

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Lúcio Renê Prade

**UMA ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO COM MECANISMOS
PARA ATENDIMENTO DOS REQUISITOS DAS REDES ELÉTRICAS
INTELIGENTES RURAIS**

**Santa Maria, RS
2020**

Lúcio Renê Prade

**UMA ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO COM MECANISMOS PARA
ATENDIMENTO DOS REQUISITOS DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES
RURALS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

Orientadora: Profa. Dra. Alzenira da Rosa Abaide

**Santa Maria, RS
2020**

Prade, Lucio Rene
Uma Arquitetura de Comunicação com Mecanismos para
Atendimento dos Requisitos das Redes Elétricas
Inteligentes Rurais / Lucio Rene Prade.- 2020.
128 p.; 30 cm

Orientadora: Alzenira da Rosa Abaide
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2020

1. Rede Elétrica Inteligente 2. Arquitetura de
Comunicação 3. Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
Rural 4. LoRa I. Abaide, Alzenira da Rosa II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2020

Todos os direitos autorais reservados a Lúcio Renê Prade. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: luciorp@gmail.com

Lúcio Renê Prade

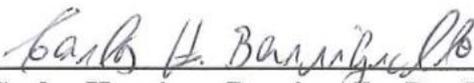
**UMA ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO COM MECANISMOS PARA
ATENDIMENTO DOS REQUISITOS DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES
RURAIS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

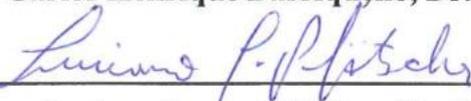
Aprovado em 19 de fevereiro de 2020:



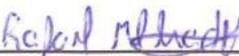
Alzenira da Rosa Abaide, Dr^a. (UFSM/RS)
(Presidente/Orientadora)



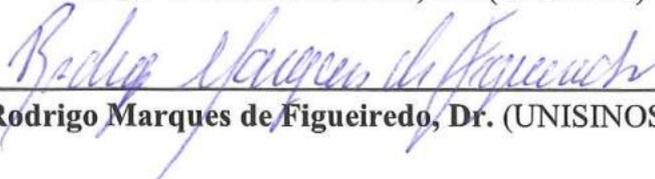
Carlos Henrique Barriquello, Dr. (UFSM/RS)



Luciano Lopes Pfitscher, Dr. (UFSC/SC)



Rafael Gressler Milbradt, Dr. (UFSM/RS)



Rodrigo Marques de Figueiredo, Dr. (UNISINOS/RS)

Santa Maria, RS
2020

“O assunto mais importante do mundo pode ser simplificado até o ponto em que todos possam apreciá-lo e compreendê-lo. Isso é – ou deveria ser – a mais elevada forma de arte.”

Sir Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

Agradecer a todos que ajudaram a construir este trabalho não é tarefa fácil. O maior perigo que se coloca para o agradecimento seletivo é não esquecer de mencionar nenhuma pessoa. Então, a todos meus amigos que, de uma forma ou de outra, contribuíram com esse trabalho, seja com sua amizade, sugestões ou mesmo apenas motivação, gostaria de expressar minha profunda gratidão.

Não poderia deixar de iniciar as homenagens nominais pela figura mais importante na realização desse trabalho, minha orientadora, Prof. Dra. Alzenira da Rosa Abaide, a quem cabe grande parte do mérito, pela sua paciência, que não foi pouca, pelos conselhos, pelo rumo nos momentos de indecisão, pela sua disponibilidade, dedicação e, acima de tudo, pela amizade: muito obrigado!

Agradeço, também, a todos os professores e colegas do grupo de pesquisa CEESP, em especial aos colegas e amigos Maicon Evaldt e Vinícius Uberti pelas inúmeras dicas e conselhos.

Deixo meu agradecimento também aos colegas Marcio Rosa da Silva, Rodrigo Marques de Figueiredo, Paulo Ricardo Pereira, Armando Keller, Samuel Lessinger, Eduardo Martins, João Olegário, Cassiano Campes e Cristiano Both, que sempre me auxiliaram e passaram tranquilidade nesse trabalho.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à minha família por todo o suporte psicológico prestado. Meus pais, Ronaldo e Marlene, minha esposa, Adriana, e minha filha, Rafaela, vocês são muito especiais e me dão muita força para superar cada novo desafio. E também a Deus, por ter iluminado meu caminho.

RESUMO

UMA ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO COM MECANISMOS PARA ATENDIMENTO DOS REQUISITOS DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES RURAIS

AUTOR: Ms. Lúcio Renê Prade
ORIENTADORA: Dra. Alzenira da Rosa Abaide

O atual cenário de transformação das redes de distribuição de energia elétrica sinaliza a necessidade de soluções alternativas para os sistemas de comunicação empregados no processo de torná-las inteligentes. Como premissa, essas alternativas deverão ser de fácil implementação e com custo acessível para permitir o uso em redes de distribuição rurais, onde, muitas vezes, o uso de outras tecnologias - como a celular - não está disponível. A crescente expansão da geração distribuída, associada à manutenção dos padrões de qualidade da energia, reforçam a necessidade da inserção dessas tecnologias de comunicação nas redes rurais. Com o propósito de prover uma alternativa para esse cenário, este trabalho propõe e implementa uma nova arquitetura de comunicação utilizando a topologia em malha baseada na tecnologia de rádio LoRa[®]. Essa arquitetura faz uso de mecanismos de priorização de pacotes para garantir a qualidade dos serviços que farão uso dessa rede e mecanismos de múltiplos canais, a fim de garantir os requisitos de comunicação necessários mesmo utilizando uma tecnologia de rádio com limitações de vazão. Essas características são importantes para que as várias aplicações e protocolos de uma Rede Elétrica Inteligente possam coexistir em um mesmo sistema de comunicação. O desdobramento da arquitetura originou um protocolo de roteamento adequado às limitações da tecnologia de rádio LoRa[®]. Também, gerou uma ferramenta de co-simulação para avaliar e dimensionar o sistema de comunicação das redes de distribuição que desejam fazer uso do sistema proposto. Ainda, como resultado, foram criados protótipos de *hardware* que atuam como nós de roteamento e interconexão com os equipamentos da rede elétrica, empregados na implementação do sistema de comunicação. A arquitetura proposta, se comparada às arquiteturas de redes LPWAN, a redes de sensores tradicionais e à arquitetura de redes celulares, apresenta ganhos significativos. Quanto à robustez do sistema, foi comprovado, com medidas de latência, *jitter* e perda de pacotes dentro do aceitável para aplicações DNP3, Modbus e NBR14522, índices estes garantidos pelo mecanismo de priorização de pacotes e pelos mecanismos de múltiplos canais de rádio. Com a aplicação de múltiplos canais, os índices de colisão de pacotes tiveram uma redução média de 25%. O sistema encontra-se na fase de protótipo, contudo, com os resultados obtidos, apresenta potencialidade de emprego no gerenciamento de sistemas de distribuição rurais inteligentes.

Palavras-chave: Rede Elétrica Inteligente, Arquitetura de Comunicação, LoRa[®], Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Rural.

ABSTRACT

A COMMUNICATION ARCHITECTURE WITH MECHANISMS TO MEET THE REQUIREMENTS OF RURAL SMART GRID

AUTHOR: Lúcio Renê Prade, MsC.
ADVISER: Alzenira da Rosa Abaide, PhD.

The current transformation scenario in power distribution networks signals the need for alternative solutions in communication systems employed in making them intelligent. As a premise, these alternatives should be easy to implement and affordable to allow their adoption in rural distribution networks, where the use of other technologies, such as mobile, is often not available. The increasing expansion of distributed generation associated with the maintenance of energy quality standards justifies the insertion of digital technologies in rural networks to achieve these goals. In this sense, this study introduces a new communication architecture with the Mesh topology, based on LoRa technology. The architecture adapts packet prioritization and multiple channel mechanisms to ensure the communication requirements necessary for the services. Several applications and protocols of a Smart Grid can coexist in the same communication system. The deployment of the architecture gave rise to a routing protocol adapted to the limitations of the radio technology used. Moreover, this study generated a co-simulation tool to evaluate and measure the automation projects in distribution networks, which aim to use the proposed system, besides the creation of hardware prototypes used in the implementation of the communication system. The gains of the proposed architecture can be observed when compared to traditional LPWAN networks and cellular technologies. The robustness of the system was evaluated with average latency measurement within the acceptable range for DNP3, Modbus, and NBR14522 applications. These indices are guaranteed by the packet prioritization and the multiple channels mechanisms. Furthermore, by applying the various channels mechanism, packet collision rates decreased by an average of 25%. The results prototyped show its potential employment in the management of intelligent rural distribution systems.

Index Terms: Smart Grid, Communication Architecture, LoRa®, Rural Electric Power Distribution System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Hierarquia DNP3.....	35
Figura 2 – Estrutura da mensagem do protocolo DNP3	36
Figura 3 – Ilustração de uma rede Mesh	44
Figura 6 – Uma forma de onda de variação linear que codifica um símbolo e sua representação sinusoidal que aumenta ou diminui a frequência linearmente.....	47
Figura 7 – Relação entre tempo de símbolo, fator de espalhamento e largura de banda selecionada	48
Figura 8 – Camadas da tecnologia LoRa®	50
Figura 9 – Estrutura de uma rede LoRaWAN básica	51
Figura 10 – Comparativo dos dispositivos e suas classes	53
Figura 11 – Teste de comunicação DNP3 sobre rede LoRaWAN	54
Figura 12 – Modelo da Arquitetura Proposta.....	67
Figura 13 – Modelo de camadas da arquitetura proposta	68
Figura 14 – Estados de um nó ao ingressar na rede mesh.....	75
Figura 15 – Esquema de clusterização dos nós da rede	77
Figura 16 – Diagrama de sequência para o envio de pacotes e roteamento.....	80
Figura 17 – Sistema de filas de prioridade para o envio de pacotes.....	81
Figura 18 – Fluxo de co-simulação, apresentando as informações trocadas entre as ferramentas de simulação da rede elétrica e da rede de comunicação	84
Figura 19 – Estrutura de interfaces da ferramenta OpenDSS	86
Figura 20 – Estrutura interna do simulador OpenDSS	86
Figura 21 – Esquema do simulador do sistema de comunicação	89
Figura 22 – Estrutura do algoritmo de co-simulação implementado.....	91
Figura 23 – Estrutura de classes do script (Mestre) da ferramenta de co-simulação.....	92
Figura 24 – Diagrama de blocos de um nó protótipo e implementação de teste.....	94
Figura 25 – Topologia da rede Mesh utilizada para avaliar a arquitetura proposta	98
Figura 26 – Trechos da rede de distribuição rural utilizada no estudo de caso.....	107
Figura 27 – Diagrama de Classes detalhado da ferramenta de Co-simulação desenvolvida.	123
Figura 28 – Imagem aérea da rede de distribuição rural, com a marcação das estações rádio bases da rede celular e a divisão em cluster após o particionamento do estudo de caso.	127
Figura 29 – Imagem aérea da rede de distribuição rural estudada, com a simulação (em amarelo) do número de gateways LoRAWAN necessários para a cobertura.	128

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Latência no envio de pacotes DNP3 sobre LoRaWAN.....	55
Gráfico 2 – Latência dos pacotes DNP3 nos testes realizados (SF = 7)	100
Gráfico 3 – Latência dos pacotes Modbus nos testes realizados (SF = 7)	101
Gráfico 4 – Latência dos pacotes NBR 14522 nos testes realizados (SF = 7)	102
Gráfico 5 – Latência dos pacotes DNP3 com o mecanismo de priorização de pacotes	103
Gráfico 6 – Latência dos pacotes DNP3 com o emprego da Técnica de Múltiplos Canais de Rádio	104
Gráfico 7 – Impacto do número de saltos na latência média e perda de pacotes (BW =125kHz e SF = 7)	105
Gráfico 8 – Impacto do número de saltos na latência média e perda de pacotes (BW = 250kHz e SF = 7 e Múltiplos Canais)	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Formato do quadro Modbus	39
Quadro 2 – Taxa média de dados para algumas aplicações em uma rede elétrica inteligente .	40
Quadro 3 – Comparação da tecnologia LoRa x SigFox.....	43
Quadro 4 – Taxa de dados Rb em bps, variando SF e BW.....	49
Quadro 5 – Comparativo LoRaWAN x ZigBee	51
Quadro 6 – Comparativo das arquiteturas de comunicação para REIs.....	57
Quadro 7 – Síntese do comparativo das tecnologias não guiadas	64
Quadro 8 – Trabalhos relacionais e suas contribuições	65
Quadro 9 – Especificação do formato do pacote usado pelo protocolo de roteamento.....	71
Quadro 10 – Configurações da rede de testes no simulador do cenário de testes	99
Quadro 11 – Parâmetros da simulação.....	108
Quadro 12 – Síntese dos resultados da co-simulação após o particionamento em 3 clusters	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3G	Terceira Geração de Tecnologias Celular
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACK	Abreviatura de <i>Acknowledge</i> (Aceite)
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i> (Infraestrutura de Medição Avançada)
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APCI	<i>Application Protocol Control Information</i> (Informação de Controle do Protocolo de Aplicação)
APDU	<i>Application Protocol Data Unit</i> (Unidade de Dados do Protocolo de Aplicação)
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> (Código Padrão Americano para Intercâmbio de Informações)
ASDU	<i>Application Service Data Unit</i> (Unidade de Dados do Serviço de Aplicação)
BW	<i>Bandwidth</i> (Largura de Banda)
COM	<i>Component Object Model</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CTS	<i>Clear to Send</i> (Pronto para Enviar)
DA	<i>Distribution automation</i> (Automação do Sistemas de Distribuição)
DERMS	<i>Distributed energy resource management system</i>
DSDV	<i>Destination-Sequenced Distance-Vector Routing</i>
DNP3	<i>Distributed Network Protocol 3.0</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
EIGRP	<i>Enhanced Interior Gateway Routing Protocol</i>
FSK	<i>Frequency-shift keying</i> (Modulação por Chaveamento de Frequência)
GD	Geração Distribuída
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i> (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Intenet das Coisas)
ISM	<i>Industrial, Scientific & Medical</i> (Bandas de Frequência Industrial, Científica e Médica)
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LLN	<i>Low power and Lossy Network</i> (redes de baixa potência e com perdas conhecidas)
LPDU	<i>Link Protocol Data Unit</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i> (Rede de área ampla de baixa potência)
MAC	<i>Media Access Control</i> (Controle de Acesso ao Meio)

NBR	Norma Técnica brasileira
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i> (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia)
NS-3	<i>Network Simulator 3</i>
OpenDSS	<i>Open Distribution System Simulator</i>
OTAA	<i>OverThe Air Activation</i> (Ativação sobre o Ar)
PHY	<i>Physical Layer</i> (Camada Física)
PLC	<i>Power Line Communication</i> (Comunicação sobre a rede elétrica)
PV	Abreviatura de <i>Photovoltaic</i> (Fotovoltaica)
QoS	<i>Quality of Service</i> (Qualidade de Serviço)
SDN	<i>Software Defined Networking</i> (Redes Definidas por Software)
SF	<i>Spreading Factor</i> (Fator de Espalhamento)
REI	Rede Elétrica Inteligente
RF	Radio Frequência
RPL	<i>Routing Protocol for Low power and Lossy Networks</i>
RSSI	<i>Radio Signal Strength Indicator</i> (Indicador de Intensidade do Sinal de Rádio)
RTS	<i>Request to Send</i> (Solicitação para Transmitir)
RTT	<i>Round Trip Time</i> (Tempo de Ida e Volta)
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i> (Terminal Remoto)
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
TPDU	<i>Transport Protocol Data Units</i>
TSDU	<i>Transport Service Data Unit</i>
TTL	<i>Time to Live</i> (Tempo de vida)
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
WMN	<i>Wireless Mesh Network</i> (Rede Sem Fio em Malha)
VPP	<i>Virtual Power Plant</i> (Usina Virtual de Energia)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	25
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES.....	25
1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO.....	28
1.3 OBJETIVOS	30
1.4 INOVAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES	31
1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	31
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E BASES TÉCNICAS.....	33
2.1 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO E SUAS APLICAÇÕES NAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	33
2.1.1 IEEE 1815 - <i>Distributed Network Protocol version 3 (DNP3)</i>	34
2.1.2 Modbus	38
2.1.3 ABNT NBR14522 - Intercâmbio de Informações para Sistemas de Medição de Energia Elétrica	39
2.1.4 Aspectos comuns aos protocolos e serviços.....	40
2.2 TOPOLOGIAS DE REDES E MEIOS DE INTERCONEXÃO.....	41
2.2.1 Redes LPWAN.....	42
2.2.2 Redes Mesh.....	44
2.3 REDES BASEADAS EM LoRa®	45
2.3.1 A Tecnologia LoRa®	46
2.3.2 A Rede LoRaWAN.....	49
2.3.3 Avaliação Preliminar da Rede LoRaWAN.....	54
2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO.....	56
3 TRABALHOS RELACIONADOS E ESTADO DA ARTE	57
3.1 ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	57
3.2 USO DO LORA® COMO MEIO DE COMUNICAÇÃO EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	59
3.3 APLICAÇÕES DO LORA® MESH E PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO	60
3.4 CO-SIMULADOR PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	62
3.5 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO DE ACESSO AO MEIO E CLUSTERIZAÇÃO	63
3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO.....	64
4 ARQUITETURA PROPOSTA.....	67

4.1 MODELO DA ARQUITETURA PROPOSTA.....	67
4.1.1 Camada Física	68
4.1.2 Camada de Acesso ao Meio (MAC)	69
4.1.3 Camada de Rede.....	70
4.1.3.1 Protocolo de Roteamento Desenvolvido	71
4.1.3.2 Endereçamento.....	71
4.1.3.3 O Formato do Pacote.....	71
4.1.3.4 Encaminhamento.....	72
4.1.3.5 Pacote Hello.....	73
4.1.3.6 Tabela de Encaminhamento.....	73
4.1.3.7 Pacotes de atualização das tabelas de roteamento.....	74
4.1.3.8 Métricas	74
4.1.3.9 Estados dos Nós da Rede.....	74
4.1.4 Aplicação	76
4.1.5 Estrutura de Rede	76
4.1.6 Atraso de Propagação do Pacote	77
4.1.7 Visão Geral do Funcionamento da Arquitetura.....	79
4.2 COEXISTÊNCIA DE SERVIÇOS	80
4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO.....	81
5 FERRAMENTA DE CO-SIMULAÇÃO E PROTÓTIPO DE <i>HARDWARE</i>	83
5.1 PROCESSO DE CO-SIMULAÇÃO.....	83
5.2 SIMULADOR DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO	85
5.3 SIMULADOR DO SISTEMA DE COMUNICAÇÃO.....	88
5.4 MODELO DE CO-SIMULAÇÃO.....	90
5.5 PROTÓTIPO DE <i>HARDWARE</i>	93
5.6 CONSIDERAÇÃO SOBRE O CAPÍTULO	95
6 VALIDAÇÃO DA TESE E RESULTADOS	97
6.1 TESTE DE DESEMPENHO DA ARQUITETURA	97
6.1.1 Cenário de Teste.....	98
6.1.2 Caso Base Rede Sem Múltiplos Canais de Rádio e Priorização de Pacotes ...	99
6.1.3 Avaliação do Impacto da Técnica de Priorização de Pacotes	102
6.1.4 Avaliação do Impacto das Técnicas Multiplexação de Frequências.....	103
6.1.5 Avaliação do Impacto do Número de Saltos.....	105
6.2 ESTUDO DE CASO DE UMA REDE RURAL	106

6.2.1 Caracterização do Estudo de Caso	107
6.2.2 Análise dos Resultados do Estudo de Caso.....	108
6.3 DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS.....	109
7 CONCLUSÃO.....	111
7.1 RESPOSTAS DAS QUESTÕES FUNDAMENTAIS.....	112
7.2 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS	114
7.3 TRABALHOS FUTUROS	115
7.3 PUBLICAÇÕES E PARTICIPAÇÕES EM EVENTOS	115
REFERÊNCIAS.....	117
APÊNDICE A – DIAGRAMA DE CLASSES DO CO-SIMULADOR.....	123
APÊNDICE B – CÓDIGO PYTHON DO SIMULADOR DNP3 USADO NOS TESTES.....	125
APÊNDICE C – REDE DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADA E COBERTURA DA REDE CELULAR.....	127
APÊNDICE D – REDE DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADA E SIMULAÇÃO DE GATEWAYS LORAWAN PARA COBERTURA	128

1 INTRODUÇÃO

Redes Elétricas Inteligentes em áreas Rurais são um grande desafio proporcionado pela estrutura do sistema elétrico brasileiro, apresenta-se aqui a contextualização e discute-se os problemas e desafios relacionados à implementação dessas redes em áreas rurais, principalmente no que se refere aos sistemas de comunicação empregados nesse tipo de rede, bem como a motivação para a pesquisa dessa tese. Em um segundo momento, busca-se apresentar os objetivos e contribuições do trabalho para, por fim, apresentar uma visão geral de sua organização e a estrutura dos capítulos para guiar a leitura.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

O termo Rede Elétrica Inteligente (REI), apesar de bem difundido, ainda gera dúvidas sobre sua definição técnica. A Rede Elétrica Inteligente não deve ser entendida como uma entidade ou um conceito fechado e imutável, mas como uma visão de modernização do Sistema Elétrico de Potência (SEP) a ser complementada, segundo as necessidades do mercado onde ela está inserida. Essa modernização do Sistema Elétrico de Potência, que passa por geração, transmissão, distribuição e usuário final, junto com o desenvolvimento de novas tecnologias de comunicação e de processamento de dados dos agentes do SEP, são aspectos determinantes para formar o conceito de Rede Elétrica Inteligente, permitindo o controle e o monitoramento do sistema como um todo. Sendo assim, a REI pode ser entendida como a convergência e integração de tecnologia da informação, capacidade de comunicação e sistema de potência (BOER; VERHAEGH, 2016).

Uma REI tem como alguns dos principais serviços: a automação da distribuição, que permite o monitoramento e manobras de forma remota; o controle de resposta à demanda, que, de maneira simplificada, é o controle de carga de acordo com a disponibilidade de geração; a medição eletrônica do consumo de energia elétrica; a restauração automática do sistema de distribuição e o gerenciamento da geração distribuída de forma a garantir a qualidade de energia. Vários outros serviços podem ser acrescentados a uma Rede Elétrica Inteligente, como o gerenciamento de veículos elétricos, a tele-proteção e o gerenciamento de fontes de energia distribuída (DERMS), a depender da necessidade e do contexto em que a rede elétrica se encontra (IRFAN *et al.*, 2017; RODRIGUEZ-MOLINA; KAMMEN, 2018).

Com relação ao segmento de distribuição de energia elétrica, o qual é o contexto deste estudo, implementações de Redes Elétricas Inteligentes em áreas de grande concentração de clientes já são realidade. Normalmente, essas redes de distribuição inteligentes, implementam apenas alguns dos serviços, sendo os mais comumente observados a Infraestrutura Avançada de Medição (AMI - *Advanced Metering Infrastructure*) e a Automação da Distribuição (DA - *Distribution Automation*), e, posteriormente, agregam novas funcionalidades e soluções, como, o gerenciamento de energia distribuída (DERMS - *Distributed Energy Resource Management System*) para locais com grande concentração de geração distribuída ou a auto recuperação da rede para manter clientes críticos com energia da forma mais ininterrupta possível. Porém, um dos grandes entraves dessa modernização das redes de distribuição consiste no elevado custo da adição das tecnologias digitais necessária para implantar uma rede inteligente. Pesquisas de mercado apontam que até 33% do custo de operação de um sistema elétrico inteligente pode estar associado apenas à infraestrutura de comunicação necessária para a operação de uma rede elétrica inteligente (RAIFORD SMITH, 2017).

Muitas vezes, esse investimento em infraestrutura e o custo com contratos de uso dos sistemas de comunicação de terceiros são proibitivos e não viabilizam às concessionárias de energia implantar sistemas de comunicação para interconectar os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs) já instalados na rede, permanecendo estes apenas com suas funcionalidades mínimas, sem possibilidade de monitoramento ou telecomandos. Isso se torna mais evidente quando o cenário consiste em redes de distribuição rurais, onde as distâncias entre o centro de operação e os IEDs é maior. Na maioria dos casos, a densidade de clientes é baixa e, muitas vezes, a opção de escolha dos sistemas de comunicação a ser empregado fica restrita a soluções de elevado custo financeiro, como enlaces dedicados de rádio ou satélite, sem possibilidade de uso das redes celulares.

Observando o cenário, entende-se que é necessária a busca por novas soluções de comunicação que permitam reduzir os custos de operação e, principalmente, de implementação de uma REI. Para modificar os custos de implantação, são necessários sistemas que permitam a coexistência de serviços, que suportem agregar novos dispositivos inteligentes e protocolos e também suportem os dispositivos inteligentes já instalados na rede elétrica e seus protocolos. Estes custos de implantação também podem ser reduzidos se novos mecanismos de comunicação que não exijam infraestruturas complexas forem adotados. Já os custos de operação poderão ser reduzidos com o uso de infraestruturas de comunicação que não dependam de locação, licenças de uso do espectro de rádio frequência ou pagamento de taxas. Mesmo assim, essas novas soluções de comunicação para Redes Elétricas Inteligentes deverão

ser robustas e confiáveis o suficiente para garantir a conectividade e, por consequência, estabilidade do sistema elétrico que elas interconectam.

Indo ao encontro dessa necessidade de comunicação de baixo custo em longas distâncias e para uma grande quantidade de dispositivos, surgiram as redes denominadas *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) e novas tecnologias de comunicação sem fios, que permitem a sua implementação. Essas redes representam um novo paradigma de comunicação, desenvolvidas originalmente para aplicações de *Internet das Coisas* (IoT), complementando a tecnologia de redes celulares tradicionais e a tecnologia de redes sem fio de curto alcance. As tecnologias sem fio desenvolvidas para as redes LPWAN oferecem um conjunto de recursos que inclui conectividade para grandes áreas, *hardware* de baixo consumo de energia e baixa taxa de dados – recursos estes que não eram fornecidos por tecnologias sem fio legadas e que poderão ser explorados em novas arquiteturas de comunicação para as mais diversas aplicações (SANCHEZ-IBORRA; CANO, 2016).

Na literatura atual, encontram-se pesquisas que abordam esse problema da comunicação em Redes Elétricas Inteligentes propondo novas arquiteturas de comunicação. O trabalho de Kong e Song (2019), por exemplo, aborda a comunicação para veículos elétricos através da rede celular. Já os trabalhos de Gope e Sikdar (2019) e Abbasinezhad-Mood *et al.* (2019) tratam do uso de uma rede de *Internet das Coisas* para comunicação de medidores inteligentes. Nazeri *et al.* (2019) e Liu *et al.* (2019) tratam de sistemas de comunicação via rádio e rede celular para aplicações de controle de geração por resposta pela demanda. Rodriguez-Molina (2018) apresenta em seu trabalho uma proposta de integração de diferentes dispositivos e protocolos usados em REIs através da implementação de um *middleware* distribuído para tradução dessas diferentes formas de comunicação sobre uma rede TCP/IP. Essas são apenas algumas entre várias pesquisas que abordam o tema. O que se pode perceber é que a maioria das iniciativas estuda ou implementa o sistema de comunicação para uma aplicação específica dentro do contexto das REIs. Na maioria das vezes, o sistema de comunicação é baseado em redes tradicionais que exigem uma infraestrutura complexa, não sendo factível seu uso em redes de distribuição rurais onde essa infraestrutura não existe. Alguns trabalhos exploram as novas redes para IoT, porém, basicamente para o monitoramento da rede elétrica através de uma rede de sensores. São raras as pesquisas atuais que buscam prover uma infraestrutura de comunicação com suporte aos diversos serviços necessários a uma REI em uma mesma rede de comunicação. No caso de prover uma rede de comunicação para monitoramento e controle tendo como base uma rede de IoT, não foram encontradas referências na literatura, demonstrando aí a necessidade de explorar esse contexto.

Finalizada a contextualização do cenário das Redes Elétricas Inteligentes e do desafio de prover conectividade robusta, confiável e de baixo custo para os elementos dessa rede e um dos possíveis caminhos a se explorar com o uso de tecnologias para *Internet* das Coisas, apresenta-se, a seguir, a motivação, a questão fundamental da tese e a hipótese que justificam a pesquisa e o desenvolvimento da tese.

1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Diante do exposto até agora sobre redes elétricas inteligentes, observa-se que uma das maiores necessidades e também um desafio técnico é a conectividade entre os agentes envolvidos (VARELA *et al.*, 2015). O monitoramento das redes de distribuição em tempo real e seu controle através de telecomandos são características cada vez mais necessárias e exigidas para alcançar os padrões de qualidade esperados pelos clientes e pelos órgãos reguladores, estabelecidas na Resolução Normativa ANEEL nº 414/2010 artigo 148, e detalhadas na Resolução Normativa ANEEL nº 479, de 3 de abril de 2012.

Especificamente nas redes de distribuição rurais, houve uma mudança no perfil de consumidor conectado nessa rede: surgiram as indústrias rurais, os clientes irrigantes e as características das cargas dos consumidores que passaram a utilizar os mesmos equipamentos dos clientes da área urbana. A expansão não controlada da geração distribuída nas redes de distribuição é outro ponto que reforça a necessidade de automação e comunicação confiável nessas redes (YUAN, 2015). Nesse aspecto, uma infraestrutura de comunicação é capaz de prover monitoramento e atuação em tempo real, permitindo, por exemplo, ajustes na seletividade dos dispositivos de proteção para diferentes configurações de gerações conectadas à rede, despacho eficiente dessas fontes e até mesmo o funcionamento de forma ilhada em *microgrids* nos casos de contenção.

Hoje os sistemas de distribuição de energia elétrica com seus equipamentos especiais, também conhecidos como os IEDs (religadores, reguladores de tensão, relés de proteção, seccionadoras telecomandadas e equipamentos de medição), são caracterizados, na sua maioria, por comunicações *broadcast*. Essas comunicações utilizam protocolos baseados no modelo pergunta e resposta, como o IEEE 1815 (DNP3), Modbus e ABNT NBR-14522, em que informações são enviadas por difusão, sobrecarregando, assim, a infraestrutura de comunicação. Os sistemas de comunicações empregados carecem de um nível maior de segurança dos dados e, principalmente, de maior disponibilidade (confiabilidade) de conexão. Também é comum o excesso de operações locais destes equipamentos IEDs por falta de

comunicação ou inexistência de um sistema de controle interconectado, principalmente em redes de distribuições rurais.

Quando busca-se possibilidades de comunicação para o uso nesse cenário, é possível observar que novas tecnologias têm sido propostas para solucionar os problemas da arquitetura da *internet* convencional e, recentemente, têm alavancado várias pesquisas voltadas para a *Internet* das Coisas (YAQOOB *et al.*, 2017). Mesmo assim, em uma área específica, como os sistemas de energia elétrica, as propostas de aplicação de arquiteturas da *Internet* das Coisas ainda são bastante reduzidas.

Assim, esta tese tem como motivação investigar e propor o uso de tecnologias de comunicação sem fio, originalmente desenvolvidas para redes de sensores, para prover conectividade em redes de distribuição elétrica rurais, permitindo que se implementem os serviços necessários para uma Rede Elétrica Inteligente.

Formulou-se a seguinte pergunta de pesquisa para nortear o trabalho: **Quais são as características fundamentais de uma arquitetura de comunicação sem fio na banda ISM (*Industrial, Scientific & Medical*), para atender as necessidades de comunicação de uma rede elétrica inteligente em área rural?** No intuito de auxiliar nesta investigação, propôs-se a seguinte hipótese: **A arquitetura de comunicação para prover conectividade em uma rede elétrica de distribuição rural deve ser modelada tendo como premissa a flexibilidade, permitindo a coexistência de vários serviços (protocolos) em um mesmo meio físico, e o uso de topologia em malha para aproveitar a redundância de enlaces (se existente) e ampla cobertura geográfica, além de fazer uso de mecanismos de múltiplos canais que permitam alcançar os requisitos de latência necessários às aplicações, mesmo usando tecnologia de rádio com limitações de taxa de dados como a LoRa[®].**

Para prover essa solução, nessa tese o autor propõe empregar como meio físico dois canais de rádio com a modulação LoRa[®], permitindo o uso de técnicas de segmentação dos dados para garantir uma maior vazão de pacotes. Faz uso da topologia em malha devido à robustez provida pela possibilidade de vários enlaces de rádio para um mesmo destino e ampliação da área de cobertura geográfica. Também implementa um mecanismo de filas de prioridade para garantir a qualidade de serviços na REI com maior criticidade. Baseado no desdobramento da hipótese, três questões técnicas são respondidas ao longo da tese.

- Quais os ganhos esperados com o emprego da nova arquitetura se comparado ao uso de uma rede LPWAN ou uma rede de sensores tradicionais?

- Como avaliar a capacidade da arquitetura atender os diferentes cenários e necessidades de conectividade das mais diversas redes de distribuição de energia elétrica rurais?
- Qual o impacto que a técnica de múltiplos canais de rádio, em conjunto com as filas de prioridades, acarreta a arquitetura?

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é especificar uma nova arquitetura de comunicação baseada nos paradigmas de *Internet* das Coisas, tendo como ponto de partida as redes em malha e a tecnologia de comunicação sem fio de longo alcance e baixa potência, LoRa[®]. Essa arquitetura deve prover conectividade aos dispositivos especiais (IEDs - *Intelligent Electronic Device*, no português, Dispositivo Eletrônica Inteligente) instalados nas redes de distribuição rurais, permitindo a coexistência dos vários serviços e seus protocolos. Isso fará com que seja possível a implementação mínima de uma rede elétrica de distribuição inteligente em área rural. A conectividade provida pela arquitetura deve suprir as características mínimas de latência, disponibilidade e confiabilidade para uso nesse tipo de aplicação.

Considerando a complexidade e a abrangência do sistema elétrico de potência, o escopo desse trabalho limita-se à comunicação de última milha em redes de distribuição rurais, ou seja, de um ponto de acesso na rede de comunicação da concessionária até os inúmeros dispositivos eletrônicos inteligentes presentes ao longo da rede de distribuição. Para atingir a contribuição proposta no objetivo geral da tese, fez-se necessário algumas contribuições pontuais, que são listadas abaixo na forma de objetivos específicos tratados nesse trabalho:

- Avaliar os requisitos de comunicação para os principais elementos envolvidos na automação, medição e gerenciamento da rede de distribuição, identificando protocolos e limitações técnicas que servirão de base para a modelagem da arquitetura;
- Avaliar topologias de redes que empregam como meio físico a tecnologia LoRa[®], bem como suas limitações, e propor a configuração de uma topologia que atenda às necessidades da arquitetura projetada;
- Avaliar protocolos de acesso ao meio e roteamento e adaptá-los às características do meio físico provido pela tecnologia LoRa[®] da topologia escolhida para a arquitetura;

- Desenvolver um modelo computacional para simulação da infraestrutura de comunicação usando a tecnologia LoRa[®], validá-lo e integrá-lo à ferramenta de simulação de sistemas de distribuição de energia elétrica OpenDSS, possibilitando, assim, uma ferramenta para projeto, dimensionamento e otimização da infraestrutura de comunicação;
- Realizar um estudo prático através da implementação real de uma infraestrutura de comunicação em escala, usando os protótipos para validar a aplicação da metodologia e da modelagem computacional.

1.4 INOVAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES

Após a revisão bibliográfica intensa sobre o assunto, ressalta-se como os principais aspectos de inovação e contribuições científicas desta tese os seguintes pontos que não foram encontrados em trabalhos:

- Uma rede de comunicação que necessita de pouca infraestrutura e baixo custo para implementação, provendo cobertura a grandes distâncias e podendo ser utilizada em locais onde não existe cobertura da rede celular;
- Aumento da confiabilidade nos *links* de comunicação utilizados atualmente, com a implementação de mecanismos de redundância como dois canais de rádio por dispositivo;
- A validação de uma nova arquitetura de rede em malha para prover infraestrutura de comunicação para redes *smart grid* que possibilite o uso de múltiplos protocolos, coexistência de serviços à integração de equipamentos legados;
- Desenvolvimento de uma ferramenta para co-simulação e dimensionamento da rede de comunicação baseada no modelo de rede elétrica;
- Desenvolvimento dos protótipos de *hardware*, *software* e protocolo para implementação da arquitetura proposta.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Este trabalho foi dividido em sete capítulos, incluindo este introdutório, no qual é feita a contextualização do tema abordado na tese e são definidos os objetivos do trabalho. O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica do trabalho, em que serão caracterizados os

sistemas elétricos inteligentes e apresentados os conceitos e bases técnicas envolvidas nas discussões da tese. O capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica, destacando os trabalhos relacionados e o estado da arte das pesquisas nessa área e explicando a contribuição de cada um desses trabalhos para a efetivação da hipótese dessa tese. O capítulo 4 apresenta a contribuição do trabalho, a proposta da arquitetura diferenciada, que faz uso de sistemas de múltiplos rádios e possibilita a coexistência de serviços. Aqui, são detalhadas suas camadas e características e modelado matematicamente seu comportamento. No capítulo 5, explica-se o funcionamento da ferramenta de co-simulação proposta para a validação da arquitetura. Essa ferramenta também servirá para dimensionar e testar os projetos de redes de comunicação que pretendem fazer uso da arquitetura proposta. No capítulo 6, são apresentados e discutidos os resultados, onde serão apontadas as implicações da arquitetura para a aplicação em um sistema real. No capítulo 7, são apresentadas conclusões com base nos resultados obtidos, contribuições e sugestão de continuidade da pesquisa dessa tese.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E BASES TÉCNICAS

Neste capítulo, apresenta-se uma síntese da fundamentação teórica e das bases técnicas relevantes, que irão permitir acompanhar o desenvolvimento dos próximos capítulos deste trabalho. A fundamentação foi dividida em quatro partes principais, começando com os protocolos e serviços utilizados em redes elétricas inteligentes e passando pelas topologias e tecnologias de redes que podem prover a comunicação. Em seguida, a revisão aprofunda-se nas redes baseadas na tecnologia LoRa[®], justificando esta escolha para o trabalho e também apresentando suas limitações. Seguindo, explora-se os conceitos necessários sobre redes, suas topologias e os protocolos de roteamento nesse tipo de rede. No capítulo, ainda são retomados alguns conceitos sobre ferramentas para simulação e co-simulação, que darão suporte ao teste e validação da arquitetura proposta no decorrer do trabalho. Finalizando, retoma-se os pontos relevantes para ajudar o leitor a criar sua linha de raciocínio.

2.1 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO E SUAS APLICAÇÕES NAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Em uma rede elétrica inteligente, são empregados diferentes equipamentos eletrônicos inteligentes (IEDs) e, por consequência, diferentes tecnologias de comunicação para atender a todos os segmentos dessa rede. O emprego de tecnologias heterogêneas é uma característica muito presente quando se detalha a implementação de uma rede inteligente. Normalmente, essa implementação acontece de forma gradual, com a agregação de novos equipamentos e tecnologias aos equipamentos de automação já presentes na rede (FARHANGI, 2010).

Essa implementação incremental gera a necessidade de interconectar diferentes equipamentos, que fazem uso de diversos protocolos. Muitas vezes, várias tecnologias de comunicação precisam ser empregadas para atender os requisitos destes diferentes equipamentos. Outros fatores que determinam a tecnologia de comunicação empregada são: localização geográfica, distância, quantidade de dados que se quer trafegar e número de elementos que devem ser conectados à rede de comunicação (GYRARD; SERRANO, 2015).

Visto a complexidade, as quantidades de informações a serem trocadas e o suporte aos variados subsistemas e serviços que compõem uma Rede Elétrica Inteligente, a interoperabilidade é importante para esse tipo de inovação na rede elétrica. Para a

implementação de uma REI, é necessário que os equipamentos e sistemas das empresas fabricantes, concessionárias e provedoras de serviços possam operar trocando informações entre si, sem intervenções consideráveis dos usuários, de forma transparente aos domínios relacionados. A padronização dos modelos de dados e dos protocolos são ações para o provimento de REIs interoperáveis, confiáveis, flexíveis e seguras, mas exigem grande esforço e tempo. A realidade atual, como já foi dito, é composta por sistemas heterogêneos que precisam coexistir, sendo essa a ideia central do trabalho.

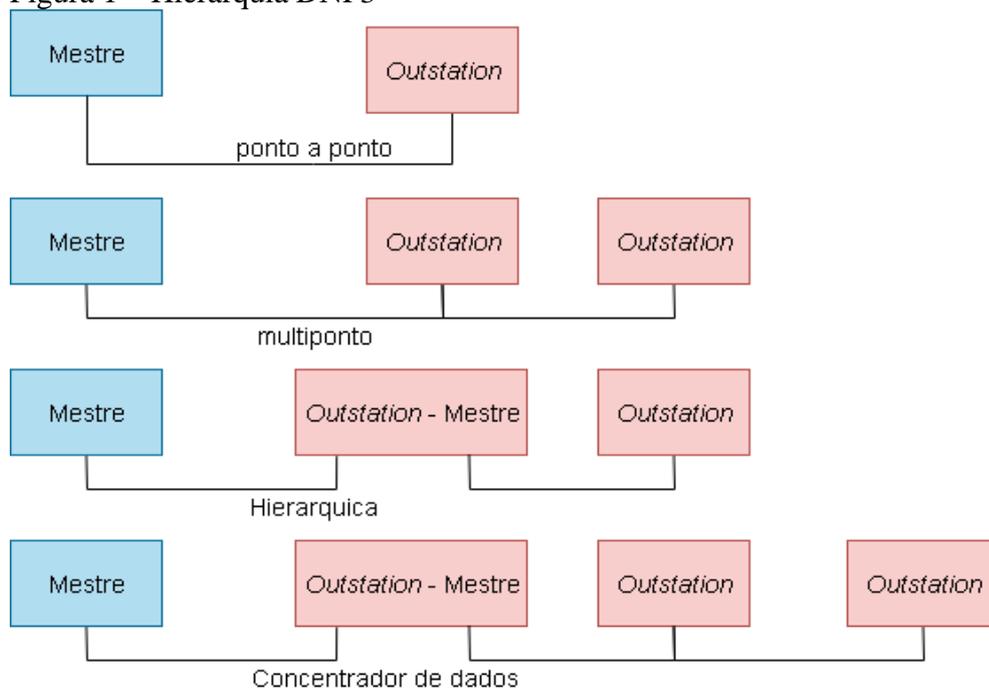
Em um levantamento prático feito pelo autor e reforçado pela literatura, os protocolos de comunicação mais comumente encontrados nos equipamentos eletrônicos inteligentes das redes de distribuição são: Modbus, DNP3 e IEC 61850, esse último tendo sua aplicação focada em automação de subestações (KUZLU *et al.*, 2017). No Brasil, ainda pode-se adicionar os protocolos ABNT NBR 14522 e PIMA, que são o padrão empregado para os sistemas de medição, sendo o protocolo PIMA utilizado apenas para comunicação local medidor coletor de dados.

Para a proposta deste trabalho, serão utilizados os protocolos DNP3, que está presente nos serviços de automação da distribuição, Modbus, que também é utilizado nos equipamentos de automação da distribuição e atualmente nos inversores inteligentes dos sistemas de geração distribuída e NBR 14522, que é empregado nos sistemas de medição inteligentes. Assim, consegue-se contemplar três serviços presentes em uma REI que possuem requisitos diferentes de comunicação e que poderão coexistir em um mesmo sistema de comunicação. A seguir, apresenta-se detalhes técnicos dos três protocolos, que serão fundamentais para o desenho da arquitetura com coexistência de serviço proposta.

2.1.1 IEEE 1815 - *Distributed Network Protocol version 3 (DNP3)*

O DNP3 é um protocolo de comunicação aberto, orientado a eventos (pergunta e resposta) com duas classes de dispositivos definidos. Dispositivo mestre, possui poder de processamento e armazenamento de dados, além dos dispositivos localizados em campo (religadores, reguladores de tensão, chaves telecomandadas), chamados de *outstation*. O protocolo DNP3 permite quatro tipos de topologias: ponto a ponto, multiponto, hierárquica e concentrador de dados, como pode ser observado na Figura 1. Para o uso neste trabalho, será considerada a topologia ponto a ponto.

Figura 1 – Hierarquia DNP3



Fonte: Adaptado de Day e Engineer (2018, p. 08).

O protocolo prevê uma separação de camadas, sendo elas: camada de usuário, de aplicação, de transporte e de enlace de dados. Elas são apresentadas a seguir e possuem as seguintes funcionalidades:

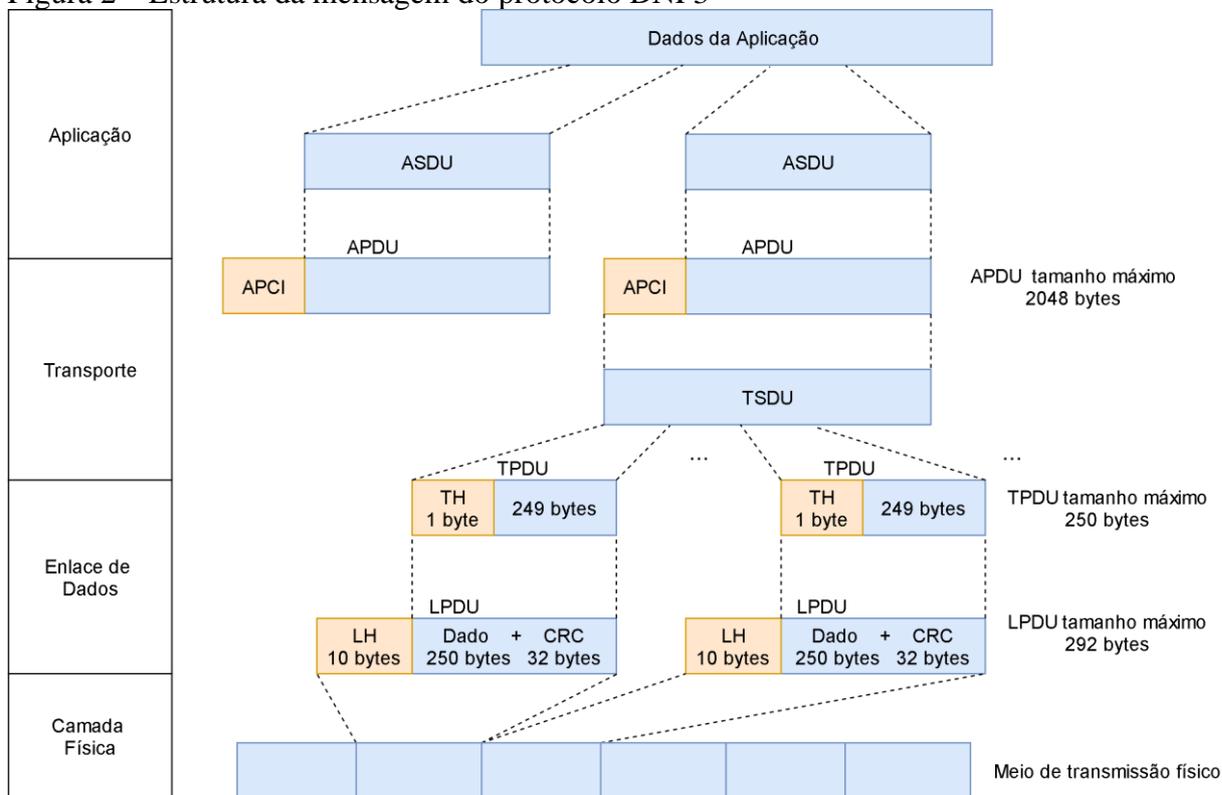
- **Camada do usuário:** não indica propriamente uma camada, mas sim um *software* do usuário, quer seja um mestre, um IED ou um concentrador de dados. Essa aplicação faz uso dos serviços da camada de aplicação para enviar/receber mensagens de outro dispositivo DNP3;
- **Camada de aplicação:** no dispositivo mestre, essa camada é responsável por receber as requisições efetuadas pelo *software*, sendo responsável pela interface entre a rede DNP3 e o usuário;
- **Camada de transporte:** responsável pelo particionamento de mensagens grandes em mensagens menores. Cada mensagem pode ter um máximo de 250 *bytes*, incluindo o cabeçalho de transporte;
- **Camada de enlace de dados:** tem como principal função verificar possíveis erros e retornar confirmação de entrega de datagramas ou ACK (confirmação). Um quadro de enlace pode ter até 292 *bytes*, incluindo seu cabeçalho e CRC.

Na camada de aplicação, o bloco de dados ASDU – *Application Service Data Unit* – não possui tamanho máximo. Esses dados são encaminhados à camada de transporte com tamanho máximo de 2048 *bytes*, e recebem o nome de APDUs – *Application Protocol Data Unit*. Também é adicionado o cabeçalho de dados denominado APCI – *Application Protocol Control Information* – de 2 *bytes* para o caso de solicitação de mensagem e 4 *bytes* para resposta.

Na camada de transporte, dados APDUs são encapsulados como mensagens de transporte. Nessa camada, estes são denominados TSDU – *Transport Service Data Unit* –, que, por sua vez, são segmentados em unidades menores, denominadas TPDU – *Transport Protocol Data Units* –, com tamanho máximo de 249 *bytes* de dados e 1 *byte* de cabeçalho. Esses 250 *bytes* são encaminhados para a camada de enlace de dados.

Na camada de enlace, os segmentos TPDU são encapsulados como mensagens de serviços, denominadas de LPDU – *Link Protocol Data Unit* –, aos quais são adicionados 10 *bytes* de cabeçalho e 32 *bytes* de correção de erros, totalizando 292 *bytes*, a serem encaminhados pelo meio físico. Essa estrutura descrita, com indicação dos tamanhos, é apresentada na Figura 2, a fim de melhorar o entendimento da estrutura usada pelo protocolo.

Figura 2 – Estrutura da mensagem do protocolo DNP3



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dispositivos mestres usam o método de *polling* para manter seus bancos de dados atualizados com os estados mais recentes dos equipamentos. O protocolo DNP3 permite especificar quais tipos de dados o dispositivo mestre deseja receber. Os dados estáticos se referem aos pontos de dados medidos ou calculados instantaneamente, enquanto os dados de eventos se referem a qualquer atividade significativa, como alterações de estado, novas informações e dados que ultrapassaram limites configurados nos equipamentos. Para obter dados instantâneos, um mestre solicita os dados da classe 0 de uma estação. Para solicitar dados do evento, o DNP3 permite organizá-los ou priorizá-los nas classes 1, 2 ou 3, obtendo, assim, maior granularidade das informações solicitadas. Essas informações somente são enviadas ao mestre se houver alteração de seu estado desde a última requisição, o que melhora o uso dos recursos da comunicação.

Os dispositivos *outstation* também podem enviar mensagens não solicitadas para atualizar automaticamente o mestre, com quaisquer alterações cruciais ou alarmes em dados que tenham sido configurados. Esse recurso, apesar de ser uma funcionalidade importante do protocolo, precisa ser considerado na proposta de arquitetura de comunicação desse trabalho, pois deve ser tratado como mais um evento passível de gerar colisões de dados. Para obter a interoperabilidade entre equipamentos, foram definidos três níveis de subconjuntos no DNP3. Estes são designados no formato “DNP3 *Application Layer Protocol Level*”, ou simplesmente abreviado como DNP3-L1, L2 ou L3.

- **DNP3-L1:** esse nível é projetado para pequenos IEDs. Utiliza pesquisas simples, incluindo classes de pesquisas (*class polls*);
- **DNP3-L2:** esse conjunto é projetado para grandes IEDs e pequenos RTUs. Adiciona outros tipos de objetos de pesquisa, formatos extras de dados e outras características, como o congelamento de contadores;
- **DNP3-L3:** esse conjunto contempla a implementação total do protocolo, é projetado para IEDs de grande porte e permite quaisquer combinações de objetos de pesquisa.

Em redes de distribuição, os IEDs geralmente implementam apenas o DNP3-L2, sendo este o nível que a arquitetura de comunicação proposta irá suportar. Outro ponto que irá influenciar na proposta será a necessidade de fragmentação do pacote LPDU quando este

apresentar tamanho superior a 240 *bytes*¹. No modelo experimental desenvolvido, observou-se que, para implementações de DNP3-L1 e L2, esse tamanho é superado apenas na requisição de dados da classe 0, que ocorre na primeira requisição dos pontos de dados do equipamento. Nas demais requisições, classes 1, 2 e 3 e mensagens não solicitadas, durante o funcionamento normal, o tamanho do dado enviado dificilmente supera esse limite, o que contribui para a otimização dos recursos do sistema de comunicação.

2.1.2 Modbus

O protocolo Modbus foi projetado especialmente para aplicações industriais, ou seja, comunicação de dispositivos eletrônicos em ambientes com muitos ruídos e interferências. Pelo fato de ser um protocolo de domínio público, sua utilização é bastante difundida. A grande aceitação também pode ser explicada pela facilidade de instalação, manutenção e interoperabilidade entre os diversos equipamentos que fazem uso dele.

É um protocolo bastante simples, se comparado ao DNP3, mas também é um protocolo de requisição-resposta, que utiliza um relacionamento mestre-escravo. Esse protocolo não está ligado diretamente a interfaces físicas, uma vez que funciona usando desde interfaces seriais (RS232 e RS485) até interfaces *ethernet* (TCP/IP), visto que ele é extremamente simples e flexível.

Outras características importantes são o formato e a sequência dos comandos de dados, comunicação mestre (*master*) para escravo (*slave*), resposta a comandos malformados e modos de transmissão de dados RTU (*Remote Terminal Unit*) e ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). Os modos definem a forma como são transmitidos os *bytes* da mensagem, e como a informação da mensagem será empacotada, não sendo possível utilizar os dois modos de transmissão na mesma rede. No modo RTU, cada mensagem de 8 *bits* contém dois caracteres hexadecimais de 4 *bits*. Esse modo possui maior densidade de caracteres, o que permite um melhor processamento de dados do que o modo ASCII para a mesma taxa de transmissão (ARAÚJO *et al.*, 2018).

O Quadro 1 apresenta exemplos dos formatos de quadros das mensagens de solicitação e resposta, mestre-escravo do protocolo Modbus no modo RTU. O tamanho máximo do *frame* de dados nesse modo é de 256 *bytes*.

¹ Limitação da tecnologia utilizada como meio físico. Será detalhado na seção 2.3.

Quadro 1 – Formato do quadro Modbus

Solicitação

Endereço Escravo	Função	Registrador Inicial		Quantidade Registradores		CRC16	
0x01	0x01	0x00	0x0a	0x00	0x02	0x9d	0xc9

Resposta

Endereço Escravo	Função	Contador de Bytes	Dados da Resposta	CRC16	
0x01	0x01	0x01	0x03	0x11	0x89

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse protocolo não contém criptografia ou qualquer outro método de segurança, exceto a validação do CRC (*Cyclic Redundancy Check*), nas mensagens que transitam, sendo assim facilmente interceptável e pouco seguro.

No contexto das redes elétricas inteligentes, o protocolo também é empregado em serviços de automação da distribuição, principalmente equipamentos legados. Porém, seu emprego vem ganhando aplicação nos inversores inteligentes utilizados na GD conectada à rede de distribuição. Assim como no protocolo anterior, também é importante observar que o tamanho máximo do *frame* estabelecido pelo protocolo é maior que a limitação de 240 *bytes*.

2.1.3 ABNT NBR14522 - Intercâmbio de Informações para Sistemas de Medição de Energia Elétrica

É o protocolo utilizado para comunicação em aplicações AMI, utilizado no Brasil. Essa norma define as interfaces e as sequências de troca de informações entre o medidor (escravo) e o leitor (mestre), sendo que, para essa comunicação, existe na especificação um tópico denominado Comunicação Convencional Leitor-Medidor. A comunicação ocorre na topologia ponto a ponto sobre uma linha serial, ou fibra, não permitindo a conexão de um leitor com vários medidores simultaneamente.

Na norma, está especificado o formato da solicitação do mestre, denominada de comando, que possui sempre 64 *bytes* de informação mais 2 *bytes* de CRC. O primeiro *byte* indica qual função está sendo solicitada, os 3 *bytes* seguintes indicam o número de série do leitor que está fazendo a solicitação e os demais *bytes*, os parâmetros informados aos medidores

conforme o comando do primeiro *byte*. Também é especificado o formato da mensagem de resposta aos comandos que os medidores devem enviar para o leitor. Essa mensagem de resposta sempre possui 256 *bytes* de informação mais 2 *bytes* de CRC. O primeiro *byte* indica a função que está sendo respondida, em seguida, 4 *bytes* com o número de série do medidor e os demais *bytes* contêm as informações enviadas pelo medidor após a solicitação (ABNT-NBR-14522, 2008). Assim como no protocolo anterior, também é importante observar que o tamanho máximo do pacote de resposta estabelecido pelo protocolo, que totaliza 258 *bytes*, é maior que a limitação de 240 *bytes*.

2.1.4 Aspectos comuns aos protocolos e serviços

Os requisitos de comunicação em uma rede elétrica inteligente variam significativamente, dependendo do serviço em uso e da abrangência. Alguns dispositivos são sensíveis ao atraso, como, por exemplo, os dispositivos de proteção, que necessitam de tempos de resposta precisos, sendo, portanto, difíceis de serem atendidos por uma rede de comunicação com latência limitada. Já outros dispositivos podem utilizar uma taxa de dados baixa, sem a necessidade de latências fixas, necessitando garantia de entrega das informações, o que pode ser proporcionado mesmo em redes com limitações de largura de banda, como a que será implementada nesta proposta de arquitetura (NAFI *et al.*, 2016). O Quadro 2 resume os requisitos de largura de banda e latência para as principais aplicações dentro de uma rede elétrica inteligente que foram levantados a partir dos trabalhos de Ogbodo *et al.*(2017), Munshi e Mohamed (2017), Nafi *et al.*(2016) e Sood *et al.* (2019)

Quadro 2 – Resumo dos requisitos para algumas aplicações em uma rede elétrica inteligente

Aplicação	Largura de Banda	Latência	Tamanho máximo do pacote (<i>bytes</i>)
Veículos Elétricos	9,6 - 56 Kbps	2 s – 5 min	256
Resposta à Demanda (Modbus)	14 - 100 Kbps	1 min	100
Medição (NBR14552)	10 - 128 Kbps	15 s	258
Automação de Subestação	9,6 - 56 Kbps	200 ms – 3 s	256
Automação da Distribuição (DNP3)	9,6 - 56 Kbps	1s – 10 s	292

Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar especificamente que as aplicações presentes no âmbito do sistema de distribuição de energia elétrica apresentam taxas de dados baixas e latências flexíveis, excluindo-se as aplicações que envolvem proteção, conforme aponta Sengupta *et al.* (2015), em que são necessárias latências na ordem de microssegundos, o que não é conseguido normalmente por uma rede sem suporte à comunicação de tempo real. Na maioria dos casos, aplicações de proteção não utilizam a rede de comunicação como meio de disparo dos eventos de proteção, apenas fazendo uso para telecomandos, verificação de estado e configuração remota. Também pode-se destacar que os protocolos estudados não apresentam mecanismos de segurança dos dados. Em todos eles, o dado trafega em forma de texto ou código binário, sem nenhum tipo de proteção. Esse é um ponto que deve ser observado, uma vez que os dados contidos nesses protocolos passarão a trafegar em uma rede sem fio, onde é possível realizar a interceptação da informação.

2.2 TOPOLOGIAS DE REDES E MEIOS DE INTERCONEXÃO

As redes baseadas no modelo TCP/IP tornaram-se, com o passar dos anos, um padrão para a interconexão de diferentes sistemas. O seu crescimento, tanto em número de usuários como de aplicações, levou à criação de uma plataforma multisserviço, capaz de atender necessidades das mais diversas aplicações com diferentes larguras de banda, flexibilidade e qualidade de serviços (SHANG *et al.*, 2016).

Os protocolos presentes no modelo TCP/IP fornecem uma solução simples e funcional para a interconexão de sistemas abertos, ou seja, sistemas que tenham seus dados disponíveis de maneira conhecida. A arquitetura TCP/IP possibilita o emprego de diferentes tecnologias na camada de redes, independentemente da infraestrutura física ou lógica empregada como meio de transmissão dos dados. Devido a essas características, a arquitetura TCP/IP é parte fundamental do sistema de comunicação de uma rede elétrica inteligente (LI; XU; ZHAO, 2015).

Normalmente, redes de dados que utilizam meios guiados, como PLC, fibra ou cabos, possuem uma robustez maior; porém, apresentam um custo maior de implementação. Dependendo da arquitetura, a utilização desse tipo de meio torna-se inviável para redes com um número elevado de dispositivos conectados e grandes distâncias.

A comunicação sem fios por meios não guiados oferece flexibilidade. Essa foi uma das formas que mais evoluiu nas últimas décadas em se tratando de infraestrutura de

telecomunicações. Seu custo de implantação também se reduziu muito, tornando possível a implementação de circuitos de rádio em pequenos dispositivos.

Novos padrões e protocolos surgiram, visando um melhor aproveitamento desse tipo de transmissão, muitos deles impulsionados pelo advento da *Internet* das Coisas. Segundo Sanchez-Iborra e Cano (2016), esse tipo de rede apresenta as características adequadas para serem empregadas em alguns sistemas de automação, surgindo, assim, a possibilidade do emprego desse tipo de tecnologia para criar uma infraestrutura de comunicação para redes elétricas inteligentes

Essas novas redes de comunicação para IoT permitirão que a última milha de comunicação de uma REI possa fazer uso de uma tecnologia mais acessível, possibilitando realizar a cobertura do grande número de dispositivos envolvidos em áreas extensas (SONG *et al.*, 2017).

2.2.1 Redes LPWAN

Esse tipo de implementação representa uma alternativa promissora como infraestrutura de comunicação, uma vez que estende o alcance dos enlaces, se comparada com as demais tecnologias que operam nas bandas de frequência industrial, científica e médica (ISM). Outro fator importante é que são financeiramente viáveis para aplicações de massa, como as necessárias em uma rede elétrica inteligente, diferentemente das tecnologias de comunicação sem fio, que usam frequências licenciadas e soluções baseadas em redes celulares.

Existem várias implementações de redes LPWAN, como LoRa[®], NWave, Ingenu, Weightless, Neul, Thread, NB-IoT e SIGFOX, cada uma delas apresentando técnicas de modulação e protocolos diferentes. Porém, em sua maioria, fazem uso do espectro não licenciado de rádio-frequência (CENTENARO *et al.*, 2016; SANCHEZ-IBORRA; CANO, 2016)

Uma característica desse tipo de implementação é o uso de *links* de rádio de longo alcance e topologias de estrelas. Os dispositivos finais estão diretamente conectados a um único nó concentrador, geralmente chamado de *gateway*, que também fornece a ponte para o nível de rede superior, geralmente uma rede baseada no modelo IP. A arquitetura de uma rede LPWAN é projetada para fornecer ampla cobertura de área e também garantir conectividade para os nós implantados em ambientes de difíceis acessos (SARAVANAN; DAS; IYER, 2017).

Essas tecnologias adotam, em geral, faixas de radiofrequência nas bandas ISM não licenciadas, em especial as frequências Sub GHz, que oferecem vantagens em relação a outras faixas, como as bandas de 2.4 GHz e 5 GHz, que são usadas globalmente e já estão bastante congestionadas. A faixa Sub GHz ainda permanece com baixa ocupação de tecnologias. Outra vantagem observada se dá em relação ao consumo de energia, pois as transmissões nas faixas Sub GHz tendem a consumir significativamente menos que as demais. Sua capacidade de transpassar obstáculos também é superior, característica essa que favorece o uso das faixas Sub GHz em sistemas de LPWAN.

O uso dessas faixas ISM Sub GHz é regulamentado pela ITU (*International Telecommunication Union*), dividindo o globo em 3 regiões e por regulações em cada país. O Brasil e os EUA pertencem ao grupo 2 do ITU, operando na faixa de 915MHz. A Europa está no grupo 1, operando em 433 MHz e 868 MHz, e a Ásia pertence ao grupo 3, operando em 915MHz.

Segundo Sérgio, Garcia e Kleinschmidt (2017) e Patel e Won (2017), os dois padrões com nível de amadurecimento aplicável na indústria são:

- **LoRa®**: no Brasil, utiliza a faixa de frequência de 915MHz, o que permite alcançar distâncias de 5 km em áreas urbanas e até 15 km em áreas abertas (ADELANTADO *et al.*, 2017). Oferece segurança com criptografia baseada no algoritmo AES-128 e possui um custo aceitável e adesão de diversos fabricantes de *hardware* que estão adotando o padrão em seus produtos;
- **SigFox**: também usa a faixa de 915MHz. O seu alcance no meio urbano é de até 10 km, e em meios rurais de até 40 km (SÉRGIO; GARCIA; KLEINSCHMIDT, 2017), com consumo mínimo de energia. Pode utilizar criptografia baseada no padrão AES-128. Como o objetivo do padrão é a criação de redes compartilhadas, existem limitações quanto à quantidade de dados transmitidos.

Quadro 3 – Comparação da tecnologia LoRa x SigFox

	LoRa®	SigFox
Tempo de implantação	Maior	Menor
Investimento inicial	Maior	Menor
Áreas com baixa penetração de sinal RF	Sim	Depende da Operadora
Precisão do Geoposicionamento	Boa	Boa
Custo da Rede pós-implantação	Patamar	Volume
Cobertura no Brasil	Menor	Maior
<i>Adaptive Data Rate</i> (ADR)	Sim	Não

Mensagens <i>uplink</i>	Ilimitada	Até 140/dia
Mensagens <i>downlink</i>	Ilimitada	Até 4/dia
Tamanho máximo de mensagens	242 <i>bytes</i>	12 <i>bytes</i>
Mensagens de confirmação	Sim	Não
Alcance dos gateways nas cidades	Até 5 km	Até 10 km
Alcance dos gateways nas áreas rurais	Até 15 km	Até 40 km

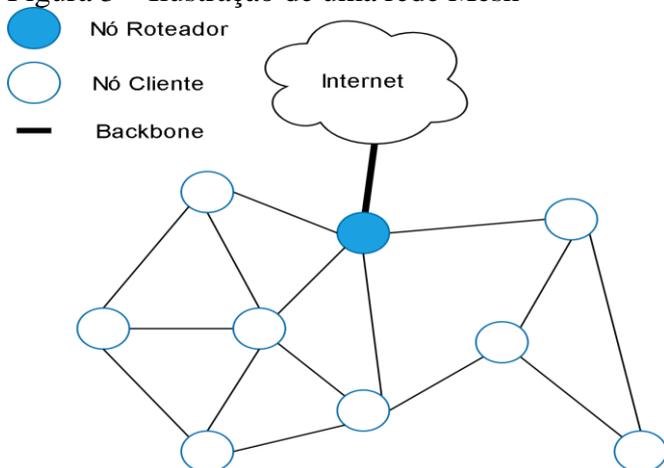
Fonte: Adaptado de Sérgio, Garcia e Kleinschmidt (2017), Patel e Won (2017).

Pode-se observar, ainda, que um dos principais diferenciadores é a limitação de mensagens diárias e também a confirmação de recebimento da transmissão, indicando, assim, que a comunicação baseada no padrão LoRa[®] possui características mais adequadas para a aplicação pretendida, viabilizando o uso desta tecnologia originalmente desenvolvida para IoT em aplicações de redes elétricas inteligentes.

2.2.2 Redes Mesh

Esta topologia de rede, também conhecido como rede em malha, tipicamente faz uso de comunicação sem fio por meio de rádio, e por isso é conhecido como *Wireless Mesh Network* (WMN). Uma rede Mesh é formada por diversos dispositivos que são interligados. Esses dispositivos podem atuar como roteadores, possuindo conexão com outras redes e funcionando como *gateway*. Os dispositivos clientes podem realizar o encaminhamento de pacotes de outros nós dentro da mesma rede, fazendo com que a área de cobertura seja ampliada. Assim, é possível criar uma rede que se reconfigura em razão do tráfego, da localização dos dispositivos e da disponibilidade de *link* (KARAOĞLAN ALTOP *et al.*, 2017). A Figura 3 apresenta uma possível configuração de uma rede WMN.

Figura 3 – Ilustração de uma rede Mesh



Fonte: Adaptado de Karaoğlan Altop *et al.* (2017).

As redes *Wireless Mesh Network* podem caracterizar uma opção de custo baixo para prover conectividade. Cada nó pode atuar como um comutador na rede, possibilitando que a arquitetura seja expansível por meio da utilização de múltiplos saltos na conexão dos dispositivos. Segundo Kim *et al.* (2017), o grande desafio nesse tipo de rede é garantir os parâmetros de qualidade exigidos pelas aplicações que farão uso da rede. Para aplicações de tempo real com restrições rígidas, as WMN não são indicadas, mas para prover conectividade em sistemas com parâmetros de tempo mais flexíveis, sua aplicação é considerada adequada. Os pontos em destaque ao utilizar-se essa topologia de rede são: baixo custo, pois não exige infraestruturas complexas de implementação; autoconfiguração, pois os dispositivos descobrem os nós vizinhos e as rotas para os dispositivos desejados; e a disponibilidade da rede. Devido a cada um dos dispositivos atuarem como comutadores, rotas alternativas podem ser criadas caso algum dispositivo deixe de comunicar com a rede.

Hoje, no contexto das redes elétricas inteligentes, as WMN são empregadas nos sistemas de medição de energia, usando como meio físico, principalmente, o padrão IEEE 802.15.5 ou, então, o padrão IEEE 802.11. Com o surgimento de outros sistemas de comunicação sem fio e outros meios físicos para as redes de IoT, como o padrão LoRa[®] discutido a seguir, pretende-se avaliar o uso da topologia Mesh com essas novas tecnologias para prover conectividade para as diversas aplicações de uma rede elétrica inteligente.

2.3 REDES BASEADAS EM LoRa[®]

As redes que utilizam padrão LoRa[®] são redes que fazem uso de dois principais elementos: o PHY LoRa[®], que é responsável pela transmissão dos dados através de frequências de rádio, utilizando técnicas de modulação específicas; e um protocolo de acesso ao meio, também conhecido como MAC. Um dos protocolos abertos desenvolvido pela Aliança LoRa[®] é denominado LoRaWAN (SEMTECH, 2015). Vale destacar que existem outras implementações de protocolos MAC compatíveis com o PHY LoRa[®] como, por exemplo, o protocolo DASH7 (DASH7 ALLIANCE, 2014). Recentemente, implementações experimentais usando o PHY LoRa[®] e a topologia Mesh foram apresentadas. A seguir, apresenta-se as características do PHY LoRa[®] e também se discute os dois modelos de protocolo de acesso ao meio que serão explorados nessa proposta.

2.3.1 A Tecnologia LoRa®

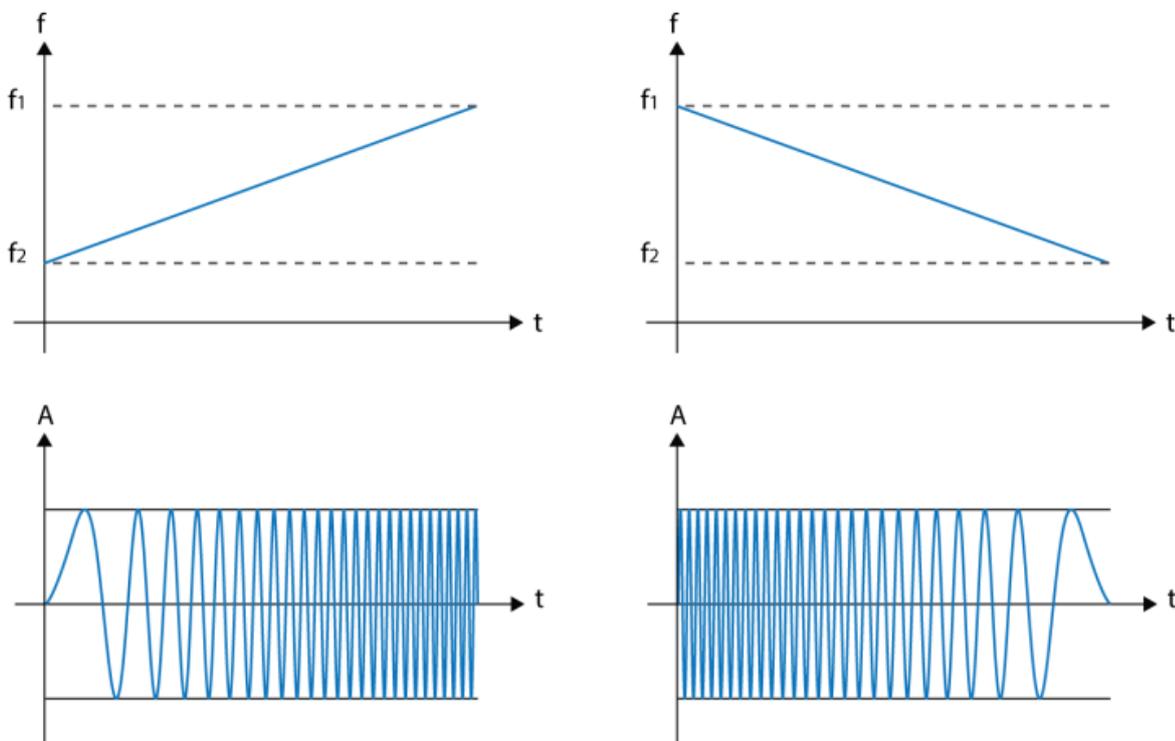
A tecnologia LoRa® utiliza o conceito de modulação *spread spectrum* (espalhamento espectral) para transmitir os dados através das ondas de rádio, apresentando três parâmetros de configuração:

- **Fator de Espalhamento (*Spreading Factor – SF*):** pode assumir valores de 5,6,7, 8, 9, 10, 11 ou 12; assim, quanto maior o SF, maior é o tempo de transmissão do símbolo, porém também aumenta a relação sinal ruído, a sensibilidade e, por consequência, o alcance, gerando um ganho na transmissão (SEMTECH, 2015);
- **Largura de Banda (*Bandwidth – BW*):** pode ser de 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz para um dado SF; um BW mais estreito aumenta a sensibilidade de recepção e incrementa o tempo de transmissão de um pacote;
- ***Forward Error Correction (FEC/Code Rate – CR)*:** responsável pela detecção e correção de erros. Essa configuração determinará o *Bit Rate*, o máximo *Payload Size* e o *Time on Air* (tempo de transmissão/duração do pacote no ar), influenciando o tamanho das mensagens, o seu alcance e o consumo de energia.

Em um dado momento, surge o conceito de *Adaptative Data Rate* (ADR), em que a tecnologia LoRa® pode gerenciar a taxa de dados e a potência de saída do sinal de rádio em cada dispositivo, buscando otimizar taxas de transmissão, minimizar o consumo de energia e maximizar a capacidade da rede (SEMTECH, 2015).

Na modulação LoRa®, o espalhamento do espectro é atingido gerando um sinal que varia continuamente em frequência, como apresentado na Figura 6. A largura de banda dessa variação é equivalente à largura de banda espectral do sinal. A modulação LoRa® deriva da modulação *Spread Spectrum (CSS)* e funciona movendo um sinal de RF com frequência variável através do tempo de maneira muito linear, quebrando as variações em diferentes instantes em termos de tempo e frequência para codificar um símbolo (SEMTECH, 2015).

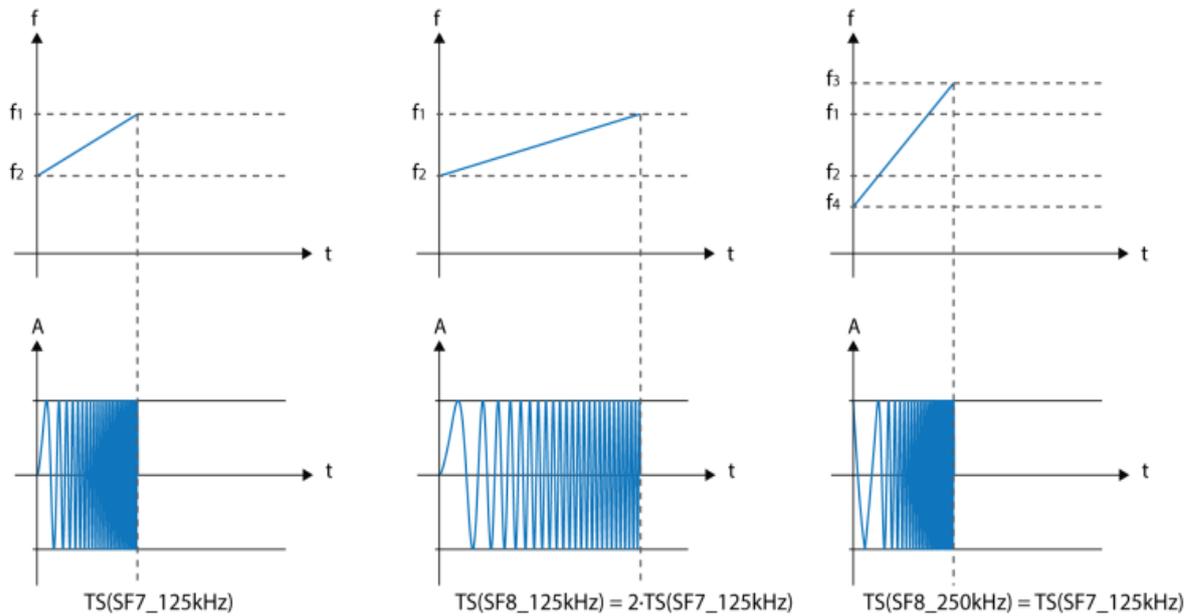
Figura 6 – Uma forma de onda de variação linear que codifica um símbolo e sua representação sinusoidal que aumenta ou diminui a frequência linearmente



Fonte: Adaptado de Semthech (2015).

Dependendo da largura de banda e do fator de espalhamento selecionado, o tempo da varredura de frequência (tempo-símbolo) levará mais ou menos tempo. Um incremento no fator de espalhamento selecionado duplicará o tempo do símbolo; então, um símbolo enviado no SF12 será 32 vezes mais demorado do que um símbolo enviado no SF7. No entanto, a largura de banda será inversamente proporcional ao tempo e a duplicação da largura de banda dividirá o tempo do símbolo pela metade. Na Figura 7, é demonstrado como esses dois parâmetros (fator de espalhamento e largura de banda) determinam o símbolo, influenciando no tempo de transmissão.

Figura 7 – Relação entre tempo de símbolo, fator de espalhamento e largura de banda selecionada



Fonte: Adaptado de Semtech (2015).

Segundo Neagu e Hamouda (2016), essa técnica de modulação é mais robusta se comparada a outras técnicas de espectro espalhado, como a DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). Ela elimina todos os problemas encontrados na DSSS e, ao mesmo tempo, oferece uma solução baseada em baixo consumo de energia, característica importante para a implementação de um sistema com alimentação por baterias ou outra fonte com limitações.

A modulação LoRa[®] incorpora o recurso de correção de erros na camada física e, portanto, irá melhorar os recursos de correção de erros no sistema ao custo de aumentar a redundância. A taxa de *bits* LoRa[®] em *bits* por segundo (bps) pode ser definida pela Equação (1) para este sistema.

$$Rb = SF * \frac{\left[\frac{4}{4 + CR} \right]}{\left[\frac{2^{SF}}{BW} \right]} * 1000 \quad (1)$$

Onde:

SF = fator de espalhamento (6 a 12)

CR = código de correção (1 a 4)

BW = largura de banda em kHz (125, 250 ou 500)

Rb = Taxa de dados em bps

Considerando a Equação (1) com a taxa CR fixa de 4/5 e apenas definindo os fatores SF de 7 a 12 e BW assumindo os valores 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz, obtém-se o Quadro 4 dado em bits por segundo.

Quadro 4 – Taxa de dados Rb em bps, variando SF e BW .

	Largura de Banda (Hz)		
SF	125000	250000	500000
7	5468	10937	21875
8	3125	6250	12500
9	1757	3515	7031
10	976	1953	3906
11	537	1074	2148
12	292	585	1171

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Thomas (2015) e Lee *et al.* (2017), essa tecnologia é resistente à interferência na banda e fora da banda de frequência, devido à sua ampla forma de espectro. Assim, pode ser empregada em ambientes urbanos e rurais, pois oferece cerca de quatro vezes mais alcance de cobertura se comparada à modulação FSK, devido à sua natureza robusta contra interferências e desvanecimento.

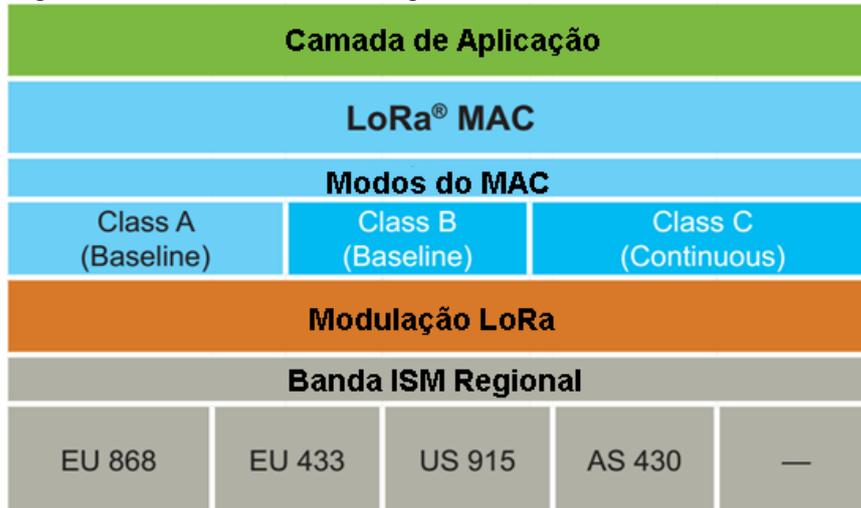
Sua capacidade de transmissão múltipla no mesmo canal de RF, com a ajuda de diferentes fatores de espalhamento diminui a probabilidade de colisões, aumentando a taxa efetiva de transmissão de dados, além de conseguir discriminar entre erros de tempo e frequência. Portanto, é considerada a técnica de modulação ideal para radar, bem como para aplicações em tempo real (HAXHIBEQIRI *et al.*, 2017).

2.3.2 A Rede LoRaWAN

A rede LoRaWAN utiliza o protocolo de acesso ao meio e à arquitetura do sistema. Na Figura 8, pode-se observar as camadas do padrão LoRa®, enquanto a camada física LoRa® habilita o *link* de comunicação de longo alcance. O protocolo da camada MAC e a arquitetura

da rede têm maior influência na determinação da vida útil da bateria de um nó, na capacidade da rede, na qualidade do serviço, na segurança e na variedade de aplicativos atendidos pela rede.

Figura 8 – Camadas da tecnologia LoRa®

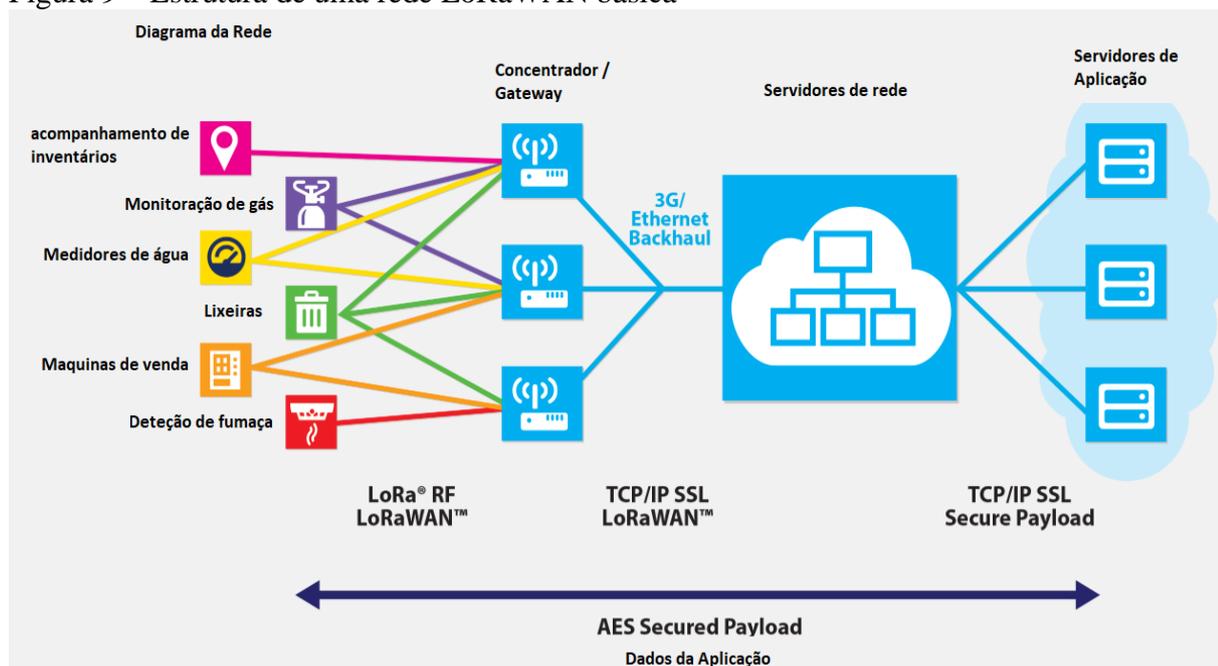


Fonte: Adaptado de Semtech (2015).

LoRaWAN é uma tecnologia totalmente convergente baseada em padrões abertos e de baixo custo. Foi projetado desde o início para implementar plataformas para a IoT. Assim, o escopo de aplicação é muito abrangente. Entre as possíveis aplicações, encontra-se redes inteligentes para as empresas de energia elétrica. Ao contrário da topologia RF Mesh, a rede LoRaWAN tem uma topologia estrela que simplifica a operação e reduz o tráfego na rede, destinado a informações de roteamento.

A Figura 9 mostra a topologia de referência do protocolo LoRaWAN. Uma característica proeminente dessa tecnologia é o baixo consumo devido à topologia estrela, que não necessita de roteamento entre nós. Esse baixo consumo possibilita alimentar os dispositivos com fontes alternativas, como baterias, e não somente com o próprio sistema de potência onde está instalado. Desta forma, é possível manter o funcionamento do sistema de comunicação mesmo com falhas na rede elétrica, permitindo monitorar o sistema nessas condições.

Figura 9 – Estrutura de uma rede LoRaWAN básica



Fonte: Adaptado de Semtech (2015).

Uma limitação da rede LoRaWAN é que esta não conta com a possibilidade de extensão de cobertura através de dispositivos de vizinhança, como é o caso das topologias em malha. Essa perda de funcionalidade, além de ser conveniente para o contexto de IoT, não representa um problema, devido ao fato de um dos dispositivos concentradores ter um custo médio aproximadamente 5 vezes inferior a um Concentrador RF de malha (MAGRIN; CENTENARO; VANGELISTA, 2017).

No Quadro 5, é apresentado um resumo do comparativo do protocolo LoRaWAN com o protocolo de malha ZigBee. Observa-se vantagens significativas, tais como taxa de dados disponível por terminal; latência uniforme, devido à ausência de múltiplos saltos para conectar os pontos finais a um concentrador; e capacidade de agregação de terminais por concentrador.

Quadro 5 – Comparativo LoRaWAN x ZigBee

Parâmetros	LoRaWAN	ZigBee
Aplicações	IoT, Cidades Inteligentes, Smart Grid (Smart Metering. DA precisa ser estudado)	Smart Grid (Smart Metering. DA), e Iluminação Pública. IoT em desenvolvimento.
Tipologia	Estrela	Malha
Faixa de Frequência	867-869 MHz (Europa e Índia) 902-928 MHz (América do Norte e Brasil) 470-510 MHz (China)	863-876 MHz/915-921 MHz (Europa) 865-867 MHz (Índia) 902-928 MHz (América do Norte e Brasil)

	920-925 MHz (Japão e Coreia)	470-510 MHz (China) 920-928 MHz (Japão) 917-923 MHz (Coreia)
Taxa Máxima de Dados por Terminal	50 Kbps	10-100 Kbps
Latência Média	1 s	700 ms por salto (recomendado até 3 saltos)
Agregação Máxima por Concentrador	15.000 terminais	10,000 terminais
Faixa Urbana (sem repetição)	2-5 km	3-5 km
Faixa Rural (sem repetição)	10-15 km	10-15 km
Nível de Maturidade Tecnológica	No posicionamento	<i>Smart Grid</i> - Estabelecido <i>IoT</i> - Em desenvolvimento
Mobilidade dos Pontos Finais	Possível	Possível com restrições

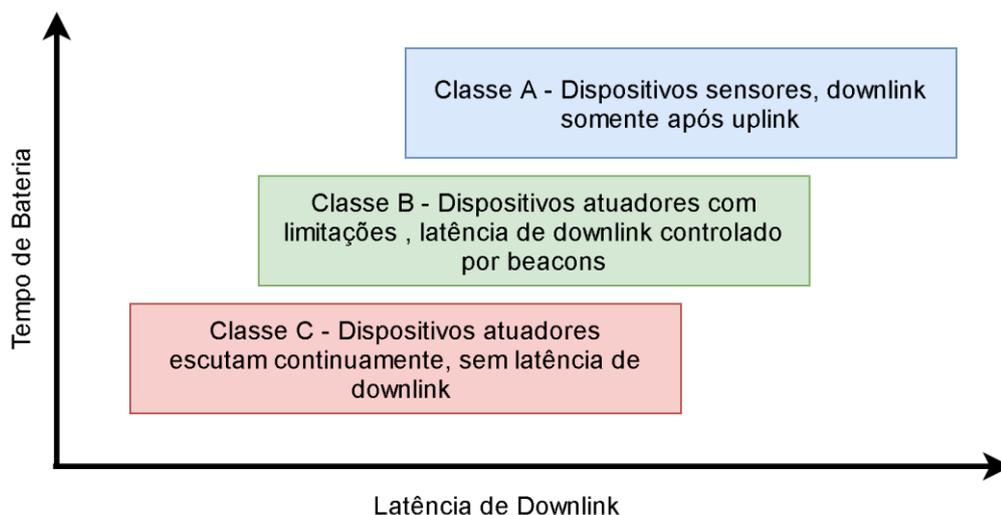
Fonte: Adaptado de MONISH (2019).

Uma outra característica do protocolo LoRaWAN é a existência de 3 classes de implementações MAC diferentes para funções:

- **Dispositivos finais bidirecionais (Classe A):** as transmissões ascendentes (dispositivo para concentrador) são baseadas em um tipo de protocolo ALOHA. A recepção dos pacotes do *gateway* só pode ser realizada em duas curtas janelas de recepção que se abrem depois de uma transmissão. Essa classe de MAC fornece o menor consumo de energia, tendo como principal aplicação o monitoramento de grandezas;
- **Dispositivos finais bidirecionais (Classe B):** além do modo classe A, estão abertas janelas de transmissões pré-programadas gerenciadas por um sinal de temporização (*Beacon*) que indica quando o receptor está pronto para receber. Pode ser conveniente para sistemas de telecomando não susceptíveis à interferência de tempo;
- **Dispositivos finais bidirecionais (Classe C):** janela de transmissão aberta continuamente para transmissão. Essa classe é mais adequada para sistemas telecomandados susceptíveis à interferência do tempo, como sistemas de gerenciamento de subtransmissão baseados em SCADA.

A Figura 10 apresenta um comparativo entre a vida útil das baterias e latência dos pacotes para cada uma das classes MAC disponíveis.

Figura 10 – Comparativo dos dispositivos e suas classes



Fonte: Adaptado de Semtech (2015).

Quanto aos *gateways*, também conhecidos como concentradores, existem modelos que podem atender a necessidades específicas, mais simples e baratos para ambientes fechados, em contraposição aos modelos industriais com proteção contra intempéries e aplicações externas.

Na comunicação entre *gateway* e dispositivo, são previstos dois tipos de troca de mensagens: mensagens sem confirmação (*Unconfirmed Data Message*), e com confirmação (*Confirmed Data Message*). Em relação à ativação dos dispositivos na rede, o protocolo LoRaWAN adota o algoritmo de criptografia AES-128, utilizando duas formas diferenciadas de ativação em razão do tipo de rede (Rede Pública ou Rede Privada).

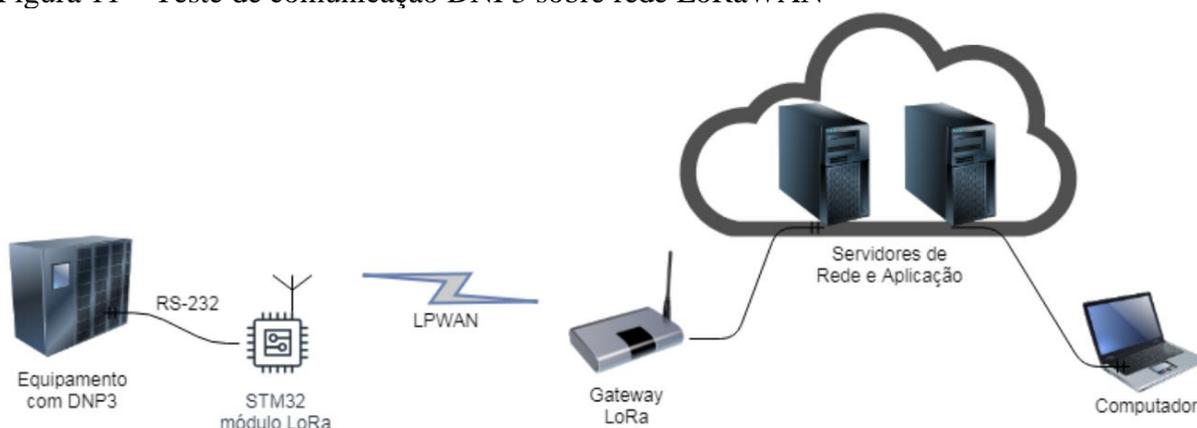
Nas Redes Públicas, utiliza-se o OTAA (*Over The Air Activation*), que se baseia no envio de um identificador global único (DevEUI), análogo ao endereço MAC das redes Ethernet e do identificador (AppEUI) e chave da aplicação (AppKey) desejada. Esses dados serão utilizados na camada de aplicação para validar e ativar o dispositivo em determinada aplicação na rede. Ocorrendo a aceitação na rede, o dispositivo recebe uma mensagem de “*join accept*”, que contém o endereço do dispositivo (DevAddr), a chave de sessão da rede (NwkSKey) e a chave de sessão da aplicação (AppSKey).

Em Redes Privadas, não são necessários os seguintes dados para ativação: endereço do dispositivo (DevAddr), chave de sessão da rede (NwkSKey) e chave de sessão da aplicação (AppSKey) são gravados no dispositivo no momento da sua configuração. Assim, ele está pronto para comunicação assim que estiver conectado na rede.

2.3.3 Avaliação Preliminar da Rede LoRaWAN

Com o objetivo de realizar uma avaliação preliminar do uso de uma rede LPWAN com protocolo LoRaWAN, implementou-se a estrutura apresentada na Figura 11 como um cenário de testes para identificar as limitações da proposta de encapsular protocolos usados em REIs, dentro de uma rede LoRaWAN.

Figura 11 – Teste de comunicação DNP3 sobre rede LoRaWAN



Fonte: Elaborada pelo autor.

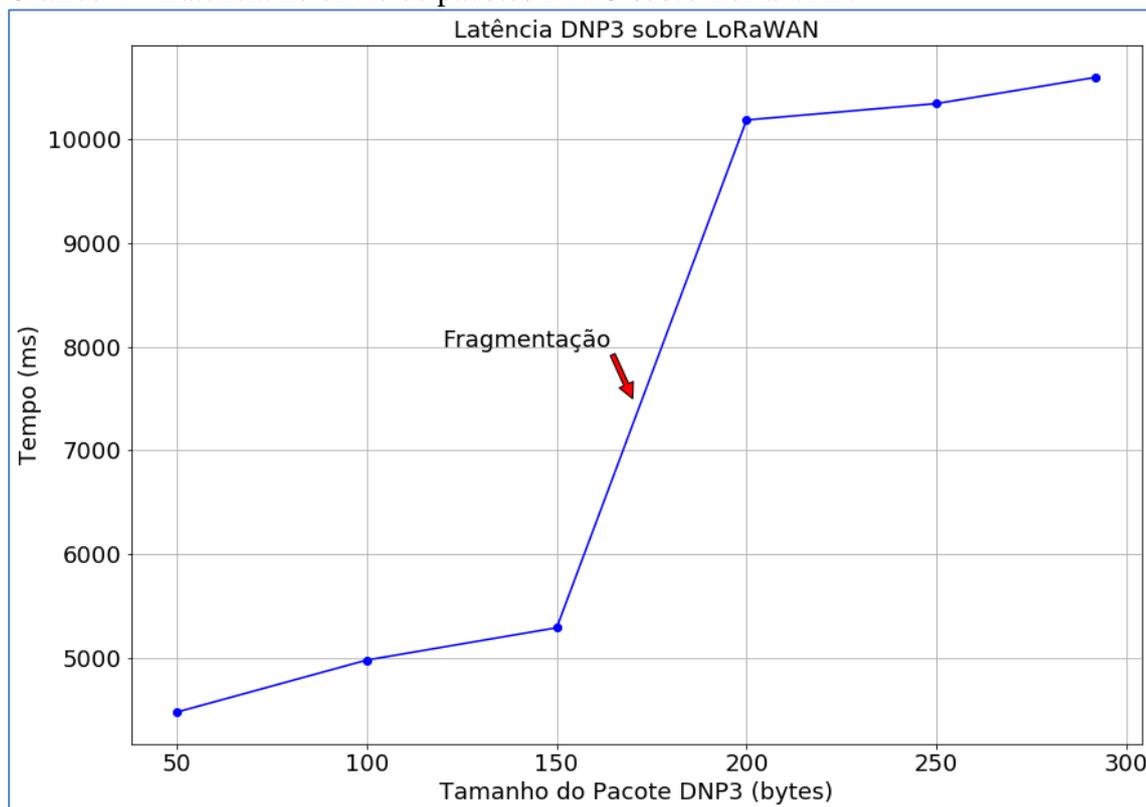
Como já retomado na seção dos protocolos para REI, o protocolo DNP3 tem um tamanho máximo de pacote de 292 *bytes*, não sendo possível a transmissão desse pacote em uma única mensagem da rede LoRaWAN, que limita a 242 *bytes* o tamanho máximo da mensagem na configuração de maior largura de banda e menor fator de espalhamento. Dessa forma, foi necessário implementar um mecanismo de fragmentação e desfragmentação e envio de múltiplas mensagens por pacote DNP3, tanto no lado do nó, quanto no lado do servidor de aplicação.

Como resultado deste estudo preliminar, obteve-se um tempo médio de aproximadamente 587 ms para transmitir cada pacote de 100 *bytes* entre o módulo e o servidor de aplicação. Já entre a transmissão do pacote e o recebimento do ACK, tem-se um tempo médio de latência de aproximadamente 1462 ms para cada pacote.

Um aspecto importante a se ressaltar é o tempo entre as transmissões consecutivas das mensagens fragmentadas que compõem um pacote DNP3. Esse intervalo foi alterado para valores menores que 5 segundos, mas não se obteve um bom resultado, pois em alguns casos os pacotes eram descartados pelo servidor de rede, sendo essa uma limitação do software

ChirpStack no servidor testado. O Gráfico 1 apresenta o comportamento da latência para o envio de pacotes DNP3 sobre a rede LoRaWAN, onde pode-se observar um incremento de tempo na ordem de 5 segundos quando o pacote DNP3 passa a ser fragmentado em mais de uma mensagem.

Gráfico 1 – Latência no envio de pacotes DNP3 sobre LoRaWAN



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, em testes com o simulador de DNP3 *master*, compreendendo a transmissão do comando e a recepção da resposta desse comando no simulador para o caso de pacotes com tamanho máximo de 292 *bytes*, obteve-se um tempo médio de 10601 ms. Esse tempo ficou dentro do limite máximo de 20 segundos usado pelo *software* SCADA como *timeout* para considerar o comando não recebido e realizar nova tentativa. Porém, o teste levou em conta apenas o uso de um equipamento DNP3, o que demonstra que não seria possível ampliar o número de equipamentos coexistindo na mesma rede e ainda assim atender os requisitos de latência da aplicação. Com base nessa informação, partiu-se para outras possibilidades de arquitetura e mecanismos que permitissem um melhor aproveitamento da largura de banda disponibilizada pela modulação LoRa®.

2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

O capítulo buscou fornecer uma visão geral dos conceitos e bases técnicas que servirão como alicerce para o desenvolvimento da tese. Iniciou a retomada pelos protocolos de comunicação e aplicações que hoje estão presentes nas redes elétricas de distribuição inteligentes, em que o destaque foi o protocolo DNP3, que é amplamente utilizado para a automação da distribuição. Ele possui características peculiares se comparado aos outros dois protocolos estudados, que é a de envio de mensagens não requisitadas. Essas mensagens não requisitadas deverão ser ponto de atenção na proposta. Ainda, na revisão dos protocolos de comunicação, percebe-se que o pacote de informações máximo permitido tem o tamanho de 292 *bytes*, o que exigirá algum mecanismo para tratar essa quantidade de informação, visto que a limitação de 256 *bytes* por transmissão é imposta pela tecnologia de modulação LoRa[®] que se pretende utilizar.

Também foram discutidas topologias de redes de *Internet* das Coisas, começando pela topologia estrela, com as redes LPWAN, mais especificamente a rede LoRaWAN. Nessa rede, executou-se um estudo preliminar para verificar a possibilidade de encapsular os protocolos de REI sobre as mensagens. Com um tempo de latência médio superior a 10 segundos devido a limitações do protocolo, descartou-se a possibilidade de utilizar essa arquitetura para a proposta.

Partiu-se, então, para o estudo de outras topologias, em especial as redes em malha, como possibilidade para a proposta. Por fim buscou-se estudar o emprego de múltiplos rádios, que permite uma melhor vazão na rede.

Alguns desses pontos serão explorados em contextos atuais através da revisão bibliográfica da literatura e revisão do estado da arte no próximo capítulo.

3 TRABALHOS RELACIONADOS E ESTADO DA ARTE

A seguir, serão abordados a revisão de literatura e do estado da arte sobre arquiteturas de comunicação, o emprego desses sistemas em redes elétricas inteligentes, bem como as novas tecnologias, protocolos e metodologias que são empregadas para moldar a nova arquitetura de comunicação, composta por *hardware*, *software* e suas ferramentas auxiliares de simulação.

3.1 ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

A seguir são apresentados os trabalhos encontrados na literatura que enfocam arquiteturas de comunicação utilizadas em Redes Elétricas Inteligentes. O Quadro 6 apresenta a comparação dos estudos encontrados no processo de revisão. Eles são comparados usando os principais recursos presentes em cada uma das arquiteturas.

Quadro 6 – Comparativo das arquiteturas de comunicação para REIs

Trabalho	Ano	Meio Físico	Topologia	Múltiplos Protocolos	Implementação da arquitetura
ZHANG <i>et al.</i>	2018	LoWPAN	Mesh	Não	Não
SOUFIANE; NATIONAL	2018	Zigbee, PLC	Mesh	Não	Não
RINALDI <i>et al.</i>	2018	IP/ PLC	Estruturada	Sim	Sim
KULKARNI <i>et al.</i>	2019	Wifi/ Bluetooth	Estruturada	Sim	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

Zhang *et al.* (2018) apresenta um estudo que explora mídias independentes para estender a cobertura da rede elétrica e melhorar o desempenho. Propõe um modelo de simulação híbrida para integrar as tecnologias de comunicação mista e os mecanismos baseados em IP em uma simulação. É aplicado um conjunto de modelos de simulação de sistemas de comunicação híbridos para validar os critérios críticos de projeto de sistema para um sistema de comunicações fotovoltaicas solares distribuídas (PV), incluindo latência única de 300 ms, taxa de transferência de 9,6 Kbps e taxa de perda de pacotes de 1%. Os resultados mostram que três arquiteturas híbridas baseadas em redes LoWPAN podem satisfazer as métricas de desempenho críticas para as comunicações distribuídas de recursos energéticos.

No trabalho de Soufiane (2018), são descritos os modelos conceituais propostos por organizações internacionais: NIST (*National Institute of Standards and Technology*, em

português, Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia), IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*, em português, Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos) e ITU (*International Telecommunication Union*, em português, União Internacional de Telecomunicações). Um estudo de simulação é realizado para entender a arquitetura de comunicação *smart grid*. Em seguida, apresenta um novo modelo baseado nesses roteiros, com as possíveis tecnologias de comunicação que podem ser usadas para interconectar os componentes e padrões, observando os requisitos e limitações desses modelos. O modelo proposto cumpre as seis funcionalidades que a rede *smart grid* deve alcançar. Por fim, o trabalho finaliza dando atenção ao lado do cliente e suas necessidades, focando especificamente em AMI.

Rinaldi *et al.* (2018) propõe uso de uma arquitetura de redes definidas por *software* (SDN) para simplificar a configuração e o gerenciamento de rede. O objetivo desse artigo é apresentar e caracterizar uma arquitetura de comunicação baseada em Protocolo da *Internet* (IP) com pontes SDN, operando com *Power Line Communication* (PLC), para alcançar as aplicações de última milha. Os resultados experimentais mostram a viabilidade da arquitetura proposta, uma vez que as limitações são dadas apenas pela implementação física do modem PLC. Em detalhes, os resultados do estudo de caso mostram que o *Round Trip Time* (RTT) mínimo está na ordem de 30 ms, a taxa de perda de pacotes é sempre menor que 1,7% e a taxa de transferência máxima é de 95 *Mbit/s*, totalmente compatível com os requisitos do aplicativo.

Kulkarni *et al.* (2019) afirma que, com um grande número de dispositivos conectados à rede elétrica inteligente, os modelos tradicionais de conectividade centralizada deixam de ser eficientes. Esses modelos dependem do envio de dados à nuvem para processamento e recebimento de comandos para executar ações de controle, resultando em um "sistema sob demanda" com alta largura de banda, baixa latência e sobrecarga de dados na nuvem. Para realizar um sistema descentralizado, há uma forte necessidade de incorporar inteligência na "extremidade da rede". Esses dispositivos inteligentes, capazes de detectar e processar dados locais e exercer ações de controle, relatam apenas informações passíveis de ação para a nuvem, agindo como um nó de controle de borda. O sistema pode, então, funcionar de forma autônoma, sem entradas constantes na nuvem, tolerando atrasos mais longos na comunicação e tornando o sistema geral menos sobrecarregado. Essa arquitetura também aborda algumas lacunas identificadas nas soluções tradicionais da *Internet* das Coisas em áreas remotas e conectividade esparsa. Uma unidade funcional do nó de computação da borda foi construída, levando em consideração várias restrições, como custos, personalizações, armazenamento de dados,

segurança cibernética e gerenciamento de energia. A plataforma foi construída e implantada, e demonstrou aplicabilidade em rede elétrica inteligente, como sensor de qualidade de energia, infraestrutura de medição automatizada e monitoramento de ativos da concessionária.

3.2 USO DO LORA[®] COMO MEIO DE COMUNICAÇÃO EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

O trabalho de Barriquello *et al.* (2017) avaliou soluções LoRa[®] com *smart grid* em Santa Maria, Brasil. Buscou-se uma implementação teórica, em área rural, de 130 nós, utilizando LoRaWAN, ajustando o ganho de antenas para cobrir todo o cenário de nós e o tempo de recebimento de pacotes com o objetivo de mostrar a boa eficiência do protocolo com aplicabilidade em *smart grid* para esses locais. Atualmente, existem outras opções para monitoramento de *smart grids* com redes RF Mesh sub-G com taxa de dados máxima de 10-100 Kbps, o que é muito eficaz em termos de extensão e alcance, mas comprometido em latência. Também foi especificado que a regulamentação pertinente ao local dos testes para EIRP, isto é, o produto da potência do transmissor e o ganho da antena, é de 36 dBm, com a observação de que um transdutor comercial LoRa[®] SX1276 utiliza até +20 dBm e possui uma sensibilidade de -137 dBm para 125 kHz e SF12. Esse trabalho tratou especificamente do serviço de AMI dentro do *smart grid*.

Os estudos desenvolvidos por Schroder Filho, Pissolato Filho e Moreli (2016), em Campinas, Brasil, também foram dedicados às aplicações de *smart grid*, em que os autores avaliaram se o LoRaWAN está apto a suprir as necessidades de sensoriamento remoto nesse campo comparando duas tecnologias, Mesh RF e LoRaWAN. Foi mostrado que um sistema com LoRaWAN custa 5 vezes menos que um sistema RF Mesh, além do LoRa[®] teoricamente conseguir agregar até 150.000 dispositivos em um *gateway* (GW). Como resultado, afirma-se que, apesar de as duas tecnologias serem relativamente recentes (Mesh RF 2012 e LoRa 2015), é indicado para novos investimentos o uso de LoRa[®] em vez de Mesh RF. O trabalho também tratou especificamente de AMI dentro do contexto de *smart grids*.

Em Gante, Bélgica, Laveyne *et al.* (2017) propôs que controle de temperatura em componentes relacionados a linhas de transmissão de energia pode ser feito com o LoRa[®], utilizando um SX1276, componente do módulo comercial RFM95. Um termostato conectado ao circuito de análise do *smart grid* sofre alternâncias de valores ao longo do dia e, dependendo da temperatura auferida, a corrente no termostato é alterada. Logo, é possível identificar se esse

valor de corrente está dentro dos limites estabelecidos ou não e, por fim, acionar elementos de controle. Esse serviço pode agregar utilidade para cidades inteligentes. O trabalho também faz aplicação da rede LoRaWAN apenas para monitoramento.

Em Meylan, França, Varsier e Schwoerer (2017) mostrou o uso do LoRaWAN com medidores de energia elétrica implementando nós e *gateways* disponíveis em Paris e analisando os alcances máximos. Ao todo, 19 *gateways*, separados por 1 km uns dos outros, foram posicionados e, nesse cenário, 17 km² foram cobertos utilizando pacotes de 11 Bytes. Os autores frisaram, contudo, que como LoRa[®] pode ser adaptada para usos em ambientes urbanos, a questão do *duty cycle* não é uma impossibilidade em transmissão, por isso ela pode ser respeitada. Também foi informado que a sensibilidade da antena varia conforme o SF, sendo o mínimo SF7, em -124 dBm, e o máximo SF12, em -137 dBm, além de que se dois pacotes são recebidos simultaneamente por um *gateway*, vindos cada um de um nó com o mesmo SF e a mesma frequência, o pacote com maior potência será decodificado se ele for 6 dB maior que o outro pacote.

Pode-se perceber que as redes LPWAN, que fazem uso do protocolo LoRaWAN, têm suas aplicações testadas apenas para o monitoramento e sempre em situações onde o determinismo da rede, ou seja, o atraso no recebimento da informação, não é um fator crítico. Não foram encontrados trabalhos que explorassem o controle de redes elétricas utilizando o protocolo LoRaWAN. Comprovou-se essa limitação também com o estudo preliminar realizado pelo autor na seção 2.3.3 onde se discutiu as redes LoRaWAN. Assim conclui-se que é necessária outra abordagem de acesso ao meio, que não a implementação do protocolo LoRaWAN. Dessa forma surgiu a proposta da nova arquitetura de comunicação, que terá como base o meio físico LoRa[®], porém a camada LoRaWAN será substituída por uma nova pilha de protocolos modelada especificamente para atender as necessidades das REIs.

3.3 APLICAÇÕES DO LORA[®] MESH E PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO

No trabalho de Cilfone *et al.* (2019), a *Internet* das Coisas (IoT) é definida como sendo uma “rede de redes”, que promete permitir que bilhões de seres humanos e máquinas interajam uns com os outros. Devido a esse rápido crescimento, a implantação das redes orientadas à IoT, baseadas em topologias de malha, é muito atraente, graças à sua escalabilidade e confiabilidade (na presença de falhas). Nesse artigo, o autor realiza uma pesquisa abrangente das seguintes tecnologias sem fio relevantes: IEEE 802.11, Bluetooth, IEEE 802.15.4, e LoRa[®] baseado em

Sub-GHz. O objetivo foi destacar como essas várias tecnologias de comunicação podem ser adequadas para redes de malha, fornecendo suporte nativo ou sendo adaptadas. Discute, ainda, como essas tecnologias sem fio, padrão ou proprietárias, podem se adaptar aos cenários da IoT (por exemplo, cidades inteligentes e agricultura inteligente), em que a heterogeneidade dos dispositivos é recurso essencial. Por fim, apresenta casos de uso de referência envolvendo todas as tecnologias orientadas à malha. Nesse trabalho, ele também estuda vários protocolos de roteamento, originalmente criados para redes Mesh baseadas no protocolo IP, e destaca que esses protocolos não são adequados para redes Mesh com tecnologias de rádio como LoRa[®]. Destaca os novos protocolos como o protocolo Babel.

O protocolo de roteamento Babel (CHROBOCZEK; SCHINAZI, 2018) considera o caso de *loops* de roteamento devido à rota padrão que inclui uma rota para um *host* que desapareceu. No protocolo Babel, a ideia é marcar como inalcançável e manter a rota antiga por tempo suficiente para que as entradas de roteamento históricas expirem. Essa abordagem impõe a manutenção do rastreamento de eventos de roteamento anteriores, o que aumenta a quantidade de informações dos nós a manter em bancos de memória persistentes. Além disso, a redução do tráfego de roteamento leva ao uso de tempos limites de rota relativamente longos, o que piora as coisas. Finalmente, como consideramos uma rede na qual as informações de roteamento estão localizadas no caminho acima de cada destino, se um sensor muda de local, ele não necessariamente atualiza seus antecessores.

O protocolo Babel é um protocolo proativo baseado no protocolo de roteamento por vetor-distância. Foi concebido com base no protocolo *Destination-Sequenced Distance-Vector Routing* (DSDV). A técnica de utilizar números de sequência é replicada do protocolo DSDV, de maneira a prevenir uma contagem até o infinito dos pacotes que circulam na rede. O protocolo Babel também adota o *Enhanced Interior Gateway Routing Protocol* (EIGRP) – protocolo que permite prevenir os *loops* de roteamento. Ele utiliza a métrica *Expected Transmission Count* (taxa de perda de pacotes para determinar o melhor caminho). Esse protocolo tem como característica principal a otimização do mecanismo de transmissão. Para isso, utiliza um histórico para selecionar rotas. Se aconteceram problemas em determinadas rotas que tenham inviabilizado seu uso, poderá optar por outros caminhos que apresentem a mesma qualidade de ligação. Assim, será escolhida uma rota que já tenha sido utilizada com sucesso em detrimento de outra rota alternativa. No artigo, verificou-se que o protocolo Babel apresentou os melhores resultados, tendo o melhor desempenho comparativamente aos outros

protocolos. Como originalmente ele é baseado na camada IP, será necessária a sua adaptação para a proposta da arquitetura.

No trabalho de Kim *et al.* (2017), discute-se a aplicação de redes de sensores de baixa potência e com perdas conhecidas como LLNs (*Low Power and Lossy Networks*). Essas redes podem ser compostas por milhares de dispositivos interconectados e podem ser usadas em uma variedade de aplicações, incluindo infraestruturas de medição automatizada de rede inteligente (AMIs), monitoramento industrial e redes de sensores sem fio. Atualmente, a maioria das implantações de LLN emprega a arquitetura aberta e padronizada baseada em IP/IPv6 para interconectar-se. Essa abordagem torna as LLNs mais interoperáveis, flexíveis e versáteis, levando ao conceito emergente da *Internet* das Coisas (IoT). Com o apoio de vários esforços de padronização do IEEE, IETF e Zigbee, os sistemas de IoT agora estão equipados com protocolos e perfis de aplicativos prontos para implantações em grande escala. Entre eles, o protocolo IPv6 recentemente padronizado para LLN, denominado *Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks* (RPL). O RPL também foi projetado para dispositivos com recursos limitados. No entanto, sua implementação demonstra-se mais complexa que a implementação do protocolo Babel, o que consumiria recursos de processamento desnecessários, e com resultados semelhantes, assim optou-se pelo protocolo Babel para a implementação.

3.4 CO-SIMULADOR PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Bor *et al.* (2016) afirma que novas tecnologias da *Internet* das Coisas (IoT), como LoRa[®], estão surgindo, o que possibilita a economia de energia na comunicação sem fio a longas distâncias. Dispositivos normalmente se comunicam diretamente com um nó coletor, que remove a necessidade de construir e manter uma complexa rede de vários saltos. Dado o fato de uma ampla área ser coberta e de todos os dispositivos se comunicarem diretamente com alguns coletores, um grande número de nós precisa compartilhar o meio de comunicação. A tecnologia LoRa[®] fornece uma variedade de opções de comunicação (frequência central, fator de espalhamento, largura de banda), a partir das quais um transmissor pode ser configurado. Muitas combinações são ortogonais e fornecem comunicações simultâneas sem colisões. No entanto, existe um limite em relação ao número de transmissores que o sistema LoRa[®] pode suportar. Nesse artigo, é investigado os limites de capacidade das redes LoRa[®], usando modelos que descrevam o comportamento da comunicação LoRa[®], onde é desenvolvido um conjunto de

scripts Python para realizar a simulação de uma rede LoRaWAN. Esse trabalho será utilizado como base para modelar o meio de propagação do simulador de rede Mesh LoRa®.

No trabalho de Mehmood (2017), ele explora o simulador de rede Mesh Cooja. Esse simulador é baseado no sistema operacional Contiki, que é usado para demonstrar o funcionamento de como esses protocolos de roteamento e compactação funcionam em simulação em tempo real. É, na verdade, um emulador de *hardware*, que permite executar o *firmware* dos nós de rede que implementam o protocolo de roteamento em um ambiente de simulação. Essa abordagem, fornece um alto nível de detalhe na simulação e permite estatísticas precisas de execução. Esse tipo de simulação fornece emulação de microprocessador e simulação de meio de rádio. O nível de simulação do *firmware* é útil quando o *software* é sensível ao tempo, como no caso da simulação esperada. Assim, irá optar-se pela implementação de um emulador de *firmware* baseado na ferramenta descrita nesse trabalho.

Nos trabalhos de Mirz *et al.* (2018) e Palensky *et al.* (2017), discute-se o processo de co-simulação de sistemas elétricos, utilizando dois ou mais simuladores em paralelo para obter um resultado combinado. Cada um dos simuladores é responsável por parte do sistema, permitindo, assim, modelar com precisão partes individuais do problema a ser estudado, sem aumentar a complexidade dos modelos e do simulador. O objetivo do processo de co-simulação é obter um único resultado em comum, assim, os modelos de um simulador têm influência nos modelos dos outros simuladores e essas interações dependem da integração entre as ferramentas de simulação. Nesses trabalhos, foram apresentados alguns métodos de sincronismo e interconexão dos simuladores, destacando-se o método mestre-escravo, que será usado na implementação da ferramenta do co-simulação desenvolvida.

3.5 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO DE ACESSO AO MEIO E CLUSTERIZAÇÃO

Nos trabalhos de Majumdar *et al.* (2017) e de Monish, Rupekeshan e Rajamanikkam (2019), é discutida a aplicação das técnicas de diversidade, como a multiplexação tempo-espaço e a multiplexação espacial, como técnicas de otimização do acesso ao meio, em redes baseadas em rádio *half-duplex*. Essas discussões serviram como base para a implementação de algoritmos de multiplexação e o uso de dois canais de rádio na arquitetura proposta. A finalidade dessa implementação será reduzir o tempo de propagação do pacote, particionando ele entre ambas interfaces de rádio e, por consequência, obtendo uma diminuição do tempo de propagação do pacote e uma redução do número de colisões.

Já no trabalho de Zhu *et al.* (2019), de Gotthard e Jankech (2018) e de Zeb *et al.* (2016), são propostas técnicas de clusterização aplicadas à rede de sensores, algumas utilizando o fator de espalhamento espectral do LoRa[®], outras diferentes canais. Para a proposta de arquitetura, estudou-se a clusterização por fator de espalhamento, mas por limitação do *hardware* empregado, essa técnica não pode ser implementada. Assim, a proposta é a clusterização por canais, ou seja, diferentes frequências.

3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

Na discussão do estado da arte das tecnologias de comunicação, constata-se que existe um novo padrão de comunicação não guiado, desenvolvido originalmente para aplicação na *Internet* das Coisas, chamado de redes LPWAN. Ele vem mostrando-se bastante promissor para aplicações de monitoramento, porém possui limitações para aplicações de controle, em que é necessário maior determinismo da rede. Dentre as tecnologias usadas por esse padrão, destaca-se o meio físico LoRa[®]

Nesse trabalho, é proposto um estudo mais aprofundado sobre a aplicação da tecnologia LoRa[®] como infraestrutura de comunicação compartilhada de última milha, devido às características levantadas durante a revisão bibliográfica e resumidas no Quadro 7.

Quadro 7 – Síntese do comparativo das tecnologias não guiadas

Tecnologia	Espectro	Banda	Alcance	Limitações
GSM, GPRS	900- 1800 MHz	Até 170 Kbps	1-10 km	Baixa largura de banda
4G	2.5 GHz	Até 200 Mbps	1-5 km	Alto custo regulatório de espectro
Wi-Fi IEEE 802.11	2.4-5.8 GHz	Até 155 Mbps	1-300 m	Curto alcance
WiMAX	2.5 GHz, 3.5 GHz, 5.8 GHz	Até 75 Mbps	1-5 km 1-5 km 10-50 km	Poucas implementações
PLC	3-500 kHz 1.8-30 MHz	1-3 Mbps até 200 Mbps	1-3 km	Ruídos em redes
ZigBee	2.4 GHz 868/915 MHz	Até 250 Kbps	30-90 m	Curto alcance e baixa largura de banda
Bluetooth	2.4-2.4835 MHz	Até 721 Kbps	1-10 m	Curto alcance

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da seleção da tecnologia que será explorada para a solução proposta, alguns outros trabalhos relacionados apresentaram contribuições fundamentais para a pesquisa. Com o intuito

de melhor identificar a contribuição desses trabalhos, elaborou-se o Quadro 8, que traz um resumo de outros trabalhos usados como base para o desenvolvimento desta tese.

Quadro 8 – Trabalhos relacionais e suas contribuições

Autores	Assunto	Contribuição com o Trabalho
YU <i>et al.</i> (2017)	<i>A Survey on the Edge Computing for the Internet of Things.</i>	Métodos de processamento distribuído através da computação de borda
ZOMERS (2014)	<i>Remote access: Context, challenges, and obstacles in rural electrification</i>	Qualificação das redes de distribuição com baixa densidade de clientes
STERBENZ (2017)	<i>Smart City and IoT Resilience, Survivability, and Disruption Tolerance: Challenges, Modelling, and a Survey of Research Opportunities.</i>	Técnicas de tolerância a falha aplicadas ao sistema de comunicação
SONG <i>et al.</i> (2017)	<i>An Internet of Energy Things Based on Wireless LPWAN. Engineering</i>	Arquitetura para Redes Elétricas Inteligentes
ABEELE <i>et al.</i> (2017)	<i>Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3</i>	Método de modelagem das tecnologias de comunicação empregadas
ARTALE <i>et al.</i> (2017)	<i>Smart Interface Devices for Distributed Generation</i>	Necessidades de um sistema de geração distribuída em uma Rede Elétrica Inteligente
HONETH; NORDSTROM (2017)	<i>Distributed Topology Inference for Electric Power Grids.</i>	Protocolos de comunicação empregados na automação de SEPs
SATO; SHIBATA; UCHIDA (2019)	<i>Modeling and simulation of data flow for VLAN-based communication in substations</i>	Requisitos de comunicação para automação de sistemas elétricos de potência

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em linhas gerais, os trabalhos mencionados serviram para a qualificação e seleção da tecnologia empregada no desenvolvimento da pesquisa, assim como serviram de base para a construção da metodologia para o desenvolvimento da arquitetura proposta. Por fim, salienta-se que, durante a pesquisa bibliográfica, não foram identificados trabalhos com enfoque semelhante ao proposto nesta tese, principalmente envolvendo os conceitos empregados: coexistência de serviços na mesma rede, topologias de rede Mesh LoRa[®] com mecanismos de múltiplos canais de rádio e priorização de pacotes, o que demonstra o seu caráter de inovação e contribuição científica e tecnológica.

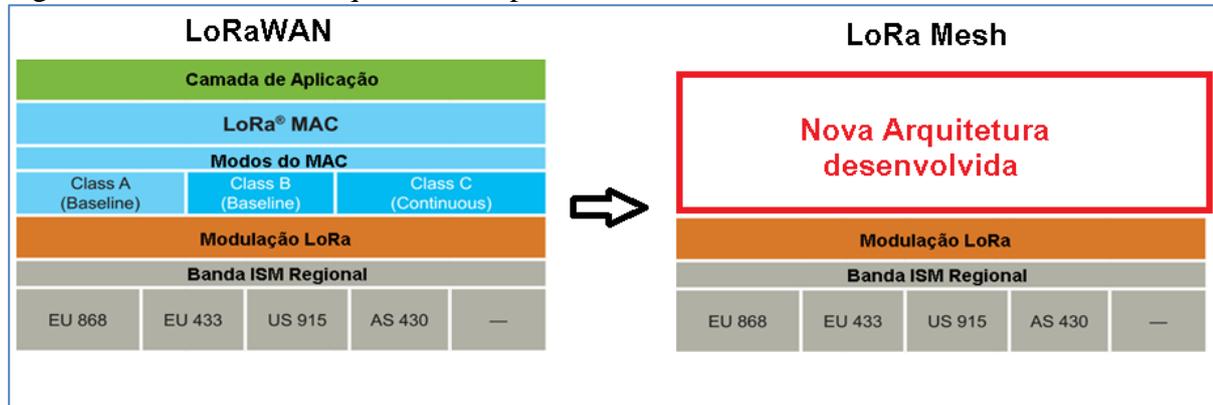
4 ARQUITETURA PROPOSTA

O objetivo deste capítulo é apresentar o modelo de arquitetura desenvolvida com base na revisão bibliográfica e nos conceitos técnicos discutidos até o momento. Além do modelo proposto, serão discutidas a aplicação das técnicas de utilização de múltiplos canais de rádio e a priorização de pacotes como ferramentas de melhora do desempenho. Como essa arquitetura é dependente do meio de transmissão PHY LoRa®, também será discutido a proposta do *hardware* para a implementação da arquitetura.

4.1 MODELO DA ARQUITETURA PROPOSTA

O modelo da arquitetura proposta, fornece uma referência para implementação de redes baseada no PHY LoRa®, que atendam minimamente as necessidades de REIs na área rural. Essa nova arquitetura apresentada na Figura 12, substituirá a camada MAC do padrão de rede LoRaWAN e permitirá uma implementação baseada em rede de malha.

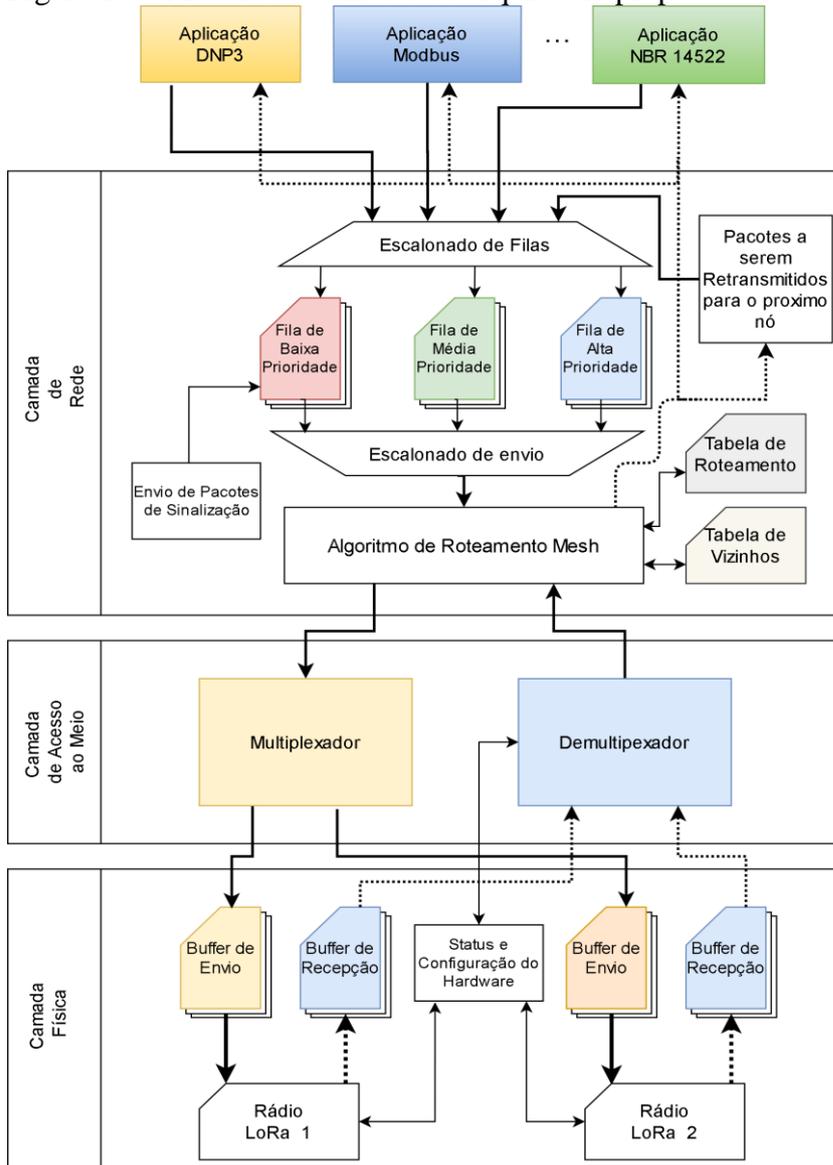
Figura 12 – Modelo da Arquitetura Proposta



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 13, é apresentada a estrutura básica da arquitetura, dividida em camadas aderentes ao modelo OSI (*Open Systems Interconnection*).

Figura 13 – Modelo de camadas da arquitetura proposta



Fonte: Elaborada pelo autor.

O modelo apresentado será detalhado em cada uma de suas camadas e implementação nos tópicos a seguir.

4.1.1 Camada Física

A camada física do modelo proposto, refere-se ao próprio meio físico no qual a comunicação irá ocorrer. Como a arquitetura foi projetada tendo como premissa o uso da tecnologia sem fio LoRa®, já discutida anteriormente, esse será o meio físico utilizado. Os rádios LoRa® comunicam-se utilizando o esquema de comunicação *half-duplex*, ou seja, não podem receber e transmitir sinais simultaneamente.

Um outro ponto a retomar é a colisão de pacotes de dados ou a impossibilidade de transmitir pacotes devido ao uso do mesmo canal de rádio, i.e., os problemas de colisão de pacotes. A solução proposta para minimizar esse problema foi a implementação de uma camada física que faça uso de dois canais de rádio e que utiliza as técnicas de multiplexação de frequência, apresentadas na revisão teórica e propostas pelo trabalho de Majumdar al. (2017) para outras tecnologias de redes sem fio. Assim, estatisticamente pode-se reduzir o índice de colisões, pois o tempo de uso do canal para enviar um pacote, é reduzido em até 50%, visto que o dado é particionado e enviado por ambas as interfaces simultaneamente. O algoritmo de controle da multiplexação de frequência, será de responsabilidade da camada de controle de acesso ao meio e serão discutidas a seguir.

4.1.2 Camada de Acesso ao Meio (MAC)

Esta camada assegura o acesso ao meio, assim como controla a sincronização entre duas entidades que queiram transmitir. Ela é a responsável por avaliar se o canal de rádio que se pretende utilizar está livre. Diferente das camadas MAC implementadas em redes TCP/IP, não serão implementados algoritmos para o tratamento de colisões por meio de envio de pacotes RTS (*Request to Send*) e CTS (*Clear to Send*), como sugerido por Islam (2019). Essa responsabilidade será da aplicação por dois motivos: manter o controle de acesso ao meio o mais simples possível e com menor *overhead* e também devido a todas as aplicações que farão uso da rede implementarem o modelo de pergunta e resposta, o que, permite verificar a entrega e a retransmissão dos pacotes de dados caso não ocorra a resposta devido a uma colisão . No entanto, a camada de acesso ao meio dessa arquitetura será responsável por gerenciar o sistema de múltiplos canais de rádio proposto para a otimização da latência e diminuição das colisões.

O esquema de transmissão Diversidade de Frequência em que a mesma informação é transmitida por ambos os canais ao mesmo tempo, será utilizada para o envio de pacotes de sinalização do protocolo de roteamento, permitindo, assim, verificar as métricas de qualidade de *link* que usa o valor do *Radio Signal Strength Indicator* (RSSI) para cada um dos canais de forma independente. Também se justifica o uso dessa técnica por se tratarem de pacotes de tamanho bastante reduzidos, e sua fragmentação em dois pacotes ocasionaria em um *header* de pacote maior que a informação válida. Já o esquema de Multiplexação de Frequência, onde o dado a ser transmitido é particionado entre as duas interfaces disponíveis e enviado simultaneamente, será utilizado para o envio de pacotes contendo dados da aplicação.

Assim como o condicionamento do dado de sinalização ou de informação da aplicação, a camada também deverá receber os pacotes através de ambas as interfaces de rádio, realizar a verificação dos dados recebidos e concatená-los em um único pacote usando como referência o número sequencial de pacote, que é o mesmo no cabeçalho de ambos os fragmentos. Esse pacote, será repassado para a camada de rede discutida na sequência. No caso de um dos fragmentos de pacote não ser recebido, o pacote inteiro é descartado e não é encaminhado para a camada superior.

4.1.3 Camada de Rede

Essa camada será a responsável pelo encaminhamento dos dados até seu endereço final dentro da rede Mesh. O protocolo de roteamento para esse tipo de rede precisa ser concebido tendo em mente a topologia de uma rede variável onde links entre os diversos nós, podem ser estabelecidos ou removidos. A largura de banda disponível e o desempenho dos nós Mesh são limitados e não devem ser desperdiçados com decisões de protocolo e com tráfego de cabeçalhos. Atualmente, existe um leque variado de protocolos e implementações Mesh que se encarregam de manter as tabelas de roteamento em cada nó como por exemplo o *Destination Sequenced Distance-Vector Routing*, adicionando, atualizando e removendo rotas apenas quando a qualidade delas altera-se, e, para isso, utilizam o processo de cálculo de métricas de qualidade.

Como apresentado anteriormente, existem vários algoritmos e protocolos de roteamento consolidados que foram implementados para redes baseadas em TCP/IP. Como a arquitetura de comunicação proposta não utiliza uma rede desse tipo, será necessário implementar um protocolo que atenda às características dessa arquitetura, como a limitação do tamanho do pacote em *256 bytes*, necessidade do menor *overhead* de sinalização possível, uso de meio de comunicação *half-duplex*, entre outros. Assim, devido às suas características de simplicidade de implementação, robustez e eficiência, o protocolo de roteamento para redes Mesh baseadas em tecnologia LoRa[®], criado para este trabalho, foi baseado no protocolo de roteamento RFC6126, também conhecido como Babel (CHROBOCZEK; SCHINAZI, 2018).

Nessa camada, também será implementada a técnica de priorização de pacotes através de três filas de envio: a fila de baixa prioridade, a fila normal e a fila prioritária, permitindo que seja possível a coexistência dos serviços.

4.1.3.1 Protocolo de Roteamento Desenvolvido

A seguir, serão apresentadas as características e funcionalidades do protocolo desenvolvido. O protocolo de roteamento utilizado como referência foi o descrito pela RFC6126, também conhecido como Protocolo Babel. Ele foi adaptado para a proposta da arquitetura deste trabalho, pois originalmente sua especificação é para uma rede TCP/IP. Algumas de suas características, como simplicidade de implementação e robustez, foram fatores determinantes para a escolha deste como base da implementação.

4.1.3.2 Endereçamento

Cada nó da rede, possui um endereço exclusivo de 4 *bytes*. Para garantir esse endereço exclusivo, optou-se por utilizar os *bytes* menos significativos do endereço MAC do *hardware* utilizado.

O endereçamento *broadcast* implica que as mensagens são enviadas para vários destinatários; esses destinos têm um endereço *broadcast* compartilhado de 4 *bytes*. Inicialmente, o único endereço *broadcast* é 0xFFFFFFFF, ou seja, transmissão limitada a todos os nós vizinhos.

4.1.3.3 O Formato do Pacote

O formato do pacote de dados apresentado no Quadro 9, é similar ao descrito na especificação original do protocolo Babel que serviu como base, apenas adaptando-se o tamanho dos campos à limitação imposta pelos rádios LoRa® e adicionando o campo “Salto” o qual é preenchido com o endereço do próximo nó a ser atingido para alcançar o destino final. Desta forma mantém-se o tamanho do dado fixo, diferente da versão original do protocolo, onde os primeiros bits do campo dado continham o endereço do próximo salto em caso de um pacote que necessitasse de vários saltos para atingir seu destino.

Quadro 9 – Especificação do formato do pacote usado pelo protocolo de roteamento

Byte 0	Byte 1	Bytes 2 - 5	Bytes 6 - 9	Bytes 10 -13	Byte 14	Byte 15	Bytes 16 - 256
TTL	Tamanho	Origem	Destino	Salto	Sequência	Tipo	Dado

Fonte: Elaborado pelo autor com base na RFC6126.

Onde:

TTL: é o “tempo de vida”, ou seja, o número de saltos permitidos antes que a mensagem seja descartada por um nó;

Tamanho: é todo o comprimento do pacote (cabeçalho + dados);

Origem: é o endereço de 4 *bytes* do nó que originou a mensagem;

Destino: é o endereço de 4 *bytes* do nó de destino pretendido;

Salto: é o endereço de 4 *bytes* do próximo nó para onde o pacote deve ser encaminhado;

Sequência: é o contador global de mensagens que determina a taxa de perda de pacotes, também usado para demultiplexar os fragmentos recebidos pelas duas interfaces de rádio. Ambos fragmentos devem possuir a mesma sequência para serem agrupados;

Tipo: é um caractere ASCII, que descreve o conteúdo da carga útil (por exemplo, r = pacote de rotas, h = pacote de *hello*, m = dados mais significativos, l = dados menos significativos);

Dado: é o conteúdo da mensagem a ser interpretada pela camada de aplicação.

4.1.3.4 Encaminhamento

Uma tabela de vizinhos é gerada por mensagens regulares e mensagens de *hello*. Quando uma mensagem regular não é enviada após um período de tempo-limite especificado, um pacote *hello* será enviado para garantir que um nó não seja descartado da tabela de roteamento de um nó vizinho. Uma entrada na tabela de vizinhos consiste nos seguintes campos:

Endereço: é endereço de 4 *bytes* do nó vizinho;

Sequência: é o número de sequência da última mensagem recebida desse endereço usado para recalculer a perda de pacotes (descrito no tópico Métricas);

Métrica: é uma representação de 0 a 255 da qualidade do *link* para o endereço vizinho;

Protocolo: é o protocolo da aplicação de REI (DNP, Modbus ou NBR14522) que este cliente está configurado para tratar. Esta informação é usada para gerar uma tabela de protocolos por nós, o que garante que os dispositivos gateway saibam para qual nó deve ser enviada a requisição;

SlaveAddress: é o endereço do dispositivo escravo associado ao nó (referente ao protocolo que o cliente está configurado).

4.1.3.5 Pacote Hello

Para evitar inundar a rede, os pacotes *hello* têm o campo TTL de 1, o que significa que eles são transmitidos por apenas um único salto. Ele também implementa um endereço *multicast* simples, de modo que qualquer vizinho imediato possa recebê-lo. Um pacote *hello* pode ser visto como qualquer pacote endereçado a todos os vizinhos usando o endereço *multicast*. Ele também carrega as informações de protocolo e *slave address* para formar a tabela de vizinhos do nó.

4.1.3.6 Tabela de Encaminhamento

A tabela de encaminhamento (roteamento) em um nó da rede, consiste nos seguintes campos:

Destino: é o endereço de 4 *bytes* do ponto final da rota;

NextHop: é o endereço de 4 *bytes* do vizinho através do qual o ponto final pode ser alcançado;

Distância: é o número de saltos do ponto final, usado para descartar o pacote caso ele ultrapasse este número, evitando assim *loops*;

Sequência: é o número de sequência da última mensagem recebida do destino usada para recalculer a perda de pacotes;

Métrica: é uma representação de 0 a 255 da qualidade do *link* entre o endereço de destino e seu salto final;

Protocolo: é o protocolo da aplicação de REI (DNP, Modbus ou NBR14522) que este cliente está configurado para tratar;

SlaveAddress: é o endereço do dispositivo escravo associado ao nó (referente ao protocolo que o cliente está configurado).

A tabela de roteamento é gerada pelos nós que anunciam suas rotas para seus vizinhos. A publicação de rotas exige que pacotes maiores com todas as rotas armazenadas em um nó, sejam transmitidos a fim de divulgar para seus vizinhos, quais os nós conhecidos e, portanto, sejam enviados com menos frequência do que pacotes *hello*. Além da tabela de roteamento, nessa tabela também está armazenada a informação de qual protocolo é tratado em cada nó, assim como seu endereço de escravo correspondente ao protocolo tratado. Assim, é possível

fazer a relação do dispositivo escravo com o endereço de nó na rede Mesh permitindo que os nós gateways possam encaminhar o pacote externo à rede para o dispositivo escravo correto.

4.1.3.7 Pacotes de atualização das tabelas de roteamento

Assim como os pacotes *hello*, os pacotes de tabelas de roteamento têm um TTL de 1 e usam endereços *multicast*, ou seja, enviados apenas para vizinhos imediatos. Na recepção por um nó vizinho, esses dados são analisados e as rotas contidas são comparadas com todas as rotas existentes na tabela de roteamento do nó. Após comparar, o nó adiciona a rota à sua tabela, atualiza uma rota existente com uma nova ou melhor métrica ou elimina a rota, pois possui uma rota melhor ou a rota se refere ao endereço local dos nós.

Devido ao tamanho limitado do pacote (240 *bytes* de dados), um pacote da tabela de roteamento é limitado a 30 rotas (8 *bytes*/rota). Após descobrir mais de 30 rotas, um nó precisa enviar vários pacotes para compartilhar toda a sua tabela de roteamento.

4.1.3.8 Métricas

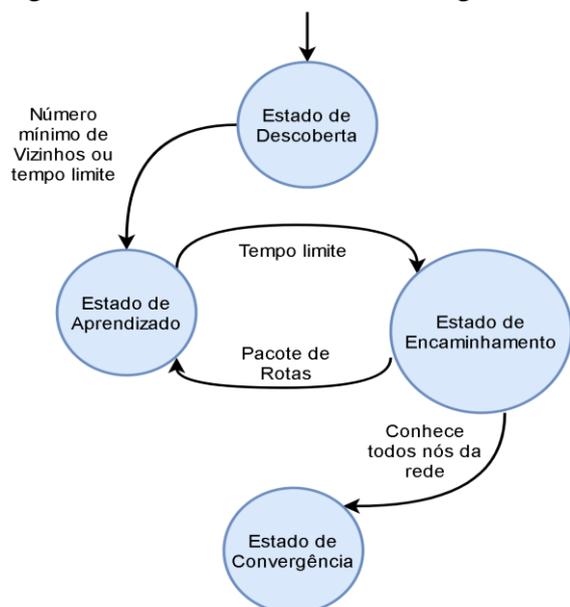
Para a seleção de rota, um nó da rede usa duas métricas, a contagem de saltos e sucesso de pacotes. Um nó dá preferência ao menor número de saltos, a menos que a taxa de êxito dos pacotes caia abaixo de um determinado limite.

O sucesso do pacote como no protocolo Babel original, é calculado a partir do número de sequência no cabeçalho dos pacotes e é representado por um valor de 0 a 255. Se um nó perder um pacote do vizinho, o valor de sucesso do pacote será diminuído em 16, o que significa que após 16 pacotes perdidos, o sucesso do pacote será reduzido para 0.

4.1.3.9 Estados dos Nós da Rede

Quando um nó ingressa na rede pela primeira vez, ele precisa passar por vários estados antes de iniciar o roteamento de pacotes, estes estados são apresentados na Figura 14 e detalhados a seguir.

Figura 14 – Estados de um nó ao ingressar na rede mesh



Fonte: Elaborada pelo autor.

- **Estado de Descoberta:** Durante a fase de descoberta, um nó transmite pacotes *hello* para se apresentar a seus vizinhos e ouve outros pacotes sendo enviados em seu intervalo, para que ele possa descobrir seus vizinhos e adicioná-los às tabelas de roteamento. Depois de um tempo limite definido ou um número mínimo de vizinhos descobertos, o nó entra na fase de aprendizado;
- **Estado de Aprendizado:** Durante a fase de aprendizado, um nó compartilha sua tabela de roteamento com seus vizinhos e escuta os pacotes de roteamento enviados pelos vizinhos. Ele analisa os pacotes de roteamento conforme descrito acima e atualiza sua tabela de roteamento. Dessa forma, ele aprende sobre os vizinhos de seus vizinhos, ou seja, nós com vários saltos de distância. A fase de aprendizado provavelmente nunca está completa, pois novos nós poderão aparecer a qualquer momento. No entanto, após um certo tempo, configurado como um parâmetro em cada nó da rede, o nó entra no estado de encaminhamento;
- **Estado de Encaminhamento:** no estado de encaminhamento, um nó descobriu uma certa quantidade de vizinhos e aprendeu sobre a rede para ser considerado uma boa rota. Esse estado deve ser considerado o estado operacional normal de um nó da rede, pois agora ele pode ser usado para enviar mensagens e retransmitir mensagens endereçadas aos nós para os quais possui rotas;

- **Estado de Convergência:** a convergência implica que todo nó tem conhecimento de uma rota para todos os outros nós da rede. Pode-se dizer que um nó da rede sabe o endereço de cada nó na rede e o endereço de salto para alcançar esse endereço, mas não conhece toda a topologia da rede. Isso reduz a memória necessária para manter uma tabela de roteamento e o tempo necessário para a convergência, pois não é necessário armazenar a rota completa para todos os nós, apenas a informação de qual deverá ser o nó vizinho utilizado para alcançar o nó final;

4.1.4 Aplicação

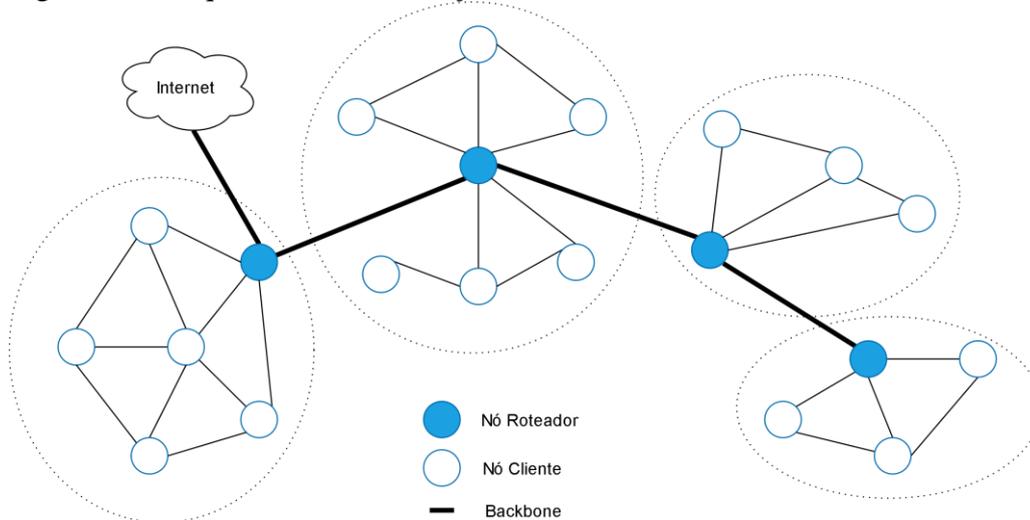
A aplicação não faz parte da arquitetura desenvolvida, será a aplicação do usuário quem fará o envio e o recebimento de pacotes de dados. No caso, a proposta inicial da arquitetura prevê como aplicações o recebimento e o envio de pacotes dos protocolos de redes elétricas inteligentes, DNP3, Modbus e NBR 14522.

Finalizada a explicação de cada uma das camadas no modelo proposto, será explicado com maiores detalhes o protocolo responsável pelo roteamento dos pacotes entre os nós da rede.

4.1.5 Estrutura de Rede

A estrutura da rede é composta por um número máximo de 1024 dispositivos (dispositivos finais, roteadores e gateways) com suas interfaces de rádio, que transmite mensagens omnidirecionalmente, de modo que, em condições ideais, todos os nós devem receber todas as mensagens transmitidas por um nó vizinho. A limitação de 1024 dispositivos é devido ao número de entradas na tabela de roteamento que cada dispositivo conseguirá armazenar nesta primeira versão do protocolo. Como alternativa a essa limitação, pode-se realizar a clusterização da rede, como a proposta da Figura 15, que, para este modelo, irá consistir em configurar os nós da rede para trabalharem em um outro par de frequências, elegendo um outro dispositivo como nó roteador daquele *cluster*.

Figura 15 – Esquema de clusterização dos nós da rede



Fonte: Adaptado de Zeb *et al.* (2016).

4.1.6 Atraso de Propagação do Pacote

O tempo de propagação de um pacote LoRa[®] significa o tempo que leva para um transceptor LoRa[®] transmitir um único pacote. Para o cálculo do tempo de propagação, é conveniente definir a duração do símbolo T_{sym} , dada pela Equação (2):

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2)$$

Onde:

BW: é a largura de banda utilizada (125, 250 ou 500 kHz);

SF: é o fator de espalhamento espectral utilizado (7 até 12).

O pacote é composto por um preâmbulo de tamanho configurável que influencia no tempo de propagação do pacote. O tempo de transmissão do preâmbulo é dado pela Equação (3).

$$T_{preambulo} = (n_{preambulo} + 4,5) T_{sym} \quad (3)$$

Onde:

$n_{preambulo}$ é o número de símbolos de preâmbulo programados.

O número de símbolos que compõem o pacote de carga útil e o cabeçalho é fornecido pela Equação (4).

$$\begin{aligned} & \text{payloadSymbNb} \\ & = 8 + \max \left(\text{ceil} \left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2DE)} \right) (CR + 4), 0 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Onde:

PL: é o número de *bytes* do *payload*;

SF: é o fator de espalhamento espectral;

H: 0 se o *header* está explícito e 1 se o *header* é implícito;

DE: 1 se modo de otimização para baixa velocidade;

CR: é o fator de correção de erro (1 até 4).

A duração do *payload* é o período do símbolo multiplicado pelo número de símbolos contidos no *payload*, conforme Equação (5), e o tempo total de propagação do pacote é dado pela soma do tempo de preâmbulo com o tempo do *payload*, como apresentado na Equação (6).

$$T_{\text{payload}} = \text{payloadSymbNb} \cdot T_{\text{sym}} \quad (5)$$

$$T_{\text{packet}} = T_{\text{payload}} + T_{\text{preamble}} \quad (6)$$

Com a aplicação da técnica múltiplos canais de rádios, busca-se reduzir o tempo de envio dos pacotes e também permitir o envio de pacotes maiores que 256 *bytes* de carga útil, pois poderá ser dividido entre as duas interfaces de rádio. Para se determinar o tempo de envio de pacote multiplexado por diversidade espacial pode-se fazer uso da Equação (7)

$$T_{\text{pckMIMO}} = \frac{(2 * T_{\text{preamble}} + (\text{payloadSymbNb} + 32) T_{\text{sym}})}{2} \quad (7)$$

Onde:

Tpreambulo: é o tempo de envio do preâmbulo.

payloadSymbNb: é o número de símbolos do *payload*.

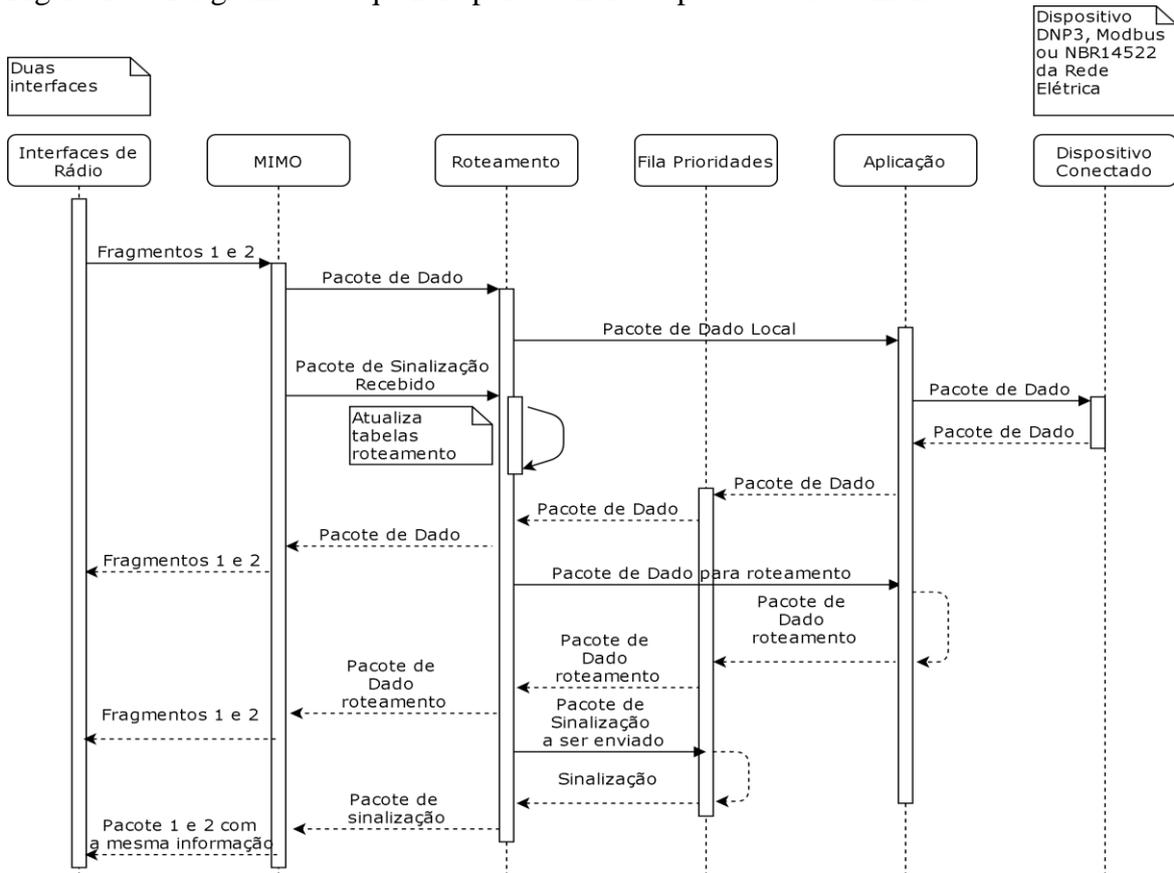
Tsym: é o tempo de envio de cada símbolo.

A constante 32 representa os bytes adicionais de cabeçalho do protocolo de roteamento para os dois fragmentos do pacote, 16 bytes em cada pacote.

4.1.7 Visão Geral do Funcionamento da Arquitetura

Na Figura 16, pode-se observar o diagrama de sequência do funcionamento básico da arquitetura. Ao receber um pacote composto por dois fragmentos (recebidos em cada uma das interfaces de rádio), o mesmo é concatenado, caso seja um pacote de dado, e o destino é o nó local, ele é tratado. Caso seja um pacote para roteamento, o nó local verifica sua tabela de roteamento e encontra a entrada que corresponde ao destino do pacote, em seguida, anexa o endereço de salto correspondente ao próximo salto. Quando esse pacote é recebido pelos nós vizinhos (próximo destino), eles verificam se o endereço de salto especificado corresponde ao endereço local. Se não corresponder, o pacote será descartado. Se o endereço de salto corresponder ao endereço local, ele decrementa o TTL no cabeçalho padrão e, em seguida, verifica a tabela de roteamento para encontrar o próximo endereço de salto para o pacote e substitui o endereço original pelo endereço de salto da tabela de roteamento. A mensagem é, então, enviada para *buffer* e enfileirada para ser retransmitida.

Figura 16 – Diagrama de sequência para o envio de pacotes e roteamento



Fonte: Elaborada pelo autor.

A escolha da rota é feita em cada um dos nós por onde o pacote passa; cada nó mantém apenas rotas com a menor distância e maior qualidade até um destino. Quando um nó recebe um pacote roteado que pretende retransmitir, ele consulta sua tabela de roteamento para encontrar o melhor endereço de salto. No caso de empate, ou seja, duas rotas com o mesmo número de saltos, o nó de retransmissão selecionará a rota com a melhor métrica.

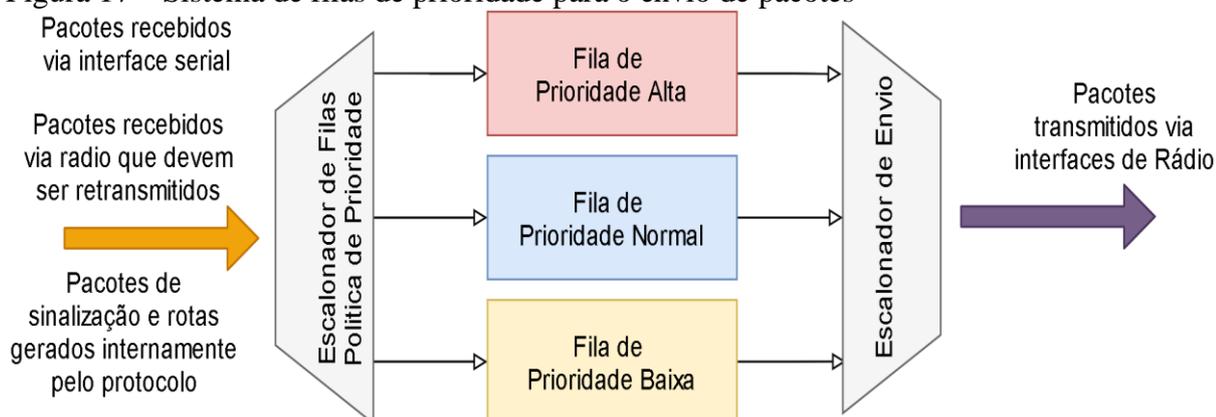
4.2 COEXISTÊNCIA DE SERVIÇOS

A coexistência de serviços para redes elétricas inteligentes, pressupõe que o sistema de comunicação atenda a mais de uma aplicação utilizando o mesmo meio físico, diferentemente das propostas tradicionais, em que a rede atende somente uma aplicação, como, por exemplo, AMI, automação da distribuição, etc. A possibilidade de priorizar o roteamento de um tipo de pacote para garantir a qualidade do serviço que possui maior restrição de tempo garante essa coexistência de forma minimamente satisfatória para a arquitetura proposta.

A importância do uso de técnicas de priorização para os serviços de uma rede *smart grid* foi discutida na pesquisa de Akerele e Al-Anbagi (2019), em que é apresentada a dificuldade de redes de sensores lidarem com as demandas das aplicações de rede inteligente, principalmente as com rigorosas restrições de atrasos. O problema foi solucionado, introduzindo um mecanismo de QoS adaptável e, por meio de simulações, demonstrou a redução do atraso de pacotes em 40% entre a origem e destino.

A proposta de implementação neste modelo consiste em um mecanismo mais simples, que pode ser visto na Figura 17, em que os pacotes vindos da aplicação do usuário, pacotes de sinalização e pacotes recebidos pelas interfaces de rádio que precisam ser retransmitidos (roteados) para outros nós são alocados nas filas correspondentes à prioridade configurada nesse pacote.

Figura 17 – Sistema de filas de prioridade para o envio de pacotes



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com esse mecanismo de política de prioridade, o pacote de maior prioridade consegue ser tratado primeiro, garantindo uma menor latência para aplicações críticas, como, por exemplo, mensagens não solicitadas do protocolo DNP3, que geralmente informam alarmes do sistema.

4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

Durante o capítulo, buscou-se apresentar todas as características presentes na arquitetura, embasando as escolhas ou opções na revisão bibliográfica realizada. Destaca-se que a arquitetura tem como características inéditas não encontradas em trabalhos correlatos o uso

do PHY LoRa[®] como meio para implementação das técnicas de diferenciação por multiplexação tempo-espaço e multiplexação espacial. Também traz como nova contribuição, baseado no que foi discutido na revisão bibliográfica, o protocolo de roteamento otimizado para uma rede Mesh com limitação de banda e não baseada em IP, como é a rede LoRa[®].

5 FERRAMENTA DE CO-SIMULAÇÃO E PROTÓTIPO DE *HARDWARE*

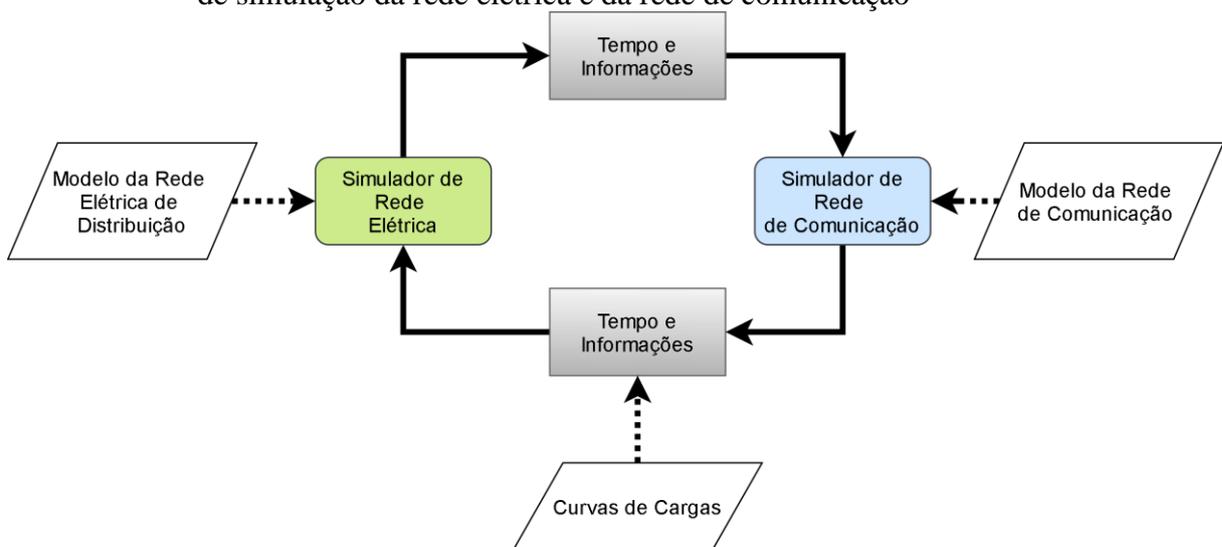
Neste capítulo, serão apresentados os aspectos relevantes para o entendimento da ferramenta de co-simulação desenvolvida para uso nos testes da arquitetura de comunicação proposta. A mesma ferramenta é usada posteriormente como ferramenta de auxílio do projeto e dimensionamento de sistemas de comunicação para interconexão dos equipamentos eletrônicos inteligentes de uma rede elétrica de distribuição. O objetivo da ferramenta é avaliar se a capacidade da rede LoRa[®] com a topologia Mesh proposta pelo trabalho é adequada aos requisitos de tempo das aplicações que estão presentes na rede elétrica à qual pretende-se interconectar. Será possível simular estados da rede elétrica muito próximos dos reais, gerando, assim, mensagens não requisitadas de alarmes (DNP3), enquanto as requisições dos demais serviços continuam a ser geradas pelos sistemas supervisórios. Assim, é possível avaliar se número de dispositivos conectados na rede poderá ser atendido de forma adequada. Caso não seja adequado, a técnica da clusterização deve ser empregada, segmentando a rede em duas redes menores, que trabalharão com um par de canais (frequências) diferentes.

5.1 PROCESSO DE CO-SIMULAÇÃO

O processo de co-simulação utiliza dois ou mais simuladores em paralelo para obter um resultado combinado. Cada um dos simuladores é responsável por parte do sistema, permitindo, assim, modelar com precisão partes individuais do problema a ser estudado, sem aumentar a complexidade dos modelos e do simulador. O objetivo do processo de co-simulação é obter um único resultado comum, assim, os modelos de em um simulador têm influência nos modelos dos outros simuladores e essa interações dependem da integração entre as ferramentas de simulação.

Um dos pontos mais importantes do processo de co-simulação é modelar os cenários em que o co-simulador pode ser utilizado. A Figura 18 apresenta o fluxo geral do processo de co-simulação usado nesse trabalho, onde percebe-se que, a cada interação entre as ferramentas, há a troca da informação do tempo para o sincronismo entre as ferramentas de simulação.

Figura 18 – Fluxo de co-simulação, apresentando as informações trocadas entre as ferramentas de simulação da rede elétrica e da rede de comunicação



Fonte: Elaborada pelo autor.

Devido à importância do sincronismo entre os simuladores, foram desenvolvidos diversos métodos para tornar possível realizar co-simulação. A escolha de um método de sincronismo deve considerar o princípio de funcionamento dos simuladores, a maneira como é realizada a comunicação entre eles, e a quantidade e a frequência de dados. Segundo Troiano *et al.* (2016), escolher um método de sincronismo inadequado pode gerar um grande impacto na co-simulação, reduzindo consideravelmente o desempenho.

A maior dificuldade está relacionada à maneira como a simulação avança em cada um dos simuladores, sendo possível dividir os simuladores em duas categorias que se diferenciam pelo domínio em que a simulação é executada. A primeira dessas categorias é chamada de Simulação no Domínio do Tempo, em que o passo temporal é utilizado para avançar a simulação. Nesse simulador, a simulação inicia em um instante t_0 em que são realizados os cálculos necessários na execução do modelo utilizado e, a cada intervalo de tempo Δt , os cálculos são refeitos. O resultado obtido em um instante t_n depende dos resultados de passos anteriores. Um exemplo é um simulador da rede elétrica OpenDSS, que realiza uma série de cálculos de fluxo de potências sequenciais para simular o comportamento dos sistemas ao longo de um período.

Outro modelo de simulador é chamado de Simulação no Domínio de Eventos, em que determinados eventos fazem com que o tempo da simulação avance em um intervalo de tempo que não é fixo. Cada evento pode causar um avanço diferente no tempo.

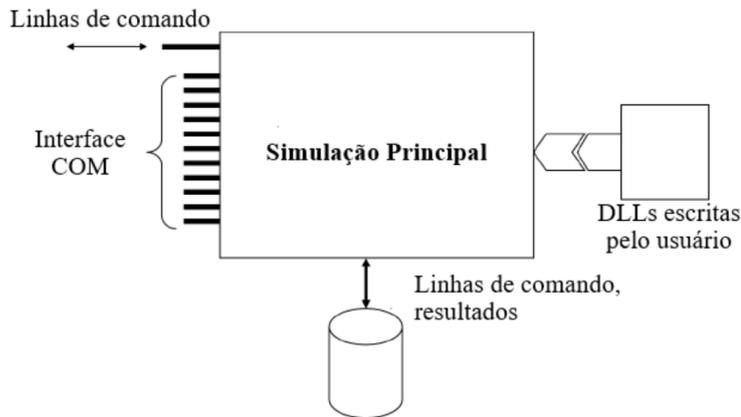
Como visto, os simuladores da rede de distribuição e da rede de comunicação executam em domínios diferentes. Portanto, ao desenvolver o co-simulador, é necessário considerar essa particularidade na escolha do método de sincronismo entre ambas as ferramentas.

Um método de sincronismo proposto por Amarasekara *et al.* (2016), chamado de Método de Sincronismo Mestre-Escravo, demonstra-se adequado para a implementação desejada. Nesse método, um dos simuladores é chamado de Mestre e é responsável por controlar toda a simulação e o avanço temporal. O outro simulador é denominado Escravo, e deve apenas responder requisições enviadas pelo Mestre. O avanço do tempo da simulação do Escravo depende de comandos enviados pelo Mestre, o que significa que a simulação do escravo avança até o momento que o Mestre requisita. O Método Mestre-Escravo está sujeito à acumulação de erros temporais, mas como o objetivo do trabalho é validar os sistemas de comunicação usando o simulador de sistemas de distribuição apenas como fonte de dado, como grandezas de corrente e tensão, acredita-se que esse problema não deverá afetar a proposta desenvolvida aqui.

5.2 SIMULADOR DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

Durante o processo de escolha da ferramenta de simulação, algumas ferramentas de simulação de sistemas elétricos foram avaliadas. Dentre elas, o OpenDSS satisfaz todas as necessidades requeridas pela proposta desse trabalho. A modelagem do sistema e a determinação das simulações são feitas por meio de linhas de comando e com a possibilidade de controle do *software* por meio de uma interface do tipo *Component Object Model* (COM), tornando, assim, viável o controle por meio de ferramentas externas, tais como os *softwares Visual Basic for Applications* (VBA), *scripts* MATLAB e *scripts* em linguagem de programação Python, que será utilizada para realizar a integração com o restante do co-simulador (HARIRI; NEWAZ; FARUQUE, 2017). A estrutura de comunicação-base do OpenDSS é vista na Figura 19, onde se pode observar a interface COM, bem como o mecanismo que será utilizado para realizar a comunicação e a sincronização com os demais blocos do co-simulador.

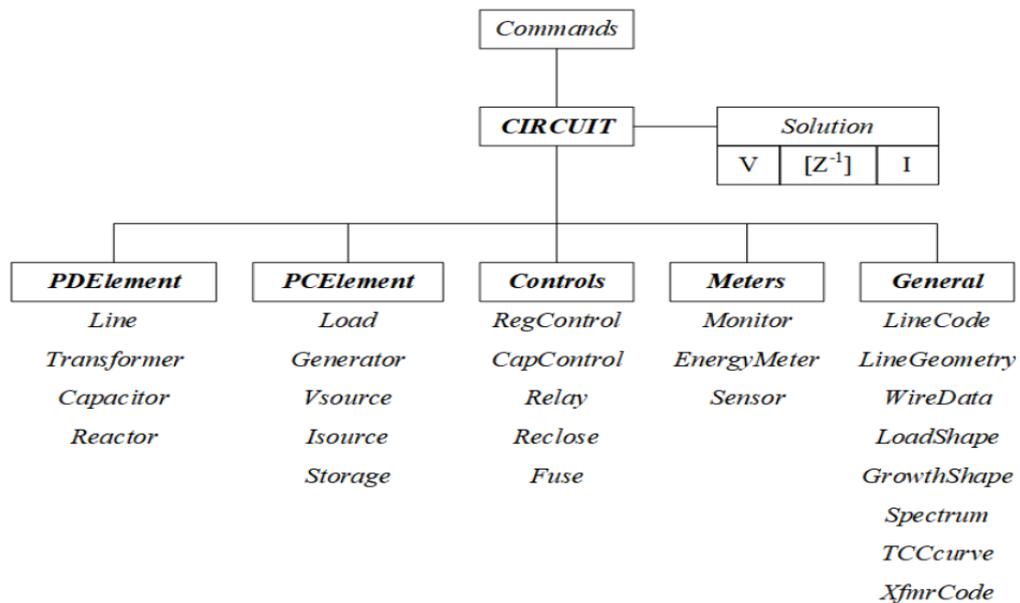
Figura 19 – Estrutura de interfaces da ferramenta OpenDSS



Fonte: Adaptado de Dugan (2013).

A arquitetura interna do simulador, vista na Figura 20, é composta por um circuito e um sistema de solução. O circuito é composto por cinco conjuntos centrais, sendo eles: elementos que fornecem potência (*Power Delivery Element* ou, simplesmente, “*PDElement*”), elementos que convertem potência (*Power Conversion Element* ou, simplesmente, “*PCElement*”), elementos de controle, medidores e elementos gerais (DUGAN; MCDERMOTT, 2011).

Figura 20 – Estrutura interna do simulador OpenDSS



Fonte: Adaptado de Dugan (2013).

Segundo Dugan (2013), a solução (fluxo de potência) é realizada com base na matriz de admitâncias nodais, vista na Equação (8), que relaciona as tensões nodais e as correntes injetadas em cada nó do sistema.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^{-1} & -Z^{-1} \\ -Z^{-1} & Z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

O fluxo de potência é calculado após as interações necessárias para definir todos os parâmetros da matriz de admitância nodal. Essa análise do fluxo de potência consiste na resolução de um circuito estático que represente a rede em questão naquele determinado instante por meio das constantes conhecidas do sistema, que caracterizam, principalmente, geradores e cargas. Analisando o fluxo de potência, é possível fazer considerações fundamentais sobre o funcionamento do sistema analisado, tais como:

- a) tensão nos barramentos;
- b) corrente e potência nos segmentos de rede;
- c) cálculo das perdas;
- d) determinação dos desequilíbrios de tensão e corrente;
- e) determinação da distorção harmônica.

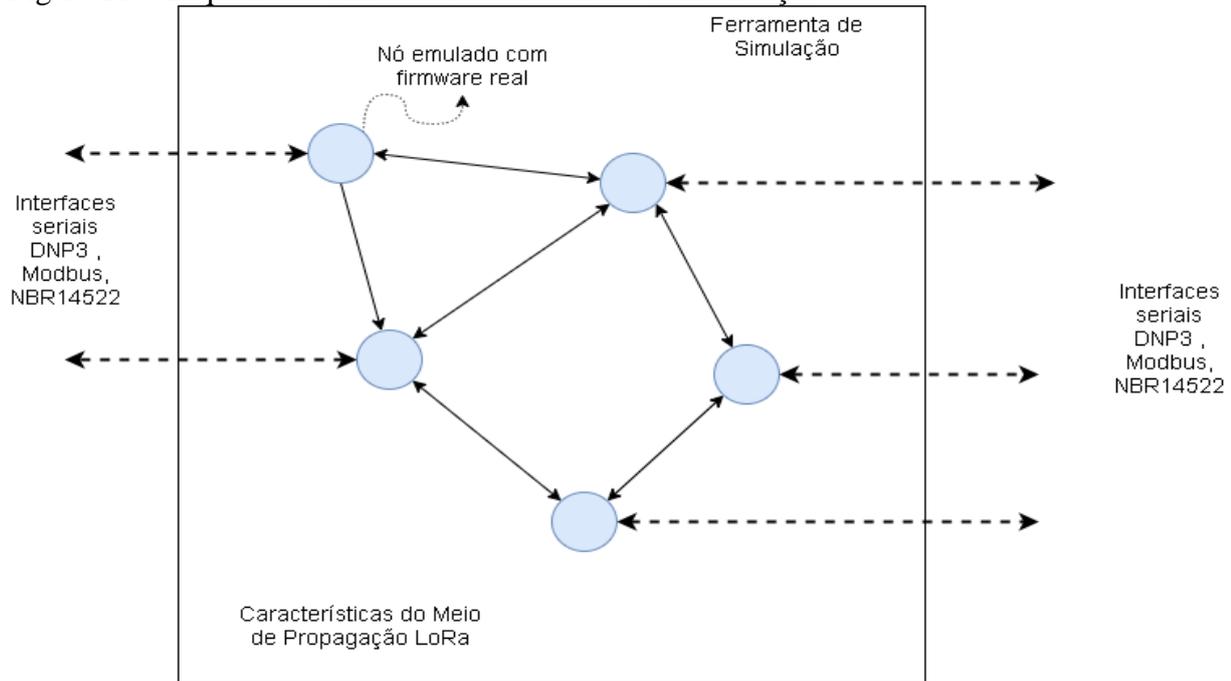
Na primeira versão da ferramenta de co-simulação, os elementos da estrutura interna do simulador que irão fazer interface com o restante da ferramenta, serão o Medidor de Energia, que será estendido com uma interface para leituras de suas grandezas através do protocolo NBR 14522, o controle de regulador de tensão, que terá sua interface usando o protocolo DNP3, incluindo mensagens não solicitadas de alarmes que poderão ser configurados, e o Religador, que terá uma interface Modbus. Além desses elementos que serão estendidos, o controle da ferramenta de co-simulação (mestre) fará, via interface COM, ajustes nas cargas e a execução do fluxo de potência no modo *snapshot* em passos de tempo determinados na configuração da simulação.

5.3 SIMULADOR DO SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

Durante o processo de escolha da ferramenta de simulação de sistemas de comunicação, várias ferramentas foram analisadas. Dentre elas, podemos citar a ferramenta NS-3 (NS-3, [s.d.]), a ferramenta OMNET++ (SLABICKI; PREMSANKAR; DI FRANCESCO, 2018), a ferramenta Cooja (MEHMOOD, 2017) e a ferramenta LoRaSim (LORASIM, [s.d.]). Nenhuma dessas ferramentas apresentou todas as características desejadas para a simulação do sistema de comunicação. Desejava-se uma ferramenta que conseguisse manipular dados reais encapsulados nos protocolos de REIs escolhidos, que pudesse disparar as transmissões com base em eventos externos, não em tempos fixos, que permitisse a implementação de modificações no protocolo de roteamento implementado, além de suportar o meio de propagação dos sinais sem fio LoRa[®] e que permitisse configurações como fator de espalhamento, largura de banda, entre outros.

Assim, optou-se pela implementação de uma ferramenta de simulação usando as características de duas ferramentas. A possibilidade de configuração do meio de comunicação baseado em LoRa[®] presente na ferramenta LoRaSim, de onde vieram todas as características da simulação do meio de transmissão, através de seu equacionamento, e a possibilidade de emular o *firmware* de cada um dos nós da rede Mesh, característica presente no simulador Cooja que foi replicada na ferramenta desenvolvida. Nesta ferramenta cada nó é emulado por um processo do sistema operacional executando o *firmware* desenvolvido. Essa abordagem, que pode ser vista na Figura 21, fornece um alto nível de detalhe na simulação e permite estatísticas precisas de execução. Esse tipo de simulação fornece emulação de microprocessador e simulação de meio de rádio. O nível de simulação do *firmware* é útil quando o *software* é sensível ao tempo, como no caso da simulação esperada.

Figura 21 – Esquema do simulador do sistema de comunicação



Fonte: Elaborada pelo autor.

O comportamento de comunicação dos nós LoRa[®] pode ser modelado usando as equações para o intervalo de comunicação – Equação (9) – e o comportamento de colisão – Equação (10) descritas por Bor *et al.* (2016).

$$R = \begin{cases} 1, & P_{rx} > S_{rx} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

Onde:

R: é a variável lógica que exprime o sucesso ou insucesso da transmissão;

P_{rx} : é a potência do sinal transmitido;

S_{rx} : é o limite de sensibilidade do receptor.

$$C(x, y) = O(x, y) \wedge C_{freq}(x, y) \wedge C_{sf}(x, y) \wedge C_{pwr}(x, y) \wedge C_{cs}(x, y) \quad (10)$$

Onde:

C: é a variável lógica que exprime se houve ou não colisão entre x e y;

O: é a variável que determina a sobreposição espacial da transmissão;

C_{freq} : é a variável lógica que determina colisão de frequências;

C_{sf} : é a variável lógica que determina colisão de espalhamento espectral;

C_{pwr} : é a variável lógica que determina colisão por potências aproximadas;

C_{cs} : é a variável lógica que determina colisão por tempos iguais.

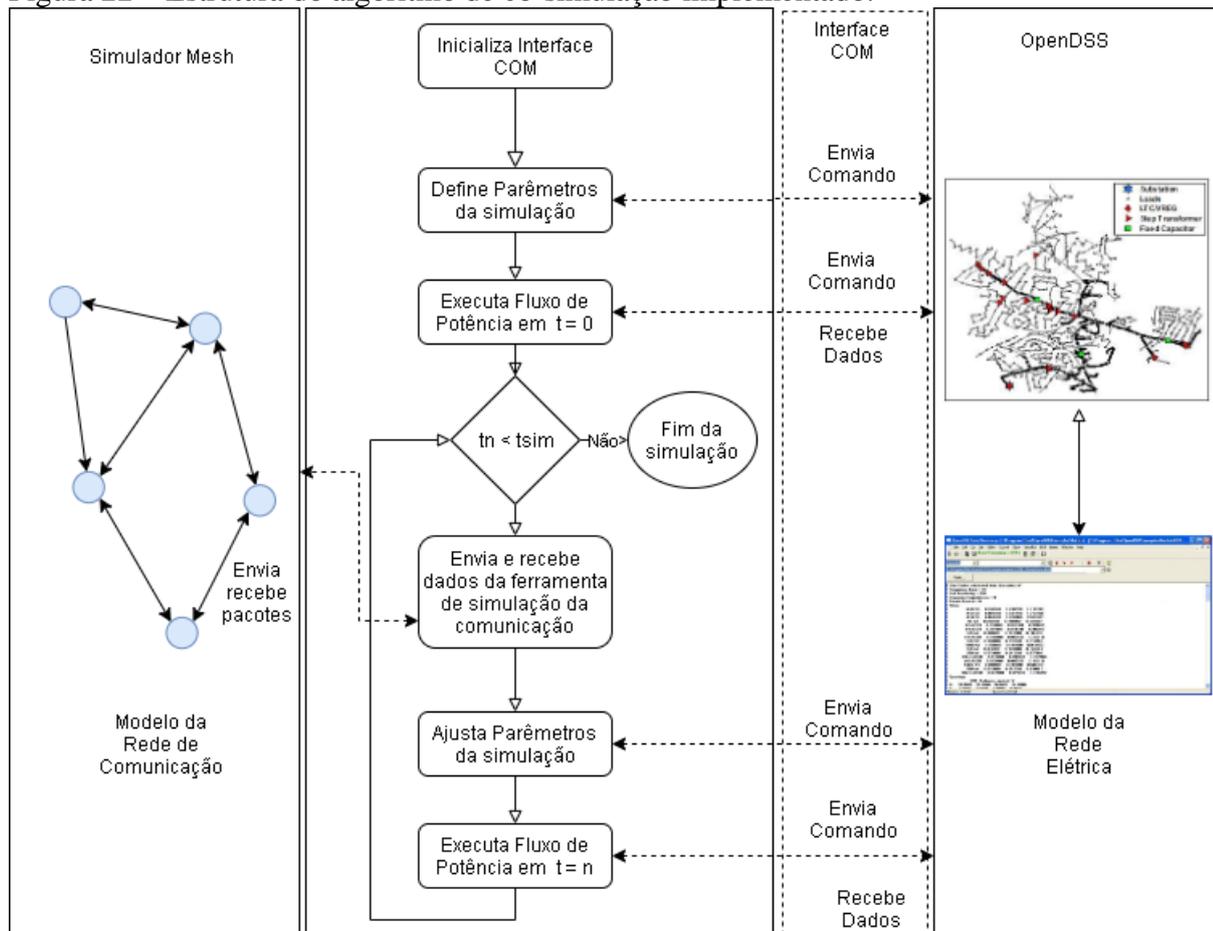
Contudo, assim como no trabalho de Bor *et al.* (2016), o simulador usa uma variante simplificada dessas equações. A variante assume um alcance infinito de comunicação no trabalho original, já para o modelo proposto neste trabalho, por se tratar de uma rede Mesh, não em topologia estrela, o alcance será configurado como um parâmetro da simulação. A variante simplificada também assume que quaisquer duas transmissões sobrepostas no tempo, com os mesmos parâmetros de frequência, espalhamento espectral e largura de banda, colidem, e nenhuma das duas transmissões é recebida. Esse modelo apresentou-se bastante eficiente em replicar o comportamento das transmissões LoRa[®], analiticamente descritas.

Como a ferramenta implementada usa a emulação do *firmware* real que será usado nos nós da rede, o comportamento do *software* será idêntico ao real. A validação da parte da ferramenta que emula o meio de transmissão com as colisões foi feita comparando o resultado dos tempos de propagação e tempos de colisão com os cálculos manuais através do equacionamento apresentado.

5.4 MODELO DE CO-SIMULAÇÃO

Especificadas as características das ferramentas de simulação de forma independente, faz-se necessária a conexão de ambas as ferramentas. O modelo de co-simulação proposto, apresentado na Figura 22, tem como elemento central um *script* implementado na linguagem Python, que atuará como elemento mestre da simulação, pois será o responsável por ditar o passo da simulação para ambas as ferramentas.

Figura 22 – Estrutura do algoritmo de co-simulação implementado.

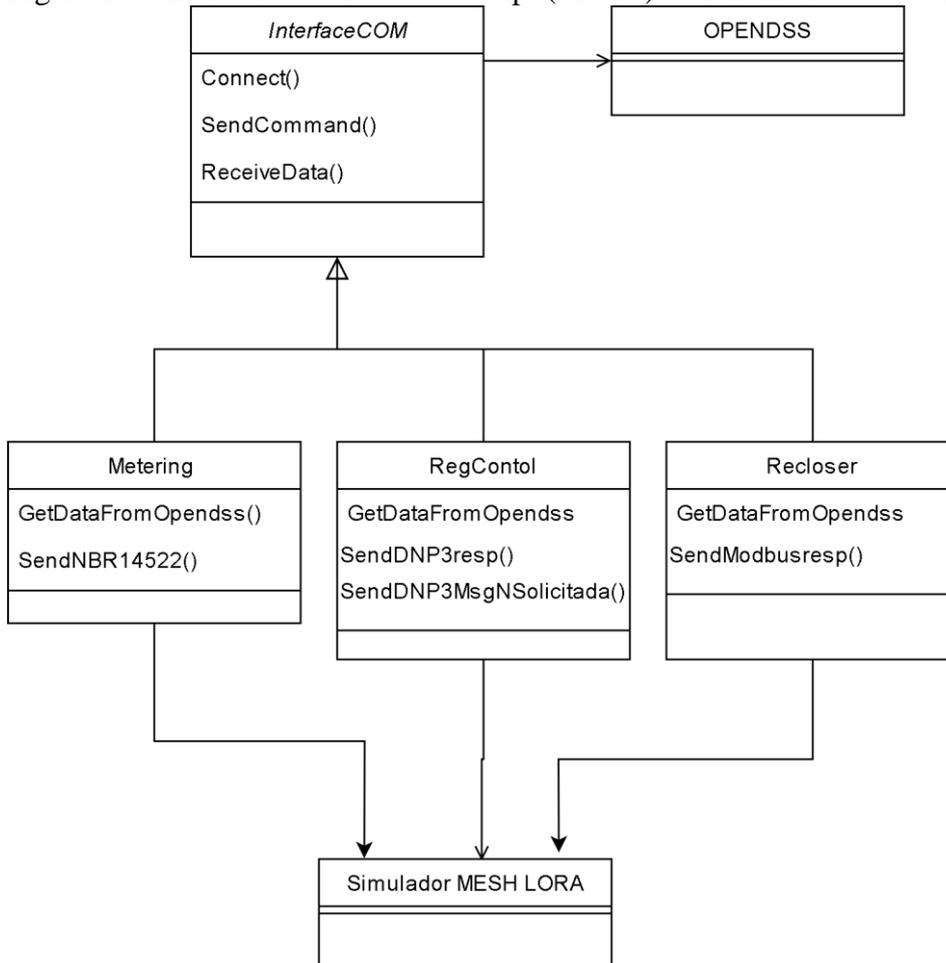


Fonte: Elaborada pelo autor.

Configurado o modelo inicial da rede elétrica na ferramenta OpenDSS e o modelo da rede de comunicação no simulador Mesh, o *script* que gerencia a co-simulação fará a inicialização da interface COM do OpenDSS e a resolução do fluxo de potência inicial. Também é nesse *script* que são configurados quais elementos da rede elétrica estarão associados a equipamentos IEDs (medidores, religadores e reguladores de tensão) e quais protocolos de comunicação esses IEDs tratarão.

Na Figura 23, pode-se visualizar as classes que compõe o *script* principal do modelo de co-simulação e o relacionamento existente entre essas classes. A classe *InterfaceCOM*, é responsável por realizar a comunicação com a ferramenta OpenDSS. Já as classes *Metering*, *RegContol* e *Recloser* são responsáveis por armazenar e manter atualizada as informações destes equipamentos presentes na rede elétrica simulada. Também são estas classes as responsáveis por atender as mensagens de solicitações dos protocolos DNP3, Modbus e NBR 14522, assim como no caso de o DNP3 enviar as mensagens não solicitadas dos alarmes.

Figura 23 – Estrutura de classes do script (Mestre) da ferramenta de co-simulação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

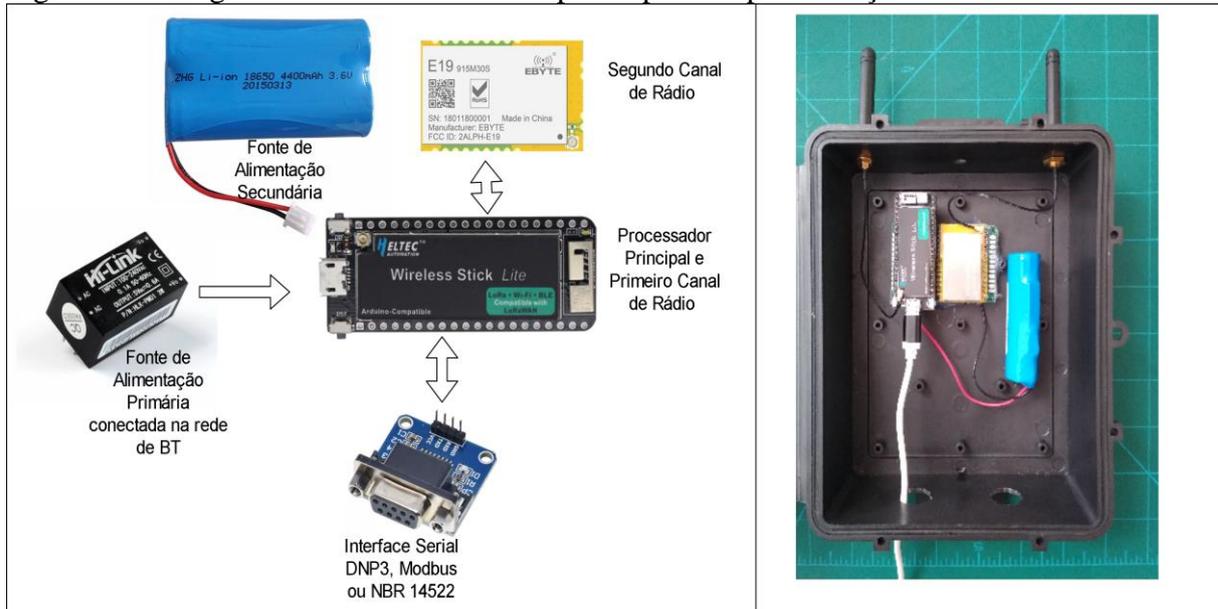
Ainda no *script*, teremos a seção que será responsável por realizar as solicitações através da rede de comunicação para todos os IEDs em um período de tempo configurado, usando o protocolo entendido por eles. Essa seção terá o comportamento de dispositivos mestre ou supervisorio para cada um dos serviços (protocolos). Para validar o mecanismo de co-simulação, utilizou-se uma rede de comunicação composta por 9 nós, sendo 3 deles nós que estavam ligados a religadores dispostos na rede elétrica (Modbus), 3 a medidores de energia (NBR14522) e ainda outros 3 a reguladores de tensão (DNP3). Em um primeiro momento, as solicitações foram realizadas a cada um dos equipamentos individualmente, de forma a verificar os dados da comunicação para confirmar que a resposta estava correta. Os relatórios disponíveis na ferramenta OpenDSS foram utilizados. No capítulo 6 serão mais bem detalhados esses testes e resultados que farão a validação da ferramenta de co-simulação.

5.5 PROTÓTIPO DE *HARDWARE*

O protótipo de *hardware* para implementar fisicamente a arquitetura da rede modelada consiste em um sistema microprocessado, composto por *hardware*, *software* e interface de rádio apresentado na Figura 24. Esse sistema é composto por três dispositivos que compartilham a mesma estrutura de rádio e *firmware* principal, apenas com configurações de conexões externas diferindo.

- **Dispositivo cliente multiprotocolo:** será o nó da rede responsável por realizar a conexão da rede Mesh com a interface serial dos IEDs através de uma interface serial. Esse dispositivo poderá ser configurado para tratar um dos três diferentes protocolos, assim como a prioridade dos pacotes gerada por ele. Esse nó será instalado sempre junto a um IED com fonte de alimentação;
- **Dispositivo cliente intermediário:** será o nó da rede que atuará como um nó de salto intermediário, quando a distância entre dois nós consecutivos for maior que a especificada no projeto da rede. Sua função, na proposta atual, é apenas realizar o roteamento, mas como proposta de expansão das funcionalidades, poderá ser agregada a medição de corrente através do conversor analógico digital, já presente no microcontrolador escolhido. Isso permitirá o monitoramento da rede em pontos intermediários. Esse dispositivo, na maioria das vezes, será instalado em pontos sem a presença de uma fonte de alimentação em baixa tensão, sendo necessária a alimentação através de um pequeno sistema fotovoltaico e de bateria, ou então um acoplamento magnético aos condutores de alta tensão, como proposto pelo trabalho de Thorin (2016). Isso só é possível pela característica de baixo consumo do *hardware* especificado;
- **Dispositivo gateway:** Este será o dispositivo responsável por rotear os pacotes da rede Mesh para uma rede IP e vice-versa. Esse dispositivo terá uma interface de rede Wifi e fará uso da tabela de roteamento para traduzir o endereço do escravo DNP3, Modbus ou NBR 14522 em um endereço do nó de rede associado àquele equipamento escravo específico.

Figura 24 – Diagrama de blocos de um nó protótipo e implementação de teste



Fonte: Elaborada pelo autor.

A rede de comunicação, mesmo com a falha do sistema elétrico que ela monitora e usa como fonte de alimentação, não deixará de funcionar, pois cada dispositivo na rede tem capacidade de ser alimentado por uma bateria que manterá seu funcionamento em momentos de falha. Com a rede de comunicação funcionando, a localização exata do ponto de falha da rede elétrica é feita de maneira mais rápida.

O uso de dois canais em rádio independentes (duas frequências) faz com que diminua a colisão e também que se garanta *links de backup* no caso da perda de um canal. Não é possível utilizar a mesma frequência com SF diferente, pois os rádios dos nós baseados no circuito integrado SX1276 ou SX1262 apenas reconhecem um fator de espalhamento espectral (SF) configurado. Assim, a proposta de Zhu *et al.* (2019), em que ele usa apenas um canal (frequência) com diferentes fatores de espalhamento para implementar as técnicas de multiplexação não será possível de se implementar. Seria necessário basear toda a proposta em outro circuito integrado, o SX1301, capaz de trabalhar com diferentes fatores de espalhamento espectral ao mesmo tempo. Porém, o custo seria muito elevado. Hoje, ele é utilizado apenas nos *gateways* da rede LoRaWAN (FSK; LORA; LORA, 2017).

Durante a avaliação do protótipo de hardware, foram realizadas medições do consumo médio, ficando este em torno de 200 mA. Isso significa que mesmo sem a alimentação primária da rede elétrica, os nós de hardware conseguiriam manter-se ativos, e por consequência manter a rede de comunicação funcionando por aproximadamente 10 horas, tendo como fonte secundária de alimentação uma bateria de lítio comercial com capacidade de 2100 mAh.

5.6 CONSIDERAÇÃO SOBRE O CAPÍTULO

Este capítulo buscou discutir a implementação da ferramenta de co-simulação, que será usada para validar a arquitetura e também, posteriormente, usada como ferramenta de auxílio do projeto e dimensionamento de sistemas de comunicação para interconexão dos equipamentos eletrônicos inteligentes de uma rede elétrica de distribuição. A ferramenta ainda se apresenta como um protótipo, em que a configuração necessária ainda é feita através de alterações na programação do *script* Python, mas é funcional e passível de aplicação. Como objetivo futuro, faz-se necessário tornar a ferramenta mais amigável, para usuários que não dominem programação implementando uma interface amigável.

Também foram apresentados os protótipos do *hardware*, por se tratar de uma arquitetura dependente do meio físico. Esse protótipo de *hardware*, junto com o *firmware* desenvolvido, será utilizado para a validação da ferramenta de simulação. O *firmware* contemplará a implementação da camada de acesso ao meio, onde será realizado o controle do rádio LoRa[®] e a multiplexação de frequência entre os múltiplos canais de rádio, da camada de rede, que terá a implementação do protocolo de roteamento e, por fim, da camada de aplicação, onde serão implementadas as técnicas de priorização de pacotes. Além, é claro, da aplicação do usuário, que diferirá para cada um dos tipos de dispositivos.

6 VALIDAÇÃO DA TESE E RESULTADOS

O capítulo a seguir apresentará a metodologia de teste e os resultados em um primeiro momento da validação isolada da arquitetura, destacando o impacto que cada um dos mecanismos presentes na proposta causa na rede. Em seguida, discute-se os resultados de um estudo de caso realizado em uma rede de distribuição rural. Por fim, faz-se a discussão dos resultados obtidos, tanto nos testes individuais da rede, como no estudo de caso proposto.

6.1 TESTE DE DESEMPENHO DA ARQUITETURA

O desempenho de uma rede pode ser avaliado segundo alguns critérios padronizados. Um dos instrumentos que descrevem esses parâmetros de avaliação é a norma RFC 2544. Nela, há conceitos de quatro medidas a serem avaliadas (FEI *et al.*, 2018):

- **Taxa de transferência ou vazão da rede:** é a capacidade que uma rede tem de transmitir os pacotes sem gerar atrasos demasiadamente grandes e com uma perda percentual de pacotes aceitável;
- **Perda de pacotes:** consiste na medida de pacotes que são enviados e não chegam em seu destino, seja por colisões, erros de roteamento ou descarte por fim da vida do pacote (*timeout*). Em nosso cenário de testes, serão considerados pacotes perdidos as requisições que não receberem uma resposta dentro de um tempo limite;
- **Latência:** em uma rede, latência é o atraso, que mede quanto tempo leva para um pacote de dados ir de um ponto designado para o outro. Há algumas técnicas de medição de latência, dentre elas a que usa a informação de tempo (*timestamp*) da rede para medir as diferenças de tempo entre a saída do pacote e a chegada do pacote em seu destino. Como a rede proposta não mantém mecanismo de sincronização de tempo entre os nós, essa medição na rede física será feita considerando o envio de um pacote e o recebimento da resposta referente a esse pacote, considerando como latência a metade deste tempo;
- **Jitter:** é uma variação estatística do atraso na entrega de dados em uma rede; ele é definido como a medida da variação do atraso (latência) entre os pacotes sucessivos

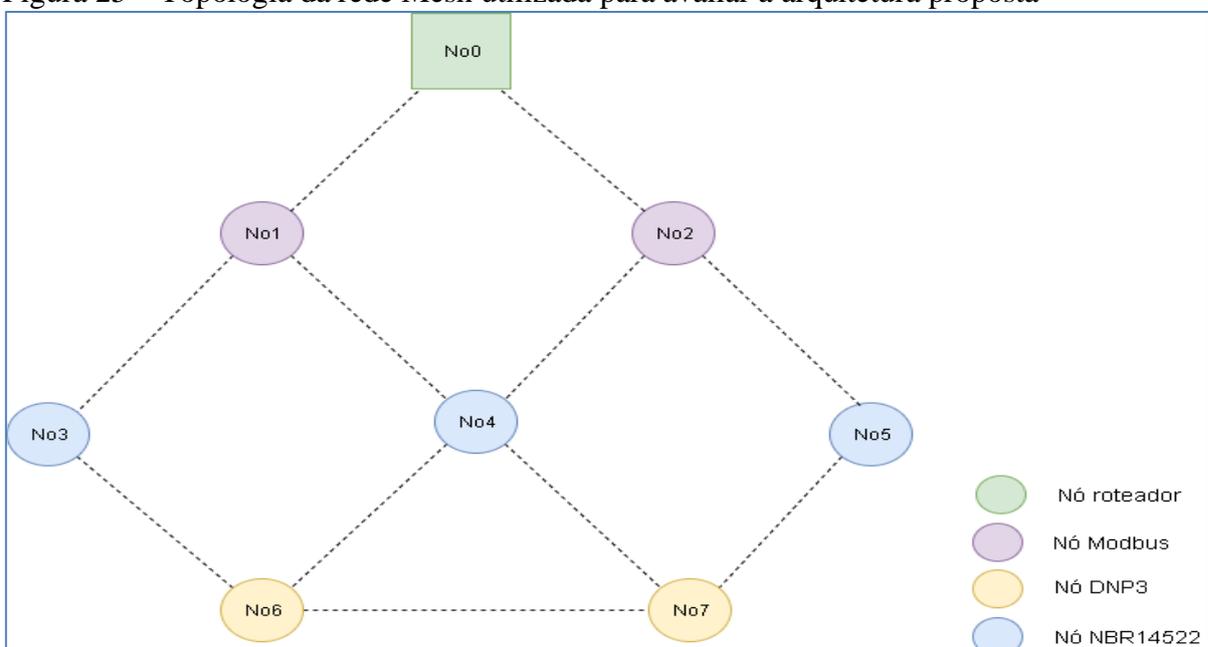
de dados. Uma variação de atraso elevada produz uma recepção irregular dos pacotes, podendo afetar o processamento dos mesmos.

Em um primeiro momento, pretende-se realizar testes apenas com a rede proposta. Assim, será utilizado somente o simulador de rede. O *firmware* dos nós foi modificado para responder as requisições feitas pelo nó roteador sempre com um pacote de tamanho e informação fixos, de acordo com o protocolo configurado. Um *script* Python faz com que o nó roteador faça solicitações sequenciais para todos os nós.

6.1.1 Cenário de Teste

A topologia da rede utilizada para avaliar o desempenho da arquitetura é apresentada na Figura 25. Essa rede é composta por 8 nós, sendo um deles o nó roteador, dois nós configurados para tratar requisições Modbus, três nós configurados para tratar requisições NBR 14522 e outros dois nós configurados para tratar o protocolo DNP3. A distância entre os nós representada pelas linhas pontilhadas é de 3 km.

Figura 25 – Topologia da rede Mesh utilizada para avaliar a arquitetura proposta



Fonte: Elaborada pelo autor.

No Quadro 10, pode-se observar os parâmetros da simulação configurados na ferramenta. A limitação do pacote de teste em 200 *bytes* dá-se por ser o tamanho máximo do

dado alocado em um único pacote. Com as técnicas de múltiplos canais de rádio empregadas, essa limitação não existe (permite até 480 bytes), comportando assim o tamanho do maior pacote, no caso, 292 *bytes* do protocolo DNP3. Porém, para mantermos a mesma base de comparação, todos os demais testes serão realizados com esse tamanho de pacote.

Quadro 10 – Configurações da rede de testes no simulador do cenário de testes

PARÂMETRO	CONFIGURAÇÃO
Distância máxima da transmissão	4 km
Tempo entre as requisições	5 segundos
Tamanho do pacote DNP3	200 <i>bytes</i>
Tamanho do pacote Modbus	200 <i>bytes</i>
Tamanho do pacote NBR 14522	64 <i>bytes</i> pergunta / 200 resposta
Envio de pacote de rotas	A cada 2 minutos
Largura de Banda	125 kHz
Envio de pacote <i>hello</i>	A cada 1 minuto
Tempo de simulação	10 minutos

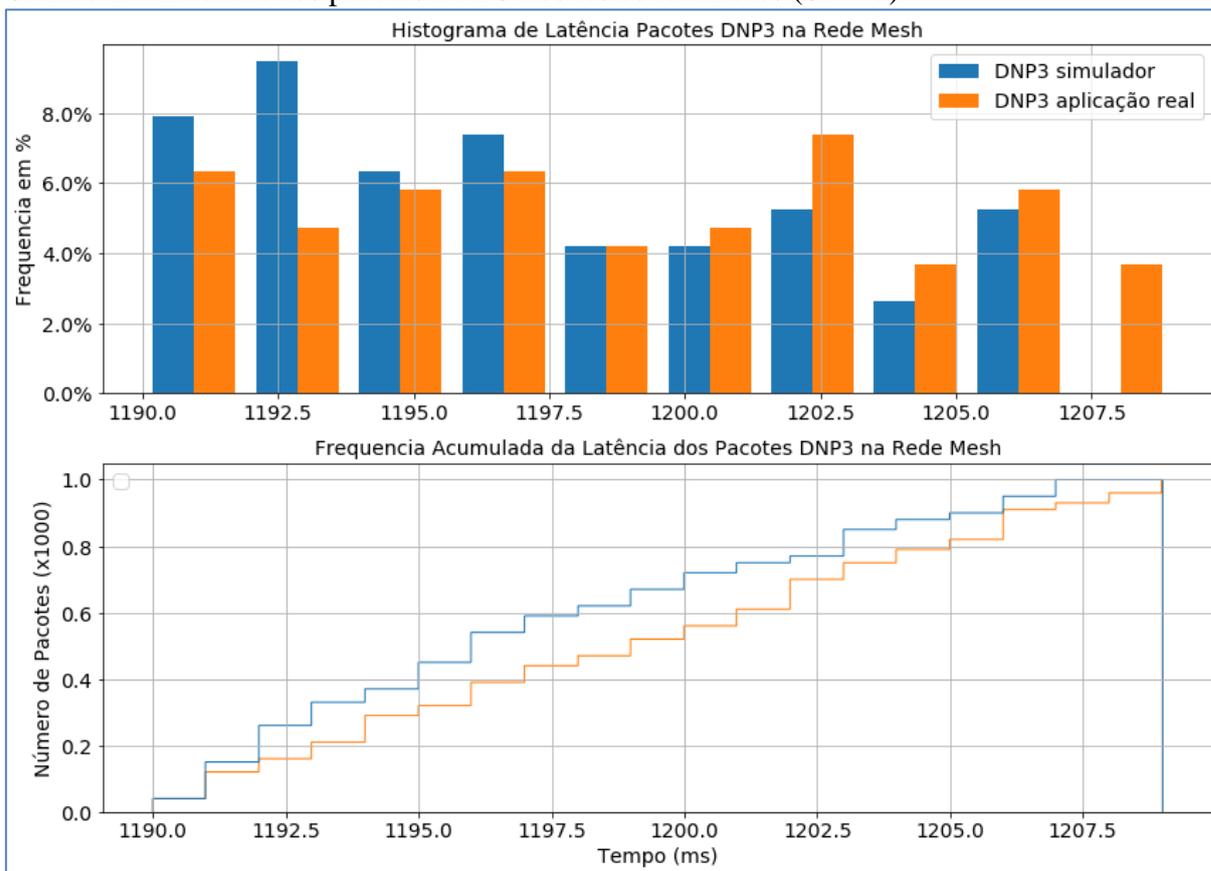
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a realização do teste físico real, os módulos de rádio LoRa[®] tiveram sua potência de transmissão reduzida através da configuração em registradores, além do sinal da antena atenuado fisicamente, forçando, assim, um alcance máximo de aproximadamente 4 metros verificados de forma empírica. Dessa forma, conseguiu-se reproduzir em escala reduzida (1:1000) a topologia da rede descrita no cenário de testes.

6.1.2 Caso Base Rede Sem Múltiplos Canais de Rádio e Priorização de Pacotes

Neste primeiro caso de teste, não foram habilitados nenhum dos mecanismos implementados na arquitetura para otimizar seu desempenho. No Gráfico 2, são apresentados na forma de histograma e na forma de diagrama de frequência cumulativa, os valores de latência para a requisição e as respostas dos nós configurados com o protocolo DNP3. Pode-se observar no cenário de testes da Figura 25, que para se alcançar esses nós, são necessários 3 saltos de roteamento.

Gráfico 2 – Latência dos pacotes DNP3 nos testes realizados (SF = 7)

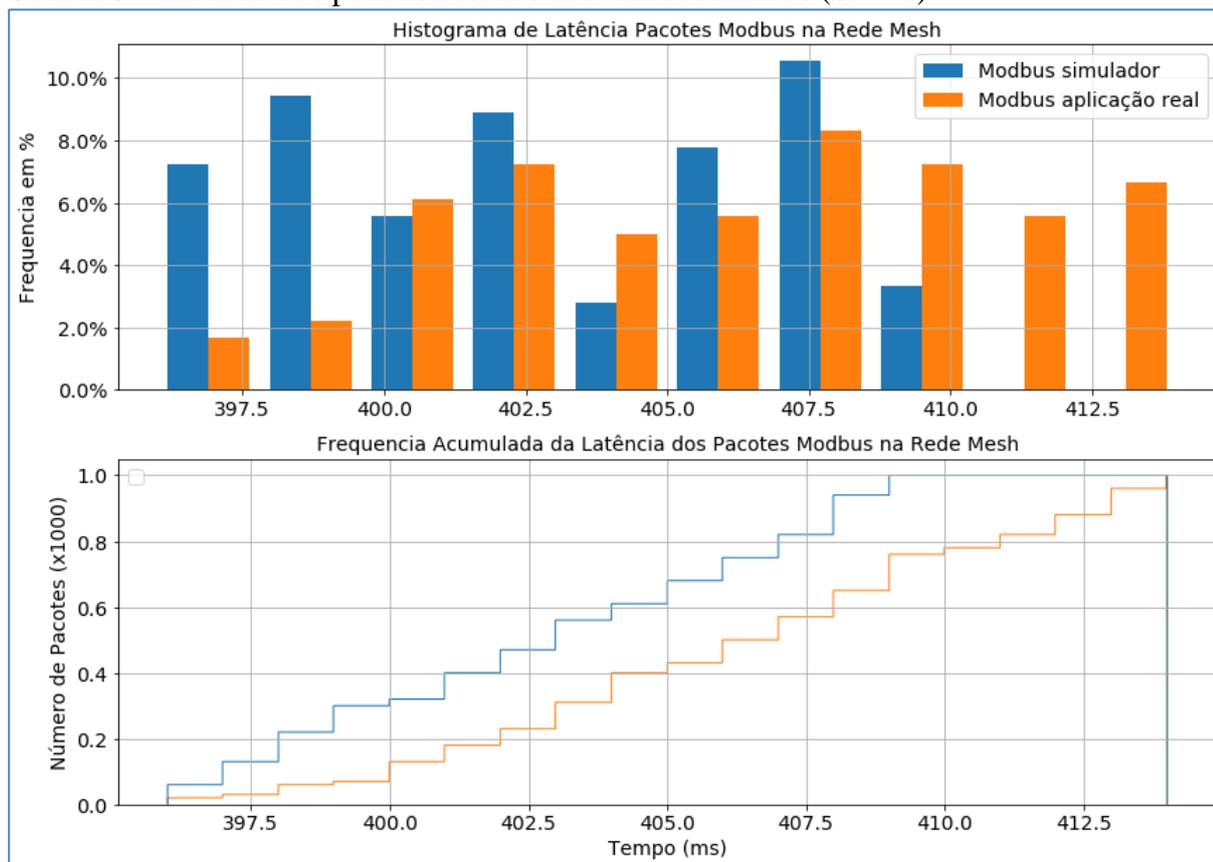


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que houve uma pequena discrepância entre a aplicação real e a simulação, se analisarmos os pacotes individualmente. Porém, o valor médio nos dois casos ficou em torno de 1198 ms (1198,44 ms na simulação e 1198,24 ms na aplicação real). O intervalo de confiança calculado ficou entre 1198,12 ms e 1198,76 ms. Na simulação, ocorreu a perda de apenas um pacote dos 1000 pacotes enviados, já na aplicação real, três pacotes foram perdidos. Essa diferença pode ser explicada, pois o envio de pacotes de sinalização e rotas no simulador ocorre em instantes muito próximos para todos os nós. Todos eles foram instanciados quase que no mesmo instante. Já na rede real, os nós não iniciam seu funcionamento sincronizados. O *jitter* medido na simulação foi de 15 ms, e na aplicação real de 19 ms.

No Gráfico 3, são apresentados os valores de latência para a requisição e respostas dos nós configurados com o protocolo Modbus. Pode-se observar que, para se alcançar esses nós, é necessário 1 salto de roteamento apenas.

Gráfico 3 – Latência dos pacotes Modbus nos testes realizados (SF = 7)

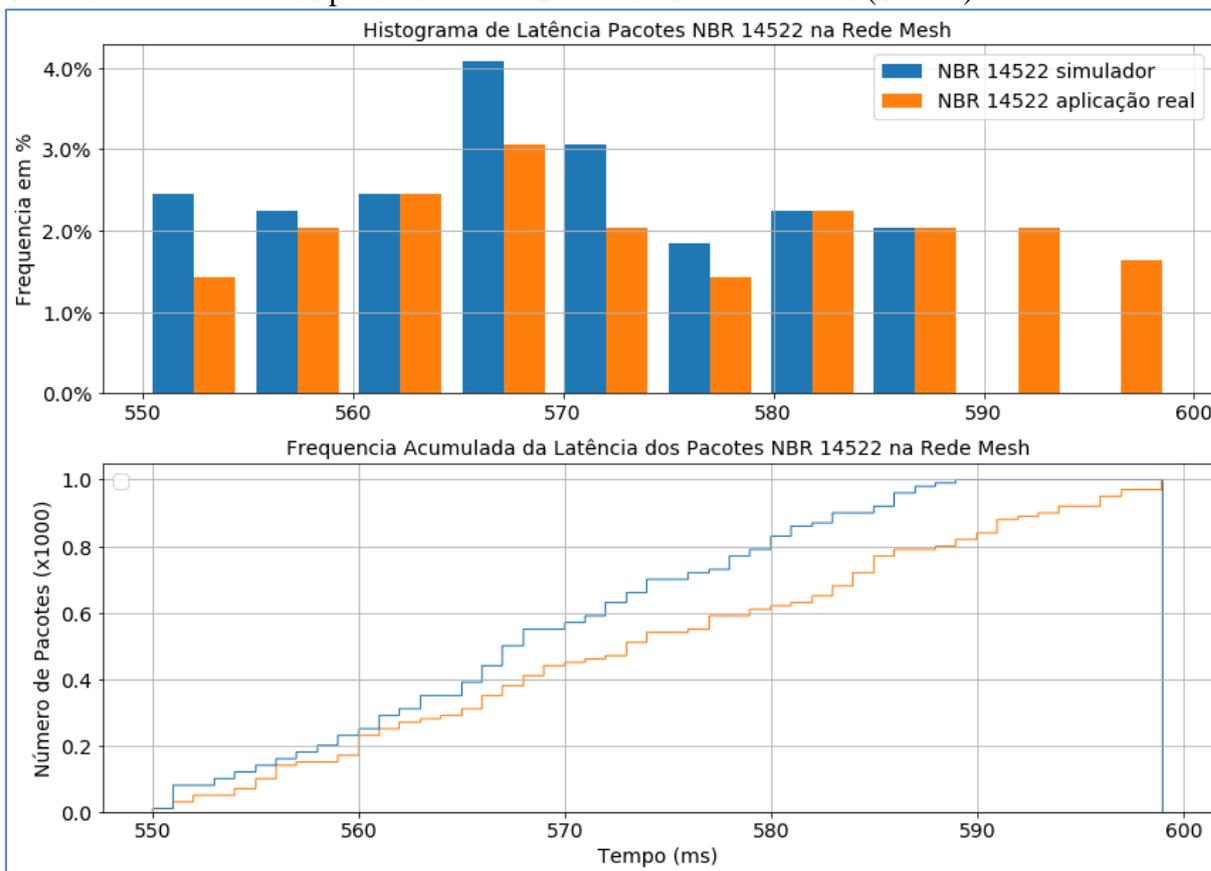


Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como nos pacotes DNP3, houve uma pequena discrepância entre a aplicação real e a simulação, se analisarmos os pacotes individualmente. Porém, os valores médios foram muito próximos. O valor médio nos dois casos foi de 402,27 ms na simulação e 405,51 ms na aplicação real. O intervalo de confiança calculado ficou entre 401,39 ms e 406,63 ms. Não ocorreram perdas de pacote dos 1000 pacotes enviados,

Já no Gráfico 4, são apresentados os valores de latência para a requisição e respostas dos nós configurados com o protocolo NBR14522. Pode-se observar que, para se alcançar esses nós, são necessários 2 saltos de roteamento.

Gráfico 4 – Latência dos pacotes NBR 14522 nos testes realizados (SF = 7)



Fonte: Elaborado pelo autor.

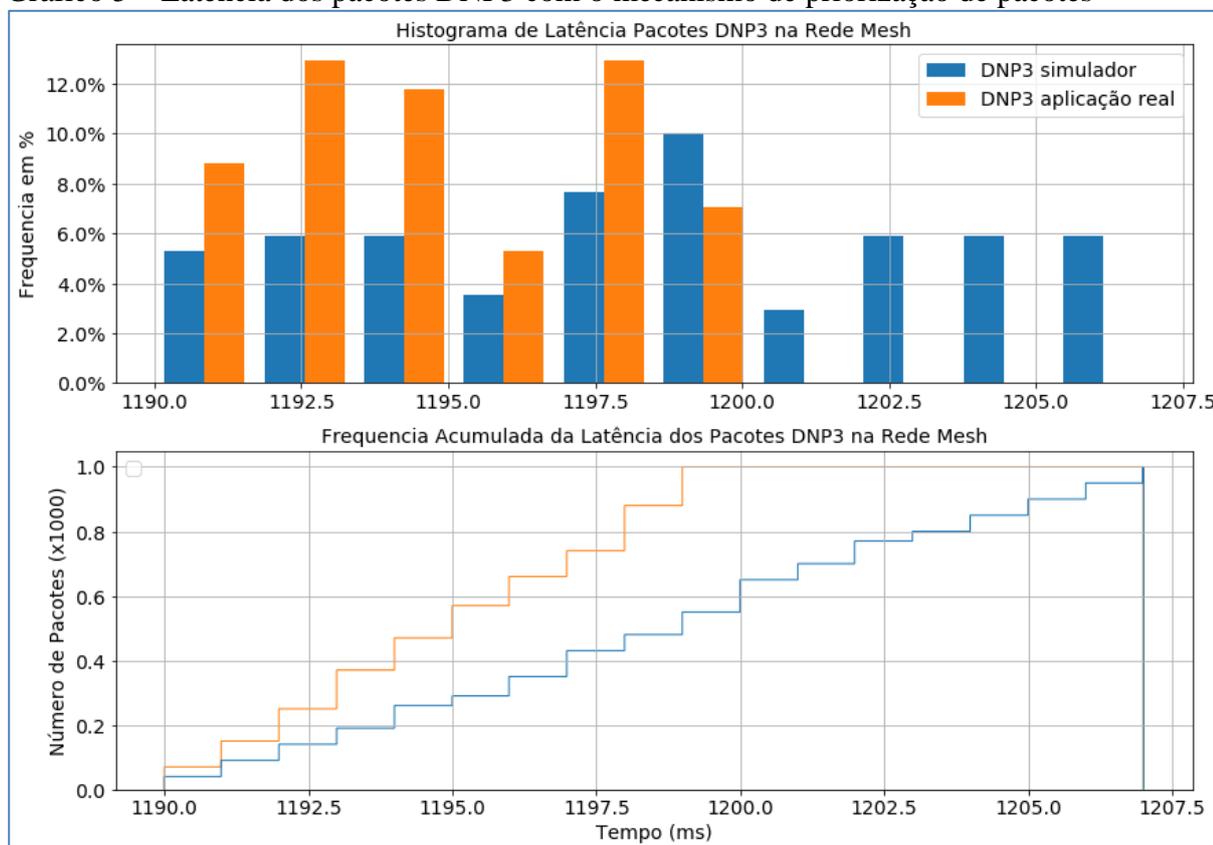
Esta análise apresenta uma distorção nos tempos de latência, pois, como já explicado, a rede implementada não possui mecanismos de sincronização de tempo. Assim, a latência é obtida com a metade do tempo entre a requisição e a resposta de um comando. Porém, nesse protocolo especificamente, a requisição tem tamanho diferente da resposta, o que reduz o tempo médio de um pacote de resposta e aumenta o tempo médio de um pacote de requisição. No entanto, a análise de tempo médio é válida para ser utilizada como parâmetro de comparação com os demais testes. O valor médio nos dois casos foi de 569,28 ms na simulação e 574,28 ms na aplicação real. O intervalo de confiança calculado ficou entre 568,26 ms e 567,52 ms. Não ocorreram perdas de pacote dos 1000 pacotes enviados.

6.1.3 Avaliação do Impacto da Técnica de Priorização de Pacotes

O mesmo cenário de testes do tópico anterior foi mantido, porém, agora os pacotes DNP3 estão sendo enviados com prioridade alta, o que faz com que o mecanismo de filas

priorize o tratamento desses pacotes. No Gráfico 5, é apresentado o comportamento da latência para os pacotes priorizados.

Gráfico 5 – Latência dos pacotes DNP3 com o mecanismo de priorização de pacotes



Fonte: Elaborado pelo autor.

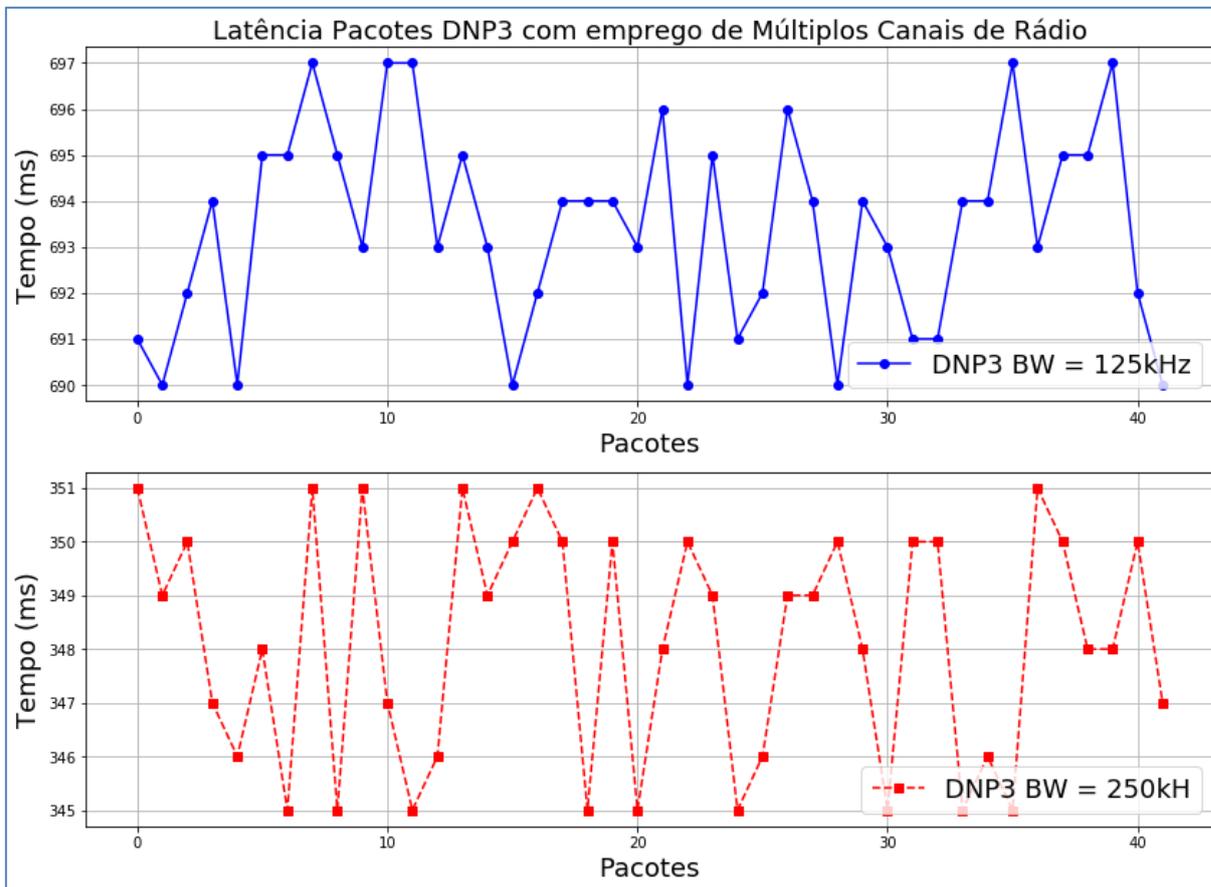
Nas barras do histograma que representam a aplicação real, se comparadas ao cenário anterior (Gráfico 2), fica evidente a diminuição do *jitter*, que passou de 19ms para 10ms, comprovando que a priorização do pacote gera um melhor determinismo nas transmissões para aquela aplicação específica. O valor médio nos dois casos foi de 1198,50 ms na simulação e 1194,46 ms na aplicação real. O intervalo de confiança calculado ficou entre 1198,17 ms e 1194,64 ms.

6.1.4 Avaliação do Impacto das Técnicas Multiplexação de Frequências

Neste caso de teste, foram habilitados os mecanismos de diversidade de frequências (dois canais de rádio transmitindo simultaneamente o pacote segmentado), que foi implementado na arquitetura para otimizar seu desempenho, reduzindo o tempo de latência. O

mecanismo de priorização de pacotes apresentado anteriormente não está habilitado. No Gráfico 6, são apresentados os valores de latência para a requisição e respostas dos nós configurados com o protocolo DNP3.

Gráfico 6 – Latência dos pacotes DNP3 com o emprego da Técnica de Múltiplos Canais de Rádio



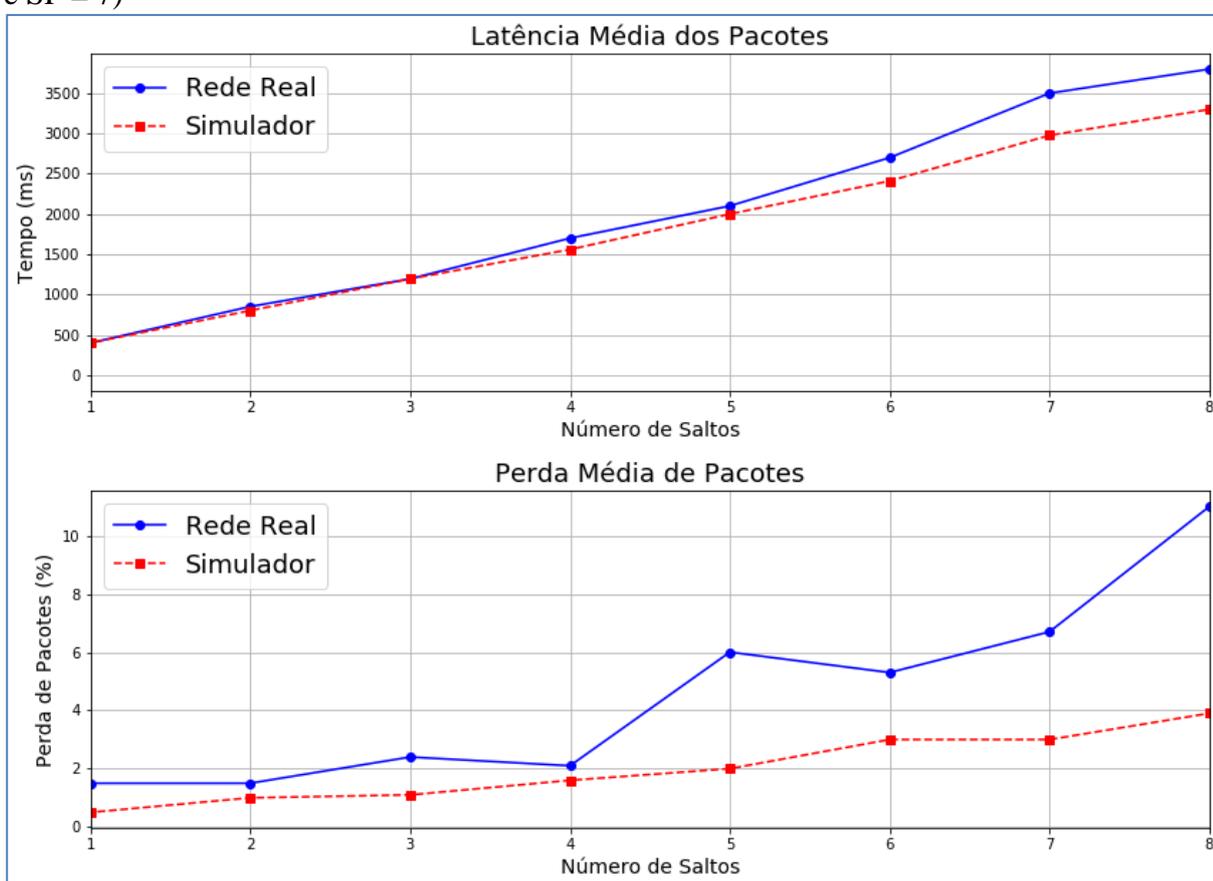
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando comparado ao caso original, em que, para alcançar o nó DNP3, são necessários os mesmos 3 saltos, a técnica múltiplos canais de rádio (multiplexação de frequências) reduz em 40% a latência do envio de um pacote (BW = 125kHz). Se alterarmos a configuração de largura de banda para BW = 250 kHz, a redução de latência atinge 70%, ficando em torno de 350 ms. Tempo esse bastante aceitável para uma rede Mesh com largura de banda limitada como a proposta pois fica dentro do timeout especificado para as aplicações de redes elétricas inteligentes. Nos dois cenários, por se tratar de uma rede de testes bastante pequena, não houve perda de pacotes, assim, é possível inferir que a redução de latência de pacotes diminui a possibilidade de colisões, principal causador da perda de pacotes.

6.1.5 Avaliação do Impacto do Número de Saltos

Neste caso de teste, o cenário foi modificado, configurando a distribuição dos nós, de forma que para o pacote chegar ao seu destino deve ser retransmitido (roteado) por outros nós da rede. Esse cenário foi sendo alterado incrementando-se o número de saltos de roteamento como apresentado no Gráfico 7, onde são exibidos os valores médios de latência e perda de pacotes para cada caso sem o uso da técnica de múltiplos canais de rádio.

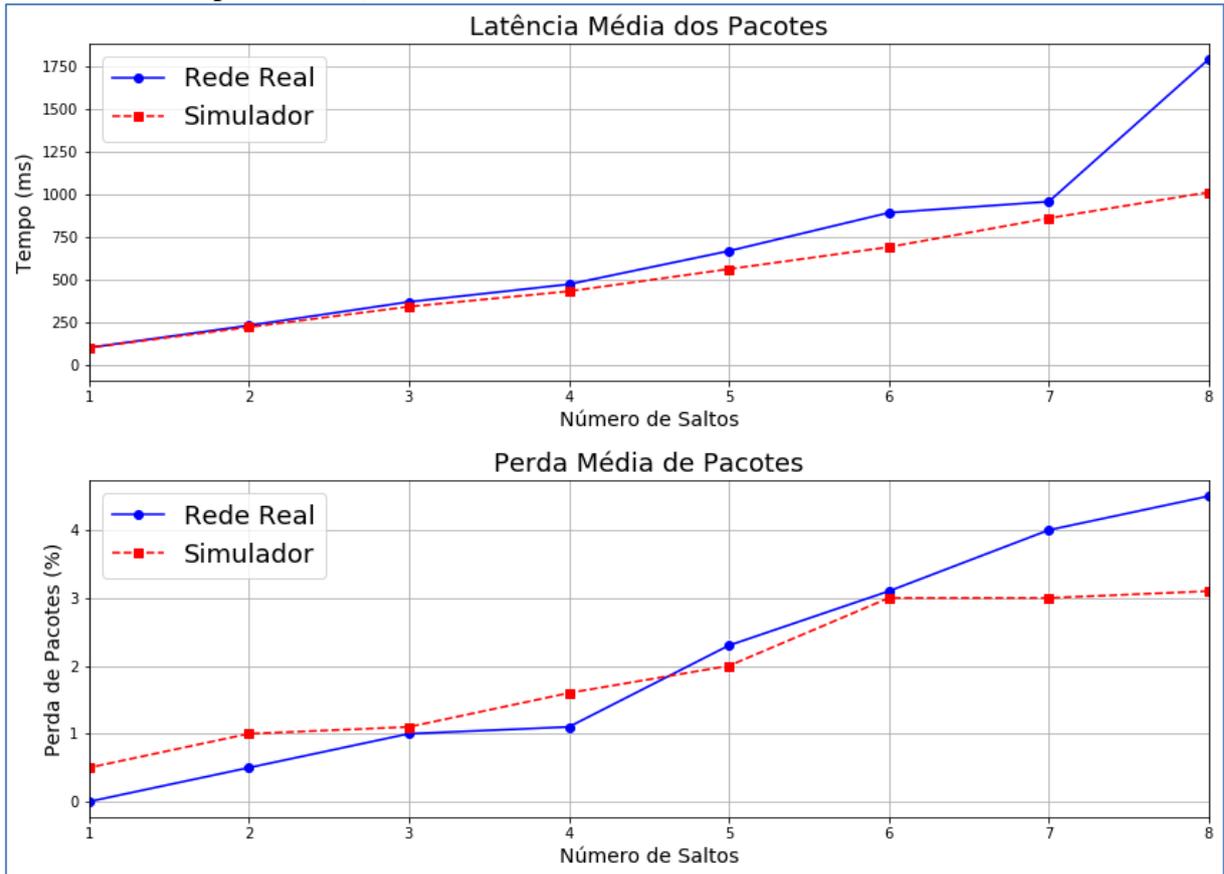
Gráfico 7 – Impacto do número de saltos na latência média e perda de pacotes (BW =125kHz e SF = 7)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já no Gráfico 8, são exibidos os valores médios de latência e perda de pacotes para o mesmo cenário descrito anteriormente, porém agora com a largura de banda alterada para 250 kHz e a utilização da técnica de multiplexação de frequência.

Gráfico 8 – Impacto do número de saltos na latência média e perda de pacotes (BW = 250kHz e SF = 7 e Múltiplos Canais)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando-se os dois cenários, o primeiro sem otimizações e o segundo com otimizações presentes, percebe-se a diminuição considerável da latência e uma diminuição da perda de pacotes de 14% para 4,7%. Porém também é evidente que a partir do quarto salto de roteamento, mesmo com as técnicas de otimização a rede começa a apresentar uma degradação de desempenho. Após a apresentação de alguns dos testes que validaram o comportamento do simulador de comunicação desenvolvido, será apresentado um estudo de caso que busca validar a integração das ferramentas no modelo de co-simulação.

6.2 ESTUDO DE CASO DE UMA REDE RURAL

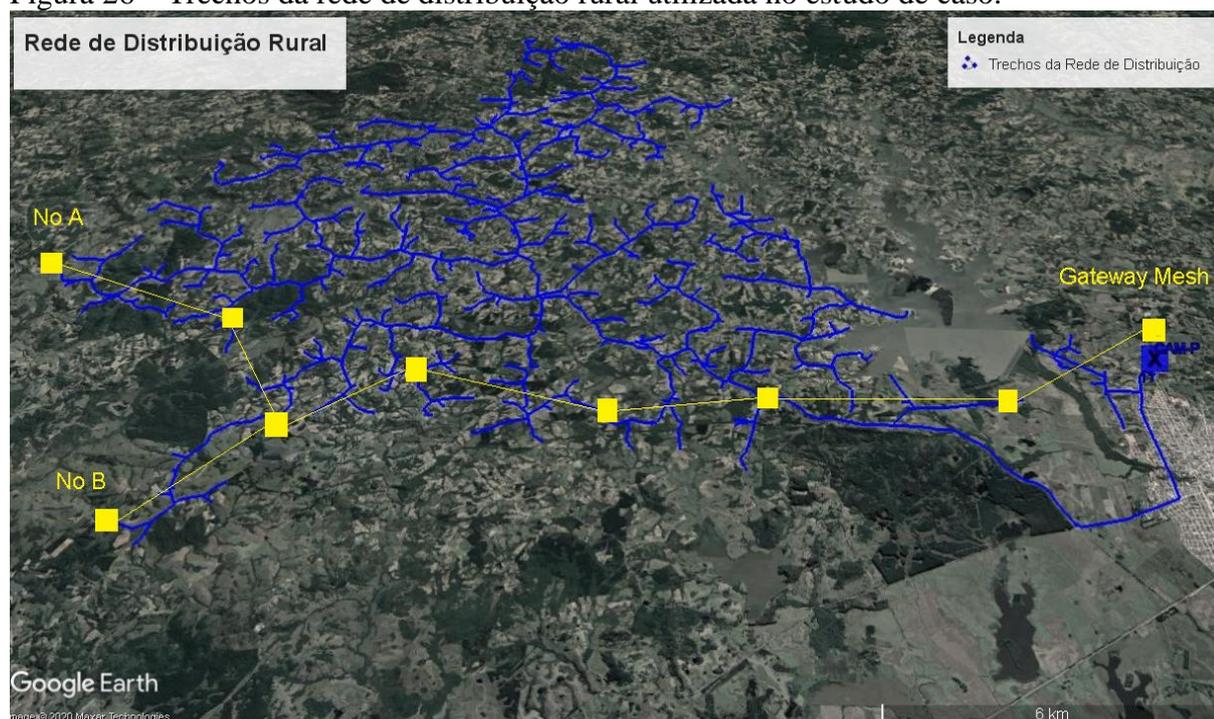
Na seção anterior, foi comprovada a eficiência da arquitetura em reduzir a latência das transmissões e também do *jitter* dos pacotes configurados com maior prioridade. Ainda, foi validado o comportamento do simulador de rede Mesh desenvolvido. Dessa forma, acredita-se

ser possível aplicar a arquitetura em um estudo de caso de uma rede de distribuição de energia elétrica real.

6.2.1 Caracterização do Estudo de Caso

A rede de distribuição de energia elétrica que será estudada se caracteriza como uma típica rede de distribuição rural. Na Figura 26 e no Apêndice C com maiores detalhes, é apresentado um mapa com a extensão da rede de distribuição. Pode-se perceber que a rede possui uma extensão bastante grande (20,2 Km entre o gateway e o nó A). No mesmo mapa (no Apêndice C), estão localizadas as estações rádio-base de telefonia celular, cadastradas no sistema de gerenciamento da ANATEL. Neste mapa é possível observar, que a rede de distribuição não tem cobertura da rede celular em toda sua extensão.

Figura 26 – Trechos da rede de distribuição rural utilizada no estudo de caso.



Fonte: Elaborado pelo autor com base no Google Earth.

A solução de arquitetura proposta encaixa-se no cenário do estudo de caso, em que será possível fazer o uso da rede de celular para interconectar com o sistema da concessionária de energia e prover cobertura ao restante da rede de distribuição através da rede Mesh proposta. A rede tem, ao todo, 954 transformadores, dos quais 72 são transformadores trifásicos. Arbitrou-

se que esses transformadores trifásicos possuem medição no lado de baixa tensão, através do protocolo NBR14522. A rede ainda tem dois reguladores de tensão, que se comunicam através do protocolo DNP3, e 6 religadores, que também fazem uso do protocolo DNP3, totalizando, assim, 80 equipamentos com conexão na rede. No Quadro 11, pode-se observar os parâmetros da simulação configurados na rede de comunicação.

Quadro 11 – Parâmetros da simulação

PARÂMETRO	CONFIGURAÇÃO
Distância máxima da transmissão	4 km
Tempo entre as requisições	5 segundos
Tamanho do pacote DNP3	292 <i>bytes</i>
Tamanho do pacote NBR 14522	64 <i>bytes</i> pergunta / 240 resposta
Otimização	Priorização DNP3 e Múltiplos Rádios BW = 250
Envio de pacote de rotas	A cada 2 minutos
Envio de pacote <i>hello</i>	A cada 1 minuto
Tempo de simulação	10 minutos

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.2 Análise dos Resultados do Estudo de Caso

Por ser um cenário mais complexo, as latências variaram de 189 ms para equipamentos com rotas de 1 salto até 1610 ms para rotas com 6 saltos como a apresentada anteriormente na Figura 26 entre o gateway e o No A ou o Nó B. Porém, um dado que chamou a atenção foi a taxa de perda de pacotes, em torno de 24,5%. Das 120 requisições enviadas durante o tempo de simulação, somente 90 requisições foram completadas, o que demonstrou que na rede está ocorrendo um elevado número de colisões, mesmo com as técnicas de otimização de acesso ao meio implementadas.

Para reduzir essa perda de pacotes no cenário proposto, deve-se aplicar a técnica de clusterização da rede Mesh, ou seja, particionar a rede em redes menores. A proposta de particionamento é apresentada na figura do Anexo C. A otimização desse particionamento não faz parte do escopo desse trabalho, sendo sugerida como trabalho futuro, neste momento ela é realizada de forma empírica apenas, a fim de reduzir o tamanho da rede. Após o particionamento, onde cada um dos *clusters* pode ser tratado com uma rede independente, pois trabalham com pares de frequência diferentes, cada uma das redes ficou com as seguintes características apresentadas no Quadro 12:

Quadro 12 – Síntese dos resultados da co-simulação após o particionamento em 3 *clusters*

Cluster A	Cluster B	Cluster C
3 Equipamentos DNP3	2 Equipamentos DNP3	3 Equipamentos DNP3
24 Equip. NBR 14522	20 Equip. NBR 14522	28 Equip. NBR 14522
Número máximo de saltos 3	Número máximo de saltos 3	Número máximo de saltos 4
Latência Máxima 413 ms	Latência Máxima 395 ms	Latência Máxima 511 ms
Perda de pacotes 2%	Perda de pacotes 0%	Perda de pacotes 3%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que com a análise do Quadro 12, que após o particionamento, a rede passou a apresentar características aceitáveis de latência para os sistemas de comunicação de uma rede elétrica inteligente rural. Feita a análise dos resultados específicos do estudo de caso apresentado como forma de validar a ferramenta de co-simulação. Passa-se para a discussão geral dos resultados, com o objetivo de fazer o fechamento da análise da nova arquitetura e sua aplicação no cenário de redes elétricas inteligentes rurais.

6.3 DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS

Nos testes iniciais, apenas com a rede de comunicação proposta pode-se observar que, na comparação com o cenário base, foi evidenciado a diminuição do *jitter* (de 19ms para 10ms), o que comprova que o mecanismo de priorização do pacote gera um melhor determinismo nas transmissões para aquela aplicação específica e permite manter a taxa de transmissão dos pacotes mais constante.

Se comparado ao caso base original, a técnica de multiplexação com múltiplos canais de rádio reduz em 40% a latência do envio de um pacote, mantendo a mesma largura de banda. Se alterarmos a configuração de largura de banda para 250 kHz, a redução de latência atinge 70%, ficando em torno de 350 ms, tempo esse bastante aceitável para uma rede Mesh com recursos bastante limitados como a proposta. Nos dois cenários com as técnicas, não houve perda de pacotes para a rede proposta com 8 nós e envio de pacotes a cada 5 segundos. Assim, pode-se inferir que a redução de latência de pacotes diminui a possibilidade de colisões, principal causador da perda de pacotes.

Os resultados foram para uma rede de testes bastante reduzida, mas pode-se observar, através da comparação no primeiro cenário, que o comportamento do simulador de rede Mesh implementado é bastante próximo ao comportamento da implementação física da mesma rede. Já para os testes de impacto gerados pelo número de saltos de roteamento, no parâmetro latência o comportamento apresentado pelo simulador apresentou-se muito similar ao observado na rede

real, porém no parâmetro perda de pacotes houve uma discrepância que variou de 2% até 6% entre o simulador e a rede real com o incremento dos saltos. Isso demonstra que esse deve ser um ponto de atenção para melhorias futuras no modelo de simulação.

No estudo de caso, a ferramenta de co-simulação, que usa o modelo da rede elétrica para gerar informações reais e alarmes (mensagens não solicitadas), mostrou-se uma ferramenta bastante útil para o dimensionamento da rede de comunicação com recursos limitados. Em conjunto com a técnica de particionamento manual, ela consegue melhorar o dimensionamento. Também, pode-se verificar nas simulações que redes com números de saltos maiores que 4 começam a apresentar degradação da performance, com incremento de colisões, principalmente. Sugere-se o uso desse cenário para casos apenas onde não se consegue alcançar por outra configuração o nó pretendido e, mesmo assim, com uma quantidade limitada de requisições enviadas para a rede. Por fim, o objetivo de prover um mecanismo de comunicação para redes elétricas rurais foi atingido, sendo necessário cuidado com o dimensionamento da rede.

Para finalizar a análise, buscou-se um comparativo de cobertura, caso fosse empregado uma rede LoRAWAN tradicional no estudo de caso. Este resultado é expresso através da imagem no Apêndice D. Na simulação realizada, seria necessário a criação de uma infraestrutura de 5 *gateways* LoRAWAN além de prover conectividade a estes *gateways* por meio de algum mecanismo como fibra, satélite ou enlace de rádio. Percebe-se com isso, que a implementação mesh proposta é vantajosa, não necessita da infraestrutura de conectividade para os *gateways*, tornando bastante reduzida a infraestrutura necessária para a implantação da rede proposta.

7 CONCLUSÃO

Esta tese apresentou, uma análise das necessidades de comunicação para sistemas elétricos de potência, onde as novas demandas mostram a afinidades entre o cenário de operação das Redes Elétricas Inteligentes e as arquiteturas de redes de comunicação para *Internet* das Coisas. Certamente a infraestrutura de comunicação ganhará cada vez mais espaço em redes de energia elétrica, só assim será possível acompanhar as futuras demandas deste setor. Todavia, essa é uma realidade ainda distante, o que leva a uma expectativa de que a evolução de *smart grids* aconteça de forma lenta e gradual. Para isso, novas arquiteturas de comunicação, que permitam uma implementação com menor custo, menor necessidade de infraestrutura e também com a segurança e a resiliência necessárias, como a proposta por esta tese, são imprescindíveis para acelerar essa evolução.

Para atingir o objetivo de prover um mecanismo de comunicação que fosse possível de aplicar em uma rede de distribuição rural, onde não é viável grandes investimentos, o trabalho especificou uma nova arquitetura de comunicação baseada nos paradigmas da *Internet* das Coisas, tendo como ponto de partida as redes em malha e as tecnologias de comunicação sem fio de longo alcance e baixa potência (LoRa[®]). Essa arquitetura foi capaz de prover conectividade aos dispositivos especiais instalados nas redes de distribuição rurais como discutido na seção de teste e resultados, permitindo a coexistência dos vários serviços e seus protocolos em uma única rede física. Isso fez com que fosse possível a implementação mínima de uma rede elétrica de distribuição inteligente em área rural. A proposta limitou-se a redes rurais, por entender que, muitas vezes, nesse tipo de rede de distribuição de energia elétrica, alternativas de conectividade são limitadas. Diferentemente do cenário dos centros urbanos, onde a disponibilidade de redes celulares, cabos de comunicação e até mesmo redes de fibra ópticas são uma realidade viável.

Junto da implementação de uma rede em malha LoRa[®] com um protocolo bem estruturado – na bibliografia encontra-se apenas implementações bastante precárias – e da agregação dos mecanismos de priorização de pacote, com diferenciações espaço-tempo e multiplexação espacial, gerou-se uma contribuição significativa para o cenário proposto. Também pode-se destacar a ferramenta de co-simulação desenvolvida, que servirá de ferramenta de apoio para projetos que pretendam fazer o uso da arquitetura de rede proposta e validada nesta tese.

Por fim, destaca-se a implementação física da rede, onde foram propostos três modelos de dispositivos protótipos, que serão adequados para prover a conectividade de equipamentos legados e equipamentos novos que venham a ser conectados na rede, pois disponibilizam interfaces flexíveis. A proposta de *hardware* ainda garante robustez à rede, que, mesmo com falta de energia, continuará funcionando, pois, o *hardware* dispõe de bateria comercial de lítio, que é continuamente carregada e garante o funcionamento dos nós, mesmo em situações de falha de energia.

Ao fim da tese, pode-se destacar que o modelo da arquitetura e a implementação da rede de comunicação Mesh foram validados com sucesso. Entendeu-se, contudo, que sua aplicação tem limitações de uso, pois explora uma tecnologia com restrições de largura de banda para transmissão de dados, embora tenha custo relativamente baixo de implementação em larga escala, características de boa tolerância a interferências, podendo prover a conectividade mínima para uma rede inteligente rural, desde que bem dimensionada. Após essa análise de fechamento do trabalho, no próximo tópico, retoma-se as questões fundamentais que balizaram o trabalho e agora serão respondidas.

7.1 RESPOSTAS DAS QUESTÕES FUNDAMENTAIS

Quais os ganhos com o emprego da nova arquitetura, se comparado ao uso de uma rede LPWAN ou uma rede de sensores tradicionais?

A nova arquitetura proporciona ganhos em relação à cobertura geográfica da rede se comparada a uma rede LPWAN. No Apêndice D, onde é apresentado uma simulação de cobertura da rede LoRAWAN para o estudo de caso, são necessários 5 *gateways* e infraestrutura de conectividade como fibra, satélite ou enlace de rádio. Já utilizando a proposta da topologia mesh e a arquitetura desenvolvida, são necessários apenas um nó gateway, que pode ficar localizado junto a infraestrutura de conectividade (rede celular) existente. Ainda existe outro ganho devido a possibilidade de acrescentar saltos, onde a cada salto acrescido na topologia da rede dobra se a área coberta sem necessidade de novos *gateways*. Também permite uma vazão de dados maior devido a multiplexação do dado em dois canais de rádio e a implementação de um sistema de comunicação bidirecional com envio e recebimento tendo as mesmas prioridades, o que difere a arquitetura de uma rede de sensores tradicionais que tem em sua maioria prioridades na canal de *uplink* (sensor – gateway). Com essas características, provou-

se possível seu uso não só no monitoramento da rede elétrica, mas também nos processos de automação, que apresentam requisitos mais rígidos.

Como avaliar a capacidade da arquitetura de atender aos diferentes cenários e necessidades de conectividade das mais diversas redes de distribuição de energia elétrica rurais?

A necessidade de avaliar a capacidade da arquitetura de atender aos diferentes cenários pode ser mensurada através da implementação da ferramenta de co-simulação; contribuição esta que se mostrou de extrema importância para os projetos que pretendem utilizar a arquitetura proposta. Como trata-se de uma arquitetura com restrições de banda de comunicação, o processo de dimensionar adequadamente o seu uso, particionando a rede em agrupamentos menores quando necessário. Assim, são análises importantes que a ferramenta de co-simulação proporciona.

Qual o impacto que a técnica de uso de dois rádios em conjunto com as filas de prioridades acarreta a arquitetura proposta?

O uso da técnica de multiplexação de frequências com dois canais de rádio proporcionou o aumento da vazão de dados na rede, ganho este devido a não mais ser necessário realizar a fragmentação e envio sequencial dos pacotes dos protocolos de REIs (múltiplos rádios) e também a diminuição do percentual de colisões, com a diminuição do tempo de envio de cada pacote estatisticamente, diminuiu-se a probabilidade de colisões. Outro ganho significativo proporcionado pela priorização de um tipo de pacote, foi a diminuição do *jitter* nos serviços/protocolos configurados como prioritários (QoS), fazendo com que estes protocolos, com maior criticidade, consigam ser tratados sempre com o menor tempo possível.

Após responder às questões fundamentais da tese, para finalizar as considerações sobre o trabalho, a seguir, serão detalhadas as contribuições desenvolvidas ao longo do estudo e, em seguida, as propostas de continuação da pesquisa.

7.2 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

Destaca-se, por fim, que essa tese apresentou um estudo sobre sistemas de comunicação para redes elétricas inteligentes, propondo uma arquitetura baseada no modelo de camadas para a coexistência de serviços de redes elétricas inteligentes em uma única rede de *Internet* das Coisas. Ao final do trabalho, pode-se elencar como principais contribuições os seguintes pontos:

- A validação da proposta de uma nova arquitetura de rede em malha para prover infraestrutura de comunicação para redes elétricas inteligentes rurais. A arquitetura demonstrou a possibilidade do uso de múltiplos protocolos em uma mesma rede com recursos de comunicação (largura de banda) limitados, possibilitando a coexistência de serviços e a integração de equipamentos legados sem a necessidade de diferentes redes para cada um dos serviços presentes na rede de distribuição. Para tanto, fez-se o uso de políticas de priorização de pacotes, técnicas que até hoje não foram aplicadas a redes em malha com a tecnologia estudada;
- A implementação física de uma rede de comunicação com topologia em malha para prover conectividade entre as redes de distribuição de energia elétrica rurais. Essas redes necessitam de pouca infraestrutura e têm baixo custo de implementação, sendo capazes de prover cobertura em grandes distâncias e ser utilizadas em locais onde não existe cobertura da rede celular;
- Desenvolvimento de um protocolo de roteamento para redes Mesh que não são baseadas na camada IP, diminuindo o *overhead* da comunicação devido à simplificação dos cabeçalhos dos pacotes e, mesmo assim, mantendo a eficiência no roteamento sem *loops*. O protocolo ainda faz o uso de técnicas de diversidade espacial para otimizar a vazão da rede e reduzir colisões;
- Desenvolvimento de uma ferramenta para co-simulação e dimensionamento da rede de comunicação baseada no modelo de rede elétrica;
- Desenvolvimento dos protótipos de *hardware*, *software*, para validação prática da arquitetura proposta, que, futuramente, poderão tornar-se produtos.

Além das contribuições elencadas, como possibilidade de aperfeiçoamento, são apresentadas as sugestões de continuidade a seguir.

7.3 TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de melhorar o desempenho e expandir as possibilidades da arquitetura desenvolvida nesta tese, são sugeridos como continuidade do trabalho:

- A criação de uma interface amigável de configuração para a ferramenta de co-simulação que permita o manuseio por usuário sem experiência em programação;
- Um estudo sobre técnicas de clusterização de rede automáticas baseadas em critérios multivariáveis, para permitir um particionamento ótimo, não baseado apenas na experiência empírica como o processo de clusterização aplicado neste estudo;
- O estudo de outros protocolos de roteamento para redes em malha, com o objetivo de determinar cenários onde a aplicação de cada um dos protocolos é melhor empregada;
- A avaliação do desempenho da arquitetura proposta em outros cenários diferentes das aplicações para redes elétricas inteligentes, como a automação industrial ou cidades inteligentes;
- A avaliação de diferentes algoritmos de priorização de pacotes para a coexistência de serviços;
- O desenvolvimento do *hardware* de medição para o dispositivo intermediário, deixando de ser apenas um nó de roteamento, passando a ter uma funcionalidade importante no monitoramento da rede elétrica.
- Estudo de impacto de mecanismos mais complexos de segurança de informação como chaves assimétricas e assinaturas.

7.3 PUBLICAÇÕES E PARTICIPAÇÕES EM EVENTOS

As publicações realizadas em congressos a seguir, foram desenvolvidos ao longo do estudo e serviram como embasamento para a delimitação do escopo do trabalho, tendo como principal balizador a geração distribuída e redes de distribuições rurais.

PRADE, L. R.; UBERTI, V. A.; EVALDT, M. C.; ABAIDE, A. R.; BERNADON, D. P.; FIGUEIREDO, R. M.; PFITSCHER, L. L. Análise técnica da inserção de geração distribuída,

estudo de caso de uma rede radial em Santa Maria, RS. In: XVII Encuentro Regional Iberoamericano del Cigre, **Anais** [...], 2017, Ciudad del Este, Paraguay.

UBERTI, V. A.; EVALDT, M. C.; ABAIDE, A. R.; PFITSCHER, L. L.; FIGUEIREDO, R. M.; PRADE, L. R. Avaliação técnico-econômica da utilização de painéis fotovoltaicos e células a combustível em sistemas de geração distribuída. In: X Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, **Anais** [...], 2016, Gramado. X CBPE, 2016.

EVALDT, M. C.; UBERTI, V. A.; ABAIDE, A. R.; PFITSCHER, L. L.; FIGUEIREDO, R. M.; PRADE, L. R.. Previsão de carga através da aplicação de métodos de regressão Estudo de caso da região Norte do Brasil. In: X Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, **Anais** [...], 2016, Gramado. X CBPE, 2016

UBERTI, V. A.; ADEYANJU, O. M.; BERNARDON, D.P.; ABAIDE, A. R. ; PEREIRA, P. R. S. ; PRADE, L. R. . Linear Programming Applied to Expansion Planning of Power Transmission System. In: IEEE PES ISGT LA 2019, **Anais** [...], 2019, Gramado. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America.

PRADE, L. R.; UBERTI, V. A.; ABAIDE, A. R.; PEREIRA, P. R. S.; BOTH, C. B. A LoRa Mesh Architecture for Automation of Rural Electricity Distribution Networks. *Electronics Letters*. 2020. DOI 10.1049/el.2020.0575.

E a participação em alguns eventos técnicos divulgando o trabalho.

PRADE, L. R.; OMORI, J. S.; BAUERMANN, A. AMI – Sistemas de comunicação para última Milha em Redes Inteligentes. **Painel**. Seminário Internacional de Smart Metering, CEEE, Porto Alegre, 2018.

PRADE, L. R. Redes para IoT. **Palestra**. *Summer School* – Ramos Estudantil IEEE, São Leopoldo, 2019

REFERÊNCIAS

- ABBASINEZHAD-MOOD, Dariush *et al.* A Secure and Efficient Key Establishment Scheme for Communications of Smart Meters and Service Providers in Smart Grid. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2019.
- ABEELE, Floris Van den *et al.* Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 4, n. 6, p. 2186-2198, 2017.
- AKERELE, Michael; AL-ANBAGI, Irfan; EROL-KANTARCI, Melike. A Fiber-Wireless Sensor Networks QoS Mechanism for Smart Grid Applications. **IEEE Access**, v. 7, p. 37601-37610, 2019.
- AMARASEKARA, Bhagya *et al.* Co-simulation platform for smart grid applications. **Proceedings of the 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, ISGT ASIA 2015**, p. 1-6, 2016.
- ARAÚJO, Paulo Régis C. *et al.* Middleware for integration of legacy electrical equipment into smart grid infrastructure using wireless sensor networks. **International Journal of Communication Systems**, v. 31, n. 1, p. 1-15, 2018.
- ARTALE, Giovanni *et al.* Smart Interface Devices for Distributed Generation in Smart Grids: the Case of Islanding. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, n. 23, p. 7803-7811, 2017.
- BARRIQUELLO, Carlos H. *et al.* Performance assessment of a low power wide area network in rural smart grids. **2017 52nd International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2017**, v. 2017-Janua, n. 1, p. 1-4, 2017.
- BOER, Petra de; VERHAEGH, Nynke. **Smart Grids from a Global Perspective**. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- BOR, Martin C. *et al.* Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale? In: PROCEEDINGS OF THE 19TH ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELING, ANALYSIS AND SIMULATION OF WIRELESS AND MOBILE SYSTEMS - MSWIM '16 2016, **Anais [...]**, 2016.
- CHROBOCZEK, J.; SCHINAZI, D. **The Babel Routing Protocol**. 2018. Disponível em: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-babel-rfc6126bis-07>. Acesso em: 27 jan. 2020.
- CILFONE, Antonio *et al.* Wireless Mesh networking: An IoT-oriented perspective survey on relevant technologies. **Future Internet**, v. 11, n. 4, 2019.
- DASH7 ALLIANCE. **DASH7 Alliance Protocol**. Disponível em: <http://www.dash7-alliance.org/product/d7ap1-1/>. Acesso em: 2 jan. 2018.
- DAY, Timothy; ENGINEER, Field Application. DNP3, Distributed Network Protocol v3 an INTRODUCTION. 2018.
- DUGAN, Roger C. Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS). **Electric Power Research Institute, Inc.**, p. 1-177, nov. 2013.

FARHANGI, Hassan. The path of the smart grid. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 8, n. 1, p. 18-28, 2010.

FEI, Lifu *et al.* Technique for network performance measurement based on RFC 2544. *In: 4th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks. Anais [...]. CICN, 2012. p. 200-204.*

FSK, G.; LORA, D. D. R.; LORA, G. F. S. K. SX1301 WIRELESS & SENSING PRODUCTS Datasheet. p. 1–40, 2017. Disponível em: www.semtech.com. Acesso em: 27 jan. 2020.

GOPE, Prosanta; SIKDAR, Biplab. An Efficient Privacy-Friendly Hop-by-Hop Data Aggregation Scheme for Smart Grids. **IEEE Systems Journal**, 2019.

GOTTHARD, Petr; JANKECH, Tomas. Low-cost car park localization using RSSI in supervised LoRa Mesh networks. WORKSHOP ON POSITIONING, NAVIGATION AND COMMUNICATIONS, 15., 2018. **Anais [...]. 2018.**

GYRARD, Amelie; SERRANO, Martin. A Unified Semantic Engine for Internet of Things and Smart Cities: From Sensor Data to End-Users Applications. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DATA SCIENCE AND DATA INTENSIVE SYSTEMS, 2015. Anais [...], 2015.*

HARIRI, Ali; NEWAZ, Alvi; FARUQUE, Md Omar. Open-source python-OpenDSS interface for hybrid simulation of PV impact studies. **IET Generation, Transmission & Distribution**, p. 3125-3133, 2017.

HAXHIBEQIRI, Jetmir *et al.* LoRa scalability: A simulation model based on interference measurements. **Sensors (Switzerland)**, v. 17, n. 6, 2017.

HONETH, Nicholas; NORDSTROM, Lars. Distributed Topology Inference for Electric Power Grids. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 13, n. 6, p. 3206–3215, 2017.

IRFAN, Muhammad *et al.* Opportunities and challenges in control of smart grids: Pakistani perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, maio 2017.

ISLAM, Md Monjurul; ZHANG, Zhongshan. Device-to-Device Communications in Unlicensed Spectrum: Problem Identification and Performance Maximization. **IEEE Access**, v. 7, p. 74134-74148, 2019.

KARAOĞLAN ALTOP, Duygu *et al.* DKEM: Secure and efficient Distributed Key Establishment Protocol for Wireless Mesh Networks. **Ad Hoc Networks**, v. 54, p. 53-68, 2017.

KIM, Hyung Sin *et al.* Load Balancing under Heavy Traffic in RPL Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 16, n. 4, p. 964-979, 2017.

KONG, Peng-Yong; SONG, Yujae. Joint Consideration of Communication Network and Power Grid Topology for Communications in Community Smart Grid. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2019.

KULKARNI, Shreyas *et al.* Enabling a Decentralized Smart Grid Using Autonomous Edge Control Devices. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 6, n. 5, p. 7406-7419, 2019.

KUZLU, M. *et al.* A Comprehensive Review of Smart Grid Related Standards and Protocols. *In: INTERNATIONAL ISTANBUL SMART GRID AND CITIES CONGRESS AND FAIR (ICSG)*, 5., 2017. **Anais [...]**, 2017.

LAVEYNE, Joannes I. *et al.* Potential of domestically provided ancillary services to the electrical grid. *In: INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, UPEC*, 52., 2017. **Anais [...]**, 2017. p. 1-6.

LEE, Jungwoon *et al.* Risk analysis and countermeasure for bit-flipping attack in LoRaWAN. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION NETWORKING*, 2017. **Anais [...]**, 2017.

LI, Shancang; XU, Li Da; ZHAO, Shanshan. The internet of things: a survey. **Information Systems Frontiers**, v. 17, n. 2, p. 243-259, 2015.

LIPFERT, Hermann. **MIMO OFDM Space Time Coding - Part I Technical Basis**. 2007. Disponível em: <http://www.irt.de/webarchiv/showdoc.php?z=OTAyIzEwMDYwMTMxMCNwZGY=>. Acesso em: 27 jan. 2020.

LIU, Pei *et al.* Joint Interference Management and Power Allocation for Relay-Assisted Smart Grid Communications. **IEEE Internet of Things Journal**, 2019.

LORASIM. [s.d.]. Disponível em: <http://www.lancaster.ac.uk/scs/sites/lora/>. Acesso em: 30 set. 2019.

MAGRIN, Davide; CENTENARO, Marco; VANGELISTA, Lorenzo. Performance Evaluation of LoRa Networks in a Smart City Scenario. **2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)**, p. 1-7, 2017.

MAJUMDAR, Chitradeep *et al.* Packet-Size Optimization for Multiple-Input Multiple-Output Cognitive Radio Sensor Networks-Aided Internet of Things. **IEEE Access**, v. 5, p. 14419-14440, 2017.

MEHMOOD, Tayyab. **COOJA Network Simulator: Exploring the Infinite Possible Ways to Compute the Performance Metrics of IOT Based Smart Devices to Understand the Working of IOT Based Compression & Routing Protocols**. 2017. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1712.08303>. Acesso em: 27 jan. 2020.

MIRZ, Markus *et al.* A Cosimulation Architecture for Power System, Communication, and Market in the Smart Grid. **Complexity**, , v. 2018, p. 1-12, 2018.

MONISH, T.; RUPEKESHAN, B.; RAJAMANIKKAM, B. Implementation of 4x4 Mimo with Zigbee. **International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology**, v. 6, n. 2, p. 147-152, 2019.

MUNSHI, Amr A.; A-R MOHAMED, Yasser I. Big data framework for analytics in smart grids. **Electric Power Systems Research**, v. 151, p. 369-380, 2017.

NAFI, Nazmus S. *et al.* **A survey of smart grid architectures, applications, benefits and standardization** *Journal of Network and Computer Applications*, 2016. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1084804516302314>. Acesso em: 7 set. 2017.

NAZARI, Masoud H. *et al.* Communication-Failure-Resilient Distributed Frequency Control in Smart Grids: Part I: Architecture and Distributed Algorithms. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2019.

NEAGU, Oana; HAMOUDA, Walaa. Performance of smart grid communication in the presence of impulsive noise. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SELECTED TOPICS IN MOBILE AND WIRELESS NETWORKING, MOWNET, 2016 Anais [...]*, 2016. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7496614/>. Acesso em: 26 nov. 2017.

NS-3. **The Network Simulator 3**. Disponível em: <https://www.nsnam.org/>. Acesso em: 27 jan. 2020.

OGBODO, Emmanuel U.; DORRELL, David; ABU-MAHFOUZ, Adnan M. Cognitive Radio based Sensor Network in Smart Grid: Architectures, Applications and Communication Technologies. **IEEE Access**, 2017.

PALENSKY, Peter *et al.* Applied Cosimulation of Intelligent Power Systems. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, p. 6-21, 2017.

PATEL, Dhaval; WON, Myounggyu. Experimental Study on Low Power Wide Area Networks (LPWAN) for Mobile Internet of Things. **2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)**, p. 1-5, 2017.

PETRIĆ, Tara *et al.* Measurements, performance and analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PERSONAL, INDOOR AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS, PIMRC, 2016. Anais [...]*. 2016.

RAIFORD SMITH. Smart Grid Manifesto. **T&D World Magazine**, 2017. Disponível em: <http://www.tdworld.com/grid-opt-smart-grid/smart-grid-manifesto>. Acesso em: 30 jan. 2018.

RINALDI, Stefano *et al.* Characterization of IP-Based communication for smart grid using software-defined networking. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 67, n. 10, p. 2410-2419, 2018.

RODRIGUEZ-MOLINA, Jesus; KAMMEN, Daniel M. Middleware architectures for the smart grid: A survey on the state-of-the-art, taxonomy and main open issues. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 20, n. 4, p. 2992-3033, 2018.

SANCHEZ-IBORRA, Ramon; CANO, Maria Dolores. State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services. **Sensors (Switzerland)**, v. 16, n. 5, p. 708, 2016.

SARAVANAN, M.; DAS, Arindam; IYER, Vishakh. Smart water grid management using LPWAN IoT technology. *In: GLOBAL INTERNET OF THINGS SUMMIT, PROCEEDINGS, 2017. Anais [...]*, 2017.

SATO, Goshi; SHIBATA, Yoshitaka; UCHIDA, Noriki. Platform System Based on LoRa Mesh Network Technology. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, v. 927, p. 510-515, 2019.

SCHRODER FILHO, H. G.; PISSOLATO FILHO, J.; MORELLI, V. L. The adequacy of LoRaWAN on smart grids: A comparison with RF Mesh technology. *In: INTERNATIONAL SMART CITIES CONFERENCE: IMPROVING THE CITIZENS QUALITY OF LIFE, ISC2 2016*, 2. 2016. **Anais [...]**, 2016.

SEMTECH. **Semtech supplies analog and mixed-signal semiconductor products for use in computers, portable devices, communications and industrial equipment.** [s.d.]. Disponível em: <http://www.semtech.com/>. Acesso em: 29 nov. 2017.

SEMTECH CORPORATION. **LoRa Modulation Basics.** 2015. Disponível em: <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2020.

SENGUPTA, A.; MUKHOPADHYAY, S.; SINHA, A. K. Automated Verification of Power System Protection Schemes - Part I: Modeling and Specifications. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, n. 5, p. 2077-2086, 2015.

SÉRGIO, Paulo; GARCIA, Rangel; KLEINSCHMIDT, João Henrique. Tecnologias Emergentes de Conectividade na IoT: Estudo de Redes LPWAN. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS*, 35., 2017. **Anais [...]**. 2017.

SHANG, Wentao *et al.* **Challenges in IoT Networking via TCP/IP Architecture NDN Project, Tech. Rep. NDN-0038.** Disponível em: <http://named-data.net/techreports.html>. Acesso em: 30 dez. 2017.

SLABICKI, Mariusz; PREMSANKAR, Gopika; DI FRANCESCO, Mario. Adaptive configuration of LoRa networks for dense IoT deployments. *In: IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium: Cognitive Management in a Cyber World, NOMS 2018.* **Anais [...]**, 2018. p. 1-9.

SONG, Yonghua *et al.* An Internet of Energy Things Based on Wireless LPWAN. **Engineering**, v. 3, n. 4, p. 460-466, 2017.

SOOD, V. K. *et al.* Developing a communication infrastructure for the smart grid. **2009 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2009**, v. 4, p. 1-7, 2009.

SOUFIANE, Zahid; NATIONAL, Institut. A New Communication Architecture Model for Smart Grid. **Journal of Computer Science**, v. 16, n. 7, p. 129-143, 2018.

STERBENZ, James P. G. Smart city and IoT resilience, survivability, and disruption tolerance: Challenges, modelling, and a survey of research opportunities. *In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON RESILIENT NETWORKS DESIGN AND MODELING (RNDM)*, 9., 2017. **Anais [...]**, 2017. Disponível em: www.ittc.ku.edu/resilinet. Acesso em: 27 jan. 2020.

THOMAS, Telkamp. **LoRa, LoRaWAN, and the challenges of long-range networking in shared spectrum.** Disponível em: <https://www.kivi.nl/uploads/media/584e9180f3822/cr-platform-lora-workshop-shared.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2018.

THORIN, Oskar. **Power Line Induction Energy Harvesting Powering Small Sensor Nodes**. 2016. Disponível em: <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?dswid=6017&pid=diva2%3A931356&c=1&searchType=SIMPLE&language=en&query=Power+Line+Induction+Energy+Harvesting+Powering+Small+Sensor+Nodes&af=%5B%5D&aq=%5B%5B%5D%5D&aq2=%5B%5B%5D%5D&aqe=%5B%5D&noOfRows=50&sortOrder>. Acesso em: 27 jan. 2020.

TROIANO, Gustavo O. *et al.* Co-simulator of power and communication networks using OpenDSS and OMNeT++. *In: 2016 IEEE INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES - ASIA (ISGT-ASIA), 2016. Anais [...], 2016.* Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7796538/>. Acesso em: 4 mar. 2019.

VARELA, Jesús *et al.* Show me!: Large-scale smart grid demonstrations for European distribution networks. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 13, n. 1, p. 84-91, 2015.

VARSIER, Nadege; SCHWOERER, Jean. Capacity limits of LoRaWAN technology for smart metering applications. **IEEE International Conference on Communications**, 2017.

YAQOOB, Ibrar *et al.* Internet of Things Architecture: Recent Advances, Taxonomy, Requirements, and Open Challenges. **IEEE Wireless Communications**, v. 24, n. 3, p. 10-16, 2017.

YU, Wei *et al.* A Survey on the Edge Computing for the Internet of Things. **IEEE Access**, [s. l.], p. 1-1, 2017.

YUAN, Guohui. Rural Electrification Goes Local: Recent innovations in renewable generation, energy efficiency, and grid modernization. **IEEE Electrification Magazine**, v. 3, n. 1, p. 16-24, 2015.

ZEB, Asim *et al.* Clustering analysis in wireless sensor networks: The ambit of performance metrics and schemes taxonomy. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 12, n. 7, 2016.

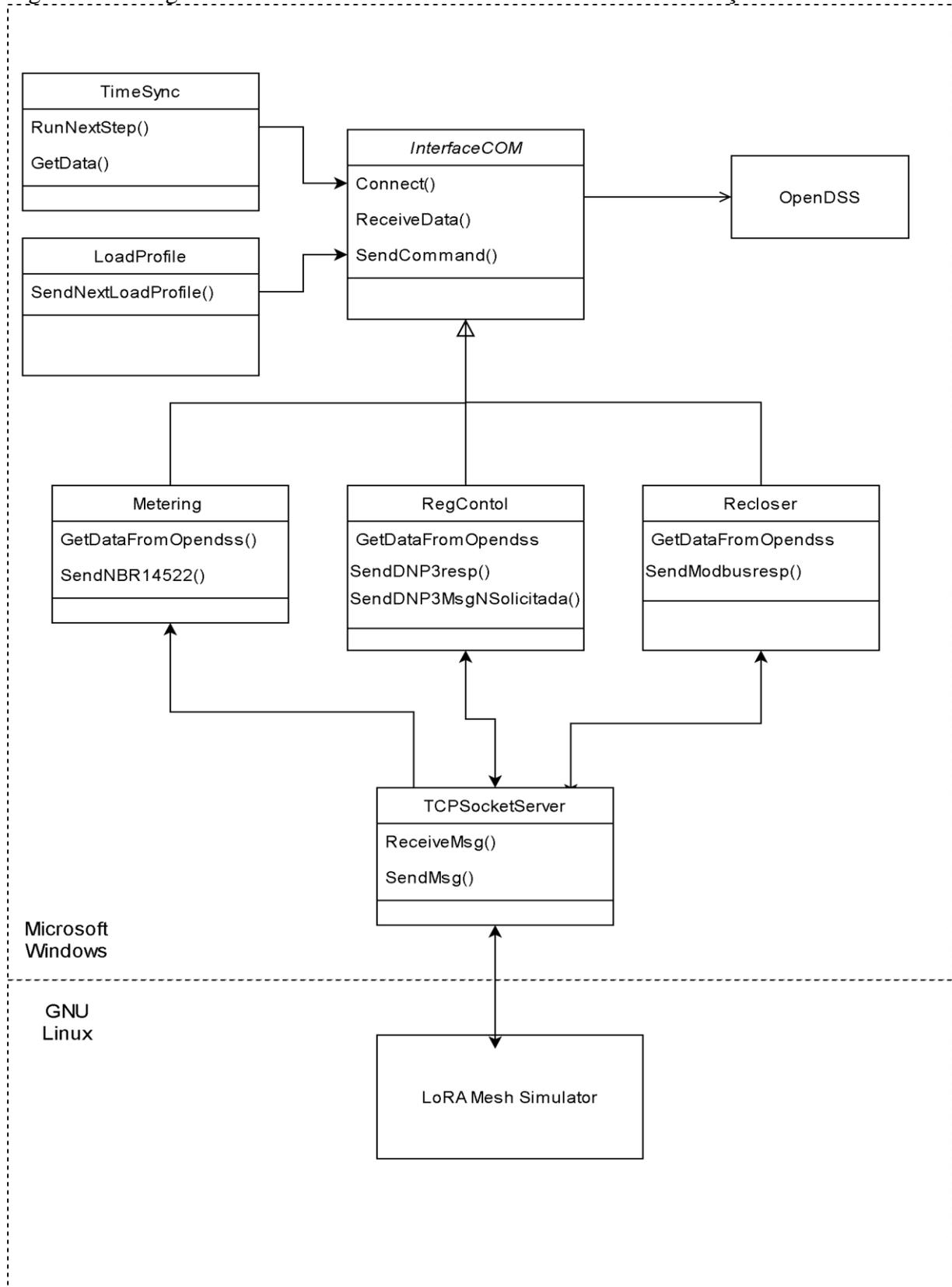
ZHANG, Jianhua *et al.* Hybrid communication architectures for distributed smart grid applications. **Energies**, v. 11, n. 4, p. 1-16, 2018.

ZHU, Guibing *et al.* Improving the Capacity of a Mesh LoRa Network by Spreading-Factor-Based Network Clustering. **IEEE Access**, v. 7, p. 21584-21596, 2019.

ZOMERS, Adriaan. Remote access: Context, challenges, and obstacles in rural electrification. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 12, n. 4, p. 26-34, 2014.

APÊNDICE A – DIAGRAMA DE CLASSES DO CO-SIMULADOR

Figura 27 – Diagrama de Classes detalhado da ferramenta de Co-simulação desenvolvida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – CÓDIGO PYTHON DO SIMULADOR DNP3 USADO NOS TESTES

Código Fonte 1 – Código fonte parcial do simulador DNP3 *Outstation*, usado nos testes de validação da arquitetura.

```

import logging
import sys

#importa a biblioteca opendnp3
from pydnp3 import opendnp3, openpal, asiopal, asiodnp3

LOG_LEVELS = opendnp3.levels.NORMAL | opendnp3.levels.ALL_COMMS
LOCAL_IP = "0.0.0.0"
PORT = 20000

#Descreve a calsse do equipamento outstation com seus pontos de dados
class OutstationApplication(opendnp3.IOutstationApplication):

    outstation = None

    def __init__(self):
        super(OutstationApplication, self).__init__()

        _log.debug('Configura a pilha the DNP3')
        self.stack_config = self.configure_stack()

        _log.debug('Configura a base de dados do DNP3')
        self.configure_database(self.stack_config.dbConfig)

        _log.debug('Cria gerenciador DNP3')
        threads_to_allocate = 1
        self.log_handler = asiodnp3.ConsoleLogger().Create()
        self.manager = asiodnp3.DNP3Manager(threads_to_allocate,
self.log_handler)

        _log.debug('Cria um canal DNP')
        self.retry_parameters = asiopal.ChannelRetry().Default()
        self.listener = AppChannelListener()
        self.channel = self.manager.AddTCPServer("server",
                                                LOG_LEVELS,

self.retry_parameters,

                                                LOCAL_IP,
                                                PORT,
                                                self.listener)

        _log.debug('Habita Outstation)
        self.command_handler = OutstationCommandHandler()
        self.outstation = self.channel.AddOutstation("outstation",
self.command_handler, self, self.stack_config)
        self.outstation.Enable()

        ...

    # Função de configuração da pilha DNP3
    @staticmethod
    def configure_stack():
        """Set up the OpenDNP3 configuration."""
        stack_config =
asiodnp3.OutstationStackConfig(opendnp3.DatabaseSizes.AllTypes(10)) =
stack_config.outstation.eventBufferConfig =
opendnp3.EventBufferConfig().AllTypes(10) =
stack_config.outstation.params.allowUnsolicited = True
stack_config.link.LocalAddr = 10
stack_config.link.RemoteAddr = 1

```

```

        stack_config.link.KeepAliveTimeout =
openpal.TimeDuration().Max()
        return stack_config

    # Função de configuração da base de dados (pontos)DNP3
    @staticmethod
    def configure_database(db_config):
        """
            Configura dois pontos analógicos (variação 30.1) nos
            índices 1 e 2.
            Configura dois pontos digitais (variação 1.2) nos
            índices 1 e 2.
        """
        db_config.analog[1].clazz = opendnp3.PointClass.Class2
        db_config.analog[1].svariation =
opendnp3.StaticAnalogVariation.Group30Var1
        db_config.analog[1].evariation =
opendnp3.EventAnalogVariation.Group32Var7
        db_config.analog[2].clazz = opendnp3.PointClass.Class2
        db_config.analog[2].svariation =
opendnp3.StaticAnalogVariation.Group30Var1
        db_config.analog[2].evariation =
opendnp3.EventAnalogVariation.Group32Var7
        db_config.binary[1].clazz = opendnp3.PointClass.Class2
        db_config.binary[1].svariation =
opendnp3.StaticBinaryVariation.Group1Var2
        db_config.binary[1].evariation =
opendnp3.EventBinaryVariation.Group2Var2
        db_config.binary[2].clazz = opendnp3.PointClass.Class2
        db_config.binary[2].svariation =
opendnp3.StaticBinaryVariation.Group1Var2
        db_config.binary[2].evariation =
opendnp3.EventBinaryVariation.Group2Var2

        ...

def main():

    app = OutstationApplication()
    _log.debug('Simulador Outstation Inicializado)
    app.shutdown()
    _log.debug('Exiting.')
    exit()

if __name__ == '__main__':
    main()

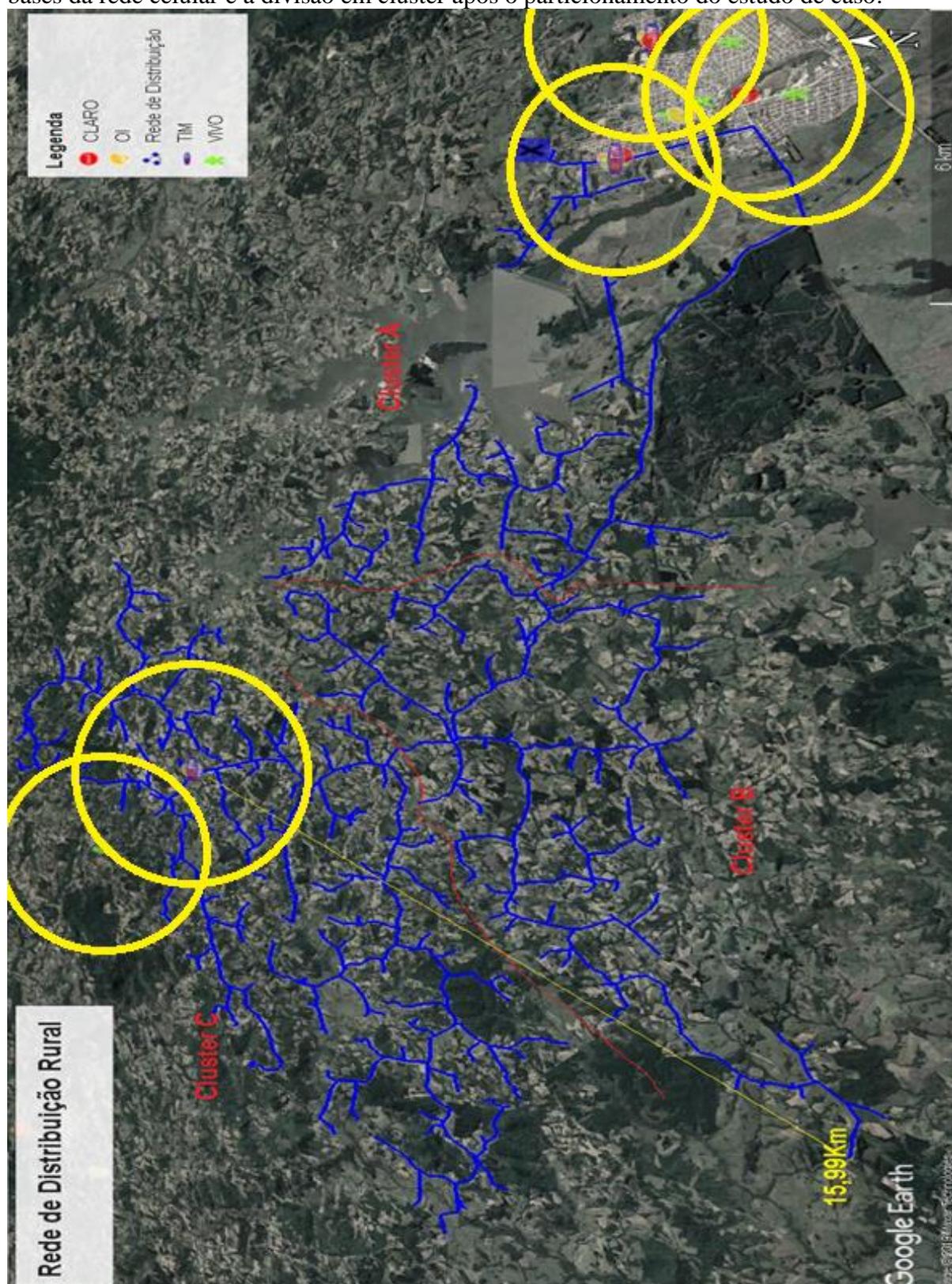
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Código fonte completo disponível no repositório <https://bitbucket.org/luciorene/tesedoutorado>.

APÊNDICE C – REDE DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADA E COBERTURA DA REDE CELULAR

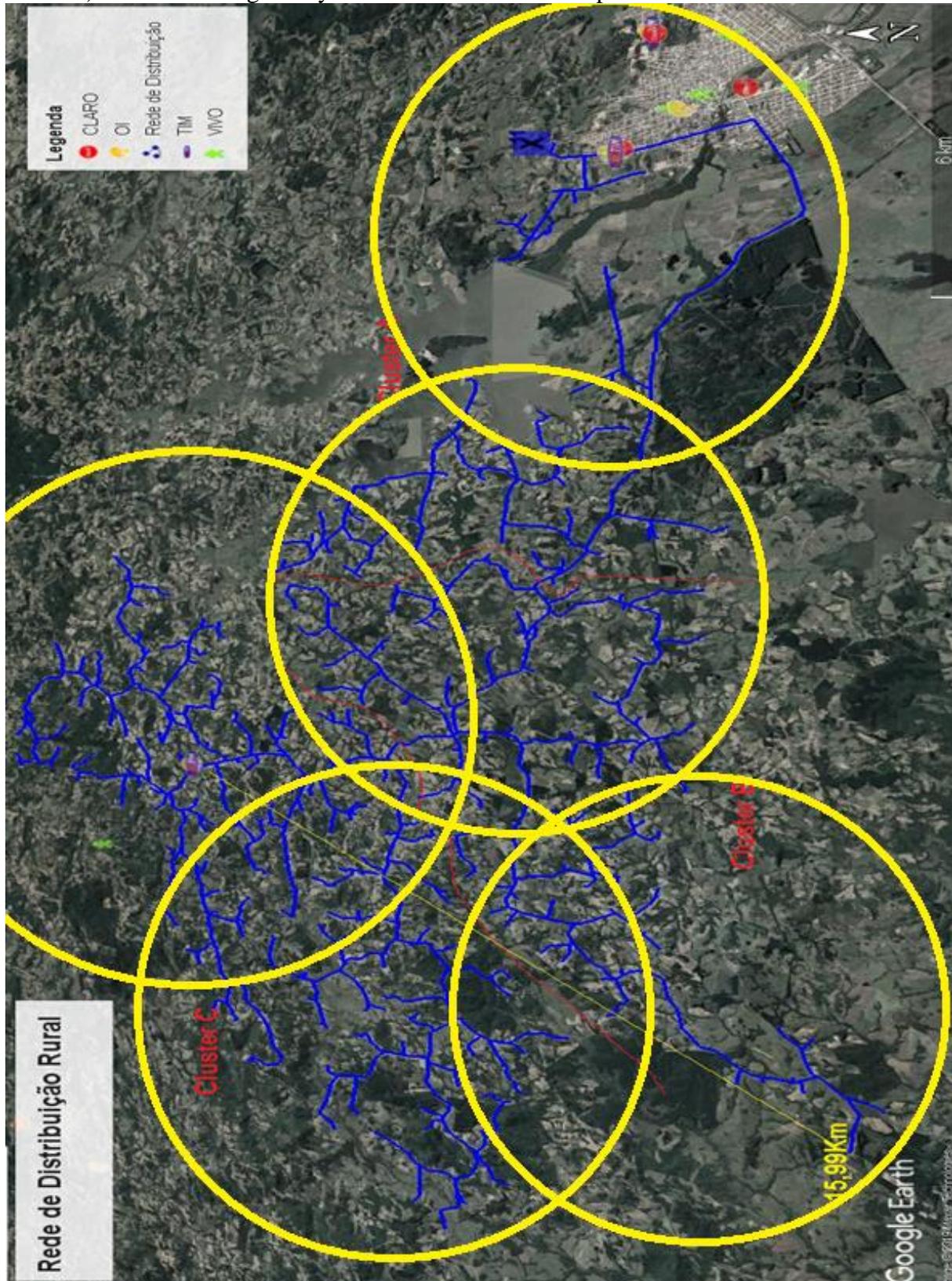
Figura 28 – Imagem aérea da rede de distribuição rural, com a marcação das estações rádio bases da rede celular e a divisão em cluster após o particionamento do estudo de caso.



Fonte: Elaborado pelo autor com base nas informações de georreferenciamento da rede de distribuição e informações de cobertura da rede celular disponíveis no site da ANATEL.

APÊNDICE D – REDE DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADA E SIMULAÇÃO DE GATEWAYS LORAWAN PARA COBERTURA

Figura 29 – Imagem aérea da rede de distribuição rural estudada, com a simulação (em amarelo) do número de gateways LoRAWAN necessários para a cobertura.



Fonte: Elaborado pelo autor com base nas informações de georreferenciamento da rede de distribuição e simulação de alcance médio de um gateway LoRAWAN com antena de 6dBi.