |       |           |       |  |
|---------|----------|----------------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|--|
| Alcance | # saltos | 4                    | 3         |       | 2         |       | 1         |       |  |
|         |          | tempo (s)            | tempo (s) | ganho | tempo (s) | ganho | tempo (s) | ganho |  |
| 110     | 9        | 107                  | 97        | -9 %  | 78        | -27 % | 60        | -44 % |  |
| 170     | 5        | 67                   | 58        | -13 % | 43        | -36 % | 34        | -49 % |  |
| 230     | 4        | 46                   | 45        | -2 %  | 32        | -30 % | 23        | -50 % |  |
| 330     | 3        | 43                   | 32        | -25 % | 27        | -37 % | 20        | -53 % |  |
| 400     | 2        | 35                   | 28        | -20 % | 25        | -28 % | 18        | -48 % |  |

Como pode ser observado na Figura 4.10 e na Tabela 4.3, ao se reduzir o número de avaliações do enlace de 4 para 1, obtêm-se uma redução média de 49% no tempo de conexão dos dispositivos para os cenários avaliados. Estes resultados motivaram à criação do mecanismo de recuperação rápida do roteamento RPL, descrito em detalhes no Capítulo 5.

### 4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo foi apresentado um estudo com o objetivo de ampliar o entendimento sobre o tempo de convergência do protocolo de roteamento RPL. Por meio de simulações, o

estudo permite avaliar a influência dos principais parâmetros de configuração do protocolo RPL no seu tempo de convergência e no ciclo de trabalho da rede. Exibe também uma análise do processo de avaliação dos enlaces para seleção do pai preferencial dos nós da rede.

Uma parte do conteúdo apresentado neste Capítulo foi publicado no artigo "*FRR: a Fast Routing Recovery Mechanism Minimizing Network Formation Time in Smart Grids*", referência número 5, indicada nas contribuições deste trabalho na Seção 1.3.

O próximo Capítulo apresenta o mecanismo de recuperação rápida do roteamento RPL, batizado de *Fast Routing Recovery* (FRR), e sua avaliação de desempenho.

## 5 FAST ROUTING RECOVERY (FRR)

Quando se considera uma rede AMI típica e a maioria das redes IoT, a disposição física dos dispositivos é bastante perene, com apenas algumas mudanças a cada semana ou mês. Em instalações marginais, a interferência eletromagnética pode fazer com que o posicionamento lógico/de rede dos dispositivos mude com relação ao roteamento. O protocolo RPL foi projetado para acomodar estas mudanças. No entanto, como reduzir o tempo de recomposição de tais redes após as extensas “mudanças” causadas por uma queda de energia elétrica ou a ocorrência periódica de reparos globais no protocolo RPL, continua sendo um desafio. O mecanismo aqui proposto é uma alternativa para minimizar este problema.

Neste trabalho, efetuei a concepção e a implementação do mecanismo FRR sobre o protocolo RPL disponibilizado no sistema operacional Contiki-NG. Planejei, executei e avaliei os resultados das simulações sobre os cenários de rede com 100 e com 771 roteadores, os quais correspondem respectivamente aos cenários uniformes e de Ipiranga. Devido a questões de tempo, obtive apoio técnico do pesquisador Patryk Henrique da Fonseca para embarcar o código do sistema operacional Contiki-NG, contendo a implementação do FRR, no módulo de hardware CC1352P utilizado nas experimentações. Efetuei o tratamento e a análise dos dados dos experimentos, os quais comparei com uma rede simulada de mesmas características de topologia e parametrizações.

### 5.1 O MECANISMO FRR

O mecanismo *Fast Routing Recovery* (FRR) foi criado para melhorar o tempo de convergência do protocolo RPL e consequentemente reduzir o tempo de formação das redes que utilizam o RPL como algoritmo de roteamento. O FRR atua no processo de seleção de pai preferencial reduzindo eficientemente o número de sondagens dos enlaces, sem sacrificar indevidamente a qualidade verificada nas sondagens. O processo de seleção de pai preferencial do protocolo RPL é fundamental para a inicialização e a manutenção do roteamento de mensagens das redes. A idealização do FRR surgiu a partir da observação dos resultados da análise efetuada na Seção 4.2, a qual evidencia o impacto do número de sondagens dos enlaces no tempo de convergência do protocolo RPL.

A sondagem dos enlaces (*LP - Link Probe*) no protocolo RPL é um instrumento usado para avaliar a qualidade dos enlaces na topologia de rede. O LP permite que os nós da rede detectem enlaces ruins ou mesmo falhas na comunicação, melhorando a resiliência da rede. As descrições do processo de seleção do pai preferencial e das métricas e cálculos utilizadas no protocolo RPL são apresentadas na Seção 2.4.1.

A execução do LP pelos nós da rede, para com os seus vizinhos, é auxiliada pela criação e manutenção de uma “tabela de vizinhos”, a qual armazena as informações obtidas, contabilizadas e calculadas sobre os mesmos. Na tabela de vizinhos são registrados dados como o endereço do vizinho, o número de mensagens transmitidas e confirmadas, a qualidade do sinal recebido, a data da última transmissão, se o vizinho é o atual pai preferencial, o valor do ETX e do *rank*. Contudo, os dados desta tabela são mantidos somente durante o tempo de execução do algoritmo, sendo totalmente apagados em caso de reinicialização do dispositivo ou mesmo no caso do reparo global do DODAG, evento que ocorre periodicamente, por exemplo a cada 8 horas de execução do protocolo RPL.

O primeiro passo para a implementação do mecanismo FRR consiste em adicionar um novo campo na tabela de vizinhos do protocolo RPL. O novo campo, chamado de FRR, possui a função de marcar os registros dos vizinhos que em algum momento foram selecionados como pais preferenciais do nó. Uma representação da tabela de vizinhos é ilustrada na Figura 5.1.

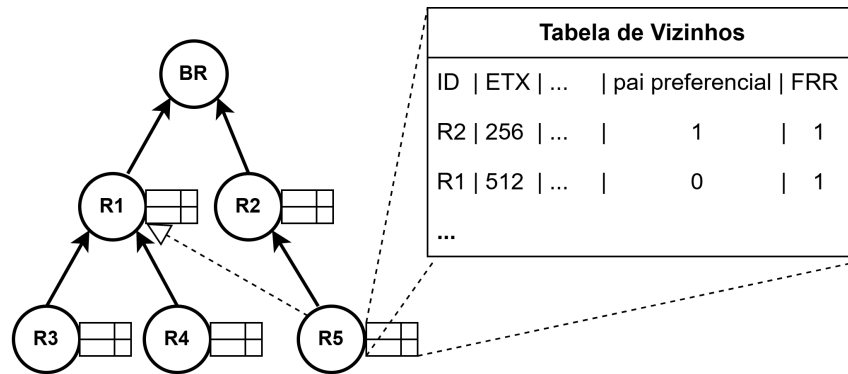


Figura 5.1: Representação da tabela de vizinhos com o campo indicador FRR.

O campo FRR do registro do vizinho de um nó é inicializado com o valor 0 quando o vizinho é inserido pela primeira vez na tabela do nó. Quando um vizinho é selecionado como pai preferencial do nó, o campo FRR deste vizinho é marcado e mantido permanentemente com o valor 1. Como pode ser observado na Figura 5.1, são exibidos dois registros da tabela de vizinhos do nó R5. Os dados informam que o pai preferencial (atual) do nó R5 é o nó R2, pois o campo “pai preferencial” deste vizinho está com o valor 1. Mas como o valor do campo FRR nos dois registros está igual a 1, isto indica que em algum momento o nó R1 foi o pai preferencial do nó R5. Esta situação está indicada na Figura 5.1 por um vetor com linha tracejada entre os nós R5 e R1.

O segundo passo da implementação do mecanismo FRR consiste na adição de uma cache de dados para memorização dos identificadores (IDs) dos registros da tabela de vizinhos que estão marcados com o valor 1 no campo FRR. Uma cache de dados (Patterson e Hennessy, 2014) é um mecanismo de armazenamento temporário que visa otimizar o desempenho de sistemas computacionais ao reduzir o tempo necessário para acessar informações frequentemente utilizadas. Ela atua como uma camada intermediária entre uma fonte de dados mais lenta, como um banco de dados ou memória principal, e um consumidor de dados mais rápido, como um processador ou aplicativo. A cache pode ser implementada em diferentes níveis e contextos, como em memórias de hardware (cache de RAM ou disco) ou em sistemas de software (cache de CPU ou aplicativo). Seu funcionamento baseia-se em algoritmos de gerenciamento, como menos recentemente utilizada (LRU - *Least Recently Used*) e menos frequentemente utilizada (LFU - *Least Frequently Used*), que determinam quais dados devem ser armazenados ou descartados para maximizar a eficiência. Dessa forma, a cache reduz a latência, minimiza a sobrecarga de processamento e melhora a experiência do usuário em diversos ambientes computacionais.

A cache do mecanismo FRR é responsável por persistir os registros parciais dos últimos  $N$  vizinhos que foram selecionados como pais preferenciais. Para manter permanentemente os registros, mesmo no caso de desligamento e reinicialização dos dispositivos, toda vez que um novo registro é marcado como pai preferencial, a cache salva o seu conteúdo em memória não volátil do tipo FLASH (IBM, 2025) ou FRAM (FUJITSU, 2025). Desta forma, quando um dispositivo é reinicializado ou quando ocorre um reparo global do DODAG, os registros são restaurados da memória não volátil para a cache e a tabela de vizinhos do RPL (a qual é mantida somente em memória RAM (*Random Access Memory*)).



Embora a tabela de vizinhos do protocolo RPL possua muitos campos, a cache do FRR só precisa salvar a informação de identificação dos nós vizinhos (IDs), pois o processo de restauração dos dados é programado para remarcar o campo FRR com valor 1 na tabela. Os demais campos da tabela de vizinhos são novamente preenchidos pelas funções originais do protocolo RPL no decorrer da sua execução.

O último passo da implementação do mecanismo FRR consiste em uma pequena modificação na lógica de sondagem dos enlaces ou LP. A alteração produz o seguinte comportamento. Quando um nó descobre um vizinho, normalmente pelo recebimento de uma mensagem DIO (*DODAG Information Object*), ele verifica o valor do campo FRR deste vizinho na sua tabela de vizinhos. Se o campo FRR estiver com valor 1, o nó efetua apenas uma avaliação do enlace e prossegue para a seleção do pai preferencial. Se o campo FRR estiver com valor 0 (zero), o nó efetua o procedimento padrão de LP, o qual corresponde a pelo menos quatro avaliações do enlace, antes de seguir para a seleção do pai preferencial. Esta redução no número de avaliações dos enlaces, obtida pela inclusão do mecanismo FRR, é que propicia a redução no tempo de convergência do protocolo RPL. A Figura 5.2 ilustra o diagrama da lógica de avaliação dos enlaces com o mecanismo FRR. A descrição do funcionamento do mecanismo FRR no formato de algoritmo é apresentada no Algoritmo 1.

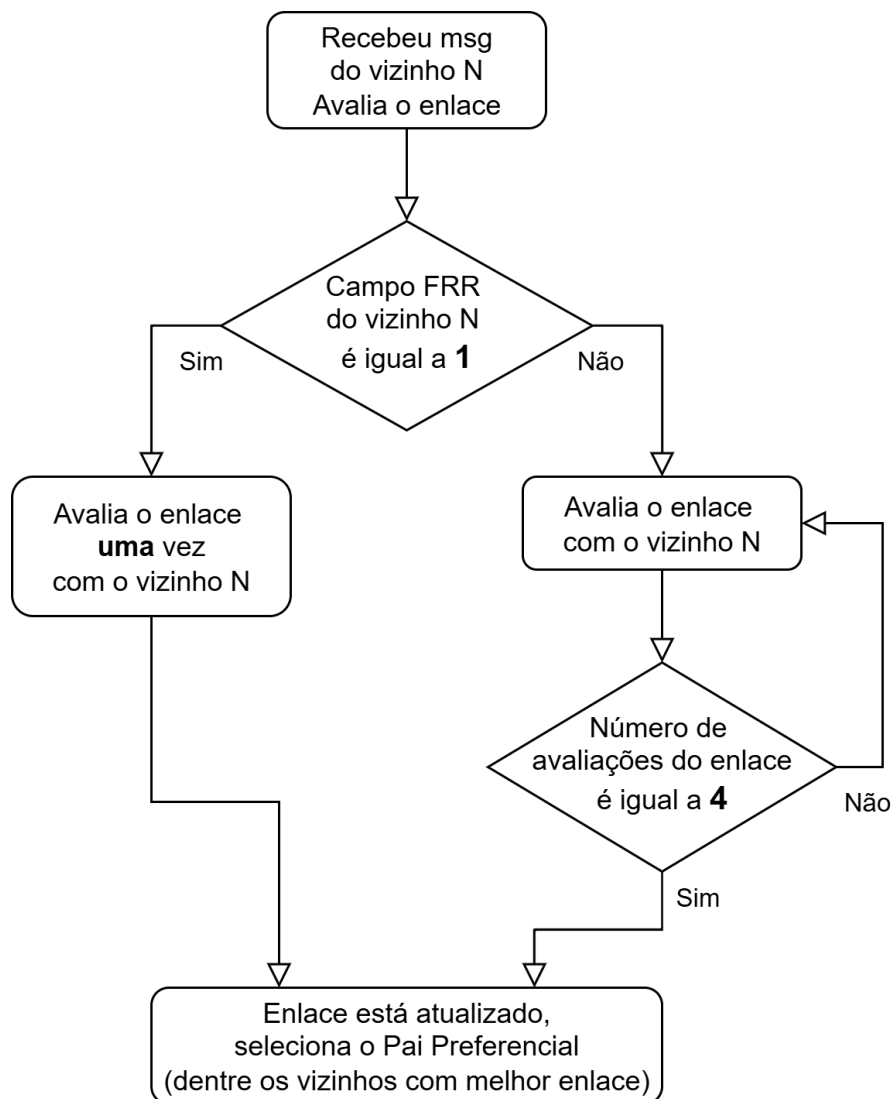


Figura 5.2: Diagrama da lógica de avaliação dos enlaces com o mecanismo FRR.

---

**Algoritmo 1** Comportamento do Mecanismo FRR
 

---

```

1: Input frrMaxSize = N // N indica o tamanho da Cache FRR
2: Input frrCache = [N]
3: Input nodePreferredParent = NULL

4: function NODEINIT // Inicialização
5:   RestoreFrrCacheFromMemory() // Restaura a cache FRR da memória
6:   for frrCache.getIds() do
7:     neighborsTable[idNeighbor].FRR ← 1

8: function EVALUATENEIGHBOR(idNeighbor)
9:   if neighborsTable[idNeighbor].FRR == 1 then
10:    SingleProbe(idNeighbor) // Efetua uma avaliação do enlace
11:   else
12:    DefaultProbe(idNeighbor) // Efetua quatro avaliações do enlace
13:   if BestParent(idNeighbor) then // Se é o melhor vizinho
14:     PreferredParentSelected(idNeighbor) // Marca como pai preferencial

15: function PREFERREDPARENTSELECTED(idNeighbor)
16:   nodePreferredParent ← idNeighbor
17:   neighborsTable[idNeighbor].PreferredParent ← yes
18:   neighborsTable[idNeighbor].FRR ← 1
19:   FrrSaveParent(idNeighbor)

20: function FRRSAVEPARENT(idNeighbor)
21:   if frrCacheSize ≤ frrMaxSize then
22:     frrCache ← idNeighbor
23:     frrCacheSize ++
24:   else
25:     frrCache.eraseLRUNeighbor() // Utiliza LRU para a escolha
26:     frrCache ← idNeighbor
27:   SaveFrrCacheInMemory() // Salva a cache FRR em memória

```

---

O mecanismo FRR é indicado para redes fixas, como por exemplo as redes AMI das Smart Grids. Considerando-se este exemplo, no caso de uma reinicialização da rede, os dispositivos reinicializarão suas tabelas de vizinhos com nós próximos do passado recente, pois é improvável que a instalação física tenha mudado. Assim, o “último” pai preferencial é provavelmente o pai preferencial atual, e o enlace para ele deve ser sondado primeiro. Para acomodar mudanças localizadas, físicas ou lógicas, um pequeno conjunto de pais anteriores deve ser mantido, pois eles provavelmente ainda estão na vizinhança física/lógica.

Quanto ao tamanho da cache do mecanismo FRR, este corresponde ao mesmo tamanho definido na tabela de vizinhos do protocolo RPL. O tamanho da tabela de vizinhos do RPL é um dos parâmetros de configuração das redes que utilizam o RPL. Este tamanho deve ser ajustado de acordo com o grau médio da rede implantada. O grau em uma rede sem fio refere-se ao número de conexões que um nó possui com outros nós vizinhos na rede.

Como o mecanismo FRR utiliza a informação histórica dos pais preferenciais de um nó para acelerar a convergência do protocolo RPL, seus melhores resultados são obtidos quando o tamanho da tabela de vizinhos é igual ou maior do que o grau médio da rede. Nesta condição, permite-se que os registros dos pais preferenciais estejam geralmente presentes na cache FRR e o ganho de desempenho seja maximizado.

Caso o tamanho da tabela de vizinhos seja menor do que o grau médio da rede, as informações de pais preferenciais podem ser perdidas, pois o RPL utiliza a estratégia LFU (*Least Frequently Used*) de substituição dos registros. Esta estratégia funciona baseada no princípio de que os registros menos frequentemente utilizados são os menos prováveis de serem necessários em um futuro próximo. No RPL, o controle de utilização dos registros da tabela de vizinhos é efetuado por meio de contadores de uso. Cada vez que um enlace com um nó vizinho é utilizado para transmissão ou recepção de uma mensagem o contador de uso é incrementado<sup>1</sup>. Portanto, o uso de uma tabela de vizinhos menor do que o número de possíveis caminhos para pais preferenciais provoca a substituição de registros na tabela e, conseqüentemente, uma redução no ganho de desempenho do mecanismo FRR. Este comportamento é evidenciado na próxima Seção, onde são exibidos os resultados da avaliação de desempenho do mecanismo FRR.

## 5.2 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Nesta Seção é apresentada a avaliação de desempenho do mecanismo proposto. Para avaliar o desempenho do FRR, o mesmo foi implementado no sistema operacional Contiki-NG (Oikonomou et al., 2022), o que permitiu a execução de simulações e posteriormente a sua avaliação experimental. Em todos os casos o desempenho do FRR foi comparado com o protocolo RPL padrão.

Para a execução das simulações, foi utilizado o simulador de rede de sensores Cooja (Osterlind et al., 2006). Quanto aos cenários de simulação, foram utilizados os cinco cenários com 1 BR e 100 Roteadores, com diferentes raios de alcance, conforme apresentado na Seção 4.1. Também foi criado um cenário de simulação com as localizações de 771 medidores de energia da área urbana de Ipiranga, para avaliar o FRR sobre a topologia de uma rede real. Para a avaliação sobre o cenário de Ipiranga foram utilizados raios de alcance de 150 e 300 metros, pois estes raios representam os alcances estimados em campo.

As simulações foram executadas para corresponder a um período de 4 horas de tempo simulado, com redefinições (*resets*) da rede programados para acontecerem em intervalos de 20 minutos. Na execução inicial de um período, as tabelas de roteamento estão vazias e o procedimento RPL padrão para seleção de pais preferenciais é executado. Nas execuções seguintes, ocorridas após cada *reset*, a memória cache do mecanismo FRR é usada para acelerar a formação da rede.

O FRR foi simulado com a utilização de caches com capacidades para 16, 32 e 64 registros. Para as simulações do FRR, são usados os parâmetros do RPL que apresentaram os melhores resultados durante a avaliação dos mesmos (Seção 4.1), e eles são:  $DIO\_Imin=12$ ,  $DIO\_Imax=4$ ,  $DIO\_k=1$  e  $DIS\_I=60$  s. Os parâmetros de configuração das redes simuladas são listados na Tabela 5.1.

As próximas Seções apresentam os resultados das simulações e dos experimentos.

### 5.2.1 Simulações com Cenários Uniformes

A Tabela 5.2 mostra os resultados da simulação para os cenários com distribuições uniformes de dispositivos. A coluna ‘# vizinhos’ mostra o número máximo de vizinhos que um determinado dispositivo pode alcançar devido às suas características de rádio (RA). Com o menor alcance,  $RA=110$  m, um determinado dispositivo alcança apenas 4 dispositivos vizinhos; com  $RA=230$  m, 16 vizinhos podem ser alcançados, conforme ilustrado na Figura 4.1.

<sup>1</sup>Os contadores de uso são variáveis de 32 bits e são reinicializados durante o reparo global da rede, o qual ocorre de 8 em 8 horas. Os contadores não “viram” a contagem.

Tabela 5.1: Parâmetros de configuração utilizados no simulador Cooja para avaliação do FRR.

|                                                                                     |                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Simulador de Rede                                                                   | Cooja, ambiente Contiki-NG                                         |
| Duração da Simulação                                                                | 14400 segundos                                                     |
| Número de Roteadores de Borda                                                       | 1                                                                  |
| Número de Roteadores                                                                | 100 (distribuição uniforme)<br>771 (cenário de Ipiranga)           |
| Área da Simulação                                                                   | 900 x 900 metros<br>2000 x 3000 (cenário de Ipiranga)              |
| Raio de Alcance (RA)                                                                | 110, 170, 230, 330 e 400 metros<br>150 e 300 (cenário de Ipiranga) |
| Bit Rate                                                                            | 250 kbps                                                           |
| Taxa de Sucesso                                                                     | TX=100% e RX=100%                                                  |
| Função Objetivo                                                                     | MRHOF + ETX                                                        |
| Valor da Histerese<br>RPL_MRHOF_CONF_RANK_THRESHOLD                                 | 192 (ETX * 128)                                                    |
| Modelo do Canal de Rádio                                                            | UDGM ( <i>Unit Disk Graph Medium</i> )                             |
| Semente de simulação                                                                | Gerada aleatoriamente                                              |
| Tamanho da tabela de vizinhos e FRR<br>NBR_TABLE_CONF_MAX_NEIGHBORS                 | 16, 32 e 64<br>16, 32, 64 e 128 (cenário de Ipiranga)              |
| <i>DIO<sub>Imin</sub></i><br>RPL_CONF_DIO_INTERVAL_MIN                              | 12 (4,096 seg.)                                                    |
| <i>DIO<sub>Imax</sub></i><br>RPL_CONF_DIO_INTERVAL_DOUBLINGS                        | 4 (65,536 seg.)                                                    |
| <i>DIO<sub>k</sub></i><br>RPL_CONF_DIO_REDUNDANCY                                   | 1                                                                  |
| <i>DIS<sub>I</sub></i><br>RPL_CONF_DIS_INTERVAL                                     | 60 seg.                                                            |
| Habilita a avaliação dos enlaces<br>RPL_CONF_WITH_PROBING                           | 1                                                                  |
| Intervalo para envio da msg DAO<br>RPL_CONF_DAO_DELAY                               | 4 seg.                                                             |
| Número de retransmissões do DAO<br>RPL_CONF_DAO_MAX_RETRANSMISSIONS                 | 5                                                                  |
| Tempo esperado antes da retransmissão do DAO<br>RPL_CONF_DAO_RETRANSMISSION_TIMEOUT | 15 seg.                                                            |

Tabela 5.2: Tempo de formação *versus* tamanho da cache do FRR.

| RA  | # vizinhos | Inicialização | FRR 16    |       | FRR 32    |       | FRR 64    |       |
|-----|------------|---------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|     |            | tempo (s)     | tempo (s) | ganho | tempo (s) | ganho | tempo (s) | ganho |
| 110 | 4          | 116           | 49        | -58 % | 49        | -58 % | 48        | -59 % |
| 170 | 12         | 72            | 28        | -61 % | 27        | -63 % | 29        | -60 % |
| 230 | 16         | 53            | 37        | -30 % | 22        | -58 % | 22        | -58 % |
| 330 | 32         | 43            | 34        | -21 % | 26        | -40 % | 19        | -56 % |
| 400 | 52         | 35            | 35        | 0 %   | 23        | -34 % | 18        | -49 % |

A coluna Inicialização mostra o tempo médio de formação para a execução inicial, quando não há informações de roteamento anteriores, e portanto, quatro sondagens de enlace são realizadas, conforme o algoritmo RPL padrão. As colunas FRR N mostram o tempo médio de formação para as reinicializações da rede, para os tamanhos de cache FRR avaliados. Nestas repetições, quando um dispositivo candidato a pai é localizado na cache FRR, uma única sondagem do enlace é realizada para que seja aceito como pai preferencial. A redução percentual do tempo de formação da rede, quando comparada à execução inicial, também é exibida na tabela.

A Figura 5.3 mostra os tempos médios de formação da rede com intervalos de confiança (traços horizontais na cor preta) para o cenário de rede com raio de alcance de 110 m. O ganho de desempenho é de cerca de 58%, independentemente do tamanho da cache FRR utilizada. Neste cenário, o número de vizinhos alcançáveis com este RA é 4, portanto menor do que os tamanhos de cache simulados.

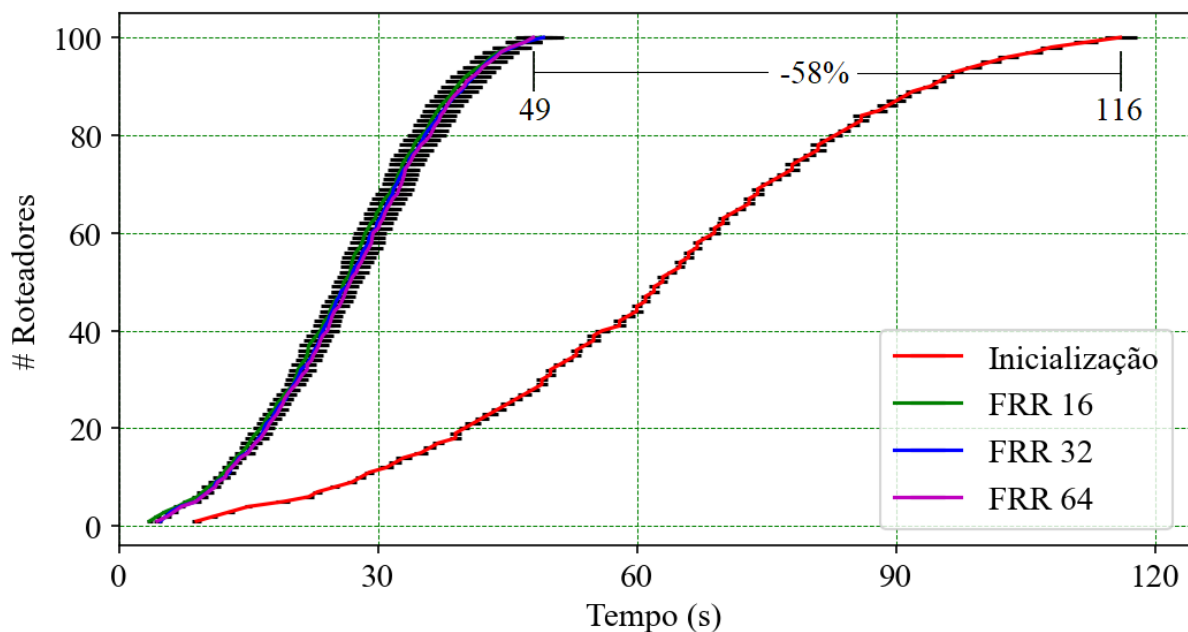


Figura 5.3: Tempo de formação do FRR. Cenário com RA de 110 m.

Nestas simulações, a cache parece ser infinita – uma vez preenchida, o conteúdo permanece o mesmo para toda a simulação. Nessas condições, os ganhos estão próximos do máximo teórico, e isso se reflete nos gráficos muito semelhantes para diferentes tamanhos de cache. Resultados análogos foram encontrados para o cenário com raio de alcance de 170 metros, que obteve uma redução no tempo de formação de até 63%.

A Figura 5.4 mostra os tempos médios de formação com intervalos de confiança (traços horizontais na cor preta) para os cenários com raios de alcance de 230 e 400 metros. Como esperado, os melhores resultados – redução de mais da metade do tempo de formação – são obtidos com as caches com 64 registros, pois estas são maiores do que o número máximo de vizinhos alcançáveis. As caches menores não têm um desempenho tão bom porque os “bons vizinhos” reais são substituídos por vizinhos “não tão bons” em reinicializações de rede subsequentes, e os enlaces para esses “maus vizinhos” são então sondados quatro vezes.

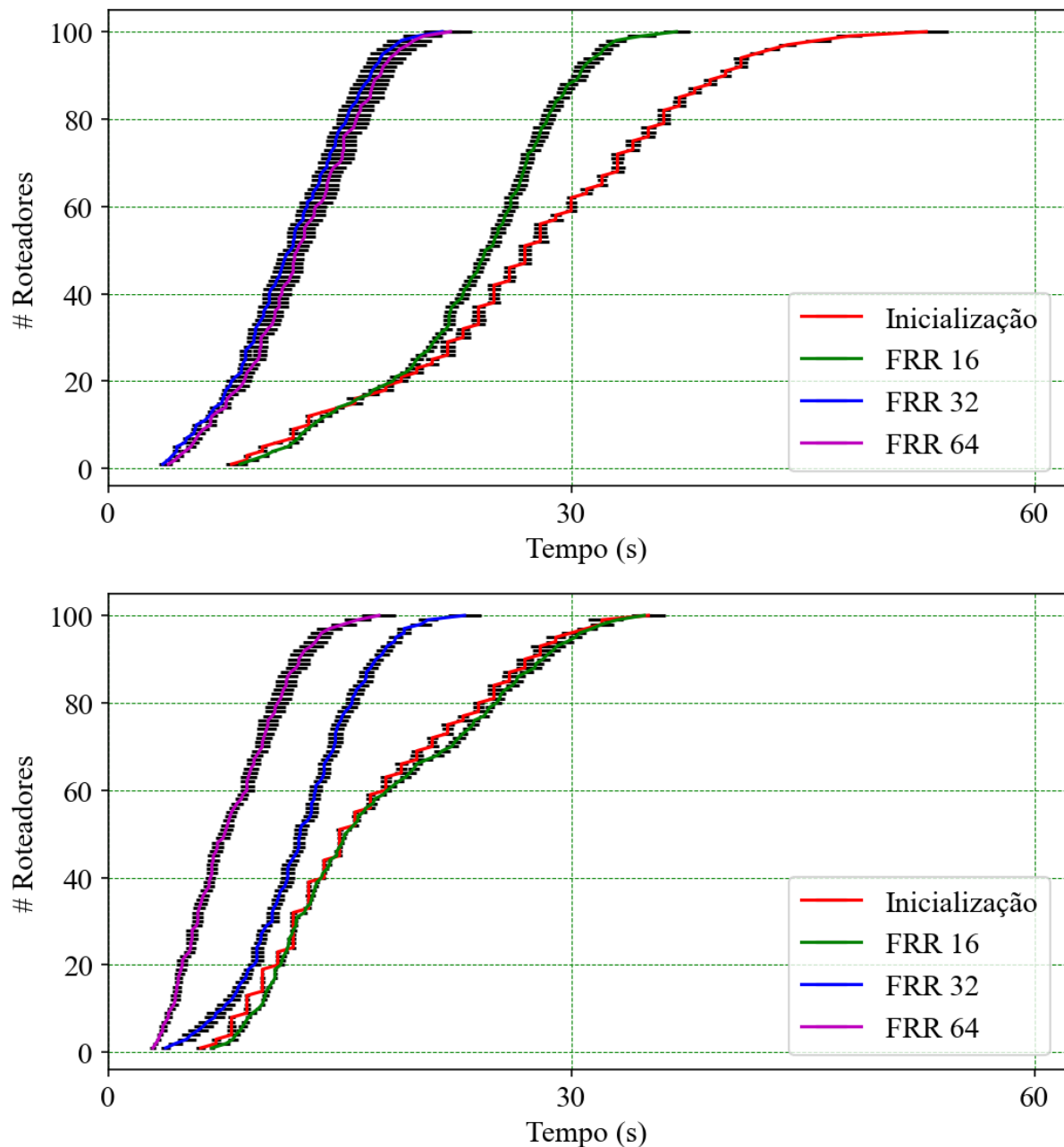


Figura 5.4: Tempo de formação do FRR. Cenários com RA de 230 m (topo) e 400 m (embaixo).

Avalia-se que o desempenho das caches menores pode ser melhorado por uma mudança no algoritmo de substituição dos seus registros. Como foi simulado, principalmente em redes densas (com muitos dispositivos no raio de alcance), frequentemente acontece que o registro para um pai anterior “bom” é substituído, na cache, por um registro de um novo vizinho, candidato



a pai preferencial. Estima-se que isso pode ser melhorado implementando associatividade na cache, com uma aproximação para a substituição do usado menos recentemente (LRU - *Least Recently Used*) ou por alguma métrica de qualidade do enlace. Essa melhoria e seu desempenho serão explorados em trabalhos futuros.

### 5.2.2 Simulações com Cenário de Ipiranga

Nesta Seção é apresentado o desempenho do mecanismo FRR por meio de simulações sobre um cenário baseado nas localizações de 771 medidores inteligentes (Roteadores) e um roteador de borda na área urbana de Ipiranga (Google, 2024). O cenário é retratado na Figura 5.5. O círculo verde ilustra o raio de alcance (RA) de 300 metros, o balão amarelo indica a posição do roteador de borda e os balões brancos sinalizam a posição dos roteadores.

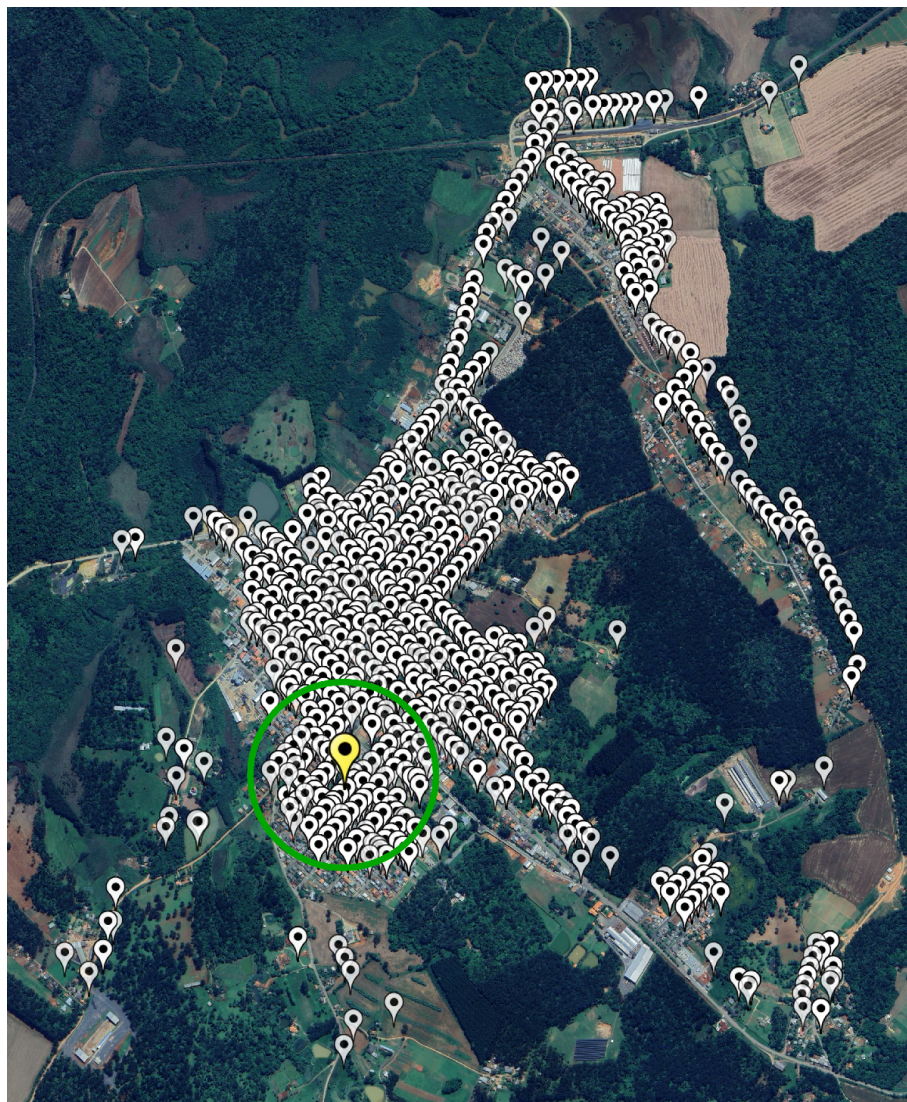


Figura 5.5: Cenário da área urbana da cidade de Ipiranga.

A cidade de Ipiranga foi usada neste estudo porque a Copel (Companhia Paranaense de Energia) gentilmente nos forneceu a localização dos medidores inteligentes e coletores de dados da rede AMI implantada. Esta cidade foi a primeira cidade no Brasil a ser totalmente atendida por uma rede AMI.

Os parâmetros de configuração para as simulações são:  $DIO\_Imin=12$ ,  $DIO\_Imax=4$ ,  $DIO\_k=1$ ,  $DIS\_I=60s$  e raios de alcance (RA) e interferência de 150 e 300 metros. A capacidade do FRR foi variada para tamanhos de 16, 32, 64 e 128 registros. A Figura 5.6 mostra os resultados médios do tempo de conexão com intervalos de confiança (traços horizontais na cor preta) dos 771 roteadores para o FRR com capacidade de 128 registros e RA de 300 metros, comparado ao tempo de inicialização, o qual corresponde ao tempo do algoritmo RPL padrão. Observe que, nesta simulação, uma cache com 128 registros é virtualmente uma "cache infinita" e produz um desempenho (muito) próximo do ótimo.

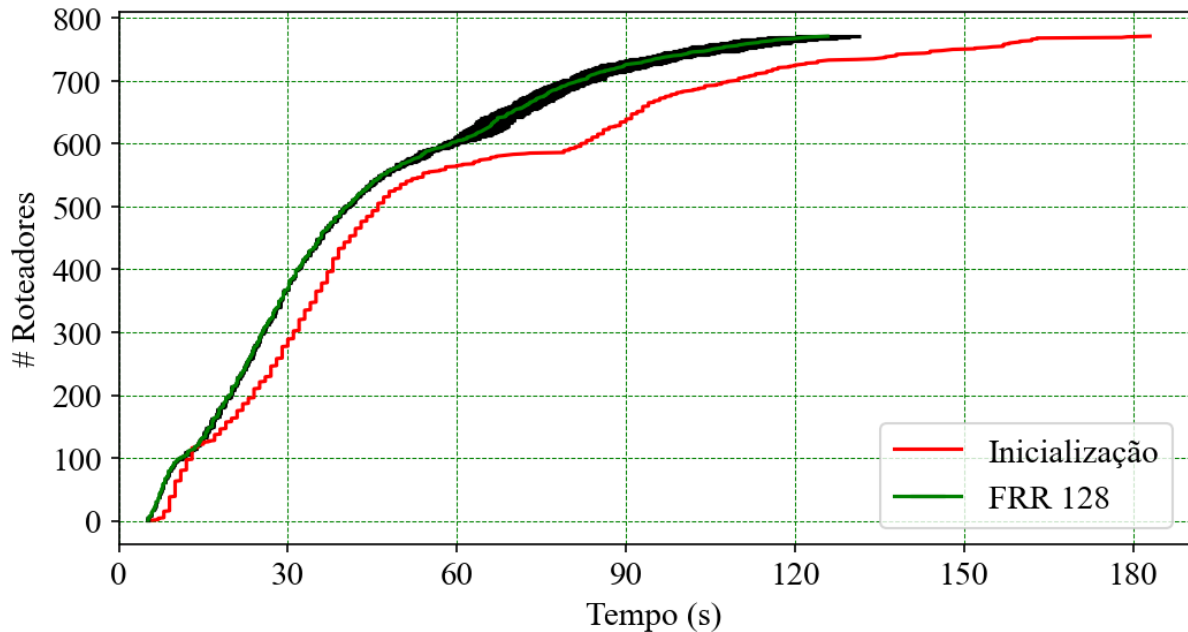


Figura 5.6: Resultado da simulação do cenário de Ipiranga, FRR 128 *versus* o tempo de inicialização (RPL padrão).

Os resultados da simulação do mecanismo FRR com capacidades de 16, 32, 64 e 128 registros mostraram reduções de 21%, 26%, 24% e 32%, respectivamente, uma média de 25% redução no tempo de convergência quando comparado ao protocolo RPL padrão.

Analisando as curvas de tempo de conexão na Figura 5.6, percebe-se que para a conexão dos primeiros 500 roteadores o ganho de tempo é pequeno, sendo mais evidente a partir deste ponto. Isto é explicado pela alta concentração de roteadores próximos ao roteador de borda, que chega a 170 roteadores para o RA de 300 metros. Assim, há um número muito grande de opções de pais preferenciais a serem selecionadas durante o estabelecimento das rotas da rede, daí o ganho com o uso do mecanismo FRR ser relativamente pequeno nesta parte da rede, uma média de 15%. No entanto, o desempenho do mecanismo FRR melhora nas áreas esparsas da rede.

Simulações com RA de 150 metros mostram reduções no tempo de formação da rede em torno de 28%. Neste cenário, 94 roteadores não se conectam à rede porque não são alcançados por nenhum outro roteador. Em relação ao ciclo de trabalho da rede, ele permanece abaixo de 0,3% em todas as simulações.

### 5.2.3 Resultados dos Experimentos

Nesta Seção é apresentado o desempenho do mecanismo FRR sobre um cenário experimental usando nove módulos de desenvolvimento CC1352P, um configurado como Roteador de Borda e oito como Roteadores. Os módulos CC1352P consistem em um processador



Arm Cortex M4F (CPU do sistema) operando a 48 MHz, 352 KB de memória não volátil (Flash) para armazenar programas e dados, 80 KB de RAM estática (SRAM) para executar programas e armazenar dados, hardware acelerador criptográfico e uma variedade de periféricos e interfaces. O módulo de rádio opera nas bandas de frequência sub-1 GHz e 2,4 GHz. A Figura 5.7 ilustra a conexão dos módulos por meio de dois *hubs* USB para executar os experimentos.



Figura 5.7: Montagem do *testbed* para os experimentos com o FRR.

Para os experimentos, foram utilizados valores de configuração RPL iguais aos utilizados nas simulações:  $DIO\_Imin=12$ ,  $DIO\_Imax=4$ ,  $DIO\_k=1$ ,  $DIS\_I=60s$ . Devido à proximidade entre os módulos, o código foi instrumentado aplicando filtragem nos endereços dos dispositivos para que fosse criada uma rede linear, conforme mostrado na Figura 5.8. Desta forma, avaliou-se o tempo de formação da rede com 8 saltos. A capacidade da cache FRR foi mantida em 16 registros para todas as execuções, pois cada módulo se conecta a no máximo 2 outros. Os módulos foram configurados para utilizar a banda de frequência sub-1 GHz da região Brasil (BZ), utilizando um único canal para comunicação e uma taxa de transmissão de 50 kbps. A coleta de dados dos registros do experimento foi realizada usando um programa em linguagem Python, o qual também controla o envio de comandos de reinicialização para os módulos, garantindo assim a sincronização entre todos os dispositivos.

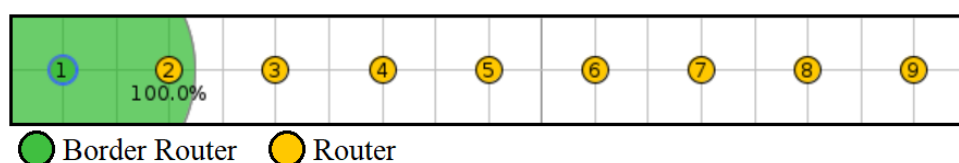


Figura 5.8: Cenário da configuração de rede para simulação e comparação com os experimentos.

Os resultados experimentais foram obtidos a partir da média de 10 rodadas de execução, com duração de uma hora cada. Uma rodada foi subdividida em 12 períodos de 5 minutos. No primeiro período, ocorre a formação inicial da rede, a qual corresponde ao comportamento padrão do algoritmo RPL, e a inicialização do FRR. Nos 11 períodos seguintes, a rede é reiniciada, mantendo a memória do FRR. Um cenário idêntico ao experimento foi simulado no Cooja para fins de comparação, utilizando-se os mesmos parâmetros de configuração. Os resultados experimentais e de simulação são mostrados na Figura 5.9.

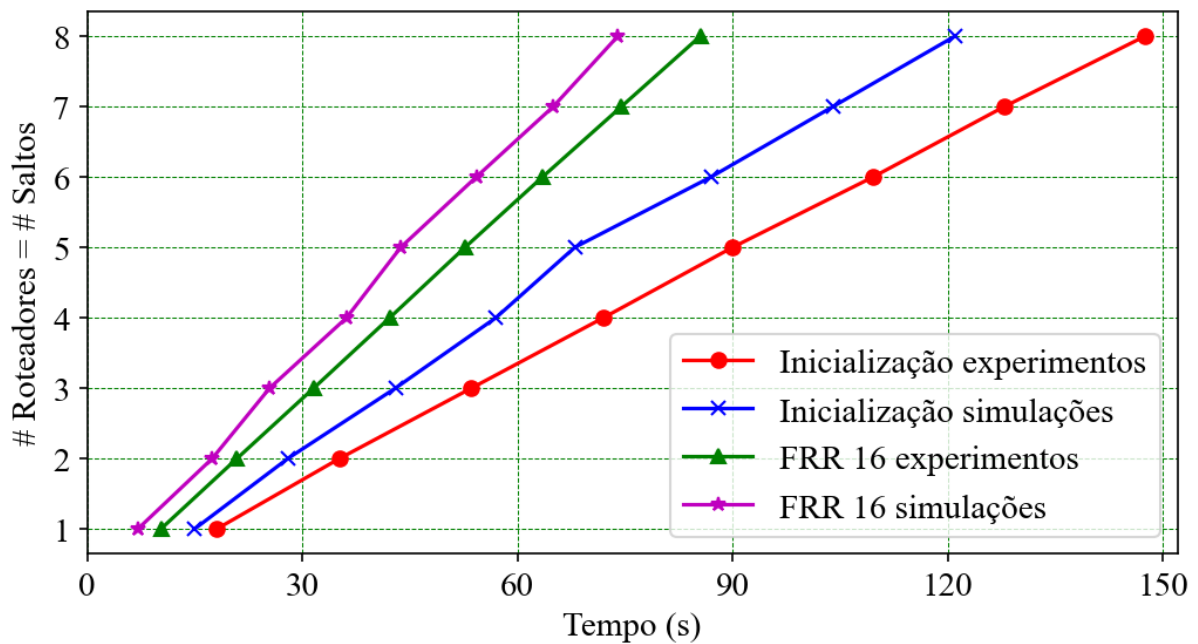


Figura 5.9: Resultados dos experimentos e simulações. FRR 16 *versus* tempo das inicializações (RPL padrão).

Os resultados experimentais obtidos com o mecanismo FRR mostram uma redução de 42% no tempo de formação da rede quando comparado ao RPL padrão, reduzindo o tempo total de formação da rede de 147 para 85 segundos, dados das curvas *Inicialização experimentos* e *FRR 16 experimentos* respectivamente. Na simulação o mecanismo FRR mostra uma redução de 40% no tempo de formação da rede em comparação ao RPL padrão, redução de 121 para 74 segundos no tempo, conforme ilustrado nas curvas *Inicialização simulações* e *FRR 16 simulações* respectivamente.

Nota-se que os resultados dos experimentos em comparação aos valores resultantes das simulações, tanto os dados das inicializações quanto aqueles resultantes do mecanismo FRR, produzem valores aproximadamente 20% maiores. Isto pode ser explicado por pelo menos três fatores: os atrasos inerentes aos circuitos eletrônicos de transmissão e recepção das mensagens; a concorrência pelo meio de transmissão, visto que os dispositivos estão próximos uns dos outros e ocorrem colisões de mensagens durante as transmissões; e a diferença de capacidade de processamento dos dispositivos utilizados nos experimentos em comparação ao ambiente de simulação. Contudo, apesar das diferenças de valores obtidos entre os ambientes de execução, os ganhos do uso do mecanismo FRR em comparação aos resultados do protocolo RPL padrão são muito semelhantes. Portanto, os dados obtidos nos experimentos corroboram com os resultados do simulador Cooja e comprovam a eficácia do mecanismo FRR na redução do tempo de formação da rede.

### 5.3 COMPARAÇÃO DO FRR COM OS TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção é efetuada a comparação qualitativa do mecanismo FRR com as principais propostas apresentadas nos trabalhos relacionados. A Tabela 5.3 sumariza a comparação, indicando quais aspectos estão presentes ou não em cada proposta, bem como quais aspectos são parcialmente abordados. O FRR, assim como os outros trabalhos, busca otimizar o desempenho de redes de baixa potência e perda de dados (LLNs), especialmente no contexto de Smart Grids (SGs), Smart Cities e Internet das Coisas (IoT), com foco na melhoria do protocolo RPL.

Tabela 5.3: Tabela comparativa do FRR com os principais trabalhos relacionados.

|                                          | (Heck et al., 2025) | (Ghaleb et al., 2015) | (Ghaleb et al., 2017) | (Lamaazi e Benamar, 2020) | (Aghaei et al., 2021) | (Safaei et al., 2021) | (Rojas et al., 2021) | (Duenas Santos et al., 2024) |
|------------------------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|
| Aspecto / Proposta                       | FRR                 | E-Trickle             | Drizzle               | FL-Trickle                | LA-Trickle            | ELITE                 | IoTorii              | Q-RPL                        |
| Redução do tempo de formação da rede     | ✓                   | ✓                     | ✓                     | ✓                         | ✓                     | ●                     | ✓                    | ✓                            |
| Aborda a recuperação de rede pós-falha   | ✓                   | ●                     | ✓                     | ●                         | ●                     | ×                     | ●                    | ●                            |
| Baixa complexidade de implementação      | ✓                   | ●                     | ●                     | ●                         | ●                     | ×                     | ✓                    | ×                            |
| Redução no consumo de energia            | ✓                   | ●                     | ✓                     | ✓                         | ✓                     | ✓                     | ✓                    | ✓                            |
| Validação por simulações                 | ✓                   | ✓                     | ✓                     | ✓                         | ✓                     | ✓                     | ✓                    | ✓                            |
| Validação por experimentos               | ✓                   | ×                     | ×                     | ×                         | ×                     | ×                     | ✓                    | ×                            |
| Otimização da configuração de parâmetros | ●                   | ●                     | ✓                     | ✓                         | ✓                     | ●                     | ●                    | ×                            |
| Considerações sobre escalabilidade       | ✓                   | ✓                     | ✓                     | ✓                         | ✓                     | ●                     | ✓                    | ●                            |
| Otimização da seleção de rotas/pais      | ✓                   | ×                     | ×                     | ×                         | ×                     | ✓                     | ✓                    | ✓                            |
| Balanceamento de carga                   | ×                   | ×                     | ●                     | ×                         | ×                     | ●                     | ✓                    | ●                            |

Legenda: ✓ = presente; ● = parcialmente presente; × = não presente.

O mecanismo FRR diferencia-se das demais otimizações propostas na literatura principalmente pelo foco na recuperação rápida da rede pós-falha. Sua abordagem baseada na memorização dos pais preferenciais garante o rápido restabelecimento da conectividade após a reinicialização total da rede ou em caso de falhas de enlace ou nó, o que o torna altamente indicado para cenários críticos em que a disponibilidade e o tempo de recuperação são prioridades. Essa característica é mais robusta do que a dos protocolos E-Trickle, Drizzle, FL-Trickle e LA-Trickle, os quais também reduzem o tempo de convergência, mas limitam-se a otimizar o *Trickle Timer*, não mantendo caminhos alternativos previamente calculados.

Em termos de baixa complexidade de implementação, o FRR se destaca por ser um mecanismo simples de implementar, baseado na memorização de informações de pais preferenciais. Isto contrasta com as outras propostas, as quais tendem a ser mais elaboradas, envolvendo abordagens como a integração de aprendizado de máquina (Q-RPL, LA-Trickle), otimizações adaptativas complexas do *Trickle Timer* (E-Trickle, Drizzle, FL-Trickle) ou o uso de arquiteturas multicamadas (ELITE), as quais podem aumentar significativamente o consumo de memória e a complexidade geral da implementação.

Na redução de consumo de energia, o FRR alcança ganhos moderados, principalmente pela diminuição de reavaliações dos enlaces, mas não apresenta resultados tão consistentes quanto Drizzle ou FL-Trickle, que reduzem o número de mensagens de controle de forma adaptativa durante toda a operação da rede. O ELITE, por sua vez, adota uma abordagem multicamada focada em eficiência energética e balanceamento de carga, levando em consideração métricas como energia residual e qualidade de enlace na escolha de rotas. Embora o ELITE não tenha

como foco principal a recuperação rápida, ele contribui para a durabilidade da rede e a distribuição equilibrada do consumo de energia. O Q-RPL se destaca na redução de consumo de energia por incorporar métricas que evitam rotas ineficientes e retransmissões excessivas.

Em termos de testes e avaliação, o FRR se diferencia por ter sido validado através de simulações e experimentos em cenários variados, incluindo uma avaliação em larga escala com dados reais de posicionamento de medidores inteligentes e uma prova de conceito em um ambiente experimental físico. Em otimização de parâmetros, o FRR fica atrás de protocolos como Drizzle, FL-Trickle e LA-Trickle, os quais ajustam dinamicamente o intervalo e o fator de redundância ( $k$ ).

Em termos de escalabilidade, especificamente no número de nós utilizados nas simulações, todos trabalhos demonstraram bom comportamento com o aumento no número de nós. O FRR se destaca por ter sido avaliado em redes com até 771 nós, uma escala consideravelmente maior do que a maioria das outras propostas da literatura, as quais tipicamente testam em cenários com um número menor de nós. O E-Trickle foi avaliado com números de nós variando de 25 a 200. O Drizzle utilizou simulações com 100 nós. O algoritmo FL-Trickle foi testado em redes com densidades de 10, 25, 30, 45 e 50 nós. O LA-Trickle simulou redes de pequeno e médio porte, com um número de nós que variou de 7 a 120. O ELITE foi avaliado em cenários com 25, 50 e 75 nós. O IoTori foi comparado em cenários densos com até 200 nós. O Q-RPL foi testado em dois cenários reais, um com 200 medidores inteligentes (Montreal) e outro com 355 (Barcelona).

Em relação ao processo de seleção de rotas/pais o Q-RPL é mais indicado para redes dinâmicas, pois faz a seleção de rotas de forma inteligente e adaptativa via Q-learning. Enquanto que o FRR não altera de forma significativa o processo de seleção de pais do protocolo RPL, mas compensa isto pela agilidade na recuperação após falhas, sendo indicado para redes com pouca ou nenhuma mobilidade. No quesito balanceamento de carga, tanto o FRR quanto a maioria dos protocolos avaliados não implementam estratégias explícitas, sendo o Q-RPL o único que, indiretamente, promove distribuição de tráfego pela escolha de rotas mais estáveis e menos congestionadas.

Em resumo, enquanto muitas propostas se concentram em otimizar aspectos específicos do RPL (como eficiência energética, taxa de entrega de pacotes ou balanceamento de carga), o mecanismo FRR se diferencia por oferecer uma solução específica e eficaz para o problema crítico do longo tempo de formação da rede.

## 5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Capítulo apresenta o mecanismo *Fast Routing Recovery* (FRR), idealizado para acelerar o tempo de convergência do algoritmo de roteamento RPL, o qual reduz o tempo de formação das redes sem fio que fazem uso do protocolo RPL, como é o caso das redes Wi-SUN. Conforme avaliações de desempenho realizadas, por meio de simulações e de experimentos, verificou-se que o mecanismo FRR reduz o tempo de convergência do protocolo RPL em até 50%. Os melhores desempenhos do FRR ocorrem quando ele comporta em sua cache um número suficiente de registros de vizinhos, que depende da densidade de dispositivos na rede e do raio de alcance dos mesmos. Como trabalho futuro é previsto melhorar o desempenho do FRR com menores caches que empreguem políticas de substituição de registros mais sofisticadas, tais como maior associatividade.

O mecanismo FRR foi divulgado por meio do artigo intitulado "*FRR: a Fast Routing Recovery Mechanism Minimizing Network Formation Time in Smart Grids*", na revista "*Internati-*

*onal Journal of Electrical Power and Energy Systems*". O artigo está indicado nas contribuições deste trabalho, referência número 5, Seção 1.3.

O próximo Capítulo conclui este trabalho e apresenta as limitações e oportunidades de trabalhos futuros.

## 6 CONCLUSÃO

As redes *Smart Grids* estão sendo implantadas em ritmo acelerado, especialmente nos países em desenvolvimento. No entanto, elas ainda carecem de melhorias em aspectos como desempenho, consumo de energia, mobilidade, segurança e interoperabilidade. Para contribuir com a evolução das *Smart Grids*, especialmente com redes de comunicação AMI e sua integração com as *Smart Cities* e IoT, este trabalho apresenta algumas soluções que permitem otimizar o desempenho destas redes e compartilhar a infraestrutura.

O mecanismo FRR (*Fast Routing Recovery*), proposto neste trabalho, contribui com a redução do tempo de convergência do protocolo RPL em até 50%. Ainda, possui baixa complexidade de implementação e também contribui para reduzir o ciclo de trabalho e o consumo de energia da rede, reduzindo o número de mensagens transmitidas. A eficiência do FRR foi verificada por meio de simulações, sobre cenários com distribuições uniformes de nós e usando localizações de medidores inteligentes na área urbana da cidade de Ipiranga. Também foi validado por meio de experimentos em uma rede linear composta por nove módulos de rádio.

O trabalho permitiu identificar que uma escolha adequada de parâmetros de configuração do protocolo RPL contribui significativamente para reduzir o tempo de formação de redes IEEE 802.15.4, como a Wi-SUN FAN. Ainda, apresentou soluções que permitem integrar aplicações de *Smart Cities* e IoT sobre as redes *Smart Grids*. Bem como desenvolveu uma solução inovadora que viabiliza a utilização das redes *Smart Grids* como *backhaul* para redes do tipo LoRaWAN.

As Seções 6.1 e 6.2 a seguir apresentam respectivamente as limitações e as oportunidades de trabalhos futuros identificadas.

### 6.1 LIMITAÇÕES

O presente trabalho apresenta uma limitação quanto à avaliação do mecanismo FRR utilizando-se a técnica de salto de canais. Nas simulações e experimentos efetuados utilizou-se um único canal para a comunicação entre os dispositivos. A avaliação do FRR utilizando-se salto de canais é prevista como trabalho futuro.

### 6.2 TRABALHOS FUTUROS

As oportunidades de trabalhos futuros são descritas abaixo:

- Avaliar o mecanismo FRR sobre um simulador de redes Wi-SUN FAN completo, o qual incorpora a funcionalidade de salto de canais e os estados de descoberta (EJ1) e configuração (EJ3) da rede, além da etapa de roteamento. Com o simulador completo, será possível avaliar o desempenho do FRR com diferentes configurações de salto de canais.
- Avaliar o mecanismo FRR sobre redes de comunicação sem-fio industriais. Estas também utilizam o protocolo de roteamento RPL, mas ao invés do CSMA-CA no controle de acesso ao meio, fazem o controle de tráfego de mensagens com o modo de operação TSCH.
- Investigar a utilização de outros métodos para a substituição de registros da tabela FRR, com a finalidade de melhorar o desempenho de caches pequenas;

- Pesquisar e desenvolver um mecanismo para ajuste dinâmico dos parâmetros de configuração de redes sem fio, principalmente para as de grande escala. Um mecanismo de ajuste dinâmico pode acelerar a formação da rede em camadas, de acordo com a distância dos dispositivos em relação ao roteador de borda.

## REFERÊNCIAS

- 802.11 (2021). IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. *IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016)*, páginas 1–4379.
- 802.16 (2018). IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. *IEEE Std 802.16-2017 (Revision of IEEE Std 802.16-2012)*, páginas 1–2726.
- Aghaei, A., Akbari Torkestani, J., Kermajani, H. e Karimi, A. (2021). LA-Trickle: A novel algorithm to reduce the convergence time of the wireless sensor networks. *Computer Networks*, 196(May):108241.
- Ambrosio, A., Heck, G. C., Riella, R., Iantorno, L., Santos, B., Rodrigues, D. d. H. C., da Silva, G. T. A., Brito, J. A. S. e Fernandez, E. (2022). Avaliação experimental do tempo de formação de uma rede multi-salto do padrão Wi-SUN FAN. Em *Anais do XL Simp. Bras. de Telecom. e Proces. de Sinais*, páginas 25–28, Santa Rita do Sapucaí. SBrT.
- Balmau, O., Dzung, D. e Pignolet, Y. A. (2014). Recipes for faster failure recovery in Smart Grid communication networks. Em *2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, páginas 248–253. IEEE.
- Baronti, P., Pillai, P., Chook, V. W., Chessa, S., Gotta, A. e Hu, Y. F. (2007). Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards. *Computer Communications*, 30(7):1655–1695.
- Bgan (2024). BGAN Technology. Acesso em: 27/10/2024.
- Bluetooth SIG (2024). *Bluetooth Core Specification Version 6.0*. Bluetooth SIG, Inc.
- Darabkh, K. A., Al-Akhras, M., Zomot, J. N. e Atiquzzaman, M. (2022). RPL routing protocol over IoT: A comprehensive survey, recent advances, insights, bibliometric analysis, recommendations, and future directions. *Journal of Network and Computer Applications*, 207:103476.
- Duenas Santos, C. L., Mezher, A. M., Astudillo León, J. P., Cardenas Barrera, J., Castillo Guerra, E. e Meng, J. (2024). Q-RPL: Q-Learning-Based Routing Protocol for Advanced Metering Infrastructure in Smart Grids. *Sensors*, 24(15):4818.
- Dunkels, A. (2011). The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol. *SICS Technical Report T2011:13*, ISSN 1100-3154, páginas 1–11.
- Eclipse (2020). Software MQTT Broker Eclipse Mosquitto. <https://mosquitto.org/>. Acesso em 17/08/2020.
- Eclipse IoT project (2020a). Biblioteca de serialização Eclipse Paho MQTT-SN Packet. <https://github.com/eclipse/paho.mqtt-sn.embedded-c/tree/master/MQTTSNPacket>. Acesso em 17/08/2020.



- Eclipse IoT project (2020b). Software Eclipse Paho MQTT-SN Gateway. <https://github.com/eclipse/paho.mqtt-sn.embedded-c/tree/master/MQTTSNGateway>. Acesso em 17/08/2020.
- Ekpenyong, M. E., Asuquo, D. E., Udo, I. J., Robinson, S. A. e Ijebu, F. F. (2022). IPv6 Routing Protocol Enhancements over Low-power and Lossy Networks for IoT Applications: A Systematic Review. *New Review of Information Networking*, 27(1):30–68.
- FieldComm Group (2024). HART protocol specifications. <https://www.fieldcommgroup.org/hart-specifications>. Acesso em 12/11/2024.
- FreeRTOS (2020). Real-time operating system for microcontrollers and small microprocessors. Acesso em 20/07/2020.
- FUJITSU (2025). Memória Ferroelétrica de Acesso Aleatório (FRAM) não volátil. <https://www.fujitsu.com/br/Images/SPBG-FRAM-Overview-BR-PT.pdf>. Acesso em 13/02/2025.
- Ghaleb, B., Al-Dubai, A. e Ekonomou, E. (2015). E-trickle: Enhanced trickle algorithm for low-power and lossy networks. Em *2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing*, páginas 1123–1129.
- Ghaleb, B., Al-Dubai, A., Ekonomou, E., Paechter, B. e Qasem, M. (2016). Trickle-plus: Elastic trickle algorithm for low-power networks and internet of things. Em *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, páginas 1–6.
- Ghaleb, B., Al-Dubai, A., Romdha, I., Nasser, Y. e Boukerche, A. (2017). Drizzle: Adaptive and fair route maintenance algorithm for Low-power and Lossy Networks in IoT. Em *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, páginas 1–6. IEEE.
- Ghaleb, B., Al-Dubai, A. Y., Ekonomou, E., Alsarhan, A., Nasser, Y., Mackenzie, L. M. e Boukerche, A. (2019). A Survey of Limitations and Enhancements of the IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks: A Focus on Core Operations. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(2):1607–1635.
- Gnawali, O. e Levis, P. (2012). The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function. RFC 6719.
- Google (2024). Google map of Ipiranga, PR, Brazil. <https://www.google.com/maps/@-25.0227162,-50.579255,4307m>. Acesso em 20/08/2024.
- Guo, S., He, L., Gu, Y., Jiang, B. e He, T. (2014). Opportunistic flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks with unreliable links. *IEEE Transactions on Computers*, 63(11):2787–2802.
- Hadaya, N. N. e Alabady, S. A. (2022). Proposed RPL routing protocol in the IoT applications. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 34(10):37–72.
- Hauweele, D., Koutsiamanis, R.-A., Quoitin, B. e Papadopoulos, G. Z. (2020). Pushing 6TiSCH Minimal Scheduling Function (MSF) to the Limits. Em *2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, volume 2020-July, páginas 1–7. IEEE.

- Hauweele, D., Koutsiamanis, R.-a., Quoitin, B. e Papadopoulos, G. Z. (2021). Thorough Performance Evaluation & Analysis of the 6TiSCH Minimal Scheduling Function (MSF). *Journal of Signal Processing Systems*.
- Heck, G. C., Quispe, A. A., da Fonseca, P. H., Junior, O. S., Hexsel, R. A. e Albin, L. C. (2025). FRR: A Fast Routing Recovery mechanism minimizing network formation time in smart grids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 164:110364.
- Hotta, D., Okumura, R., Mizutani, K. e Harada, H. (2020). Stabilization of multi-hop routing construction in Wi-SUN FAN systems. Em *Proc. IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference*, páginas 1–6. IEEE.
- IBM (2025). Armazenamento flash. <https://www.ibm.com/br-pt/topics/flash-storage>. Acesso em 13/02/2025.
- IEEE 802.15.4-2003 (2003). 802.15.4-2003 - IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 15: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). <https://ieeexplore.ieee.org/document/1237559>. Acesso em 18/11/2019.
- IEEE 802.15.4-2006 (2006). 802.15.4-2006 - IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). <https://ieeexplore.ieee.org/document/1700009>. Acesso em 18/11/2019.
- IEEE 802.15.4-2011 (2011). 802.15.4-2011 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks–Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). <https://ieeexplore.ieee.org/document/6012487>. Acesso em 18/11/2019.
- IEEE 802.15.4-2015 (2016). IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011)*, páginas 1–709.
- IEEE 802.15.4-2020 (2020). IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)*, páginas 1–800.
- IEEE 802.15.4-2024 (2024). IEEE/ISO/IEC International Standard – Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 15-4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs). *ISO/IEC/IEEE 8802-15-4:2024(en)*, páginas 1–800.
- IEEE Std 2857 (2021). IEEE Standard for Wireless Smart Utility Network Field Area Network (FAN). *IEEE Std 2857-2021*, páginas 1–182.
- Inmarsat (2018). Inmarsat: Global Satellite Communication Services. Inmarsat. Acesso em: 27/10/2024.
- Junjalearnvong, T., Habara, T., Okumura, R., Mizutani, K. e Harada, H. (2017). A dynamic routing protocol supporting mobile nodes in Wi-SUN FAN systems. Em *Proc. IEEE 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, volume 6, páginas 325–331. IEEE.

- Kermajani, H. e Gomez, C. (2014). On the Network Convergence Process in RPL over IEEE 802.15.4 Multihop Networks: Improvement and Trade-Offs. *Sensors*, 14(7):11993–12022.
- Lamaazi, H. e Benamar, N. (2020). RPL Enhancement Based FL-Trickle: A Novel Flexible Trickle Algorithm for Low Power and Lossy Networks. *Wireless Personal Communications*, 110(3):1403–1428.
- Lampe, L., Tonello, A. M. e Swart, T. G., editores (2016). *Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2 edition.
- Levis, P., Clausen, T. H., Gnawali, O., Hui, J. e Ko, J. (2011). The Trickle Algorithm. RFC 6206.
- Maral, G., Bousquet, M. e Sun, Z. (2020). *Satellite Communications Systems*. Wiley.
- Meter-Bus (2020). Meter-Bus. <https://m-bus.com/>. Acesso em 08/07/2020.
- Morikawa, Y., Mizutani, K. e Harada, H. (2023). Mobility Enhancement for IEEE 802.15.4 SUN-OFDM Using Channel Estimation and Viterbi Decoder With Likelihood Ratio Adjustment Methods. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 4(August):701–712.
- MQTT (2020). MQTT Specifications. Acesso em 20/07/2020.
- MQTT-SN (2019). MQTT-SN Specification. Acesso em 04/11/2019.
- Node-Soap (2020). Biblioteca Node-Soap. <https://github.com/vpulim/node-soap>. Acesso em 17/08/2020.
- Oikonomou, G., Duquennoy, S., Elsts, A., Eriksson, J., Tanaka, Y. e Tsiftes, N. (2022). The Contiki-NG open source operating system for next generation IoT devices. *SoftwareX*, 18.
- OMNeT++ (2021). OMNeT++ Discrete Event Simulator - an extensible, modular, component-based C++ simulation library and framework. <https://omnetpp.org>. Acesso em 26/11/2021.
- Osterlind, F., Dunkels, A., Eriksson, J., Finne, N. e Voigt, T. (2006). Cross-Level Sensor Network Simulation with COOJA. Em *Proc. 31st IEEE Conference on Local Computer Networks*, páginas 641–648. IEEE.
- Paetz, C. (2015). *Z-wave Basics: Remote Control in Smart Homes*. Dr. Christian Paetz.
- Patterson, D. A. e Hennessy, J. L. (2014). *Computer Organization & Design: The Hardware/Software Interface*. Morgan Kaufmann, 5th edition.
- Pedretti, A., Silva, E. R. d., Valério, E. C., Omori, J. S. e Santana, T. A. S. (2020). A Copel e as smart grids. *O Setor Elétrico*, páginas 40–45.
- Rajalingham, G., Gao, Y., Ho, Q.-D. e Le-Ngoc, T. (2014). Quality of service differentiation for smart grid neighbor area networks through multiple rpl instances. Em *Proceedings of the 10th ACM Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks, Q2SWinet '14*, página 17–24, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Raza, U., Kulkarni, P. e Sooriyabandara, M. (2017). Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2):855–873.

- Rojas, E., Hosseini, H., Gomez, C., Carrascal, D. e Rodrigues Cotrim, J. (2021). Outperforming RPL with scalable routing based on meaningful MAC addressing. *Ad Hoc Networks*, 114:102433.
- Romaniello, G., Potetsianakis, E., Alphand, O., Guizzetti, R. e Duda, A. (2013). Fast and energy-efficient topology construction in multi-hop multi-channel 802.15.4 networks. Em *2013 IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, páginas 382–387. IEEE.
- Safaei, B., Monazzah, A. M. H. e Ejlali, A. (2021). ELITE: An Elaborated Cross-Layer RPL Objective Function to Achieve Energy Efficiency in Internet-of-Things Devices. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(2):1169–1182.
- Saleem, Y., Crespi, N., Rehmani, M. H. e Copeland, R. (2019). Internet of Things-Aided Smart Grid: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions. *IEEE Access*, 7:62962–63003.
- Semtech Corporation (2024). LoRa and LoRaWAN. <https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lora-and-lorawan.pdf>. Acesso em 17/09/2024.
- Semtech-Cycleo (2020). Lora network packet forwarder project. [https://github.com/Lora-net/packet\\_forwarder](https://github.com/Lora-net/packet_forwarder). Acesso em 10/08/2020.
- Sigfox (2024). Sigfox: What is sigfox og technology. Acesso em: 27/10/2024.
- Silicon Labs (2023). AN1330: Silicon Labs Wi-SUN Mesh Network Performance. <https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/an1330-wi-sun-network-performance.pdf>. Acesso em 20/11/2023.
- Simon, D., Hurst, R. e Aboba, D. B. D. (2008). The EAP-TLS Authentication Protocol. RFC 5216.
- Solimini, D., Tuset-Peiró, P., Boquet, G., Gomes, R. D., Vázquez-Gallego, F. e Vilajosana, X. (2021). Towards Reliable IEEE 802.15.4g SUN with Re-transmission Shaping and Adaptive Modulation Selection. *Journal of Signal Processing Systems*, 93(9):1027–1044.
- Solimini, D., Tuset-Peiró, P., Boquet, G., Vilajosana, X. e Vázquez-Gallego, F. (2020). Improving Link Reliability of IEEE 802.15.4g SUN with Re-Transmission Shaping. Em *Proceedings of the 17th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, & Ubiquitous Networks*, páginas 25–32, New York, NY, USA. ACM.
- Texas Instruments (2018). SimpleLink™ CC13X2 TI 15.4-Stack User's Guide - Frequency-Hopping Mode. [https://software-dl.ti.com/simplelink/esd/simplelink\\_cc13x2\\_sdk/1.60.00.29\\_new/exports/docs/ti154stack/html/ti154stack/frequency-hopping-mode.html](https://software-dl.ti.com/simplelink/esd/simplelink_cc13x2_sdk/1.60.00.29_new/exports/docs/ti154stack/html/ti154stack/frequency-hopping-mode.html). Acesso em: 28/07/2022.
- Thread Group (2024). What is Thread - Overview. <https://www.threadgroup.org/What-is-Thread/Overview>. Acesso em 27/10/2024.
- TIA-4957.210 (2013). Multi-Hop Delivery Specification of a Data Link Sub-Layer. ANSI/TIA-4957.210.

- Vilajosana, X., Watteyne, T., Chang, T., Vučinić, M., Duquennoy, S. e Thubert, P. (2020). Ietf 6tisch: A tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(1):595–615.
- Vogli, E., Ribezzo, G., Grieco, L. A. e Boggia, G. (2015). Fast join and synchronization schema in the IEEE 802.15.4e MAC. Em *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, páginas 85–90. IEEE.
- Vogli, E., Ribezzo, G., Grieco, L. A. e Boggia, G. (2018). Fast network joining algorithms in industrial IEEE 802.15.4 deployments. *Ad Hoc Networks*, 69:65–75.
- Wang, Y.-P. E., Lin, X., Adhikary, A., Grovlen, A., Sui, Y., Blankenship, Y., Bergman, J. e Razaghi, H. S. (2017). A primer on 3gpp narrowband internet of things. *IEEE Communications Magazine*, 55(3):117–123.
- Wi-SUN (2024). Wi-SUN Alliance. <https://www.wi-sun.org>. Acesso em 15/02/2024.
- Winter, T., Thubert, P., Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., Vasseur, J. e Alexander, R. (2012). RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. RFC 6550.
- Yassein, M. B., Aljawarneh, S. e Masa'deh, E. (2017). A new elastic trickle timer algorithm for internet of things. *Journal of Network and Computer Applications*, 89:38–47.
- Zontou, E. (2023). Unveiling the evolution of mobile networks: From 1g to 7g. <https://arxiv.org/abs/2310.19195>. Acesso em 18/12/2023.

## APÊNDICE A – COMPARTILHAMENTO DAS REDES SMART GRIDS

Como parte do seu plano de investimento em *Smart Grids* e apostando no protocolo Wi-SUN FAN, entre os anos de 2017 e 2019 a Companhia Paranaense de Energia (Copel) instalou medidores de energia inteligentes em todos os seus clientes no município de Ipiranga - PR, cerca de 5250 consumidores de energia em uma população de pouco mais de 15 mil habitantes. Apesar do expressivo custo de implantação da tecnologia, a solução se mostrou viável devido à economia gerada pela leitura remota do consumo, bem como pela redução de despesas com a execução dos serviços de corte e religamento dos clientes, serviços estes que também passaram a ser comandados remotamente (Pedretti et al., 2020). Embora a solução tenha se mostrado economicamente viável, existe a percepção de que a infraestrutura de comunicação esteja sub-utilizada, surgindo a necessidade de se avaliar a rede de dados Wi-SUN quanto a sua real capacidade e à suportabilidade de novas aplicações. Diante deste cenário, a Copel contratou o Lactec para a execução do projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) intitulado *Aplicações Smart City Sobre a Rede Smart Grid de Ipiranga (Smart City Ipiranga)*<sup>1</sup>. O objetivo do projeto é validar a viabilidade técnica, econômica e de desempenho da utilização da rede de dados Wi-SUN, previamente implantada pela concessionária para prover acesso aos seus processos de automação e telemedição, em novas aplicações voltadas aos conceitos das *Smart Cities* e IoT. A possibilidade de compartilhamento das redes SGs, além de viabilizar que outras companhias e a indústria ofereçam novos serviços para a população, permitirá que as concessionárias acelerem o retorno dos seus investimentos através da cobrança pelo serviço de comunicação de dados na rede SG, dado que o custo de implantação das mesmas ainda é alto, principalmente em regiões rurais. O projeto de P&D teve início em outubro de 2019, possuía duração de 24 meses mas foi prorrogado para 40 meses devido à pandemia, o que permitiu que a etapa de validação em campo pudesse ser adequadamente executada.

Neste Apêndice são apresentadas as soluções pesquisadas e desenvolvidas para validar a viabilidade técnica de utilizar as redes de comunicação das *Smart Grids* (SG) como canal de transmissão de dados para aplicações de cidades inteligentes (*Smart City*) e Internet das Coisas (IoT). As soluções aqui descritas contribuíram com a execução do projeto de P&D *Smart City Ipiranga* da Copel. Como pesquisador do Lactec desde 2007, atuei neste projeto como responsável técnico pela equipe de software e desenvolvi as seguintes atividades:

- Defini a arquitetura de integração do *framework*;
- Auxiliei no processo de seleção das aplicações a serem testadas;
- Participei da escolha do protocolo de comunicação para as aplicações;
- Contribui com o desenvolvimento do mecanismo de compressão da comunicação LoRaWAN;
- Validei os resultados dos testes de integração;
- Escrevi e apresentei artigos e informes técnicos.

---

<sup>1</sup> Código PD-2866-0515/2019 do programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

## A.1 ESTUDO DA REDE SMART GRID DE IPIRANGA

A COPEL instalou sua primeira SG na cidade de Ipiranga, estado do Paraná, Brasil. A Figura A.1 ilustra a localização geográfica da cidade. Ipiranga foi escolhida porque possui uma predominância de consumidores rurais (60%). São aproximadamente 5500 consumidores distribuídos em uma área de 927 km<sup>2</sup>, o que produz uma densidade de pontos de medição de apenas 5,93 consumidores por km<sup>2</sup>. Ademais, sua cobertura de operadoras de telefonia celular se restringe à pequena região urbana central (Pedretti et al., 2020).

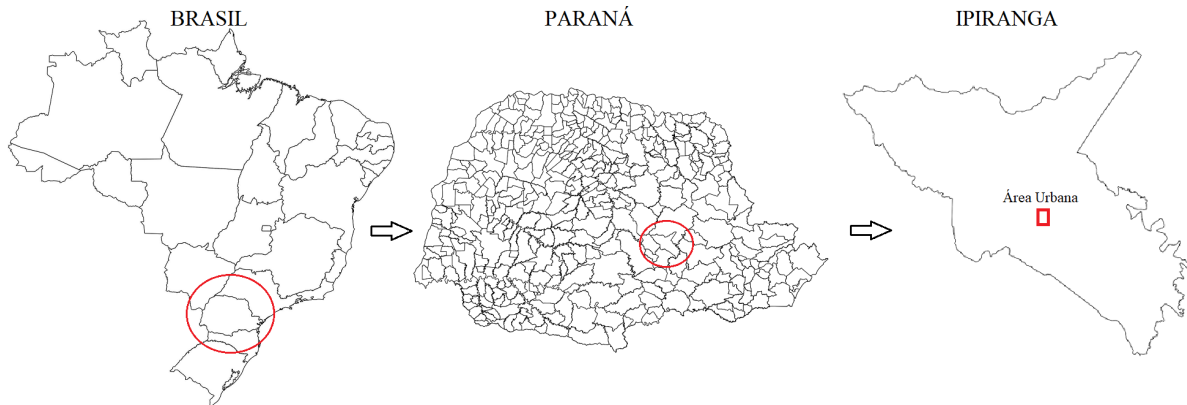


Figura A.1: Localização da cidade de Ipiranga.

A rede SG em Ipiranga é formada por duas camadas de rádio frequência (RF). A camada superior, de *backhaul* ou de rede de área ampla (WAN - *Wide Area Network*), é constituída por rádios de 900 MHz que operam nas topologias ponto-a-ponto e multiponto e possuem taxas de transmissão de dados de 125 kbps à 1,25 Mbps. A camada superior fornece conectividade para os equipamentos de automação da rede elétrica, tais como religadores automáticos e reguladores de tensão, e para os coletores de dados. A camada inferior, rede em malha ou FAN (*Field Area Network*), é composta por medidores inteligentes, roteadores e coletores de dados que operam no padrão Wi-SUN FAN, o qual segue a especificação IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15.4-2015, 2016) e é promovido pela Aliança Wi-SUN (Wi-SUN, 2024). A Figura A.2 ilustra a disposição georreferenciada dos equipamentos na rede presente em Ipiranga. Na Figura A.2(a) são ilustrados os enlaces de rádio que conectam os religadores automáticos (marcadores amarelos), os reguladores de tensão (balões vermelhos) e os coletores de dados (estrelas verdes). Enquanto na Figura A.2 partes (b) e (c) são ilustrados os componentes da infraestrutura avançada de medição (AMI - *Advanced Metering Infrastructure*), coletores de dados (estrelas verdes), roteadores (bandeiras azuis) e medidores inteligentes, área rural com pontos verdes e área urbana com pontos amarelos.

Os módulos coletores de dados, também chamados de roteadores de borda (*Border Routers*), atuam como *gateways* entre a rede em malha (*mesh*) e o *backhaul*, encaminhando as mensagens dos medidores inteligentes para o sistema coletor de dados (MDC - *Meter Data Collection*). Segundo a especificação do fabricante, um coletor é capaz de atender até 2000 equipamentos (medidores inteligentes ou módulos de rádio). Os módulos roteadores são utilizados para ampliar a área de cobertura da rede *mesh*. O restante da rede é formada pelos medidores inteligentes (*smart meters*) e pelos módulos de rádio, sendo estes últimos utilizados para a integração de novas aplicações sobre a rede. Cada novo módulo de comunicação é previamente cadastrado e configurado para operar na rede da empresa, o que aumenta a segurança do sistema.

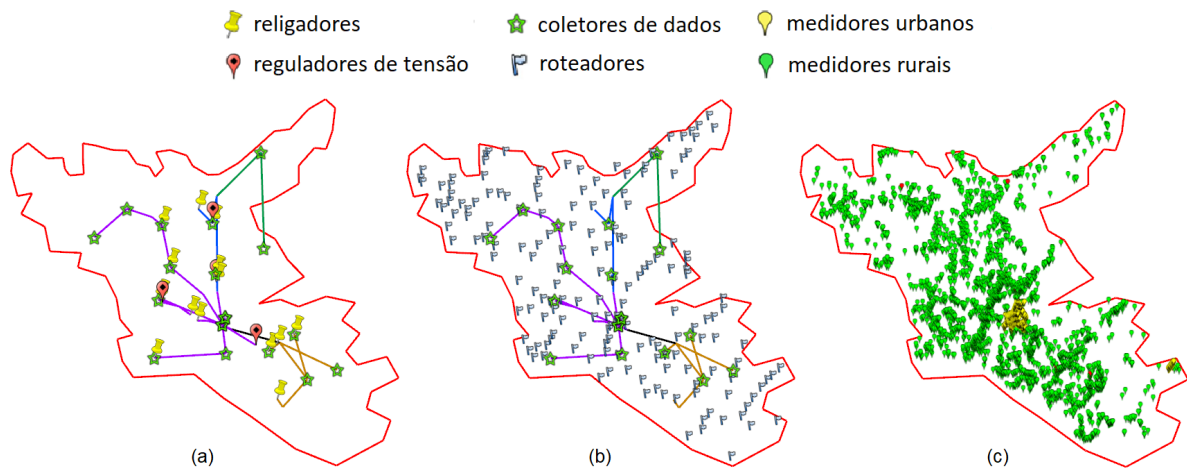


Figura A.2: Ilustração da rede *Smart Grid* de Ipiranga.

## A.2 PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÕES

A primeira etapa do projeto de P&D compreendeu a pesquisa de requisitos das aplicações a serem desenvolvidas, visando compreender quais aplicações de *Smart City* seriam mais úteis para a Copel, no contexto do compartilhamento da rede de *Smart Grid*, bem como para os moradores da cidade de Ipiranga. De acordo com os dados coletados nas entrevistas realizadas com os moradores, a cidade de Ipiranga possui poucos problemas de cunho social que possam ser resolvidos com soluções de comunicação. A grande maioria dos moradores possui acesso à internet, e este canal já possibilita que mesmo os moradores da região rural acessem informações relevantes para suas rotinas. Os entrevistados destacaram inclusive, a utilização das redes sociais pelos moradores da cidade, para a comunicação entre si e com a prefeitura. A cidade não possui semáforos, a segurança pública não é um problema social, a comunicação entre os moradores acontece via internet ou telefone fixo. Assim, dentre as possíveis soluções típicas de *Smart City* pensadas para Ipiranga, as que fizeram mais sentido para o contexto da cidade são:

1. O monitoramento do clima para auxílio à agricultura;
2. A medição de consumo de água;
3. O controle da iluminação pública.

Definidas as aplicações, foram identificados os equipamentos e suas demandas de comunicação. Para a primeira aplicação foi utilizada uma estação meteorológica, a qual registra as grandezas monitoradas em intervalos de 15 minutos. A segunda aplicação integra medidores de consumo de água, os quais efetuam medições a cada 60 minutos. E a terceira aplicação utiliza relés de controle de luminárias de iluminação pública, os quais efetuam leituras de grandezas elétricas a cada 60 minutos e registram os momentos de “liga” e “desliga” das luminárias.

A Tabela A.1 exibe a caracterização diária do volume de dados produzido e número de mensagens transmitidas em cada equipamento para cada uma das aplicações avaliadas. Os dados da aplicação de medição de energia (AMI) foram inseridos na tabela para fins de comparação. Note que as frequências de medição e número de mensagens são diferentes para a maior parte dos equipamentos, pois sempre que possível os dados são acumulados para minimizar o número de transmissões. A Tabela A.1 mostra também o tamanho de cada conjunto de informações (*payload*) em *bytes* e o intervalo entre as medições das informações em minutos.



Tabela A.1: Volume de dados produzidos por tipo de aplicação.

| Aplicação             | Carga paga (bytes) | Intervalo de medição (min.) | Nr. de bytes (por dia) | Nr. Mensagens (por dia) |
|-----------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|
| Estação Meteorológica | 80                 | 15                          | 7680                   | 24                      |
| Medição de Água       | 20                 | 60                          | 480                    | 2                       |
| Iluminação Pública    | 16                 | 60                          | 384                    | 2                       |
| Medição Energia (AMI) | 278 (méd.)         | diversos                    | 38808                  | 140                     |

Para cada uma das aplicações acima descritas, foram projetados e integrados os circuitos eletrônicos e módulos de comunicação necessários para o funcionamento das mesmas sobre a rede SG de Ipiranga. As próximas seções detalham os circuitos e descrevem cada uma das aplicações.

#### A.2.1 Estação Meteorológica

A integração de estações meteorológicas permite que os agricultores da região efetuem o acompanhamento do clima, auxiliando nas tomadas de decisão de plantio, irrigação e colheita. Para esta aplicação foi escolhida uma estação que disponibilizasse os principais parâmetros a serem monitorados e que fosse adequada para integração com o módulo de comunicação da rede *Smart Grid* de Ipiranga. A Figura A.3 ilustra o equipamento de medição, os módulos que foram integrados e a estação instalada na casa da subestação de energia de Ipiranga.

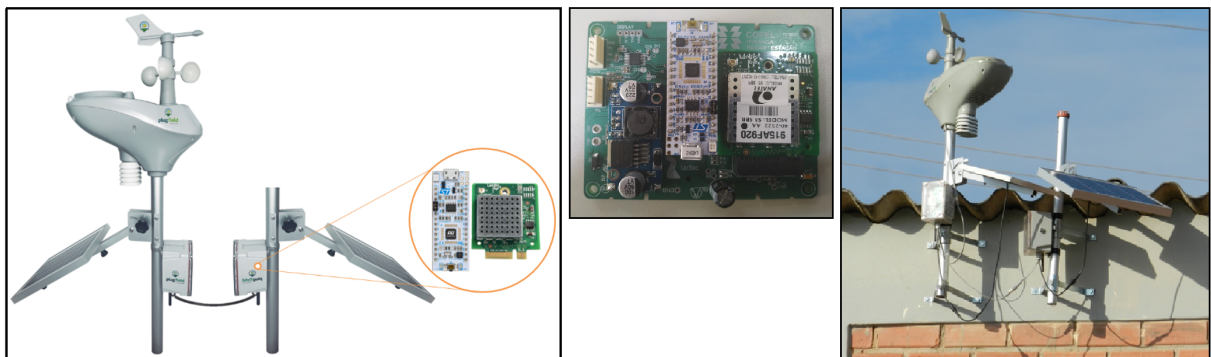


Figura A.3: Estação Meteorológica para monitoramento do clima.

Os dados da aplicação da estação meteorológica são encaminhados em formato pré-definido pelo fornecedor da estação e correspondem a uma sequência de caracteres contendo os dados medidos. Esta sequência possui aproximadamente 80 *bytes* e é coletada a cada 15 minutos. Para a aplicação da estação meteorológica foi utilizado o próprio sistema fornecido pelo fabricante do equipamento para a coleta e visualização dos dados. A Figura A.4 mostra um exemplo de coleta de dados de velocidade do vento e luminosidade medidos pela estação e exibidos na tela do sistema.

#### A.2.2 Medidor de Consumo de Água

Para a integração de medidores eletrônicos de água foi firmado um acordo de cooperação com a Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar, no intuito de criar uma solução que atendesse às necessidades do setor. O desenvolvimento da solução foi efetuado sobre medidores eletrônicos com a tecnologia de comunicação M-Bus (Meter-Bus, 2020), sendo necessário um

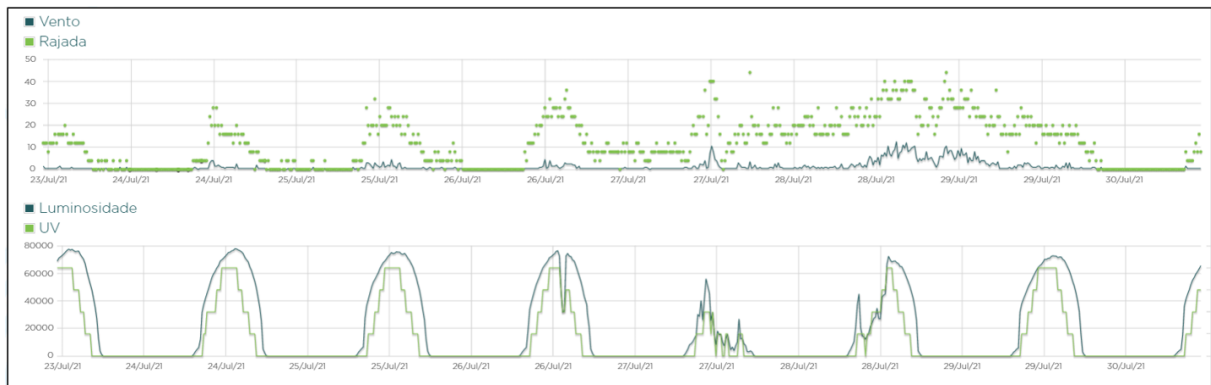


Figura A.4: Dados visualizados no software da estação meteorológica.

circuito eletrônico de interface de sinais, além de uma CPU e do módulo de comunicação da rede *Smart Grid*. A solução permite a leitura remota do consumo de água e a identificação de falhas (vazamentos, violações, por exemplo). Ainda, a implantação massiva da medição remota de água provê informações para a distribuidora efetuar a programação antecipada dos fluxos de produção, otimizando o processo de distribuição de água. A Figura A.5 ilustra os componentes da solução, a placa de circuito impresso montada e o protótipo instalado em campo.

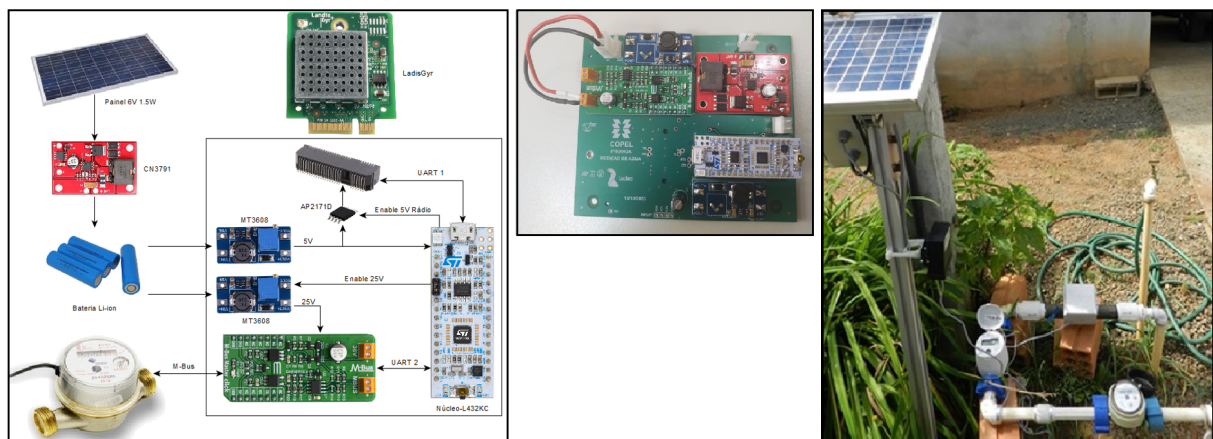


Figura A.5: Equipamentos da aplicação de medição de água.

A aplicação de medição de água registra as medições do consumo acumulado a cada hora e infere situações de anomalia, como o excesso de consumo, com base em dados históricos registrados. As transmissões dos dados ocorrem duas vezes por dia para o sistema de monitoramento que foi desenvolvido especificamente para esta solução. A Figura A.6 ilustra um exemplo de gráfico de consumo exibido na aplicação de monitoramento.

### A.2.3 Relé de Iluminação Pública

A integração de dispositivos que permitem o monitoramento do estado das lâmpadas (acesa, apagada e/ou queimada), visam agilizar o processo de substituição de lâmpadas, bem como acompanhar com precisão o funcionamento do sistema de iluminação pública. Os equipamentos, além de identificar o estado da lâmpada, também medem a tensão e a corrente no ponto instalado e permitem controlar a mudança de estado (ligar e desligar) de forma automática ou em modo manual. A Figura A.7 ilustra os componentes utilizados na solução, o equipamento montado e instalado em uma luminária para a execução de testes.

Nesta etapa dos trabalhos foram pesquisadas as características da rede de comunicação *Smart Grid* de Ipiranga e quais soluções poderiam ser utilizadas para se conseguir a integração de novas aplicações. Verificou-se que, embora a rede utilize internamente o protocolo IPv6 com transporte UDP, ela não permite que os dispositivos de terceiros usufruam da flexibilidade do endereçamento IP e dos números de porta UDP diretamente. A transferência de dados entre os módulos de rádio (dispositivos) e o sistema MDC é feita via modo transparente e não há nenhum protocolo de controle no rádio: quaisquer *bytes* transmitidos por um dispositivo através da porta serial são transferidos inalterados ao servidor, e vice-versa. Uma particularidade deste sistema

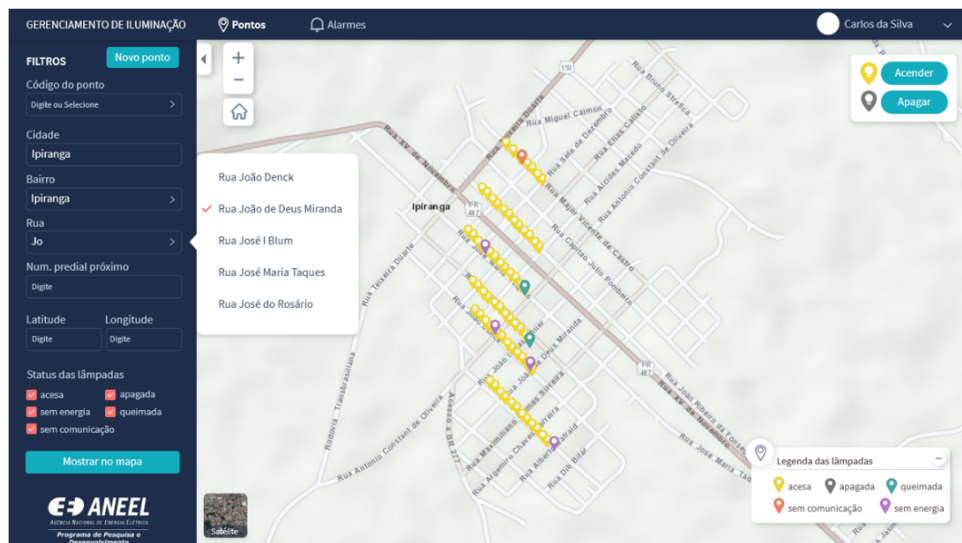


Figura A.8: Tela de posicionamento georreferenciado da aplicação de gestão da iluminação pública.

MDC é que as aplicações externas que forem se conectar a ele devem utilizar a API web service SOAP/XML para receber e enviar mensagens para os dispositivos da rede.

Tendo em vista as restrições da rede SG de Ipiranga, selecionou-se o MQTT-SN (MQTT-SN, 2019) como protocolo de aplicação, atuando como *middleware* para o tráfego dos pacotes de dados das variadas aplicações de *Smart City* e IoT. O protocolo MQTT-SN é uma simplificação do protocolo MQTT (MQTT, 2020), desenvolvida para redes de sensores sem fio. Além disso, permite que os servidores de aplicação sejam desenvolvidos com base em MQTT, um protocolo amplamente utilizado em aplicações IoT.

No lado do dispositivo embarcado a camada de software é dividida em duas partes (ver diagrama da Figura A.7). A primeira parte, executada no módulo de comunicação fornecido pelo fabricante da rede *Smart Grid* de Ipiranga, contém a pilha de protocolos de comunicação Wi-SUN FAN e é responsável por prover conectividade de rede ao dispositivo. O módulo de comunicação disponibiliza uma porta serial para o envio e recebimento de mensagens no nível da camada de aplicação. A segunda parte, executada em um microcontrolador conectado na porta serial do módulo de comunicação, contém a lógica da aplicação, a qual utiliza o protocolo MQTT-SN versão 1.2. Para o desenvolvimento da aplicação utilizou-se como apoio a biblioteca de serialização Eclipse Paho MQTTSNPacket (Eclipse IoT project, 2020a), a qual permite facilmente converter as mensagens MQTT-SN em estruturas na linguagem C (*structs*) e vice-versa, e as tratativas de temporização proporcionadas pelo sistema operacional de tempo real FreeRTOS (FreeRTOS, 2020), utilizado apenas no microcontrolador.

No lado do servidor, implementou-se um *MQTT-SN Forwarder* como servidor de integração. A função do *MQTT-SN Forwarder* é permitir que um *MQTT-SN Gateway* externo à rede de sensores se comunique com eles. Para isso, o *Forwarder* inclui um cabeçalho na mensagem contendo o endereço do dispositivo na rede de sensores. Mais detalhes sobre o funcionamento do *Forwarder* podem ser encontrados em (Node-Soap, 2020). O *MQTT-SN Gateway* utilizado neste projeto é o Eclipse Paho MQTTSNGateway (Eclipse IoT project, 2020b), um programa de código aberto (*open-source*). Essa implementação do *Gateway* suporta conexão com *Forwarders* e tem suporte ao recurso de tópicos predefinidos, tornando-a ideal para o projeto. Como *MQTT Broker*, utilizou-se o Eclipse Mosquitto (Eclipse, 2020), também *open-source*. A arquitetura de comunicação projetada é apresentada na Figura A.9.



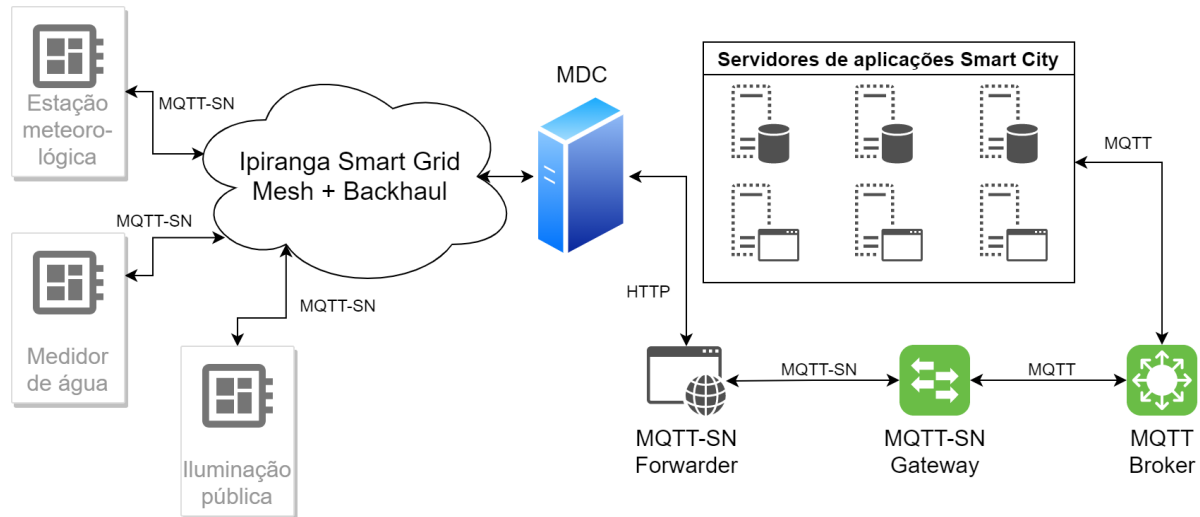


Figura A.9: Arquitetura do compartilhamento da rede SG com as aplicações de *Smart City*.

Os passos da comunicação entre dispositivos e servidores de aplicações seguem a seguinte sequência: os dados dos dispositivos são encapsulados em pacotes MQTT-SN, são transmitidos para a rede *Smart Grid*, trafegam pela rede e são entregues pelo sistema MDC para tratamento pelos módulos *Forwarder*, *Gateway* e *Broker*, os quais fazem respectivamente o controle de endereçamentos, a conversão de protocolos e a gestão das assinaturas e publicações nas filas de mensagens (tópicos). Para a comunicação no sentido inverso, dos servidores para os dispositivos, basta inverter a ordem dos passos.

A viabilidade técnica do compartilhamento foi validada inicialmente sobre um protótipo do sistema montado nos laboratórios do Lactec, o qual conta com todos os componentes envolvidos, desde os dispositivos até os servidores de aplicação, e posteriormente foram instalados na rede SG de Ipiranga. O resultado deste desenvolvimento está publicado no trabalho "*GRID-CITY: A Framework to Share Smart Grids Communication with Smart City Applications*", referência número 1, indicada nas contribuições deste trabalho, Seção 1.3.

#### A.4 COMUNICAÇÃO LORAWAN SOBRE AS REDES WI-SUN

As redes *mesh* baseadas na especificação IEEE 802.15.4 (como o Wi-SUN) possuem alto consumo energético, visto que o dispositivo precisa passar pelo processo de ingresso na rede e permanecer ligado para manter o roteamento. Isso não é um problema para aplicações ligadas à rede elétrica (como medidores de energia elétrica e relés de iluminação pública), mas prejudica aplicações que não dispõem de fonte constante de energia. Para viabilizar a inclusão de aplicações com restrições energéticas, a estratégia desenvolvida foi criar uma interface Wi-SUN para um *gateway* LoRaWAN (Semtech Corporation, 2024). Dessa forma, a rede em malha atua como *backhaul* para o *gateway* LoRaWAN. Como resultado, os dispositivos finais podem usar a tecnologia de comunicação LoRaWAN, que é eficiente em consumo energético, o que amplia as opções de uso compartilhado da rede.

O LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) é um padrão de rede ampla de baixa potência (LPWAN - *Low Power Wide Area Network*) e de longa distância, como o próprio nome diz. Ele utiliza a modulação proprietária LoRa (*Long Range*) e forma uma rede do tipo estrela, o que permite que os dispositivos sejam extremamente simples e permaneçam a maior parte do tempo no modo de baixo consumo (*sleep*), para economia de energia. Uma rede LoRaWAN é formada por dispositivos que comunicam diretamente com o *gateway* utilizando o protocolo

LoRaWAN. O *gateway* utiliza o protocolo UDP para comunicar com o servidor de rede (*Network Server*), o qual faz o controle de segurança e interconecta os dispositivos com seus servidores de aplicação. A principal opção para comunicação entre *gateways* LoRaWAN e um *Network Server* é o protocolo Semtech Packet Forwarder (Semtech-Cycleo, 2020). No entanto, as mensagens desse protocolo utilizam formato de dados JSON, o que utiliza muitos *bytes* para transmissão, tornando-o inadequado para uso direto na rede SG em estudo.

Para agregar o *gateway* LoRaWAN à arquitetura de comunicação do projeto foi desenvolvida uma aplicação *proxy*. O *proxy* introduz uma série de melhorias na comunicação entre o *gateway* e o *Network Server*, viabilizando o estabelecimento das conexões e a correta transferência dos pacotes de dados. As melhorias incluem: a compressão de mensagens, o controle de fragmentação, a criação de uma fila de pacotes a serem enviados aos dispositivos (*downlink buffer*) e a redução no tráfego de pacotes.

A Figura A.10 apresenta a arquitetura de comunicação do projeto com a inclusão do *proxy*. A parte do protocolo MQTT-SN permanece sem modificação. Os novos componentes são: o *gateway* LoRaWAN (caixa pontilhada), o servidor de integração e o *Network Server* (NS). Nesta nova arquitetura, os protocolos MQTT-SN e LoRaWAN (comprimido) trafegam pelo mesmo canal de comunicação HTTP SOAP, coexistindo mutuamente: isso é possibilitado por meio do uso de diferentes números de porta nos quadros de encapsulamento.

Para o teste da integração Wi-SUN / LoRaWAN foram adquiridos medidores de água comerciais com a tecnologia LoRaWAN. Para a validação da compatibilidade do sistema, foram utilizados equipamentos de três fabricantes distintos. Os medidores de água LoRaWAN foram instalados juntamente aos medidores de água Wi-SUN, ambos em série ao medidor pré-existente da Sanepar, como pode ser visto na Figura A.5 (pág. 83).

O *gateway* LoRaWAN desenvolvido no projeto foi montado em uma caixa com nível de proteção IP65 (à prova de poeira e protegido contra jatos de água), com ventilação forçada. O equipamento é composto por um rádio com protocolo Wi-SUN, um rádio com protocolo LoRaWAN, um microprocessador para a gestão dos protocolos e um modem celular para acesso remoto. O *gateway* foi instalado na torre de rádio existente na subestação de distribuição de energia de Ipiranga. A Figura A.11 ilustra os detalhes internos da caixa onde foram montados os componentes do *gateway* e o momento da instalação do *gateway* na torre de rádio.

O trabalho desenvolvido para a integração de um *gateway* LoRaWAN em uma rede Wi-SUN está publicado no artigo "*Enabling LoRaWAN Communication Over Wi-SUN Smart Grid Networks*", referência número 2, indicada nas contribuições deste trabalho, Seção 1.3.

## A.5 AVALIAÇÃO DO COMPARTILHAMENTO DA REDE SMART GRID

### A.5.1 Análise da Disponibilidade

Esta seção apresenta a análise da disponibilidade da rede de comunicação *Smart Grid* de Ipiranga, antes da incorporação de novas aplicações. O objetivo do estudo visa identificar a utilização da rede e determinar a sua capacidade de expansão.

Em função da rede *Smart Grid* da Copel em Ipiranga ser uma rede de produção, por questões de segurança, não foi cedido o acesso direto à base de dados do sistema de gerenciamento da rede, chamado de *Command Center*. Foi disponibilizado acesso somente a alguns relatórios e lista de dispositivos. Por este motivo, decidiu-se avaliar a utilização da rede por meio da métrica de ciclo de trabalho dos coletores de dados.

A Tabela A.2 exibe informações para 6 coletores de dados, os com identificadores (ID) 1 e 2 estão dispostos na região urbana, enquanto os demais estão na área rural. Para a determinação do ciclo de trabalho dos coletores, utilizou-se as informações de número médio de pacotes de

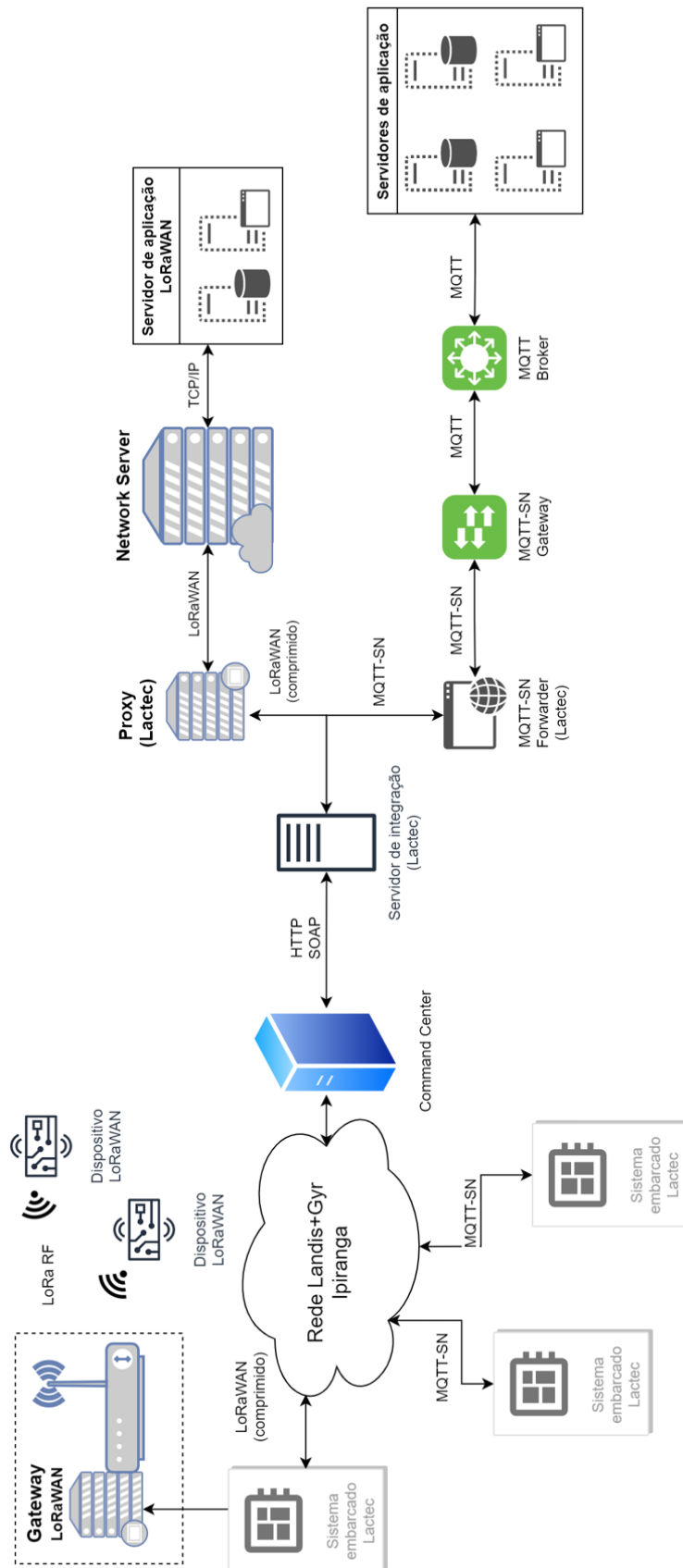


Figura A.10: Arquitetura da integração do Gateway LoRaWAN.



Figura A.11: Montagem do gateway LoRaWAN e local da instalação em campo.

entrada e saída diários de cada equipamento, considerando-se a taxa de transmissão de 200 kbps e mensagens com tamanho de 512 *bytes*. A Tabela A.2 exibe também o número de medidores inteligentes conectados em cada coletor e a latência média dos pacotes trafegados nos coletores, que representa o tempo médio entre o envio de uma mensagem até o retorno da respectiva resposta. O período de análise dos dados apresentados corresponde ao mês de janeiro de 2021.

Tabela A.2: Avaliação do ciclo de trabalho da rede por coletor.

| ID coletor | # medidores inteligentes | latência média (ms) | # pacotes entrada | # pacotes saída | ciclo de trabalho (%) |
|------------|--------------------------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|
| 1          | 677                      | 1184                | 21454             | 47233           | 1,59                  |
| 2          | 705                      | 961                 | 18484             | 33798           | 1,21                  |
| 3          | 324                      | 1105                | 25029             | 22703           | 1,10                  |
| 4          | 207                      | 730                 | 18065             | 21363           | 0,91                  |
| 5          | 250                      | 591                 | 16364             | 25671           | 0,97                  |
| 6          | 359                      | 651                 | 12357             | 21968           | 0,79                  |

O cálculo do ciclo de trabalho é efetuado da seguinte maneira: (i) calcula-se o tempo para transmissão de 512 *bytes* na velocidade de 200 kbps, em segundos; (ii) soma-se os números de pacotes de entrada e saída por coletor; (iii) multiplica-se os resultados de i e ii para obter o tempo total gasto na transmissão dos pacotes; (iv) divide-se o resultado de iii pelo número de segundos de um dia (86.400) para obter a fração de tempo utilizada nas transmissões; (v) e multiplica-se o resultado de iv por 100 para obtenção do valor percentual.

Aplicando-se os cálculos para o exemplo do coletor número 1 da Tabela A.2, temos:

$$(i) \quad 200 \text{ kbps} = 204800 \text{ bps} / 8 = 25.600 \text{ bytes/s}$$



$$\begin{aligned}
 & 512 \text{ bytes} / 25.600 = 0,02 \text{ segundos} \\
 \text{(ii)} \quad & 21.454 + 47.233 = 68.687 \\
 \text{(iii)} \quad & 68.687 * 0,02 = 1.373,74 \text{ seg.} \\
 \text{(iv)} \quad & 1.373,74 / 86.400 = 0,01589 \\
 \text{(v)} \quad & 0,01589 * 100 = 1,59\%
 \end{aligned}$$

Embora não se tenha obtido informações mais detalhadas sobre a ocupação da rede, os valores resultantes do cálculo do ciclo de trabalho nos coletores indica que a rede *Smart Grid* de Ipiranga possui baixa ocupação (Guo et al., 2014), portanto, tem disponibilidade para suportar novos equipamentos de comunicação.

#### A.5.2 Análise do Impacto no Tráfego da Rede com os Novos Dispositivos

Nesta seção é apresentado o resultado do estudo do comportamento da rede *Smart Grid* de Ipiranga com a inserção dos novos dispositivos desenvolvidos no projeto. A avaliação foi efetuada verificando-se a taxa de recebimento de mensagens dos comandos do tipo "contorno transparente", pois este é o tipo de comando utilizado pelo Command Center para o tráfego das mensagens de dispositivos de terceiros, diferentes dos medidores inteligentes.

Tendo em vista que o número de dispositivos protótipos instalados em campo para as aplicações desenvolvidas é limitado, sendo uma estação meteorológica, 3 medidores de água e 26 relés de iluminação pública (IP), estes últimos foram programados de modo que permitissem o ajuste da sua frequência de transmissão. Deste modo, fixou-se o tamanho das mensagens dos dispositivos de IP em 340 *bytes* e variou-se o intervalo das transmissões para simular a existência de mais equipamentos instalados. Foram utilizados os seguintes valores de intervalos de transmissão: 5 minutos, 1 minuto, 30 segundos e 10 segundos. Estes valores respeitam os limites de tráfego de mensagens definidos pelo fornecedor da rede, que são: o tamanho máximo do *payload* nas mensagens de 437 *bytes* e o intervalo mínimo entre duas transmissões consecutivas em um mesmo dispositivo de 10 segundos.

Os 26 dispositivos de IP foram instalados na área central da cidade no dia 10 de março de 2022, configurados inicialmente para transmissão de mensagens com intervalo de 5 minutos. A localização georreferenciada dos dispositivos é exibida na Figura A.12. Como pode ser observado, a maioria foi instalado em postes de iluminação nas ruas próximas à subestação de energia elétrica de Ipiranga e um foi instalado em um poste de balizamento dentro da própria subestação, indicado como um balão amarelo sobre o quadrado roxo na Figura A.12.

Os dados da média de mensagens de comando de contorno transparente recebidas no sistema *Command Center* iniciaram a ser registrados à partir do dia 1º de fevereiro de 2022, para se contabilizar quanto deste tipo de mensagens já trafegavam na rede. Pois era de conhecimento a existência de equipamentos de medição de consumidores industriais que fazem uso do mesmo método de comunicação.

A Tabela A.3 exibe os dados de avaliação coletados. Cada linha da tabela informa um período de teste analisado, incluindo-se a medição antes da instalação, que retrata as mensagens pré-existentes trafegadas na rede. Nas linhas dos testes são exibidos os valores médios diários para o número de mensagens transmitidas pelos equipamentos de IP, o número de mensagens recebidas no sistema, o número de mensagens recebidas considerando somente a aplicação de IP e a correspondente taxa de sucesso das mensagens de IP recebidas. A última coluna informa quanto que o número de mensagens adicionais, inseridas pelos equipamentos de IP, representam de acréscimo no ciclo de trabalho diário da rede, calculado para a taxa de transmissão de 200 kbps e mensagens de tamanho 340 *bytes*.

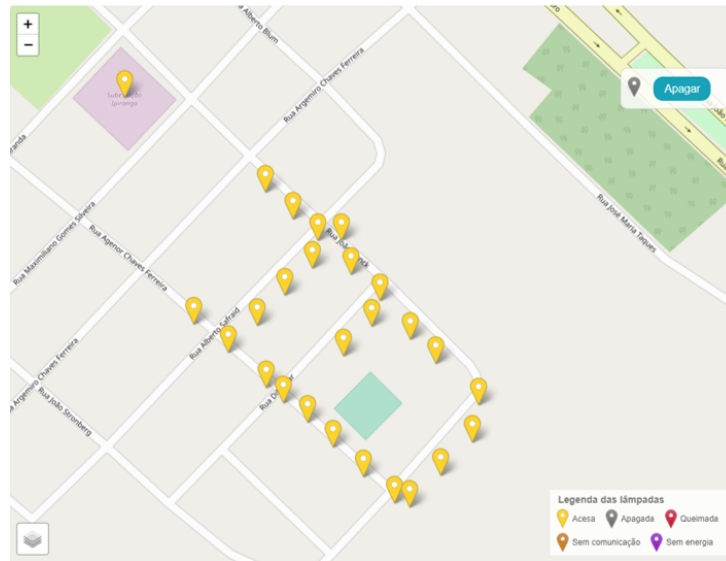


Figura A.12: Localização dos 26 relés de IP instalados na SG de Ipiranga.

Tabela A.3: Impacto no tráfego da rede com os novos dispositivos.

| Intervalo entre mensagens | Data Início | Data Fim   | # msg. TX por dia | # msg. RX por dia | # msg. IP por dia | taxa suces. média (%) | ciclo trab. adic. (%) |
|---------------------------|-------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| Antes da inst.            | 01/02/2022  | 09/03/2022 | 0                 | 3.950             | 0                 |                       |                       |
| 5 min.                    | 10/03/2022  | 26/04/2022 | 7.488             | 11.438            | 7.488             | 100,00                | 0,12                  |
| 1 min.                    | 27/04/2022  | 03/07/2022 | 37.440            | 39.700            | 35.750            | 95,49                 | 0,58                  |
| 30 seg.                   | 04/07/2022  | 17/07/2022 | 74.880            | 63.000            | 59.050            | 78,86                 | 1,15                  |
| 10 seg.                   | 18/07/2022  | 18/07/2022 | 224.640           | 128.000           | 124.050           | 55,22                 | 3,45                  |

Verificou-se que os dispositivos de IP comunicaram com o sistema *Command Center* via o coletor de dados ID 1, apresentado na Tabela A.2, que possui 677 medidores de energia conectados e um tráfego diário médio prévio próximo de 70.000 mensagens.

Analisando-se os resultados apresentados nota-se que, para o primeiro período de teste, intervalo de transmissão de 5 minutos, todas as mensagens transmitidas pelos novos dispositivos foram recebidas no sistema *Command Center*. Para o segundo período de teste, intervalo de 1 minuto, mesmo com um incremento de 37.440 mensagens diárias, a rede SG de Ipiranga apresentou uma taxa de sucesso de entrega de mensagens maior que 95%. Este resultado indica que a rede SG de Ipiranga, nas condições do coletor de dados ID 1, suporta um incremento no número de mensagens transmitidas de cerca de 50%.

Para os últimos testes, com intervalos de transmissão de 30 e 10 segundos, a taxa de sucesso do recebimento de mensagens reduz com maior intensidade a medida que aumenta-se o número de mensagens transmitidas para 74.880 e 224.640. Contudo, a rede SG manteve o seu funcionamento normal quanto à leitura das medições de energia. Isto pode ser explicado pelo fato do sistema *Command Center* fazer o controle das "lacunas" de dados (dados faltantes devido a falhas de entrega), os quais são requisitados posteriormente. Destaca-se ainda o fato de que toda a carga adicional de mensagens foi concentrada em uma região pequena da rede *Smart Grid*, e em um único coletor de dados.

Para concluir, os resultados mostram que o aumento de tráfego produzido pela inclusão de novas aplicações é possível de ser acomodado pela rede *Smart Grid* de Ipiranga. Contudo, para se determinar a capacidade de transmissão das redes Wi-SUN FAN de forma padronizada,

um estudo aprofundado deve ser conduzido, sendo uma das oportunidades de trabalho futuro desta pesquisa.

## A.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos com a execução do projeto *Smart City Ipiranga* comprovaram a viabilidade técnica da utilização das redes *Smart Grids* como meio de comunicação para aplicações voltadas ao conceito de *Smart Cities* e IoT. O projeto promoveu o desenvolvimento de um *framework* que possibilita a integração de novas aplicações sobre a rede AMI implantada no município de Ipiranga, bem como de um *gateway* LoRaWAN com aplicação *proxy* que viabiliza o uso da rede Wi-SUN FAN como *backhaul* para a instalação de redes LoRaWAN, o que expande as possibilidades de dispositivos a serem utilizados.

O compartilhamento da rede SG foi testado com base na implantação de três diferentes aplicações, quais sejam: controle de iluminação pública, medição remota de consumo de água e aquisição de dados de estações meteorológicas. O desempenho da rede SG de Ipiranga foi avaliado previamente e após a instalação dos novos dispositivos em campo, verificando-se que a rede é capaz de suportar um acréscimo de até 50% em novos dispositivos e serviços.

Estas soluções permitem que as concessionárias de energia acelerem o retorno do investimento com as SGs, ofereçam uma nova opção de comunicação para a sociedade e contribuam com o desenvolvimento das *Smart Cities* e da IoT.

Agradeço ao gerente, Eng. Tiago Augusto Silva Santana (Copel), ao coordenador, Sr. Lourival Lippmann Junior, e a toda a equipe de pesquisadores, técnicos e auxiliares que participaram no desenvolvimento do projeto de P&D *Smart City Ipiranga* e que contribuíram para a realização deste trabalho.