



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

Marcelo Marcos Amoroso

Tecnologias de redes sem fio para casas inteligentes: uma análise técnica e econômica

Araranguá

2020

Marcelo Marcos Amoroso

Tecnologias de redes sem fio para casas inteligentes: uma análise técnica e econômica

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Ricardo A. R. Moraes, Dr.

Coorientador: Prof. Gustavo M. de Araújo, Dr.

Araranguá

2020

Ficha de identificação da obra

Amoroso, Marcelo

Tecnologias de redes sem fio para casas inteligentes :
uma análise técnica e econômica / Marcelo Amoroso ;
orientador, Ricardo Moraes, coorientador, Gustavo de
Araújo, 2020.

162 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em
Energia e Sustentabilidade, Araranguá, 2020.

Inclui referências.

1. Energia e Sustentabilidade. 2. Simulação
Computacional. 3. Teste de campo. 4. Redes sem Fio. 5.
Smart Home. I. Moraes, Ricardo. II. de Araújo, Gustavo.
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade. IV. Título.

Marcelo Marcos Amoroso

Tecnologias de redes sem fio para casas inteligentes: uma análise técnica e econômica

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Analucia Schiaffino Morales, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Luciana de Oliveira Rech, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes, Dr.

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

Profa. Dra. Kátia Cilene Rodrigues Madruga
Subcoordenadora do Programa de Pós-Graduação

Prof. Dr. Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes
Orientador

Araranguá, 2020.

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe, a minha querida noiva, a minha irmã e aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador e amigo Ricardo Moraes, pela compreensão, paciência, empenho na realização deste trabalho e pela oportunidade dada a mim.

À cooperação e auxílio do Professor Gustavo Medeiros de Araújo na execução da simulação e sugestões para o desenvolvimento do trabalho.

À cooperação e auxílio do Professor Marcelo Daniel Berejuck na execução da análise econômica e sugestões para o trabalho.

À cooperação e auxílio de Suelen Laurindo na execução da simulação.

Aos meus pais Clayton e Marli, e minha noiva Thais, que sempre me apoiaram e me auxiliaram durante toda a formação.

Aos meus amigos e colegas de classe, que me acompanharam durante essa jornada.

À UFSC e todos integrantes desta instituição.

Ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

A todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para o desenvolvimento deste trabalho.

“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez”. (George Bernard Shaw).

RESUMO

O conceito da *Smart Grid* encontra-se em execução e é uma realidade próxima, sua aplicação foi acelerada pela redução dos custos dos componentes eletrônicos, a evolução da Internet das Coisas e a necessidade do desenvolvimento de soluções mais eficiente para os veículos elétricos e a geração distribuída. Os principais projetos ao redor do mundo estão começando pela implementação de *Smart Homes*, devido a maior facilidade da solução técnica e alta compensação. Toda essa implementação está acompanhada de barreiras técnicas e econômicas, devido ao aumento de dados gerados e o aumento do custo direto dos produtos. Os principais problemas relatados são: a grande oferta de tecnologias de comunicação e a falta de interoperabilidade entre a solução dos fabricantes. Este documento foca no estudo das principais redes sem fio, Sub-GHz, Wi-Fi e ZigBee, realizando um comparativo através de análises técnica e econômica das redes, visando eleger a melhor solução para um controle e gerenciamento de demanda dentro de uma Smart Home. As tecnologias são testadas por meio de um experimento computacional parametrizado por dados obtidos de um teste de campo, aplicado num ambiente real, baseado numa residência no Brasil. A simulação foi utilizada para avaliar as tecnologias de rede sem fio de forma mais ampla, permitindo simular um ambiente completo de Smart Home para gerenciamento e demanda de energia, aplicando um nodo de comunicação para cada ponto de energia. A análise econômica relaciona o custo direto de rádios da tecnologia e seu consumo de energia, baseado em tarifas da distribuidora local da residência. Concluiu que a rede sem fio Wi-Fi, baseado no padrão IEEE 802.11, é a melhor solução para aplicações de gerenciamento de demanda e energia de ambientes Smart Home, apresentando maiores taxa de sucesso de transmissão e melhor custo benefício.

Palavras-chave: Análise técnica e econômica. Casa Inteligente. Rede Inteligente. Tecnologia de redes sem fio.

ABSTRACT

The Smart Grid concept is being implemented and it is a close reality, its application has been accelerated by the reduction of the electronic component's costs, the Internet of Things evolution and the necessity to develop more efficient solutions for electric vehicles and distributed generation. The main projects around the world are starting with the implementation of Smart Homes, due to the greater easy technical solution and high compensation. These implementations are followed by technical and economic barriers, due to the increase in data generation and the increase products price. The problems reported are: the large variety of technologies communication and the lack of interoperability between the manufacturers' solution. This document focuses on the study of the main wireless networks, Sub-GHz, Wi-Fi, and ZigBee, through a technical and economic comparison analysis of the networks, highlighting the best solution to demand and energy management inside a Smart Home. The technologies are tested by means of a computational experiment, parameterized by data obtained from a field test, applied in a real environment, based on a residence in Brazil. The simulation was used to evaluate wireless network technologies in more details, allowing to simulate a complete Smart Home environment for energy and demand management, applying a communication node for each energy point of a smart home. The economic analysis relates the direct cost of technology module and their energy consumption, based on rates from the local distributor of the residence. In conclusion, the Wi-Fi technology, based on the IEEE 802.11 standard, was the best solution for demand and energy management applications in Smart Home environments, with higher transmission success rates and better cost benefit.

Keywords: Economical and Technical Analyze. IoT. Smart Grid. Smart Home. Wireless Technologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemático do SIN no Brasil.....	17
Figura 2 - Os 4 pilares das aplicações em SH.	21
Figura 3 - Conceito de uma SG, aplicada em todo ambiente.	28
Figura 4 - SH e suas aplicações.	30
Figura 5 - Conceito de geração distribuída.....	30
Figura 6 - Fluxo de energia do conceito V2G para os três modelos de veículos.	31
Figura 7 - Localização dos projetos de <i>smart grid</i> no Brasil.....	32
Figura 8 - Componentes de uma IoT.....	36
Figura 9 - Disposição dos canais no espectro.....	43
Figura 10 - Topologia estrela e <i>mesh</i> do padrão IEEE 802.11, com suas possíveis conexões.....	45
Figura 11 - Rede <i>mesh</i> com ZigBee.	47
Figura 12 - Classificação da pesquisa.	51
Figura 13 - Fluxograma de Pesquisa.	53
Figura 14 - Fluxograma da revisão sistemática.....	55
Figura 15 - Artigos utilizados nas sínteses.	59
Figura 16 - Gráfico da faixa de área útil das residências em São Paulo.....	61
Figura 17 - Quantidade de cômodos das residências avaliadas em São Paulo.....	62
Figura 18 - Casa com área entre 86 m ² e 130 m ²	63
Figura 19 - Pacote para uma comunicação Wi-Fi para medição elétrica.	66
Figura 20 - Planta baixa da residência com os nodos localizados.....	70
Figura 21 – Módulos utilizados no experimento Sub-GHz.....	73
Figura 22 - Módulos utilizados no experimento Wi-Fi.	74
Figura 23 - Módulos utilizados no experimento ZigBee.....	75
Figura 24 - Fluxograma resumido da programação.....	76
Figura 25 - Eficiência obtida nos testes experimentais.	77
Figura 26 - Tempo de envio do pacote do nodo para o coordenador.	77
Figura 27 - Planta baixa com a numeração de todos os nodos.....	78
Figura 28 - Ambientes de simulação Sub-GHz, Wi-Fi e ZigBee.....	80
Figura 30 - Simulação com a tecnologia Sub-GHz.	82
Figura 31 - Simulação com a tecnologia Wi-Fi.....	83
Figura 32 - Simulação com a tecnologia ZigBee.	84
Figura 33 - Comparativo entre os custos de operação das tecnologias.	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativos entre os projetos pilotos de SG no Brasil.....	34
Quadro 2 – Camadas do modelo OSI.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tecnologias de redes sem fio citadas nos trabalhos.	55
Tabela 2 – Componentes de controle utilizados no experimento.	71
Tabela 3 – Taxa de sucesso dos nodos nos testes com Sub-GHz.	79
Tabela 4 – Taxa de sucesso dos nodos nos testes com Wi-Fi.	79
Tabela 5 – Taxa de sucesso dos nodos nos testes com ZigBee.	80
Tabela 6 - Taxa de sucesso dos nodos R1 a R4 da simulação Sub-GHz.	81
Tabela 7 - Resultados da taxa de sucesso dos nodos R1 a R4 da simulação Wi-Fi.	82
Tabela 8 - Resultados da taxa de sucesso dos nodos R1 a R4 da simulação ZigBee.	83
Tabela 9 - Custo direto dos módulos baseado num orçamento de dez mil unidades.	85
Tabela 10 - Consumo de corrente nos diferentes modos de operação.	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ARM – *Acorn RISC Machine*

ATM – *Asynchronous Transfer Mode*

BLE – *Bluetooth Low Energy*

CSMA/CA – *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*

DSSS – *Direct Sequence Spread Spectrum*

EXI – *Efficient XML Interchange*

FPGA – *Field Programmable Gate Array*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

IEEE – Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

IoT – *Internet of Things*

IP – *Internet Protocol*

ISM – *Industrial Scientific Medical*

ISO - *International Organization for Standardization*

LAN – *Local Area Network*

LoRaWAN – *Low power Wide Range Area Network*

MAC – *Media Access Control*

M2M – *Machine-to-Machine*

NFC – *Near Field Communication*

OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

OMNeT++ - *Objective Modular Network Testbed in C++*

ONS – Operação Nacional do Sistema interligado nacional

OSI – *Open System Interconnection*

OWL – *Ontology Web Language*

PAN – *Personal Area Network*

PLC – *Power Line Communication*

RDF – *Resource Description Network*

REI – Redes Elétricas Inteligentes

REN – Resolução Normativa de Energia

RFID – *Radio Frequency Identification*

RJ – *Registered Jack*

RN – Resolução Normativa

RTC – *Real Time Clock*

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SG – *Smart Grid*

SH – *Smart Home* ou *Smart House*

SI – Sistema Internacional

SIN – Sistema Interligado Nacional

SP – São Paulo

SSID – *Service Set Identifier*

TCP – *Transmission Control Protocol*

TIC – Tecnologia da Informação e Comunicação

TUE – Tomada de Uso Específico

TUG – Tomada de Uso Geral

UNII – *Unlicensed National Information Infrastructure*

V2G – *Vehicle-to-Grid*

VE – Veículo Elétrico

WAN – *Wide Area Network*

WSN – *Wireless Sensor Network*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	22
1.2	HIPÓTESE	23
1.3	OBJETIVOS	23
1.3.1	Objetivo geral.....	23
1.3.2	Objetivos específicos	24
1.4	JUSTIFICATIVA	24
1.5	MÉTODO DE PESQUISA.....	25
1.6	LIMITAÇÃO DO TRABALHO	25
1.7	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	26
2	REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES E IOT.....	27
2.1	REDE ELÉTRICA INTELIGENTE.....	27
2.1.1	Geração Inteligente.....	28
2.1.2	Transmissão Inteligente	29
2.1.3	Casa Inteligente.....	29
2.1.4	Carros elétricos	31
2.1.5	SG no Brasil	32
2.2	IoT.....	34
2.2.1	Construção de uma IoT.....	35
2.2.2	IoT baseado em redes com fio.....	38
<i>2.2.2.1</i>	<i>Principais tecnologias</i>	<i>38</i>
2.2.3	IoT baseado em redes sem fio	39
<i>2.2.3.1</i>	<i>Wi-Fi.....</i>	<i>41</i>
<i>2.2.3.2</i>	<i>ZigBee.....</i>	<i>45</i>
<i>2.2.3.3</i>	<i>Sub-GHz.....</i>	<i>47</i>
2.3	Conclusão	48

3	METODOLOGIA.....	50
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	50
3.2	PROCEDIMENTOS DA PESQUISA	51
3.3	PLANEJAMENTO DA PESQUISA	52
3.4	REVISÃO SISTEMÁTICA	54
3.4.1	Comparativo entre tecnologias.....	56
3.4.2	Artigos experimentais.....	57
3.4.3	Síntese	58
3.5	ASPECTOS DA EXPERIMENTAÇÃO	60
3.5.1	CENÁRIOS	60
3.5.2	Topologia de rede.....	64
3.5.3	Pacote de dados	65
3.5.3.1	<i>Tamanho do pacote de dados</i>	65
3.5.3.2	<i>Periodicidade das medições</i>	66
3.6	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL.....	67
3.7	SIMULAÇÃO	68
3.8	ANÁLISE ECONÔMICA	68
3.9	CONCLUSÃO.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
4.1	EXPERIMENTO PRÁTICO	70
4.2	SIMULAÇÃO	78
4.3	ANÁLISE ECONÔMICA	85
5	CONCLUSÕES.....	89
5.1	REVISÃO DAS MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS	89
5.2	VISÃO GERAL DO TRABALHO	90
5.3	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	90
5.4	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	90
	REFERÊNCIAS.....	91

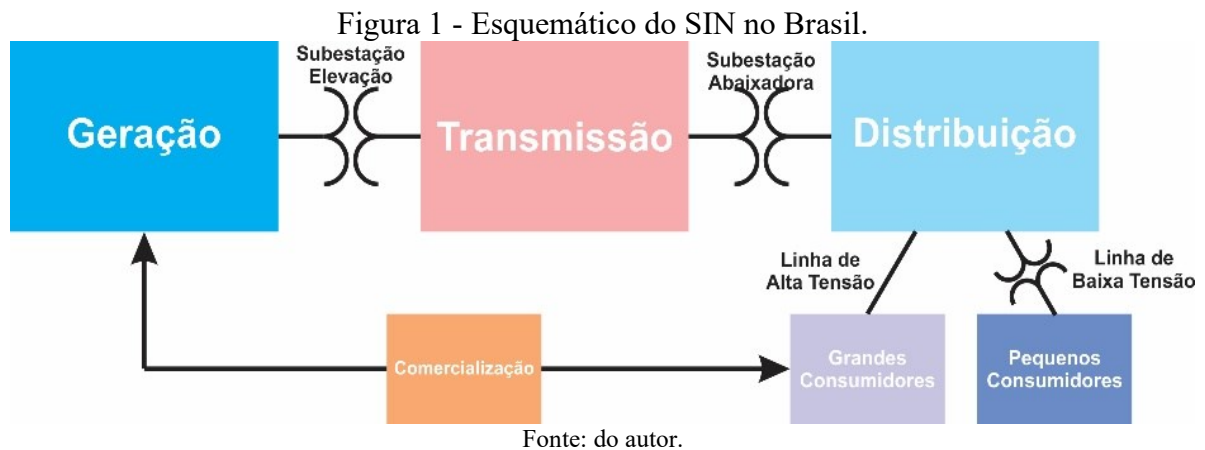
APÊNDICE A – Lista de Artigos da Primeira Síntese.....	97
APÊNDICE B – Lista de Artigos da Segunda Síntese	103
APÊNDICE C – Lista de Artigos da Terceira Síntese	108
APÊNDICE D – Linhas de código implementados no coordenador.....	110
APÊNDICE E – Linhas de código implementadas no cliente	125
APÊNDICE F – Arquivo de criação do ambiente de simulação	129
APÊNDICE G – Modelo Wi-Fi do OmNET++	131
APÊNDICE H – Modelo ZigBee do OmNET++	143
APÊNDICE I – Modelo Sub-GHz do OmNET++.....	151

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica sempre teve relação direta com qualidade de vida e o progresso econômico. Desde a sua descoberta, a eletricidade ocupa um lugar de destaque dentre as formas de energia utilizadas pela humanidade (PINTO, 2013). Sendo considerada uma das mais nobres formas de energia secundária, devido a sua facilidade de geração, transporte, distribuição e utilização. Isso garantiu uma universalização da eletricidade, disseminando o seu uso pela sociedade e caracterizando-a como um direito humano básico no Brasil (Programa Luz para Todos do Governo Federal) (MME, 2003).

Com esse programa do Governo Federal e em resposta aos problemas que o Sistema Elétrico de Potência (SEP) no Brasil vinha sofrendo, em meados dos anos 2000, iniciou-se um investimento para a estruturação do Sistema Interligado Nacional (SIN). Esse é o modelo aplicado ainda nos dias atuais (PINTO, 2013).

O SIN tem como objetivo conectar os grupos que compõem a rede elétrica: geração, transmissão, distribuição, consumo e comercialização. A Figura 1 demonstra o esquemático da topologia do sistema.



O modelo SIN possui uma elevada confiabilidade, estabilidade, acresce a disponibilidade e é mais econômico. As desvantagens apresentadas por um sistema interligado são a proliferação de um distúrbio elétrico em todo o sistema e a complexidade de operação/proteção (PINTO, 2013).

A geração realiza a conversão das mais variadas formas de energia em energia elétrica. No Brasil, a hidroelétrica contempla 85 % da matriz energética de fontes, sendo esse modelo renovável e de alta eficiência. (BARROS et al., 2012).

A interface entre as distribuidoras e as usinas de geração é realizada pelo setor de transmissão de energia, responsável por encaminhar grandes potências elétricas aos centros de consumo (cidades e grandes empresas) (BARROS et al., 2012; PINTO, 2013).

O setor de distribuição é gerido por distribuidoras estatais, ou cooperativas, que atuam no objetivo de garantir a qualidade do abastecimento de energia elétrica nas residências, estabelecimentos comerciais e indústrias de médio e pequeno porte (BARROS et al., 2012).

O consumo de energia elétrica é a etapa final, onde novamente ocorre a conversão das formas de energia, porém dessa vez é a energia elétrica que é convertida nas demais para o uso de acordo com a necessidade (BARROS et al., 2012; PINTO, 2013).

A comercialização é a área mais nova criada dentro do SEP, esta realiza a aproximação comercial entre os grandes consumidores e as centrais geradoras de energia (PINTO, 2013). Essa categoria permite contratos diretos entre as partes mencionadas envolvidas, negociando assim uma tarifa para a energia elétrica e incluindo em outros contratos separados a etapa de transmissão e distribuição (BARROS et al., 2012).

O modelo SIN apresentado é clássico e utilizado em muitos países, o fluxo de energia é unidirecional (geração para consumo) e está fadado a receber alterações com a implementação da geração distribuída (energia fotovoltaica, aerogeradores, entre outros) e o aumento do uso dos carros elétricos (CARVALHO, 2015).

A matriz energética mundial é, na sua maioria, baseada em gerações não renováveis, com destaque para as termelétricas a carvão (41%) e gás natural (21,9%) (IEA, 2017). Esses modelos de geração possuem sérios problemas, como: os recursos limitados em escala humana e o fato de emitirem gases poluentes durante todo o processo.

Logo, existe toda uma pressão e movimentação de organizações mundiais para a troca das matrizes para modelos renováveis, onde nessa classificação a geração fotovoltaica e eólica apresentam os crescimentos mais significativos (CARVALHO, 2015).

A tendência é uma redução das grandes centrais geradoras e o aumento das pequenas usinas de geração de energia, essas localizadas mais próximas aos centros consumidores. Isso altera em parte a característica unidirecional presente no SIN. A geração distribuída apresenta relevantes índices de crescimento em todo mundo e no Brasil.

Essa tendência começou em 2012 no país, com a publicação da REN 482, que estabelece um sistema de compensação de energia. Isso permite aos consumidores instalarem centrais geradoras de pequeno porte em suas instalações e abater o valor de consumo de energia na fatura (ANEEL, 2012a).

Outro fator impactante no SEP é o aumento da utilização de carros elétricos. Projeções de IEA (2011) apontam que existirão 106,5 milhões de carros híbridos rodando na Terra até 2050, representando 10% do consumo de energia elétrica. Comprova-se a preocupação quanto a esse fator pelo aumento dos estudos e artigos relacionados ao tema.

A geração distribuída e o carro elétrico estão em lados opostos do ponto de vista gerador e consumidor, sendo que diretamente e analisando utopicamente, uma tecnologia resolve o problema da outra. Porém, isso implica numa complexidade técnica de implementação, na qual o modelo tradicional de SIN não suportaria receber. Logo, existe um anseio por um sistema mais eficiente, controlado e que lide melhor com esses problemas.

Esse novo modelo que visa melhorar o modelo tradicional é nomeado Rede Elétrica Inteligente (*Smart Grid*, sigla SG), que pode ser definido como um sistema de energia tradicional equipado com a Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC) provendo uma comunicação bidirecional de energia e comunicação de dados, aplicada em todas as esferas (geração, transmissão, distribuição e consumo) (CECILIA; SUDARSANAN, 2016; EL-HAWARY, 2014).

É de suma importância, e irreversível, considerar um sistema de potência moderno com a capacidade de amplificar a eficiência, confiabilidade e segurança da rede; reduzir a demanda de pico; oferecer benefícios ao meio; localizar e reparar faltas e problema mais facilmente; integrar a geração distribuída; entre outros ganhos (EL-HAWARY, 2014). Gungor et al. (2011) reforça que essas vantagens advêm de um controle automatizado, infraestrutura moderna de comunicação, sensoriamento e monitoramento de qualidade e tecnologias de gerenciamento de energia.

Um dos elementos chave da SG é a interação entre o operador do SIN (ONS), empresas atuantes no sistema e os consumidores, é no ponto final da rede denominado casa inteligente (tradução livre de *Smart Home* ou *Smart House*) que os maiores ganhos são apresentados (SAAD AL-SUMAITI; AHMED; SALAMA, 2014).

A ideia central de uma *Smart Home* (SH) é a permissão do controle das aplicações internas da residência pelo agente de distribuição de energia. Esses sinais podem ser manuais ou automatizados com o intuito de otimizar o consumo de energia e reduzir a demanda nas horas de pico.

Conforme cita Saad Al-Sumaiti (2014) uma SH é composta, na sua plenitude, pelos itens abaixo, todos comunicando-se entre si:

- a) aplicações inteligentes;
- b) armazenamento de energia;

- c) geração distribuída;
- d) medidor inteligente; e
- e) sistema de gerenciamento de energia

O tema de estudo desse trabalho encontra-se no ambiente de uma SH, que pode ser definida como uma casa que possibilita a comunicação de dispositivos digitais entre si e através da Internet. Esta definição não é nova e está diretamente relacionada com o que hoje se chama de Internet de Coisas (IoT – *Internet of things*).

Conforme afirma Evans (2011, p. 2):

Agora, considere que a IoT representa a próxima evolução da Internet, dando um grande salto na capacidade de coletar, analisar e distribuir dados que nós podemos transformar em informações, conhecimento e, por fim, sabedoria. Nesse contexto, a IoT se torna bem importante.

A ideia principal da IoT é simples: conectar qualquer corpo à internet, seja um produto, um animal, uma pessoa, literalmente qualquer coisa (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010; XU; HE; LI, 2014).

De acordo com Wollschlaeger (2017), a IoT causará um severo impacto em todos os aspectos do dia a dia das pessoas e também em diferentes áreas. Pelo ponto de vista do usuário existem dois campos principais de aplicações: trabalho e doméstico.

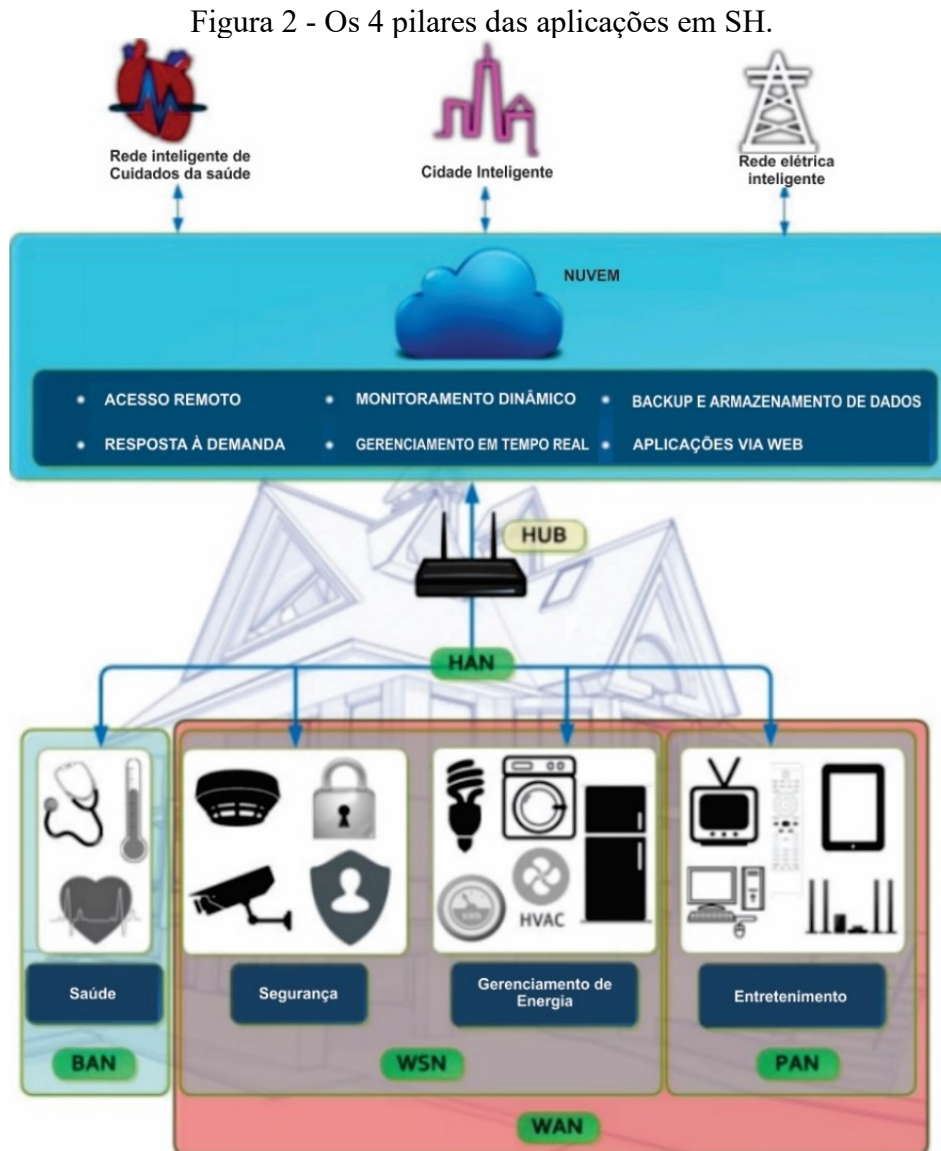
A IoT cresce exponencialmente, de acordo com Schneider (2015, tradução nossa), reforçado pelo NIS:

Um bom raciocínio, por si só, com certeza, não é o suficiente para enfrentar os desafios da própria tecnologia. A escala de Gartner prevê que a IoT incluirá 25 bilhões de dispositivos até 2020 e a Cisco prevê que o tráfego da IoT ultrapassará o tráfego gerado por seres humanos até 2018, significa que há muito para garantir.

Uma SH consiste em inúmeras aplicações constituídas no topo de uma infraestrutura de IoT. Segundo Mendes et al. (2015) e Muqsit et al. (2017) uma SH é implementada a partir da IoT para diversas soluções, que podem ser divididas em quatro pilares segurança, cuidados da saúde, entretenimento e gestão de energia.

A Figura 2 apresenta as principais categorias de atuação dentro de uma SH, demonstrando sua conexão com o mundo externo e possibilitando inúmeras aplicações e melhorias na qualidade de vida num modo geral (MENDES et al., 2015b). Esse modelo de residência com comunicação entre os produtos garante inúmeras vantagens para o consumidor e para a distribuidora. A ideia central da SH é permitir que qualquer equipamento troque

informações com outro nó (representado por um produto ou central), possibilitando a transmissão de dados referente ao funcionamento do produto e as grandezas elétricas (principal contribuição à SG).



Fonte: (MENDES et al., 2015, adaptado).

O foco principal desse trabalho está relacionado com o gerenciamento de Energia de uma SH. Nesse ponto, Gungor et al. (2012) reforçam as melhorias permitidas por uma SH voltada para a SG, como:

- a) medição de consumo de energia elétrica;
- b) controle de demanda; e
- c) implantação de novos meios de medição e tarifação (monômnia, binômnia, horo sazonal, entre outras maneiras).

Todo esse ganho e soluções que a SH apresenta são vantajosos, porém junto trazem grandes desafios, como aumento dos dados gerados, e a necessidade de tecnologias de comunicação para interligar os dispositivos das aplicações da SH.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

É notável que a tecnologia da informação, implementada na rede elétrica, apresenta benefícios e inovação. É de conhecimento também que quase a totalidade do Brasil tem acesso à energia elétrica. Consequentemente, entende-se que a *smart grid* chegará a todos num futuro próximo, logo percebe-se um viés técnico e econômico para essa implementação. O volume de informação e dados gerados será grande, assim como a necessidade de um custo reduzido da tecnologia devido a necessidade de popularização.

Como cita Gungor et al. (2012, p. 1, tradução nossa):

Uma SG, sempre, tem a capacidade de realizar um fluxo de energia bidirecional, tem total visibilidade e controle sobre os ativos da rede e permite a integração total entre diferentes fontes de energia e deslocadas (tradicionais e renováveis). Tais resultados são alcançados graças às infraestruturas avançadas de comunicação digital bidirecional que conectam totalmente os fornecedores e consumidores e permitem o sensoriamento remoto inteligente, a medição, o controle, o monitoramento e a análise.

Essa informação gerada bidirecionalmente precisa ser tratada e transportada, assim as tecnologias de comunicação precisam satisfazer as condições necessárias com bom desempenho e que atenda esse tráfego de dados (GUNGOR et al., 2012).

Para a tecnologia de comunicação ser adequada a aplicações de SH é necessário que esta atenda aos requisitos das aplicações, tais como: baixo consumo de energia, largura de banda suficiente para transmissão de dados, permitir comunicação de curta e média distância, segurança nas transmissões dos dados e interoperabilidade. O fato dessa tecnologia permitir a comunicação com diferentes topologias vai permitir o dinamismo e facilitar o desenvolvimento da SH (KUMAR; OVSTHUS; KRISTENSEN, 2014; SARIJARI et al., 2013).

No contexto de uma SH, os dispositivos que integram as aplicações e necessitam de comunicação variam de sensores, controladores e atuadores, até computadores, que podem ser utilizados em redes domésticas e são divididas em redes com e sem fio. O problema das redes com fio é que a maioria das casas não tem cabeamento, portanto, o custo e complexidade de instalação são fatores que dificultam o seu uso. Por outro lado, as redes sem fio proporcionam facilidade de instalação, porém, apresentam problemas de desempenho, cobertura e segurança.

As redes sem fio lideram as aplicações dentro da SG, principalmente no ambiente de uma SH, para as aplicações dos quatro pilares apresentados. Para o correto funcionamento é necessário que a escolha da tecnologia atenda as necessidades levantadas e permita o correto funcionamento de um ou mais dos quatro pilares.

Logo, o presente trabalho visa responder alguns questionamentos pertinentes à implantação de uma SH no âmbito de gerenciamento de energia, baseada em tecnologias de redes sem fio:

- Qual a melhor tecnologia de rede sem fio que contemplará as funcionalidades necessárias para o gerenciamento e medição de energia dentro da SH?
- Apenas uma tecnologia será a solução ou a interoperabilidade de mais tecnologias?
- A tecnologia de rede sem fio é usual e aplicada em soluções industriais? Possui produção em escalas globais e qual seu custo baseado em valor comercial?

1.2 HIPÓTESE

As tecnologias de rede sem fio baseadas nas normativas do IEEE, possivelmente, serão as melhores soluções do ponto de vista técnico e econômico. Uma única tecnologia não será a solução de comunicação para os quatro pilares (entretenimento, gerenciamento de energia, segurança e saúde) e sim a interoperabilidade entre mais tecnologias.

As redes Sub-GHz em conjunto com as redes Wi-Fi podem ser a melhor co-solução devido à pouca interferência existente nessa faixa de comunicação, redução considerável no consumo de energia elétrica e pelo maior alcance. Essa tendência surgiu com os novos desenvolvimentos de aplicações da rede 802.11ah.

1.3 OBJETIVOS

A presente seção apresenta os objetivos geral e específicos para cumprimento e execução do trabalho.

1.3.1 Objetivo geral

Determinar a melhor solução de tecnologia de rede sem fio para implementação de uma rede elétrica inteligente residencial do ponto de vista técnico e econômico, com o auxílio de análises práticas e indicadores pertinentes à medição do desempenho da tecnologia.

1.3.2 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos são definidos neste trabalho:

- a) realizar uma revisão sistemática da literatura sobre as tecnologias de redes sem fio que serão utilizadas no trabalho;
- b) avaliar as tecnologias de rede sem fio que serão implementados no experimento prático e de simulação; e
- c) levantar o custo direto e não relativo dos módulos utilizados no experimento para a realização de uma análise econômica, baseado em quantidades comerciais consideráveis de compra.

1.4 JUSTIFICATIVA

A IoT está em desenvolvimento e com certeza será implementada em todos os ambientes possíveis (DRATH; HORCH, 2014). O aumento de uso como infraestrutura das aplicações de *smart home*, acontecerá em todos os produtos conectados da residência.

A SG apresenta uma grande inovação, evolução advinda da Internet, permitindo a comunicação de todos os grandes setores do Sistema Elétrico de Potência e oportunizando total controle e melhorias de eficiência.

A implementação da tecnologia da informação em qualquer produto é a base da IoT e se correlaciona com a rede elétrica inteligente, isso expande as aplicações e permite um controle maior dos equipamentos. A base da IoT (letra T da sigla *thing*) é a possibilidade de fazer qualquer objeto, seja orgânico ou material, comunicar-se com a internet e começar a transmitir dados. Para isso é muito importante que o custo do módulo seja baixo (para popularizar e pulverizar o conceito) e também com um baixo consumo de energia (equipamentos remotos alimentados por baterias). Atualmente, existem muitas tecnologias candidatas ao posto da rede sem fio da IoT, porém não existem trabalhos científicos que comparem as tecnologias através de técnicas de simulação e experimentais, logo esse trabalho vem com o intuito de preencher essa lacuna (GUNGOR et al., 2013; KUMAR; OVSTHUS; KRISTENSEN, 2014; WOLLSCHLAEGER; SAUTER; JASPERNEITE, 2017).

Esse trabalho aborda as principais tecnologias de redes sem fio, realizando uma análise comparativa, baseada em testes que utilizam as técnicas de simulação e experimental, para avaliar o desempenho das principais soluções selecionadas. A relevância científica do trabalho

está na escolha da(s) melhor(es) tecnologia(s) para a popularização da IoT de maneira técnica/economicamente viável num contexto de SH.

As redes de informações precisam operar de maneira confiável, visto que com o passar do tempo existem mais variedades de produtos conectados na internet. Um meio confiável, seguro e que atenda a velocidade necessária da comunicação garantirá um melhor desenvolvimento dessa ideia perante à sociedade.

1.5 MÉTODO DE PESQUISA

De acordo com Gil (2010) o objetivo do trabalho pode ser visto como o critério preponderante para o estabelecimento do método de pesquisa. Nesta classificação, a dissertação de mestrado que aqui se apresenta pode ser classificada como uma pesquisa explicativa.

O objeto de estudo é a comparação técnica/econômica das principais redes sem fio, sendo que as variáveis do trabalho serão as soluções mais comuns ao mercado e aplicações. O ambiente do experimento será controlado e constante para todas as aplicações, visando reduzir ao máximo qualquer interferência externa e não prevista.

Com os itens citados, caracterizar-se-á os dois itens necessários de uma pesquisa explicativa (GIL, 2010):

- a) manipulação;
- b) controle; e
- c) análise dos resultados obtidos.

Maiores detalhes sobre os procedimentos metodológicos são apresentados no capítulo 3.

1.6 LIMITAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho tem seu foco nas tecnologias de rede sem fio abrangidas pelo IEEE e redes Sub-GHz, aplicados numa SH. As tecnologias são analisadas para aplicações relacionadas ao acionamento de cargas e transporte de informações, referentes à residência. De início, optou-se por limitar dentro das redes IEEE pela existência de protocolos e menor custo para implementação, pois análises técnicas e econômicas serão realizadas. O trabalho não aborda aplicações de entretenimento, segurança e saúde, por entender-se que a tecnologia Wi-Fi e Bluetooth já está sendo amplamente utilizada como solução destas áreas.

As principais métricas analisadas são: cobertura, desempenho, custo e consumo de energia elétrica.

1.7 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente capítulo contextualizou e abordou de forma histórica a introdução do trabalho, elucidando os temas mais importantes referentes a *smart homes*, *smart grid* e IoT. Demonstrando o problema da aplicação dessas tecnologias, a contribuição do trabalho e os objetivos traçados para a execução deste.

O capítulo 2 descreve os principais temas abordados nesse trabalho, com o intuito de incorporar uma fundamentação teórica para todos os leitores.

No capítulo 3 é detalhada a natureza da pesquisa, classificando-a dentro da metodologia adequada, possibilitando dar o melhor encaminhamento para o desenvolvimento do trabalho. Ainda, neste capítulo apresenta-se a revisão sistemática da literatura sobre os temas abordados.

O quarto capítulo apresenta os experimentos realizados, a análise econômica sobre os módulos utilizados e a discussão sobre os resultados obtidos.

No capítulo 5 está a conclusão, utilizando os resultados obtidos nos experimentos como fundamentação das respostas sobre os objetivos traçados. Por fim, as considerações finais e a proposta para trabalhos futuros são descritas.

2 REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES E IOT

O mundo está mudando rapidamente, numa velocidade que os humanos nunca haviam imaginado antes. De acordo com Yoost e Peterson (2015) existem três megatendências que devem ser monitoradas:

- a) mudanças demográficas;
- b) sobe e desce da economia mundial; e
- c) proliferação das informações.

Este trabalho está diretamente relacionado com a terceira tendência. Entende-se que todas as áreas serão impactadas pela tecnologia da informação, permitindo uma melhor compreensão do funcionamento, monitoramento das variáveis e controle do processo como um todo. Uma das áreas com grandes ganhos é a de energia, com a integração a uma tecnologia de informação, criando assim a rede elétrica inteligente.

Neste capítulo consta toda a abordagem teórica sobre o conteúdo do trabalho, realizando uma explicação sobre os principais conceitos: rede elétrica inteligente, principais redes sem fio e Internet das coisas.

2.1 REDE ELÉTRICA INTELIGENTE

O modelo tradicional da rede elétrica possui apenas um fluxo unidirecional de energia, a inteligência está concentrada em centrais com controle realizado nas subestações, enquanto as terminações são totalmente passivas.

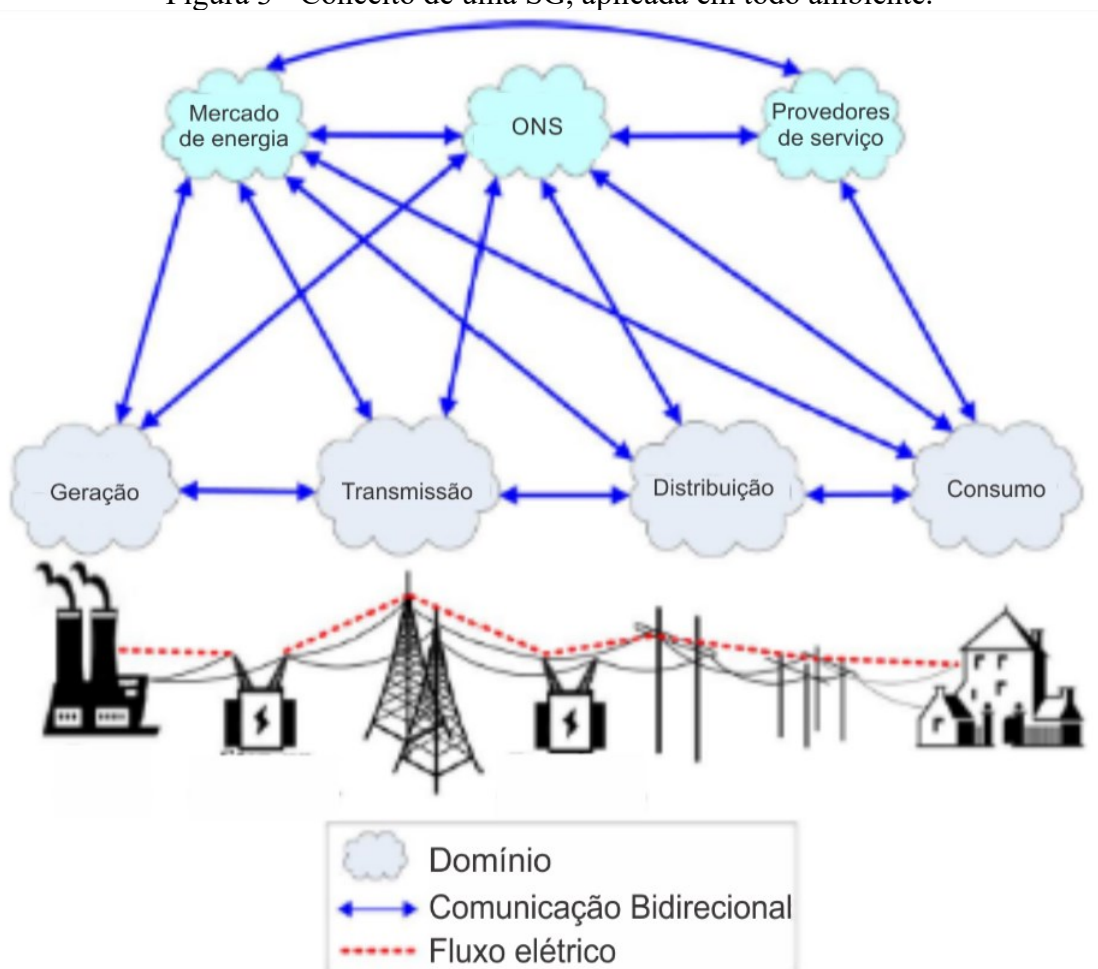
Como cita Rivera, Esposito e Teixeira (2013):

O conceito de smart grid (SG) – ou redes elétricas inteligentes (REI) – traz uma mudança de paradigma para o setor de energia elétrica. As REIs objetivam otimizar produção, distribuição e consumo de energia, viabilizando a entrada de novos fornecedores e consumidores na rede, com melhorias significativas em monitoramento, gestão, automação e qualidade da energia ofertada, por meio de uma rede elétrica caracterizada pelo uso intensivo das tecnologias de informação e comunicação (TIC).

A Figura 3 demonstra o conceito central da solução, com a integração de todos os ambientes.

A SG apresenta-se como uma solução e melhoria para o modelo tradicional, em resposta as novas tecnologias e necessidades que a afetarão diretamente, como a geração distribuída, carros elétricos e a transparência das informações.

Figura 3 - Conceito de uma SG, aplicada em todo ambiente.



Fonte: (CECILIA; SUDARSANAN, 2016, adaptado).

Existem alguns elementos que compõem uma rede elétrica inteligente, que devem comunicar entre si. As subseções a seguir apresentam uma breve explicação sobre cada componente.

2.1.1 Geração Inteligente

A inserção de um sistema inteligente na geração de energia elétrica é de suma importância, pois está ocorrendo um aumento significativo de geração distribuída. A facilitação nas leis das políticas públicas e a redução nos custos das tecnologias demonstram um cenário positivo para esse crescimento (IEA, 2017).

A *smart generation* apresenta uma solução para integração entre as usinas, pois toda a geração precisa ser controlada e gerenciada, visto que no SIN o consumo e geração de energia precisam estar em harmonia. A geração distribuída é uma grande vantagem, principalmente do

ponto de vista ambiental, sustentável e eficiente, porém é inegável, que a ideia de cada pessoa poder gerar sua própria energia, demonstra risco e descontrole (CGEE, 2012).

2.1.2 Transmissão Inteligente

Uma transmissão inteligente (tradução livre para *smart transmission*) utiliza a automação de seus componentes para oferecer serviços inteligentes. Para isso realiza-se a coordenação dos dispositivos de proteção em conjunto com a automatização das subestações (CGEE, 2012).

De acordo com a CGEE (2012) as principais vantagens e aplicações de uma transmissão inteligente são:

- a) aceitar novas usinas de geração na rede elétrica automaticamente;
- b) controle e monitoramento em tempo real, autodiagnóstico das ocorrências; e
- c) gerenciamento da geração de acordo com as fontes intermitentes.

Existe um longo caminho para alcançar essas vantagens e a principal barreira é a tecnologia atual aplicada nas linhas de transmissão e a necessidade de altos investimentos.

2.1.3 Casa Inteligente

Uma SG tem como um dos elementos chave a interação entre o operador do SIN (ONS), empresas atuantes no sistema e os consumidores, o ponto final da rede onde isso ocorre é na casa inteligente (SAAD AL-SUMAITI; AHMED; SALAMA, 2014).

Tornar os consumidores inteligentes garante um enorme ganho para a distribuição de energia elétrica, principalmente no campo de controle de demanda. A distribuição inteligente é composta pelos ganhos já apresentados na transmissão inteligente, somados das vantagens de uma SH.

A SH ganhou força com a IoT, sua solução é baseada em implementar esse contexto em todas as cargas. Na Figura 4 apresenta-se a ideia da comunicação dos equipamentos com uma central para uma posterior conexão com uma rede WAN (*Wide Area Network*) (para visualização pela ONS, ou distribuidora de energia).

Além do controle e monitoramento das cargas e demanda, a SH aplicada na residência permitiria um melhor aproveitamento da geração distribuída (CARVALHO, 2015).

Figura 4 - SH e suas aplicações.



Fonte: do autor.

No Brasil essa tendência começou em 2012, com a publicação da REN 482, que estabelece um sistema de compensação de energia. Isso permite aos consumidores instalarem centrais geradoras de pequeno porte em suas instalações e abater o valor de consumo de energia na fatura (ANEEL, 2012a). A Figura 5 ilustra o conceito de geração distribuída, que mostra os consumidores (residências, escolas, entre outros) com painéis fotovoltaicos e mini aerogeradores instalados em suas construções.

Da perspectiva do planejamento energético, o aumento da geração distribuída implica em incertezas no controle e incremento de variáveis para serem analisadas. Além dos modelos de geração renovável mais usuais (fotovoltaico e eólico), existe uma outra possível fonte de geração/consumo que apresenta potencial de aumento: os carros elétricos.

Figura 5 - Conceito de geração distribuída.



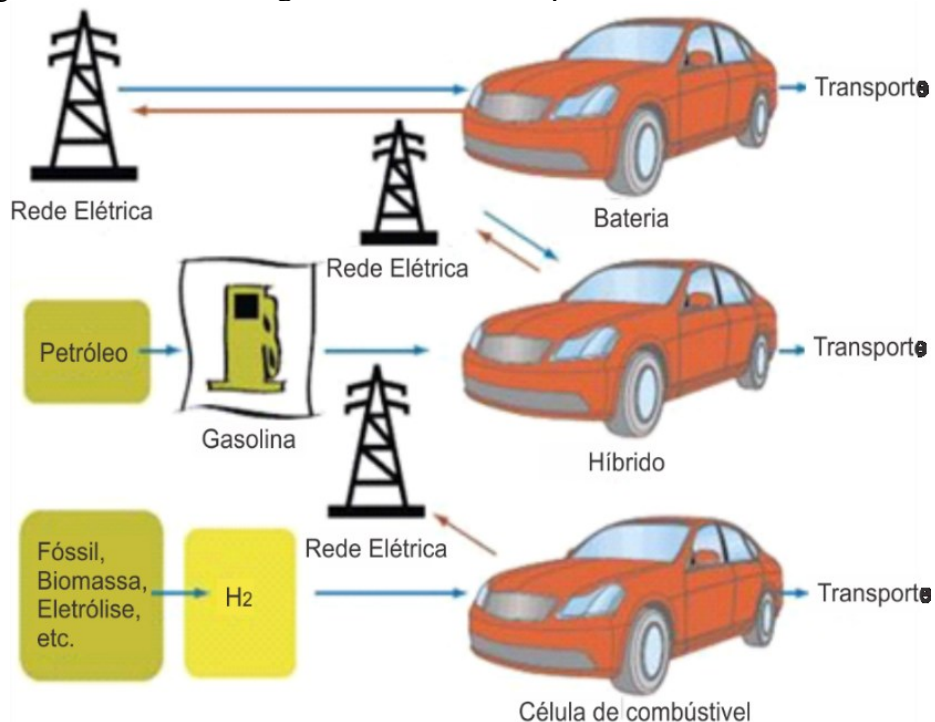
Fonte: (PEREIRA, 2011).

2.1.4 Carros elétricos

De acordo com IEA (2017), o VE representará 55% das novas vendas de veículos e também mais de um terço da frota automotiva do mundo até 2050. Somente estas informações já chamam a atenção dos setores energéticos mundiais, porém existe uma solução que possivelmente será implementada com os VE, denominada *Vehicle-to-grid* (V2G). O V2G inverte a perspectiva sobre os veículos elétricos, usualmente esses automóveis utilizariam a rede elétrica para carregar a carga de seus armazenadores.

O Sistema Elétrico de Potência tradicional sofre com flutuações das demandas durante o dia, fazendo com que os operadores trabalhem nesse período controlando a geração de energia e todo esse processo gera perdas elétricas. O V2G proporciona uma solução para essas variações, utilizando os armazenadores dos VE (TSANG et al., 2017; ZHOU; LI, 2015). A Figura 6 demonstra como o V2G seria aplicado nos três modelos de automóveis, inclusive aproveitando outras fontes de energia.

Figura 6 - Fluxo de energia do conceito V2G para os três modelos de veículos.



Fonte: (ZHOU; LI, 2015, adaptado).

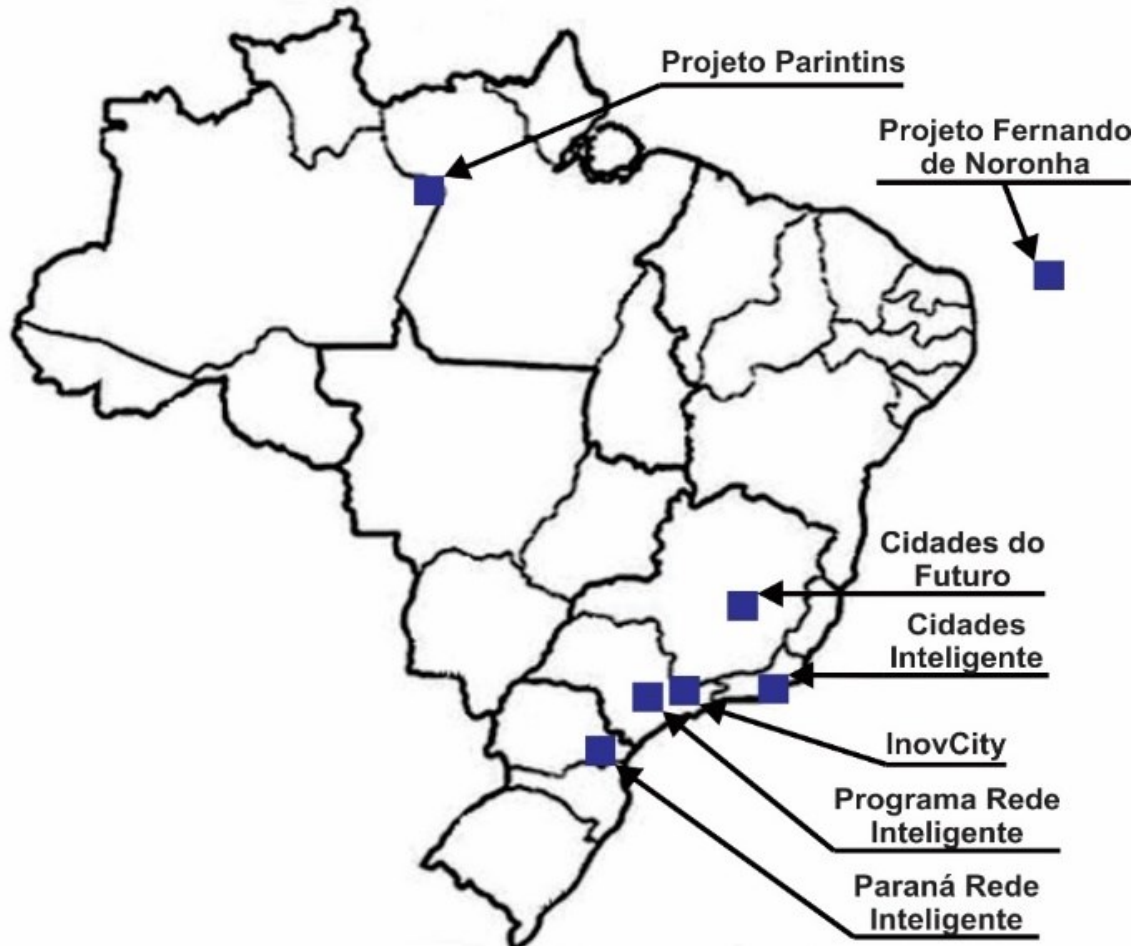
Os veículos elétricos apresentam números inexpressivos no Brasil, quando comparado ao resto do mundo. Logo, os estudos envolvendo SG ainda não preveem o V2G. Já existem modelos de *smart grids* sendo aplicados que serão apresentados a seguir.

2.1.5 SG no Brasil

A tecnologia atual do sistema de potência do Brasil é mais avançada, com maior nível de automação, na geração e transmissão. Enquanto na distribuição, os equipamentos são mais obsoletos e existem consideráveis problemas de eficiência e qualidade (GALO et al., 2014).

O Brasil possui projetos pilotos e aplicados em 7 cidades do país. Os principais ganhos visados com a *smart grid* no Brasil são a redução dos custos operacionais, técnicos e não técnicos; aumento da confiabilidade e eficiência do sistema em todas as esferas; e desenvolvimento sustentável (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013). A Figura 7 apresenta as cidades com projetos e seus respectivos nomes.

Figura 7 - Localização dos projetos de *smart grid* no Brasil.



Fonte: do autor.

O órgão regulamentador na área da eletricidade é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável por homologações e criação das normas regulamentadoras. A partir de 2009 diversas diretrizes foram criadas voltadas para essas novas tecnologias na área de geração distribuída e SG, destacamos as seguintes Resoluções Normativas (REN):

- a) REN 375/2009: utilização das instalações de distribuição de energia elétrica como meio de transporte para a comunicação digital ou analógica de sinais (ANEEL, 2009a);
- b) REN 395/2009: aprova os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, e dá outras providências (ANEEL, 2009b);
- c) REN 479/2012: altera a Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010, que estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada (ANEEL, 2012b); e
- d) REN 482/2012: condições gerais para o acesso de micro e mini geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências (ANEEL, 2012a).
- e) REN 502/2012: regulamenta sistemas de medição de energia elétrica de unidades consumidoras do Grupo B (ANEEL, 2012c).

Para efeito comparativo e situacional, o Quadro 1 apresenta todos os projetos de *smart grid* no Brasil e suas aplicações. Os projetos estão enumerados como:

- a) Cidade Inteligente (Búzios/RJ);
- b) Rede Inteligente (Barueri/SP);
- c) Rede Inteligente (Vargem Grande Paulista/SP);
- d) InovCity (Aparecida/SP);
- e) Cidades do Futuro (Sete Lagoas/MG);
- f) Projeto Parintins (Parintins/AM);
- g) Projeto Fernando de Noronha (Fernando de Noronha/PE); e
- h) Paraná Rede Inteligente (Curitiba/PR).

Esses projetos pilotos em andamento no Brasil e as resoluções normativas da ANEEL comprovam a forte tendência da aplicação de novas tecnologias nas áreas de SG e geração distribuída. Especificamente, no ambiente de uma SH, visto que o maior ganho para o sistema é próximo as unidades consumidoras.

Reforça-se o foco nas SH devido ao número de implementos voltados para essa área relatados no Quadro 1, como: Tele medição inteligente, Geração distribuída, Prédios inteligentes, Conscientização do consumidor, Tratamento de conexões ilegais, Pré-pagamento, Interação com clientes e Programas de eficiência energética.

Quadro 1 - Comparativos entre os projetos pilotos de SG no Brasil.

Características do Programa	1	2	3	4	5	6	7	8
Número de consumidores (mil)	10	52	32	15	95	14,5	0,89	10
Custo (milhões R\$)	12,6	23,7		3,1	14,2	7,2	5,3	15,7
Tele medição inteligente	X	X	X	X	X	X	X	X
Detecção de falta	X	X	X	X	X	X	X	X
Auto-manutenção	X	X	X		X	X		X
Geração distribuída	X	X		X	X	X	X	X
Armazenamento de energia	X						X	
Mobilidade elétrica	X	X		X			X	X
Iluminação pública inteligente	X			X			X	
Prédios inteligentes	X	X			X			
<i>Broadband internet</i>	X							
Conscientização do consumidor	X			X				
Tratamento de conexões ilegais		X						
Tarifas especiais	X	X		X	X	X	X	X
Pré-pagamento		X						
Interação com clientes		X			X	X		
Programas de eficiência energética				X				
Melhorias na geração						X		

Fonte: (GREGIO et al., 2015, adaptado).

2.2 IOT

A internet das coisas está crescendo rapidamente e tornou-se um tópico emergente nas áreas técnica, social e econômica. A combinação da conectividade dos objetos e uma poderosa análise de dados são capazes de transformar a forma como se vive.

Esse termo apareceu em meados de 1999, de acordo com Ashton (2009), e na época a ideia estava diretamente associada a tecnologia RFID (*Radio Frequency Identification*). O conceito como é conhecido atualmente foi moldado e emergiu com o avanço dos sistemas embarcados, microeletrônica, comunicação e sensoriamento. Desde a época que o termo surgiu, tomou muito a atenção da indústria e a academia.

O precursor da IoT como conhecemos foram as WSN (*Wireless Sensor Networks*), que se refere a uma rede de sensoriamento e armazenamento de informações de dados físicos coletados. O termo começou a ser substituído em torno de 2011, quando o conceito baseado em IoT começou a ser mais usual (SANTOS et al., 2017).

Diversos documentos sempre vangloriam a IoT e todo ganho proporcionado esperado em diversas áreas, na contramão, sua aplicação apresenta vários desafios técnicos para seu funcionamento em plenitude. Um deles é a normatização de diferentes tecnologias que terão que trabalhar juntas, em interoperação. A operabilidade de qualquer dispositivo IoT deve ocorrer com outro dispositivo, independente de fabricante ou tecnologia. Na prática, essa compatibilidade é muita complexa de ser implementada (SANTOS et al., 2017).

A IoT funciona baseada em alguns componentes básicos na maioria das aplicações, que são brevemente relatados a seguir.

2.2.1 Construção de uma IoT

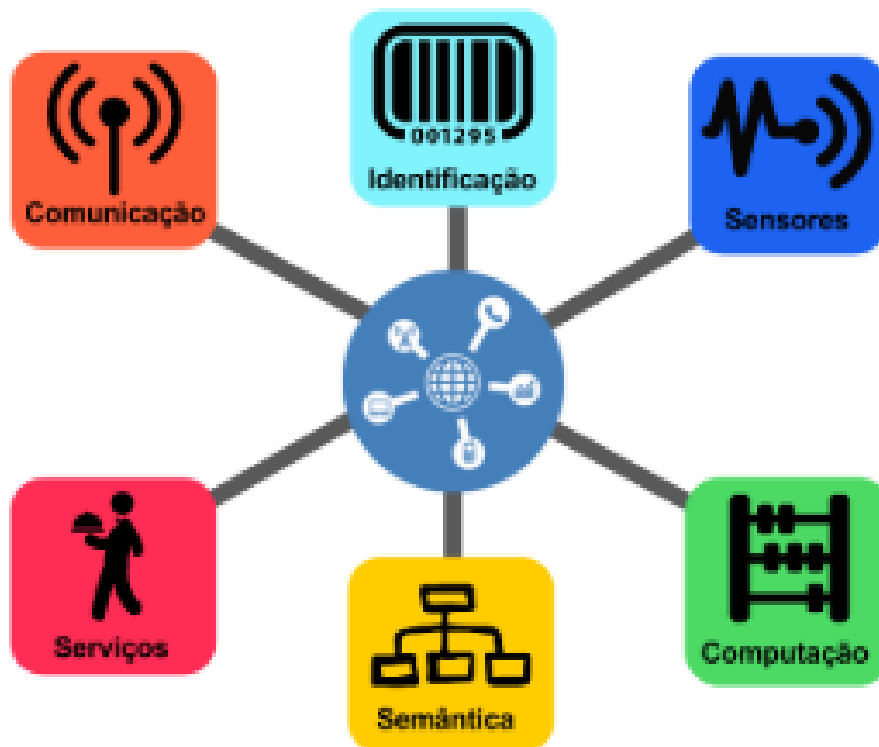
A implementação da IoT depende do funcionamento de diversas tecnologias coexistindo para criar uma projeção virtual do objeto físico no mundo virtual. São necessárias seis etapas, que serão descritas a seguir e ilustradas na Figura 8, para o completo emprego da IoT.

Por mais simplificada que seja a aplicação no objeto, toda unidade necessita de uma computação representada por um processamento de um algoritmo. Esse componente é representado por FPGAs (*Field Programmable Gate Array*), microcontroladores e processadores (SANTOS et al., 2017).

Um dos pontos primordiais é a comunicação do nodo com uma rede local, ou direto com a Internet, para essa solução existem diversas técnicas consolidadas. Nesse ponto diversas tecnologias se destacam, como Wi-Fi, Bluetooth e IEEE 802.15.4.

Para o nodo conectar-se à Internet é importante que tenha uma identificação. As tecnologias que despontam nessa área são o NFC (*Near Field Communication*), RFID e endereçamento IP (SANTOS et al., 2017).

Figura 8 - Componentes de uma IoT.



Fonte: (SANTOS et al., 2017).

A extração de conhecimento dos objetos que compõem a IoT é uma habilidade nomeada semântica. A proposta é uma descoberta e uso eficiente dos recursos, reconhecimento dos dados e prover determinado serviço a partir dele. Neste campo os principais destaques são: EXI (*Efficient XML Interchange*), OWL (*Ontology Web Language*) e RDF (*Resource Description Framework*) (SANTOS et al., 2017).

A medição e coleta de informações do ambiente, ou de algum processo em específico, realizado pelo objeto é realizada por sensores, outra parte que compõem o nodo. Além de medições, o objeto pode realizar atuações e manipulações no ambiente por atuadores.

E o último componente da IoT são os serviços, responsáveis por converter variáveis físicas em variáveis virtuais, para serem lidas por todo o sistema. Esses serviços podem converter variáveis físicas como temperatura, coordenadas geográficas, pressão, dentre outros. Há a possibilidade também de prover valores de tempo, em escalas determinadas por RTC (*Real Time Clocks*), ou osciladores internos e externos conectados aos processadores (SANTOS et al., 2017).

A comunicação é fundamentada normalmente em dois modelos conhecidos como OSI (*Open Systems Interconnection*) definido pela ISO/IEC 7498-1 e o TCP/IP que é tido como mais prático e um resumo do outro modelo (SANTOS et al., 2017).

A especificação ISO/IEC 7498-1 apenas delimita via padrão a interação entre as camadas, deixam os detalhes mais internos da implementação da camada em si para os fabricantes. Isso permite que uma camada de um produto de um fabricante interopere com outro fabricante.

Para melhor organização os modelos dividem a tarefa em camadas, posicionadas hierarquicamente uma sobre a outra. O Quadro 2 demonstra um breve resumo da função das camadas definidas pelo modelo OSI.

Quadro 2 – Camadas do modelo OSI.

Camada	Nome	Descrição
7	Aplicação	Essa é a camada mais exposta aos usuários da rede, sendo a interface homem-máquina. Dentre os protocolos mais usuais estão HTTP, FTP e SMTP.
6	Apresentação	Lida com a representação das informações, sendo composto por codificação MIME, compressão de dados, verificação de formatos, ordenação de bytes, entre outros.
5	Sessão	Responsável por gerenciar as sessões lógicas entre aplicações. Como exemplos temos NetBIOS e RPC.
4	Transporte	Define um método para acesso a um modelo de serviço para o nó da rede. Temos o TCP como exemplo de protocolo que garante que todos os dados cheguem ao destino, rearranje e entregue para a próxima camada.
3	Rede	Nessa camada ocorre o roteamento, onde os pacotes deixam a conexão local e são transmitidos para outra rede. O protocolo mais conhecido é o IP (<i>Internet Protocol</i>).
2	Conexão de Dados	Essa camada é mais conhecida como MAC (<i>Media Access Control</i>), responsável por organizar a comunicação de um ou mais nós que compartilham o mesmo meio físico. Os protocolos mais conhecidos são: Ethernet, <i>Token Ring</i> , ATM e o 802.11.
1	Física	A camada mais baixa denominada Física refere-se ao próprio meio no qual a comunicação ocorre, podendo ser um cabo de cobre, um feixe numa fibra ótica, ondas de rádio, luz visível, entre outros.

Fonte: do autor.

Nem todos os produtos precisam ter as sete camadas descritas aplicadas em sua operação, o *switch*, por exemplo, trabalha com até a terceira camada implementada. Isso reduz custos, pois necessita de um menor processamento e energia para a realização da função.

No modelo TCP/IP o número de camadas é reduzido a cinco, sendo que é reunido as camadas 5 a 7 na de aplicação, de maneira a simplificar o entendimento e diagnóstico das redes. O restante é idêntico ao modelo OSI. Esse modelo foi criado por entendimento que as análises de redes TCP/IP raramente apresentam problemas nas camadas Sessão ou Apresentação.

O presente trabalho aborda as camadas física e de conexão de dados, também chamada de enlace. Essas duas camadas acompanham o produto que o fabricante comercializa, o MAC (*Medium Access Control*) fica interno a *stack* dos controladores ou processadores e a PHY está relacionada diretamente com a tecnologia.

2.2.2 IoT baseado em redes com fio

A IoT é definida pela presença dos seis componentes anteriormente citados, porém não temos como imaginar a existência dela sem a TIC. Pois, os outros itens citados sempre existiram em aplicações offline, com o implemento das redes de comunicação e sua constante melhoria que a evolução para a internet das coisas aconteceu.

As redes com fio possuem vantagens como: facilidade de conexão, alta taxa de transmissão, protocolos de comunicação bem definidos, baixa presença de interferência e baixo custo. Porém, existem desvantagens, tais como: necessidade de uma infraestrutura e limita a mobilidade do nodo.

2.2.2.1 Principais tecnologias

Existem diversas tecnologias para comunicação de redes com fio, duas principais se destacam para aplicações IoT: Ethernet e PLC (*Power Line Communication*) (GUNGOR et al., 2012; TANENBAUM; WETHERALL, 2011).

O Ethernet foi normatizado pelo órgão IEEE em 1983, nomeado como padrão IEEE 802.3. Este modelo está presente em grande parte das redes locais e foi melhorando com o passar dos anos. Nos dias atuais, existem dois modelos de cabos: par trançado de cobre e fibra óptica (TANENBAUM; WETHERALL, 2011).

O padrão mais comum utilizado é o 100baseT, que define uma taxa de transmissão de dados de 100 Mbps no par trançado de cobre com conectores RJ-45. A topologia de rede é

estrela com *switches* como gerenciadores da rede no ponto central desta. Opera com distâncias de até 100 m devido a resistividade elétrica do material.

Na fibra óptica as perdas são menores, suas taxas chegam em torno de 10 Gbps e a distância de cobertura da tecnologia chega a 2000 m. Em ambos materiais condutores a distância pode ser aumentada com o uso de repetidores, que aumentam a potência do sinal a partir de certo ponto (TANENBAUM; WETHERALL, 2011).

O padrão PLC é mais recente e é fundamentado sobre o aproveitamento do cabo de alimentação como via de comunicação. O conceito iniciou sobre o uso da rede elétrica, em corrente contínua inicialmente, como transmissor/receptor de informação a partir da modulação da tensão em valores menores que o nominal (exemplo variação de 1 V para transmissão dos bits numa rede de 48 V).

Posteriormente, com a melhoria da eletrônica e a redução dos custos, criaram-se filtros para a expansão do modelo para redes CA (corrente alternada). Essa tecnologia está presente em poucas redes de comunicação, porém já vem sendo usada principalmente nos Medidores Inteligentes em alguns países. Sua velocidade é baixa quando comparada com a Ethernet atingindo 3 Mbps, mas atende a maioria das aplicações previstas em IoT e SH e funciona dentro de distâncias de até 3 km. A principal vantagem é que essa tecnologia aproveita uma estrutura que na maioria dos casos se encontra pronta (ANEEL, 2009a; GUNGOR et al., 2011, 2012; HADLACH et al., 2017).

Essa tecnologia é afetada pelos problemas ocorridos na rede elétrica, logo uma das desvantagens do PLC é compartilhar a infraestrutura e os distúrbios que o afetam. Isso limita sua velocidade e principalmente resulta em intervalos de não funcionamento. Outro problema recorrente é devido a indução magnética de tensão, advindas de cabos próximos com alta intensidade de corrente (GUNGOR et al., 2011; HADLACH et al., 2017).

2.2.3 IoT baseado em redes sem fio

As redes sem fio comunicam-se com o uso das ondas eletromagnéticas para envio a longas distâncias e permitem mobilidade ao nodo conectado.

Se a IoT nasceu com a melhoria da tecnologia da informação, podemos dizer que essa popularizou-se devido as redes sem fio. Com esse modelo de rede e a melhoria da bateria, os objetos associados as redes ganharam mobilidade e facilidade na execução da estrutura.

Existe uma variedade de tecnologias de redes sem fio, algumas mais consolidadas que iniciaram suas aplicações para outras finalidades e outras em ascensão.

O conceito de SG é muito amplo, pois envolve diferentes esferas com diferentes variáveis e barreiras diversas. A ideia central da Rede Elétrica Inteligente é o controle da energia na distribuição, transmissão, geração e consumo. Assim, entende-se que existe a possibilidade da coexistência de diferentes tecnologias. Vamos citar no texto a seguir as principais tecnologias de acordo com a literatura.

A tecnologia Wi-Fi é a mais popular dentre as que despontam na IoT, esta encontra-se presente em vários ambientes e no cotidiano. O padrão é definido pela IEEE 802.11, as taxas previstas de velocidades de 600 Mbps ou 1300 Mbps, de acordo com a frequência selecionada. Sua popularização se deu devido a facilidade da formação de rede, utilização de um protocolo semelhante ao já usual IEEE 802.3 e mobilidade, enfatizando a velocidade de entrada e saída do dispositivo ao trocar de rede (GUNGOR et al., 2012; TANENBAUM; WETHERALL, 2011).

A próxima que desponta, principalmente para baixas taxas e longos alcances, é a Sub-GHz, que está sendo citada e normatizada como um adendo ao IEEE 802.11ac. A tecnologia de rede sem fio implementa um produto que opera nas três bandas. Como exemplo temos um roteador com as frequências comuns do Wi-Fi (2,4 GHz e 5 GHz) e ainda disponibiliza uma terceira banda operante no espectro do Sub-GHz (< 1 GHz). As frequências têm prioridades de operação, sendo o 2,4 GHz encarregado das médias taxas de transmissão e médio alcance, o 5 GHz responsável pelas altas taxas de transmissão e menor alcance, enquanto o Sub-GHz garante um raio maior de alcance e baixas taxas de transmissão. O intuito é focar o Sub-GHz para aplicações voltadas a IoT de gerenciamento de energia (XU; HE; LI, 2014; ZANELLA et al., 2014).

O ZigBee é um padrão baseado no protocolo IEEE 802.15.4, essa tecnologia opera na frequência de 2.4 GHz com possibilidade de atuar na faixa Sub-GHz. Suas aplicações envolvem baixa velocidade e consumo energético reduzido. A taxa máxima é de 250 kbps, possui modo *sleep* e o alcance varia de acordo com a série chegando a 1 km em campo aberto.

O BLE (*Bluetooth Low Energy*) é um padrão que evolui do Bluetooth, suas aplicações são voltadas para dispositivos que necessitam de longa vida útil. Essa tecnologia é dominante nos PANs, conectando *smartphones* em seus periféricos principalmente. O BLE foi criado voltada para ser uma rede de comunicação que operasse em inúmeras topologias, porém o mesmo mostrou-se eficaz em conexões *peer-to-peer*.

As redes 3G/4G/5G são indicadas para transmissões de longa distância e que possuem alimentação permanente, devido ao alto consumo energético da tecnologia. Logo, locais

afastados e com pouca mobilidade podem ser atendidas por este tipo de rede (SANTOS et al., 2017).

Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) permite a criação de redes mesmo em longas distâncias, a níveis globais. A LoRaWAN traz especificações como segurança, bidirecionalidade, mobilidade e tratamento de serviços de localização, oferecendo suporte ao IPv6, 6LoWPAN e suporte a topologia estrela. Sua arquitetura baseia-se no conceito de enumerar todos os dispositivos com um IP, conectando várias ilhas de redes independentes através de coordenadores que interligam as diversas redes. Sua taxa de comunicação é baixa, entre 300 bps a 50 kbps, limitando as aplicações. A faixa de frequência é Sub-GHz e tem alcance de 45 km em campo aberto (TANENBAUM; WETHERALL, 2011).

O SigFox é a única tecnologia citada a utilizar o *Ultra Narrow Band*, sendo esse protocolo atuante como API, fornecendo serviços de tratamento da comunicação de dados para aplicações voltadas a IoT. Ele opera reduzindo drasticamente a taxa de transmissão para valores entre 10 bps e 1000 bps, diminuindo o consumo e conseguindo alcance de até 50 km em campo aberto (SANTOS et al., 2017; TANENBAUM; WETHERALL, 2011).

Dentre as tecnologias, foram escolhidas três: Wi-Fi, ZigBee e Sub-GHz para a realização dos testes através de técnicas experimentais e de simulação. Portanto, maiores detalhes dessas tecnologias são descritos a seguir.

2.2.3.1 *Wi-Fi*

A popularização da família padrão IEEE 802.11 está elencada por importantes características dessa tecnologia, como o baixo custo, interoperabilidade de diferentes fabricantes devido a protocolos, aplicabilidade em diferentes ambientes e faixa de operação dentro da banda ISM (*Industrial, Scientific, Medical*) (MAHMOOD; JAVAID; RAZZAQ, 2015).

Existem novas tecnologias baseadas no Wi-Fi, que aprimoram sua aplicação voltando-a para IoT e SH, mas entende-se que existe um caminho a ser percorrido para alcançar a popularidade dos preços dos equipamentos que utilizam o 802.11 (MAHMOOD; JAVAID; RAZZAQ, 2015).

Desde a criação do 802.11, houve diversas versões que diferenciam modulação, banda de atuação, licenciamento de acordo com a região, alcance, largura de banda e velocidade de transmissão. Isso cria uma diversificada gama de modelos, explanaremos sobre as mais atuais e usuais.

Existem numerosos protocolos da família 802.11, sendo que nem todos relacionam-se com protocolo de rádio. Os seis padrões atualmente implementados e em ascensão são o “b”, “a”, “g”, “n”, “ac”, “ad” e “ah”. O primeiro a ser homologado é o que nomeia a família de protocolos, o 802.11 utilizando CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with collision avoidance*). As taxas de transferência inicialmente eram em torno de 2 Mbps, essa norma foi criada para a padronização das camadas de enlace (MAC) e física (PHY) (EMMANUEL; RAYUDU, 2016).

O 802.11b foi aprovado pelo IEEE em setembro de 1999. Sua modulação é baseada em DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) e opera na banda ISM entre 2,4 GHz e 2,495 GHz. Sua capacidade máxima de transmissão é de 11 Mbps, com velocidades reais de 5 Mbps (EMMANUEL; RAYUDU, 2016).

A versão 802.11a foi ratificada pelo IEEE em conjunto com o padrão b, essa versão é menos usual. Ela utiliza modulação *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) e trabalha na banda ISM de 5,745 GHz à 5,805 GHz, ainda pegando uma porção da banda UNII (*Unlicensed Band*) de 5,15 à 5,32 GHz. Como esse padrão opera numa faixa diferente do espectro da versão b, essas são incompatíveis. O que torna o 802.11a menos usual no mundo é o fato da sua faixa de operação possuir limitação por legislação vigente, impedindo equipamentos de atuarem em aplicações externas (EMMANUEL; RAYUDU, 2016).

O 802.11g chegou mais tarde ao mercado, pois foi padronizado apenas em junho de 2003. Sua vantagem está no esquema de modulação baseado OFDM, operando na banda igual ao padrão b. Isso aumenta a capacidade de transmissão da tecnologia para 54 Mbps em padrões laboratoriais e atinge velocidades reais de 22 Mbps. Ainda existe a opção de total compatibilidade funcionando em 11 Mbps DSSS, ou menos se necessário. Ocorre também a opção da junção de tecnologias para atingir um maior número de aplicações, como os padrões ac, n e ah (SETHI; SARANGI, 2017).

O padrão 802.11ac é uma evolução em relação ao modelo a, oferecendo uma maior velocidade de transmissão podendo chegar a 1300 Mbps operando no mesmo espectro. A vantagem está na comunicação simultânea entre diversos nodos (SETHI; SARANGI, 2017).

A versão 802.11n opera com altas taxas de transmissão em torno de 450 Mbps, sua velocidade é relativamente menor que o padrão ac porque comunica-se apenas com um dispositivo por vez. Sua vantagem é ter padronização nas duas faixas do espectro de 2,4 GHz e 5 GHz (SETHI; SARANGI, 2017).

O padrão 802.11ah é tido como um dos mais promissores para aplicações envolvendo IoT e SH, pois opera em três bandas diferentes: 2,4 GHz, 5 GHz e Sub-GHz. Basicamente, ele

trabalha da mesma maneira aos anteriores apresentados, com a inclusão das frequências entre 700 MHz, 800 MHz e 900 MHz. De acordo com as leis vigentes do país uma dessas três faixas é selecionada, no Brasil a banda é de 902 MHz à 928 MHz. Essa frequência reduzida influencia em duas situações: maior área de cobertura e menores taxas de transmissão (SETHI; SARANGI, 2017).

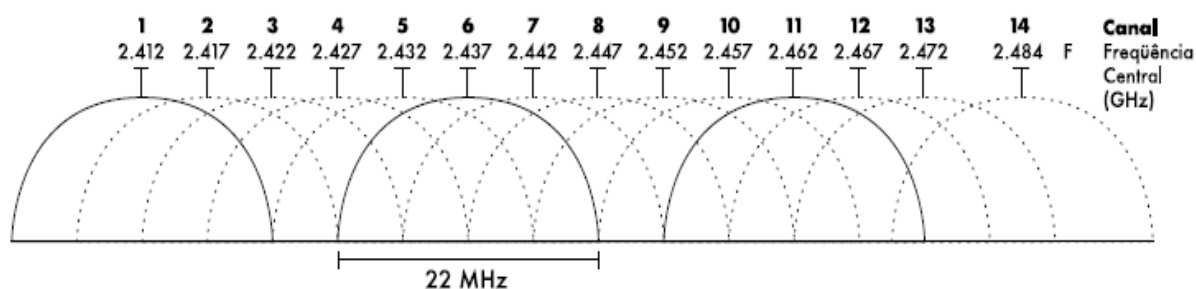
Essa relação frequência e distância de alcance existe devido ao comportamento intrínseco das ondas de rádio, pois o comprimento de onda é inversamente proporcional a sua frequência. Um maior comprimento de onda, ocasiona um aumento da facilidade dessa onda atravessar e contornar os obstáculos. Por isso, é importante encontrar um equilíbrio de acordo com a aplicação (FLICKENGER, 2008).

Logo, a implementação da rede Sub-GHz em conjunto com o Wi-Fi no padrão 802.11ah garante um maior número de aplicações dentro dos quatro pilares, já citados, da SH. Isso porque o gerenciamento de energia e saúde normalmente trabalham com dados de sensores, esse tipo de informação não possui tamanhos significativos quando comparados com a área de segurança e entretenimento, que envolvem pacotes de *streaming* de vídeo, áudio, entre outros.

Como comentado, a tecnologia de rede sem fio opera em faixas do espectro eletromagnético, com intervalos dentro da banda. Como exemplo vamos verificar o espectro de 2,4 GHz, este funciona de 2,4 à 2,48 GHz, a largura de banda então é de 80 MHz. Para um funcionamento de mais dispositivos em paralelo, ocorre a divisão dessa largura de banda em canais individuais, isso evita colisão de informação e reduz a interferência (JORDÁN CÓRDOVA et al., 2011).

O intervalo de separação definido pelo padrão é de 5 MHz, com isso são criados 14 canais individuais. Esses canais ficam dispostos como na Figura 9.

Figura 9 - Disposição dos canais no espectro.



Fonte: (FLICKENGER, 2008).

Percebe-se que cada canal intersecciona com os seus pares, isso ocorre porque a largura do canal é de 22 MHz devido a limitação da tecnologia dos filtros. Logo,

preferencialmente os gerenciadores da rede optam por alocar os nodos nos canais 1, 6 e 11, para evitar conflito de informações. Porém, pode ocorrer a saturação dos canais com o aumento do número de nodos, limitando a solução (FLICKENGER, 2008).

O acesso ao meio físico também ganhou implementos com as diferentes versões, para melhorar o desempenho da rede adicionaram-se mais antenas aos produtos. Isso possibilita a comunicação em paralelo com diferentes nodos, enquanto uma está recebendo a informação, as outras podem estar enviando e vice-versa.

Com a tecnologia mais bem explanada, na sequência apresentam-se as diferentes topologias possíveis de aplicação. A rede sem fio IEEE 802.11 tem seus componentes operando em quatro configurações: mestre, cliente, *ad-hoc* e monitor (FLICKENGER, 2008).

O modo mestre, reconhecido popularmente como AP (*Access Point*), normalmente é desempenhada pelo roteador da sua rede. Ele cria o serviço nomeando a rede com um SSID (*Service Set Identifier*), gerencia comunicação, autentica clientes, trata a contenção dos canais, repete pacotes, entre outras funções. O mestre apenas pode comunicar-se com clientes associados a ele (FLICKENGER, 2008).

O cliente, ou gerenciado, une-se a uma rede identificada e gerenciada por um mestre. Para ocorrer essa associação é necessário que as credenciais apresentadas correspondam com o definido para a rede sem fio. Nesse modo a comunicação é realizada apenas com o mestre, impossibilitando a troca de informações diretas entre os clientes (FLICKENGER, 2008).

No *ad-hoc*, do latim “para isto”, é criado outro modelo de rede denominado multiponto-para-multiponto, dessa maneira todos os nodos são mestres e clientes. Isso aumenta o alcance da rede em troca de redução de desempenho, pois são aplicadas multitarefas para todos os pontos (FLICKENGER, 2008).

O modo monitor é usado mais como ferramenta passiva de medição do tráfego, porque ele mensura o mesmo sem interferir na rede diretamente (FLICKENGER, 2008).

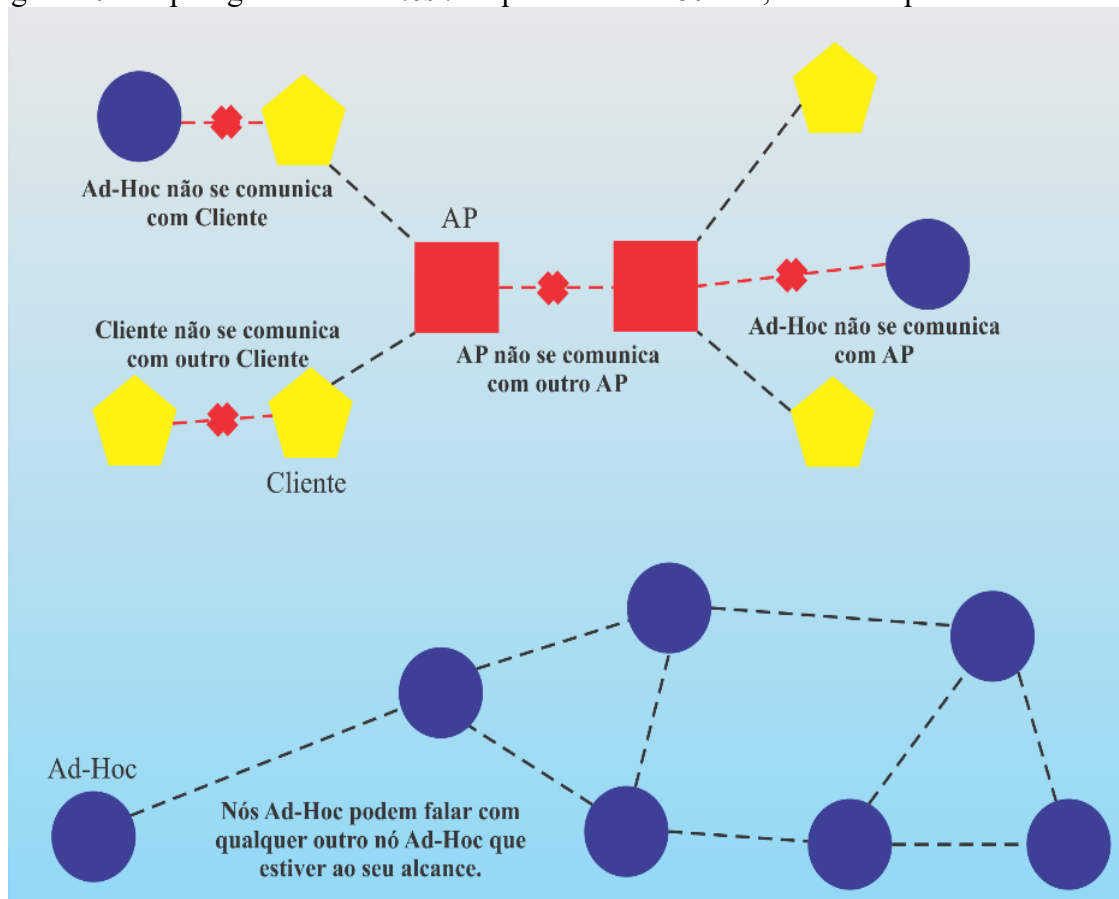
Com essas configurações citadas é possível trabalhar com as topologias estrela e *mesh*, o modelo das redes e suas conexões estão na Figura 10.

A configuração estrela é a mais usual nas redes domésticas, para haver comunicação é preciso que os nodos, configurados como cliente, estejam ao alcance do AP, ou mestre. Percebe-se que o modo mestre e cliente não interagem com o *ad-hoc*.

Logo, nodos configurados como *ad-hoc* formam uma rede única, denominada *mesh*. Nessa rede todos os nodos são clientes e mestre, permitindo um alcance maior da tecnologia, pois basta que um operador enxergue um, ou mais, para que possa comunicar-se com qualquer

ponto. Essa topologia cobre uma área maior, mas todos os nodos precisam operar o tempo todo, os pacotes são maiores e isso sacrifica a taxa de transmissão.

Figura 10 - Topologia estrela e *mesh* do padrão IEEE 802.11, com suas possíveis conexões.



Fonte: (FLICKENGER, 2008, adaptado).

Os módulos de comunicação Wi-Fi comercializados possuem os quatro modos de operação implementados, sendo que fica ao encargo do consumidor, ou técnico, optar pela topologia de rede.

A tecnologia ZigBee, a próxima a ser abordada, assemelha-se em algumas características com o Wi-Fi.

2.2.3.2 ZigBee

O ZigBee nasceu como um padrão criado por uma companhia com o intuito de prover uma comunicação sem fio para os dispositivos com baixo consumo de energia, distância reduzida e com as aplicações na camada MAC para operações em *mesh* (KUZLU; PIPATTANASOMPORN; RAHMAN, 2016).

Com o aumento do uso e advento da IoT, essa tecnologia desenvolveu interesse da comunidade, onde diferentes empresas do mercado se uniram para padronizar e evoluir a tecnologia, criando a ZigBee Alliance.

A padronização ocorreu nas camadas PHY e MAC por intermédio da IEEE, que definiu o 802.15.4 como nomenclatura da tecnologia. Suas principais características estão em baixo consumo de energia, baixas taxas de transmissão, segurança e facilidade no implemento (USMAN; SHAMI, 2013).

Essa tecnologia opera na faixa do ISM, na linha dos 2,4 GHz, com 16 canais separados por 5 MHz, de certo modo semelhante ao Wi-Fi. Sua vantagem está no menor consumo e maior facilidade na implementação de uma rede *mesh*, *cluster tree*, entre outras (MULLA et al., 2015).

Uma das desvantagens é o fato de operar na mesma faixa do Wi-Fi e algumas redes de celulares, o que causa congestionamento desse espectro. Seu custo de mercado é relativamente maior que soluções similares, devido ao tempo de vida e popularidade da tecnologia (SARIJARI et al., 2013).

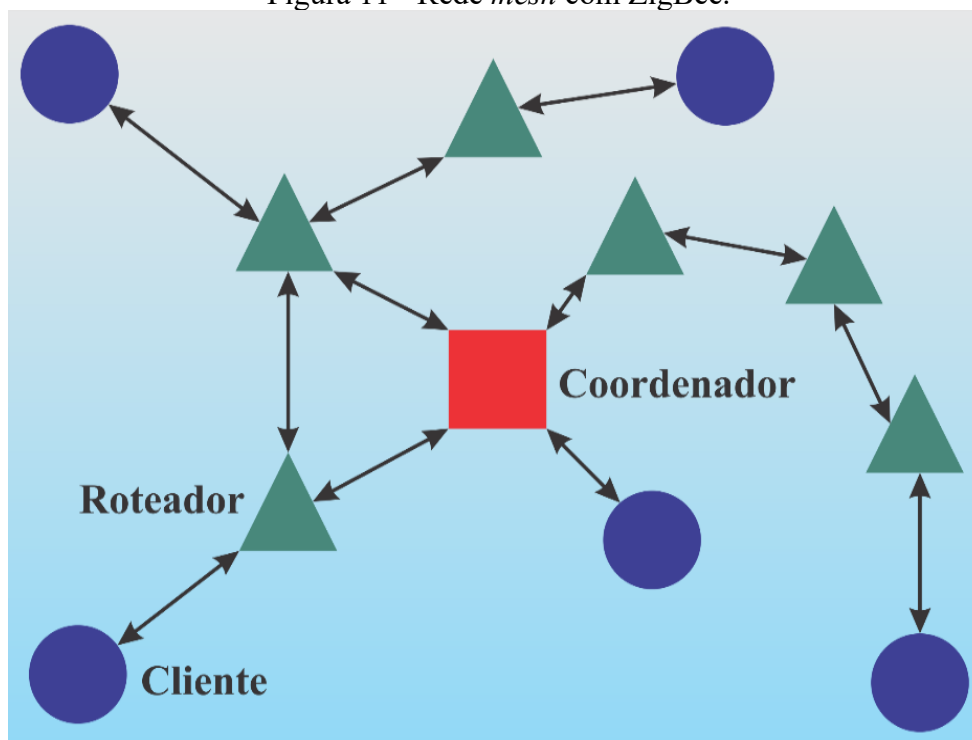
Cada nodo que compõem a rede pode operar em três diferentes configurações: coordenador, roteador e cliente.

O coordenador é análogo a configuração mestre da rede Wi-Fi, sendo esse responsável por gerenciar características da rede, como alocação dos nodos em canais, definição de SSID, rearranjo das rotas de informação, entre outro. É obrigatório a existência de apenas um mestre por rede e sua comunicação pode ser realizada tanto com os roteadores, quanto com os clientes.

O roteador funciona como um amplificador de sinal, aumentando a área de cobertura da rede e alcançando nodos que estão invisíveis ao coordenador. Nesse modo sua responsabilidade é de encaminhar as informações bidirecionais entre clientes e mestre (SETHI; SARANGI, 2017).

O cliente, comumente conhecido como *end device*, são os pontos finais da rede e nesse nodo que são conectados as aplicações, normalmente de sensoriamento e controle. A configuração *end device* comunica-se com roteadores, ou o mestre, não comunicando com outros clientes (SETHI; SARANGI, 2017).

A Figura 11 apresenta um resumo do funcionamento da rede. Percebe-se que apesar de ser uma rede *mesh*, existem maiores limitações quando comparadas com a topologia em Wi-Fi, pois os nodos têm funções definidas que limitam as aplicações. Por exemplo, um cliente não pode atuar como roteador e vice-versa, um pouco diferente do padrão *mesh* implementado pelo *ad-hoc*.

Figura 11 - Rede *mesh* com ZigBee.

Fonte: do autor.

O ZigBee ganhou força com a IoT, suas aplicações são específicas para sensoriamento e controle, limitada pela baixa taxa de transmissão. Logo, essa tecnologia aparece como uma solução para a implementação de uma SH.

Esse padrão é importante para aplicações desconectadas da rede elétrica, alimentadas por bateria, garantindo uma vida útil estendida para o produto. Como alternativa para esse problema, outra rede citada no ambiente de SH, é o Sub-GHz que será detalhado a seguir.

2.2.3.3 Sub-GHz

A rede Sub-GHz é uma tecnologia mais antiga, quando comparada com as já citadas, ela surgiu como solução para pequenas automações residenciais e automotivas.

As bandas utilizadas nessas aplicações não tinham padronização, sendo possível encontrar nas mais variadas configurações, como 292 MHz, 315 MHz, 433 MHz, 900 MHz, entre outros dentro do ISM (AUST; PRASAD; NIEMEGEERS, 2012).

Essa falta de padronização fez com que vários fabricantes implementassem sua tecnologia e tratativa das informações, sendo comercializado até mesmo produtos com comunicação aberta apenas com a camada física implementada (AUST; PRASAD; NIEMEGEERS, 2012).

Assim, a topologia utilizada comumente era ponto-a-ponto, com dois nodos na rede. As comunicações podiam ser bidirecionais, porém a maioria das aplicações eram unidirecionais, sendo um nodo receptor e o outro transmissor.

Com a implementação dos padrões 802.11, 802.15.4 e 802.15.1, viu-se a evolução do tratamento de informações. Expandindo assim características para essa tecnologia, que também com a IoT e SH ganhou força e voltou aos holofotes das soluções (USMAN; SHAMI, 2013).

Assim, o Sub-GHz se destaca por características como alto alcance, reduzidas interferências no espectro e custo reduzido. Sua banda de atuação foge dos padrões mais populares e essa rede sem fio possui um longínquo tempo de mercado (ALI et al., 2017).

No padrão 802.11ah, o Sub-GHz aparece em conjunto com o Wi-Fi e o fato desse protocolo disponibilizado pela IEEE ter sido criado, reforça o potencial dessa solução. Assim, para aplicações em território nacional o espectro de frequência definido está entre 802 MHz e 928 MHz, devido as leis vigentes e permitindo interoperabilidade entre fabricantes (USMAN; SHAMI, 2013).

A largura de banda dos canais individuais no padrão ah podem ser definidos como 1, 2, 4, 8 e 16 MHz e a modulação é realizada utilizando OFDM. Valores menores de largura de banda permite mais canais de conexão individual com redução da taxa de transferência e aumento de interferência entre canais vizinhos (USMAN; SHAMI, 2013).

Essa tecnologia permite operar em redes *mesh*, porém devido a sua baixa taxa de transferência não é a topologia mais indicada. Logo, a formação estrela trabalha melhor no ambiente de uma SH, composta por um mestre e diversos clientes, pois as distâncias da maioria das residências são cobertas pelo raio de atuação.

2.3 CONCLUSÃO

Com a advento da IoT, da *smart grid* e mais especificamente da *smart home*, existe um anseio da comunidade por novas soluções e percebe-se um aquecimento do mercado nessa área. A quantidade de tecnologias, padrões e produtos buscando criar redes sem fio voltadas a essas aplicações está crescendo. Logo, é possível notar que em paralelo a esses trabalhos é necessário a definição da melhor tecnologia, do ponto de vista técnico e econômico, para que ocorra o avanço dessas áreas.

O órgão IEEE, responsável pelas padronizações, incentivou essa área com os protocolos criados e é perceptível que as redes que usufruem dessas homologações ganham

mercado e popularidade mais rapidamente, justamente por permitir a interoperabilidade entre diferentes fabricantes.

Logo, esse trabalho busca auxiliar essa procura pela melhor solução. Este capítulo apresentou a fundamentação teórica para os principais conteúdos que cercam essa busca pela melhor tecnologia.

3 METODOLOGIA

De acordo com Gil (2010), a pesquisa é inacabável e são passos que nos aproximam da verdade. Todo o procedimento de investigação é controverso e por muitas vezes confundível, visto que as metodologias aplicáveis se dividem por características homogêneas que constam nos diferentes métodos.

Este capítulo apresenta a metodologia empregada no desenvolvimento desta dissertação e sua classificação conforme referências metodológicas. A revisão sistemática foi realizada com base nos principais acervos de trabalhos e artigos da área de tecnologia, servindo para a definição dos parâmetros utilizados na pesquisa e a definição das características e análises aplicadas nos experimentos.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Há diversas formas de classificar uma pesquisa científica, porém, o passo inicial de qualquer pesquisa está relacionado com a definição do seu *status quo*, para posterior aplicação dos métodos adequados. De acordo com Gerhardt e Silveira (2009) e Gil (2010), a pesquisa científica se divide em abordagem, natureza, objetivo e procedimento, sendo que todo trabalho deve se encaixar em pelo menos uma área de cada campo citado. A Figura 12 retrata os campos com suas respectivas áreas, onde a presente pesquisa está classificada de acordo com os destaques (retângulos tracejados) na Figura.

De acordo com o esquemático da Figura 12, a pesquisa possui uma abordagem quantitativa, pois se baseia em dados numéricos que representam o desempenho de cada tecnologia, tanto econômico quanto técnico (GERHARDT; SILVEIRA, 2009; GIL, 2010; SILVA; MENEZES, 2005).

O objetivo deste trabalho envolve o levantamento de soluções e conhecimentos, através de experimentação, para aplicação prática. Esse modelo é de natureza aplicada, como citado no esquemático (SILVA; MENEZES, 2005).

O caráter do objetivo desta pesquisa é exploratório, pois proporciona maior familiaridade com o problema e constrói hipóteses. Outro importante fator é que se realiza uma análise de exemplos que estimulem a compreensão (GIL, 2010).

Os procedimentos para a realização da pesquisa são: experimental, bibliográfico e de caso. Conforme mostrado na Figura 12 e mais bem explanado no texto a seguir.

Figura 12 - Classificação da pesquisa.

ABORDAGEM	Qualitativa
	Quantitativa
NATUREZA	Básica
	Aplicada
OBJETIVOS	Exploratória
	Descritiva
	Explicativa
PROCEDIMENTOS	Experimental
	Bibliográfica
	Documental
	Campo
	<i>ex-post-facto</i>
	Levantamento
	<i>Survey</i>
	Caso
	Participante
	Ação
	Etnográfica
	Etnometodológica

Fonte: do autor.

3.2 PROCEDIMENTOS DA PESQUISA

O procedimento bibliográfico está presente em quase a totalidade das pesquisas científicas, visto a necessidade de fundamentar o problema e em alguns casos a solução. Esse modelo aparece pela necessidade da definição do problema, mesmo que sendo senso comum, mas principalmente para a limitação do trabalho (GIL, 2010).

Especificamente, a pesquisa bibliográfica desse trabalho busca filtrar as tecnologias de redes sem fio que despontam como solução aplicável aos problemas de gerenciamento e demanda de energia numa casa inteligente. Isso delimita a experimentação e simulação computacional aos padrões de redes sem fio mais relevantes ao mercado atualmente, principalmente do ponto de vista econômico.

Essa pesquisa ainda se enquadra nos campos: experimental e de caso. O intuito é diferenciar dos livros e artigos científicos referentes ao tema, pois não se encontram aplicações de caráter experimental comparativo de tecnologias.

A pesquisa experimental deve seguir um planejamento rigoroso, logo é vista a motivação de um procedimento bibliográfico citado (SILVA; MENEZES, 2005). O objetivo é determinar o objeto de estudo, selecionar as variáveis influenciadoras, definir as formas de controle e observação (mensuração) do experimento. Ainda se enquadra como um estudo de caso devido a aplicação a um ambiente definido, como a *smart home* (GIL, 2010).

3.3 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

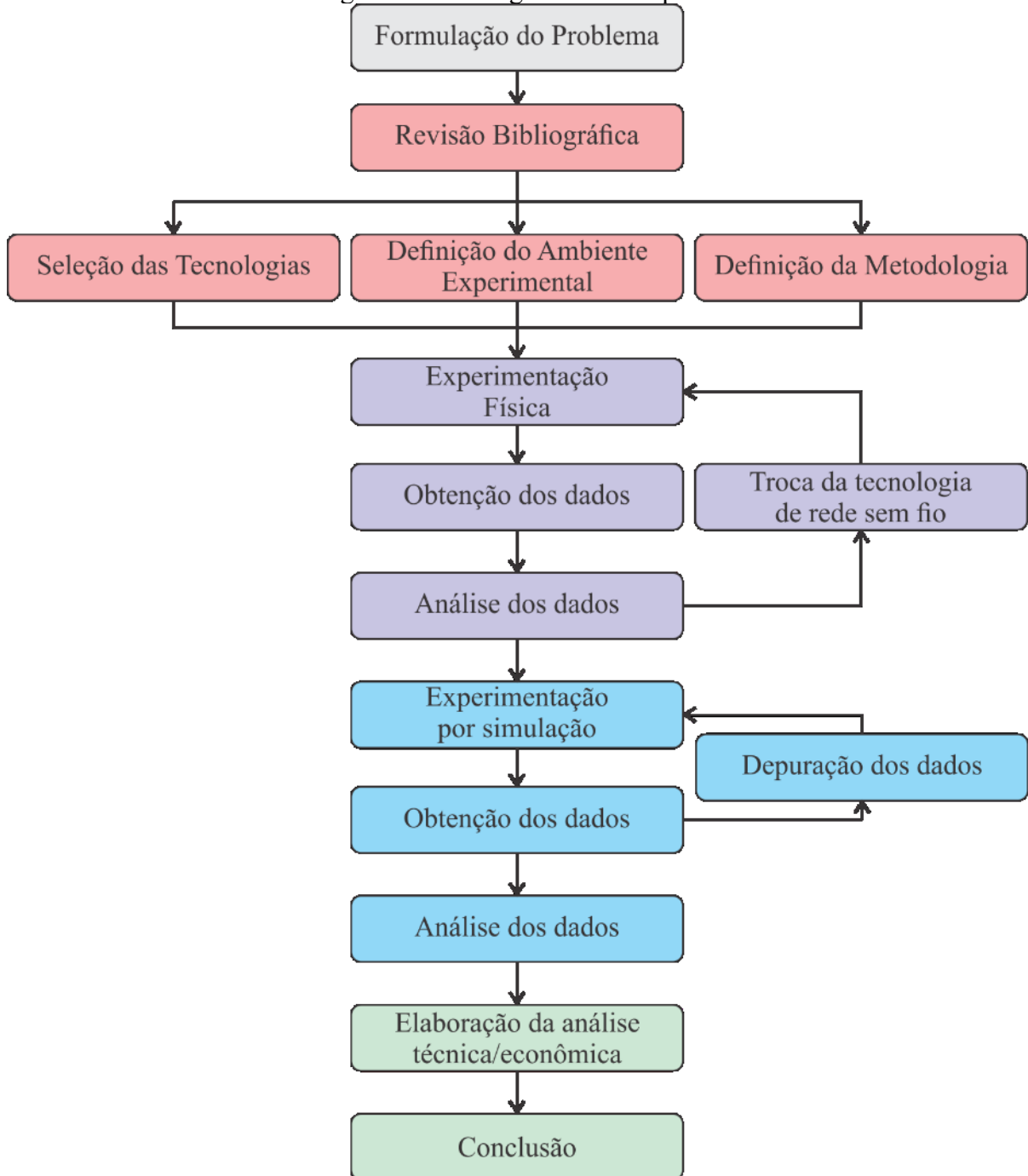
Esta seção apresenta o planejamento dos três métodos de pesquisa realizados: bibliográfico, de caso e experimental. O início dessa pesquisa foi marcado pela busca de evidências para responder a questão central do trabalho: “Qual a melhor tecnologia de rede sem fio que contemplará todas as funcionalidades necessárias para o gerenciamento e medição de energia dentro da SH?”, sendo realizado através de um procedimento bibliográfico.

O fluxograma da Figura 13 apresenta a divisão do trabalho dentro de cada procedimento utilizado, representado por cores. A cor rosa representa a etapa de pesquisa bibliográfica, em seguida a cor roxa apresenta a parte do estudo de caso e, por fim, a cor azul demonstra a experimental. Com a questão central do trabalho definida, iniciou-se uma busca bibliográfica utilizando os principais acervos digitais da área: IEEE Xplore, *Science Direct*, periódicos da CAPES e repositórios de universidades por teses e dissertações. A grande quantidade de trabalhos encontrados demonstra a importância do estudo e seu impacto, o que se observou foi a defasagem de pesquisas que envolvam experimentação, principalmente prática.

Primeiramente, no processo da revisão bibliográfica, foram delimitadas as tecnologias que constam no processo experimental. Atualmente existem diversas soluções em ascensão, porém que não são tão usuais, por tempo de vida e outros devido a falta de padronização e custo elevado.

Ainda durante a revisão bibliográfica, levantou-se os padrões de residência para o território brasileiro. Esse processo visa verificar a área de cobertura que deve ser atendida pelas tecnologias, número de nodos para o gerenciamento de demanda de energia, configuração dos cômodos da residência, configuração das cargas elétricas, entre outras informações.

Figura 13 - Fluxograma de Pesquisa.



A partir dos resultados obtidos na revisão da literatura (apresentado em detalhes na próxima seção), foram definidos dois métodos para a análise técnica das principais tecnologias de redes sem fio, com o intuito de obter uma maior contribuição com o tema para a comunidade científica.

Para diferenciação dessa pesquisa em relação aos trabalhos da área, optou-se por implementar uma modelagem computacional das redes sem fio, depurados através de um

experimento físico. Assim, realizou-se um procedimento experimental com cinco nodos, em ambiente físico residencial real já constando a rede Wi-Fi padrão de uso do dia-a-dia, para analisar o desempenho técnico de três diferentes tecnologias de rede sem fio. Os dados levantados foram utilizados para validação do modelo computacional.

Com a simulação computacional depurada e validada, as tecnologias foram avaliadas em cenários de pior caso, para verificação do máximo desempenho num ambiente de SH, onde todos os pontos de energia elétrica são considerados nodos de comunicação.

A conclusão é baseada na comparação dos dados obtidos com os dois experimentos, no âmbito técnico. Em contrapartida, uma análise econômica das tecnologias de rede sem fio avaliadas foi realizada.

3.4 REVISÃO SISTEMÁTICA

Uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) foi realizada e uma das principais conclusões foi que o tema central deste trabalho está em ascensão nos periódicos.

A pesquisa foi realizada com uma expressão de busca visando limitar os trabalhos, utilizando os seguintes termos: *smart grid*, *smart home*, tecnologias de redes sem fio e *home area network*.

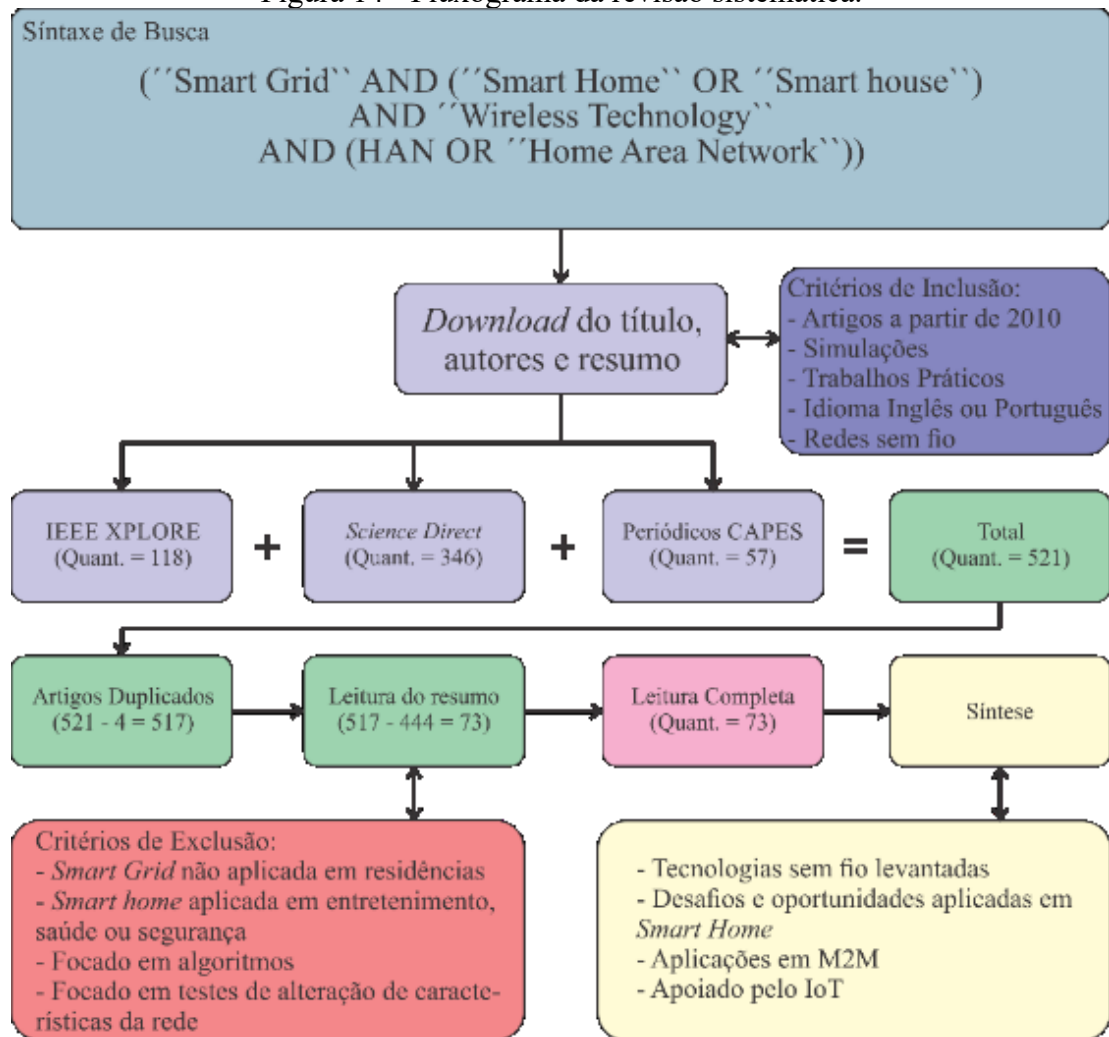
A partir dos termos definidos, buscou-se trabalhos relacionados nas principais bases de pesquisa, IEEE Xplore, *Science Direct* e Periódico CAPES. A Figura 14 demonstra o processo completo de busca.

Os critérios de inclusão foram aplicados na primeira busca, sendo selecionados artigos no idioma português e inglês, publicados a partir de 2010, com desenvolvimento prático, ou em ambiente de simulação e operando com tecnologias de redes sem fio.

A exclusão dos artigos foi realizada na leitura dos resumos, após a primeira busca e retirada dos trabalhos duplicados nas bases. Os artigos excluídos divergem do tema central, pois, normalmente não realizavam pesquisas das tecnologias de rede sem fio num ambiente de SH, e quando focavam em casas inteligentes eram aplicações voltadas para segurança, entretenimento, saúde e não no gerenciamento de energia.

Após a triagem realizada, chegou-se a um total de 73 trabalhos selecionados para a leitura completa. A etapa final foi uma síntese dos artigos, sendo possível realizar uma análise quantitativa das tecnologias de redes sem fio e uma análise qualitativa dos resultados apresentados nesses artigos.

Figura 14 - Fluxograma da revisão sistemática.



Fonte: do autor.

O levantamento quantitativo visa relatar as principais tecnologias de redes sem fio sugeridas e utilizadas nos trabalhos. Constatou-se que os trabalhos de implementação prática focam em uma ou duas tecnologias nos experimentos. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos no levantamento.

Tabela 1 - Tecnologias de redes sem fio citadas nos trabalhos.

Tecnologia	Quantidade de citações
Wi-Fi	45
ZigBee	55
Sub-GHz	29
Bluetooth	13
Outros	39

Fonte: do autor.

A Tabela 1 sintetiza as principais tecnologias citadas na literatura, no grupo “Outros” consta os protocolos proprietários e não regidos pelo IEEE (Instituto dos Engenheiro Eletricistas e Eletrônicos).

É perceptível nos trabalhos a relação direta entre *smart home* e IoT, onde a maioria dos trabalhos destaca o uso do ZigBee. Pois, algumas aplicações envolvendo IoT são alimentados por bateria e essa tecnologia, baseada no padrão IEEE 802.15.4, possui baixo consumo de energia.

A tecnologia Wi-Fi é apresentada em duas variantes: LoWi-Fi e padrão IEEE 802.11 com suas variantes. Sua popularidade é considerada um forte fator para essa rede sem fio ser definida como principal padrão de aplicação do conceito de uma SH. Existem numerosos produtos que são comercializados com essa tecnologia, o que reforça a utilização do IEEE 802.11.

As redes Sub-GHz ascenderam com o padrão 802.11ah, que implementam a comunicação em frequências da faixa dos mega-hertz. Dentro dessas frequências existem outras tecnologias operantes com protocolos proprietários.

O Bluetooth também aparece em citações devido a proximidade entre SH e IoT, devido ao baixo consumo de energia. Porém, essa tecnologia possui maior complexidade na formação de redes devido ao seu funcionamento, o que acarreta na alteração do padrão de operação para sua implementação. Consequentemente reduzindo a oferta de módulos presentes no mercado para desenvolvimento da tecnologia, tornando essa solução mais nova e menos popular.

Alguns trabalhos realizam um comparativo, ou revisão, das principais tecnologias de comunicação para o ambiente de casa inteligente.

3.4.1 Comparativo entre tecnologias

Existe uma quantidade significativa de trabalhos realizando comparativos entre as tecnologias de redes sem fio, baseados em referências documentais.

Para Mahmood; Javaid; Razzaq (2015), após um comparativo realizado entre diversas tecnologias para HANs (*Home Area Networks*) em SHs, as principais soluções de redes sem fio são o Wi-Fi e ZigBee. Com maiores vantagens para o ZigBee para aplicações de gerenciamento de energia, por ter menor consumo de energia e suportar um número elevado de nodos na rede.

De acordo com Kailas; Cecchi e Mukherjee (2012) existem muitas aplicações de automação baseadas em ZigBee, Wi-Fi e Z-Wave, porém não existe tecnologia que desponta.

A escolha deve variar de acordo com a aplicação, destacando o problema da interoperabilidade entre dispositivos.

Cecilia e Sudarsanan (2016) concluíram que para aplicações de *smart homes* as melhores tecnologias são ZigBee, Sub-GHz, Wi-Fi, Z-Wave e M-bus. Enquanto que para Emmanuel e Rayudu (2016) existe uma necessidade de convergência para um protocolo comum, garantindo a interoperabilidade e evolução.

Para Usman e Shami (2013), as principais evoluções da *smart grid* estão no domínio do consumidor com soluções que envolvem ZigBee e Wi-Fi como tecnologia de comunicação.

Conforme Toschi, Campos e Cugnasca (2017), reforçado por Huq e Islam (2010), a real evolução da SH ocorrerá com o surgimento de uma padronização pelo mundo, pois do contrário continuarão a existir soluções isoladas dos fabricantes sem uma real integração.

De acordo com Kuzlu, Pipattanasomporn e Rahman (2016) as principais soluções para uma completa integração na *smart home* estão nas redes sem fio, quando comparadas as redes com fio, citando dentre as principais tecnologias: ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth, Sub-GHz, 6LowPan, EnOcean e Wave2m.

Para Mendes et al. (2015a), as soluções divergem de acordo com a área de aplicação, sendo o Wi-Fi e ZigBee as principais soluções para *smart home*.

Snyder, Gunther e Griffin (2012) citam que *smart grid* e *smart home* ainda são soluções imaturas e dispersas, devido a falta de padronização entre os fabricantes e a presença de inúmeras soluções para as redes de tecnologias sem fio.

Todos os trabalhos citados apresentam comparativos de nível referencial, baseado em *know-how* dos autores e pesquisa bibliográfica. Os artigos com resoluções práticas são apresentados a seguir.

3.4.2 Artigos experimentais

Existem muitos artigos experimentais com aplicações voltadas para a *smart home*. A maioria deles apresenta estudos de caso e campo relacionados com o tema, sempre abordando uma ou duas tecnologias de redes sem fio.

Collotta e Pau (2015a) realizaram simulações baseadas numa variante de Bluetooth Low Energy, utilizando BluHEMs WSHAN. A conclusão foi feita na comparação direta com a mesma solução utilizando ZigBee e verificou-se um ganho no tempo fim-a-fim e na taxa de recepção de pacotes, devido a menor complexidade e tamanho do cabeçalho de cada tecnologia.

Collotta e Pau (2015b) também validaram a aplicação em experimento prático no trabalho “*A Solution Based on Bluetooth Low Energy for Smart Home Energy Management*”.

No trabalho de Tascikaraoglu, Boynuegri e Uzunoglu (2014) implementou-se um gerenciamento de demanda de cargas numa residência com alimentação por fontes alternativas renováveis de energia. O sistema foi implementado utilizando a tecnologia ZigBee. Suas conclusões não focaram em citar a tecnologia e sim a redução do pico de potência obtido com a solução. Ainda Belcredi et al. (2016) também criaram uma plataforma de *smart home* utilizando ZigBee para gerenciamento de energia.

Burunkaya e Pars (2017) desenvolveram e implementaram um *smart meter* baseado numa rede ZigBee, com o intuito de validar os ganhos de uma aplicação SH. No desenvolvimento de uma *smart grid* no campus da universidade, Ghosh e Chakraborty (2017) utilizaram uma rede *mesh* baseado no padrão IEEE 802.15.4.

Nuyen et al. (2018) apresentaram um experimento em menor escala, através de uma maquete de uma SH, seu trabalho está voltado para pesquisa e educação. Para a comunicação e o controle dos nodos foi utilizado o ZigBee e Wi-Fi.

Para o desenvolvimento de uma rede de sensores para o gerenciamento de energia dentro de uma casa inteligente, Chen, Chang e Chen (2015) desenvolveram aplicações com a tecnologia IEEE 802.11. Também utilizando Wi-Fi, Ozcelik, Korpeoglu e Agrawala (2017) implementaram um estudo de caso de uma *smart home* com rede M2M (*Machine-to-Machine*) para aumento da eficiência energética.

Para Verma et al. (2016) a melhor comunicação, para aplicações M2M num ambiente de *smart home*, são as redes sem fio baseadas em Wi-Fi. Justifica-se a utilização dessa tecnologia devido a sua popularidade, segurança, evolução, tempo de uso. Ele ainda conclui que não verifica intensa presença de dispositivos utilizando bateria, isso evita o principal problema desse modelo que é seu consumo de energia.

Como mencionado, os trabalhos experimentais focam em mostrar uma implementação de uma solução e sua validação, utilizando sempre uma, ou no máximo duas tecnologias de redes sem fio.

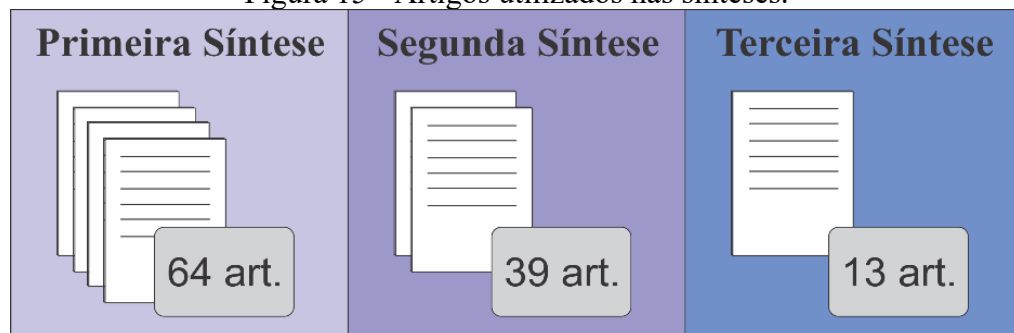
3.4.3 Síntese

Com o intuito de sintetizar os artigos e apresentar a conclusão da revisão sistemática da literatura, com uma visão do panorama geral, separou-se os artigos obtidos em três grupos:

- a) redes sem fio baseadas em padrão estabelecido pelo IEEE (802.11 e 802.15.4), presentes no Apêndice A.
- b) redes sem fio com protocolos proprietário presentes no Apêndice B; e
- c) definições sobre *smart home*, desafios, barreiras e oportunidades presentes no Apêndice C.

A Figura 15 apresenta a quantidade de artigos dentro de cada síntese. A primeira e a segunda síntese foram utilizadas para definir as tecnologias de redes sem fio utilizadas no experimento e a terceira para definição dos parâmetros de teste.

Figura 15 - Artigos utilizados nas sínteses.



Fonte: do autor.

As redes sem fio baseadas nos padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4 são citadas em 87% dos artigos da revisão sistemática, o que ascende essas tecnologias como as principais. As redes sem fio são apresentadas como a melhor solução, devido ao custo reduzido de implantação, mobilidade e facilidade de troca de ponto de acesso. Quando baseadas nas redes padronizadas pelo IEEE as vantagens são realçadas devido à facilidade de desenvolvimento, aumento de segurança e confiabilidade (BERRÍO; ZULUAGA, 2012; CHHAYA et al., 2017; EMMANUEL; RAYUDU, 2016; KAILAS; CECCHI; MUKHERJEE, 2012; KUZLU; PIPATTANASOMPORN; RAHMAN, 2016; MENDES et al., 2015b; SNYDER; GUNTHER; GRIFFIN, 2012).

Os protocolos proprietários estão focados em entregar soluções requisitadas por *smart homes*, porém o tempo de vida das tecnologias, elevado custo e falta de padronização dificultam sua perpetuação. As principais redes sem fio nessa categoria operam nas bandas de 2,4 GHz e Sub-GHz (CECILIA; SUDARSANAN, 2016; KAILAS; CECCHI; MUKHERJEE, 2012; MAHMOOD; JAVAID; RAZZAQ, 2015).

Assim, conclui-se que as tecnologias mais promissoras e que devem ser melhor avaliadas são: Wi-Fi (802.11), ZigBee (802.15.4) e Sub-GHz. Os rádios Wi-Fi e ZigBee operam

na banda de 2,4 GHz, logo optou-se pelo Sub-GHz com o intuito de trabalhar numa frequência diferente.

A terceira síntese definiu que aplicações de gerenciamento de demanda de energia são parte vital de uma SH e que essa área é uma das menos desenvolvidas. Um dos empecilhos levantados é a grande variedade de tecnologias de redes sem fio, o que dificulta a interoperabilidade entre produtos de diferentes fabricantes (CECILIA; SUDARSANAN, 2016; CHHAYA et al., 2017; TOSCHI; CAMPOS; CUGNASCA, 2017).

Um outro ponto em comum, bastante citado, é o fato de aplicações de gerenciamento de energia não necessitarem de uma tecnologia com alta taxa de transmissão. A *smart home* também se correlaciona com IoT, isso cria aplicações com alimentação por bateria. Essas características justificam a utilização de ZigBee na maioria dos experimentos (BELCREDI et al., 2016; MENDES et al., 2015b).

A rede Wi-Fi é a rede sem fio mais utilizada no mundo, isso garante muitas vantagens a essa tecnologia. Sua popularidade garante redução no custo direto e de projeto. A grande maioria das residências possuem *access point*, o que facilita a formação de redes 802.11.

Assim, a revisão sistemática demonstrou a importância desse tema e caracterizou um problema existente que impede o avanço das SHs, auxiliando também na definição das tecnologias a serem utilizadas e auxiliou na definição dos parâmetros de testes.

3.5 ASPECTOS DA EXPERIMENTAÇÃO

Nesta seção são apresentadas as parametrizações utilizadas nos experimentos, discutindo o método de definição das variáveis de teste e ambientação, bem como a tratativa a ser realizada.

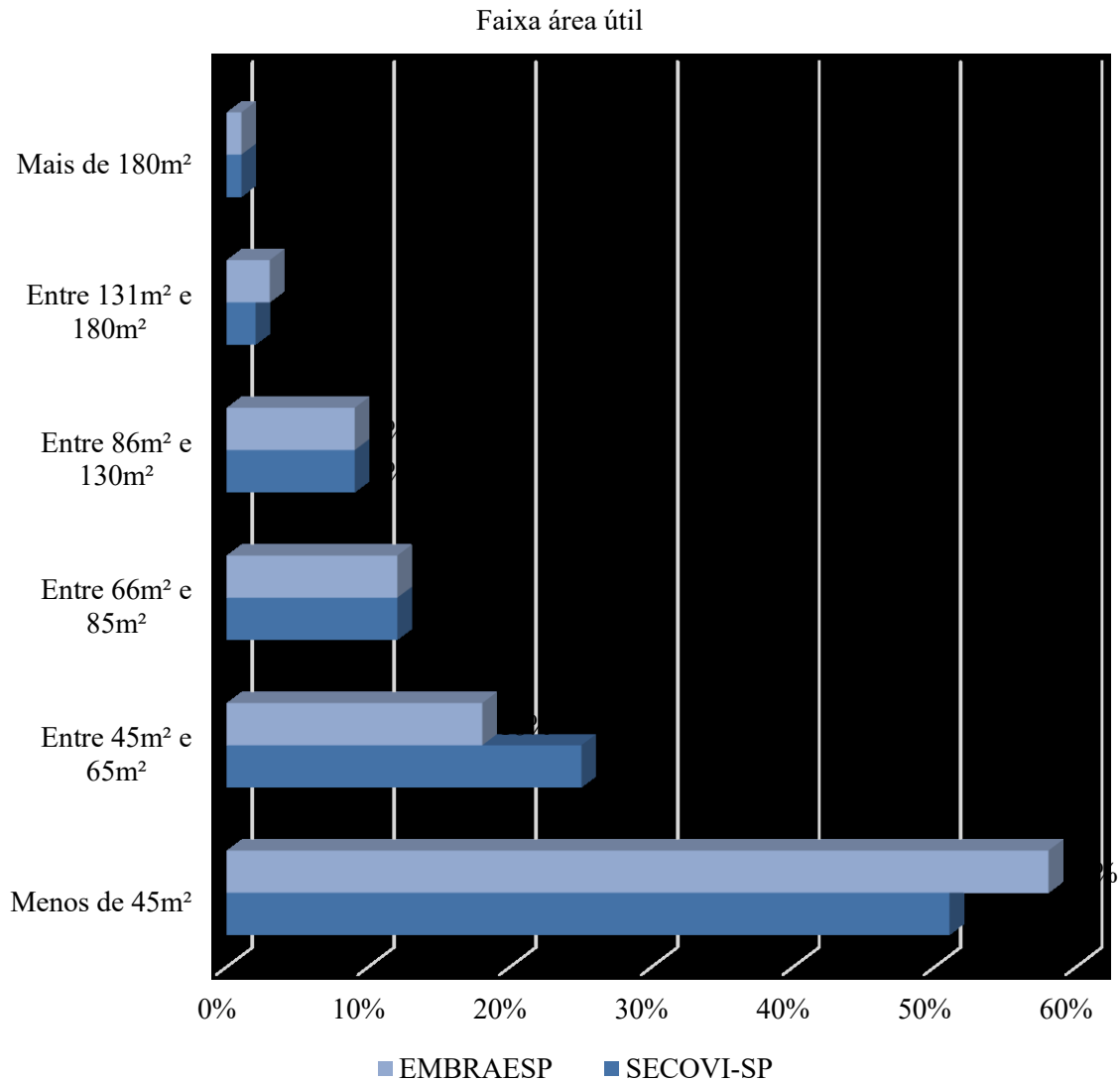
3.5.1 CENÁRIOS

A parametrização do cenário da aplicação é necessária, pois existem fatores que influenciam no desempenho das tecnologias de redes sem fio, como: barreiras físicas, localização dos nodos e distância. A definição do ambiente permite identificar essas variáveis citadas e replicá-las nos testes realizados.

Logo, o cenário de teste precisa estar ambientado no tema central do trabalho, aplicações voltadas para as casas inteligentes. O cenário deve representar a maioria das residências brasileiras.

De acordo com dados estatísticos de Petrucci (2018), as residências se dividem por área em seis grupos, representados na Figura 16. Entende-se que quanto maior a área das residências, maior serão as distâncias dos clientes em relação ao coordenador, ou mestre, visto que a topologia utilizada na maioria das configurações de rede e no experimento é a estrela.

Figura 16 - Gráfico da faixa de área útil das residências em São Paulo.



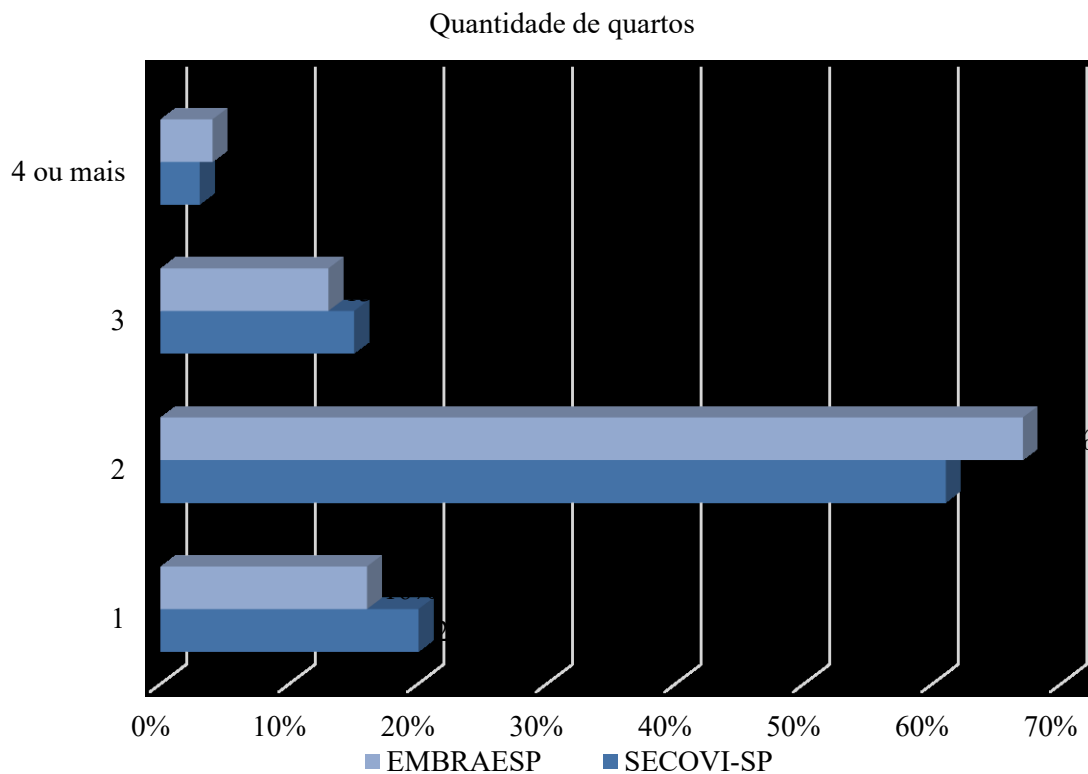
Fonte: (PETRUCCI, 2018, adaptado).

Com o intuito de abranger uma quantidade expressiva das residências brasileiras, foi definido um modelo de residência para uso nos experimentos. A casa possui 125 m², isso engloba indiretamente 97% e 98%, de acordo com EMBRAESP e SECOVI-SP respectivamente (PETRUCCI, 2018). Do ponto de vista técnico, subentende-se que áreas maiores apresentarão desempenhos reduzidos em relação aos menores, logo as opções menores, devem ser englobadas nos resultados das residências maiores.

Outra influência na decisão de avaliar uma casa com área útil na terceira faixa do gráfico é a possibilidade do conflito dos resultados de simulação com os resultados experimentais. Pois, a análise experimental será realizada numa residência real de 125 m² com o mesmo desenho arquitetônico. Permitindo validar os resultados obtidos no ambiente de simulação.

A configuração dos cômodos também impacta o experimento, pois o levantamento dos pontos de tomada varia de acordo com a função da área. Assim, de acordo com a Figura 17, estão dispostas as estatísticas referentes a quantidade de quartos. As residências com um, dois e três quartos são 96 % e 97 % das residências no estado de São Paulo, de acordo com EMBRAESP e SECOVI-SP respectivamente (PETRUCCI, 2018).

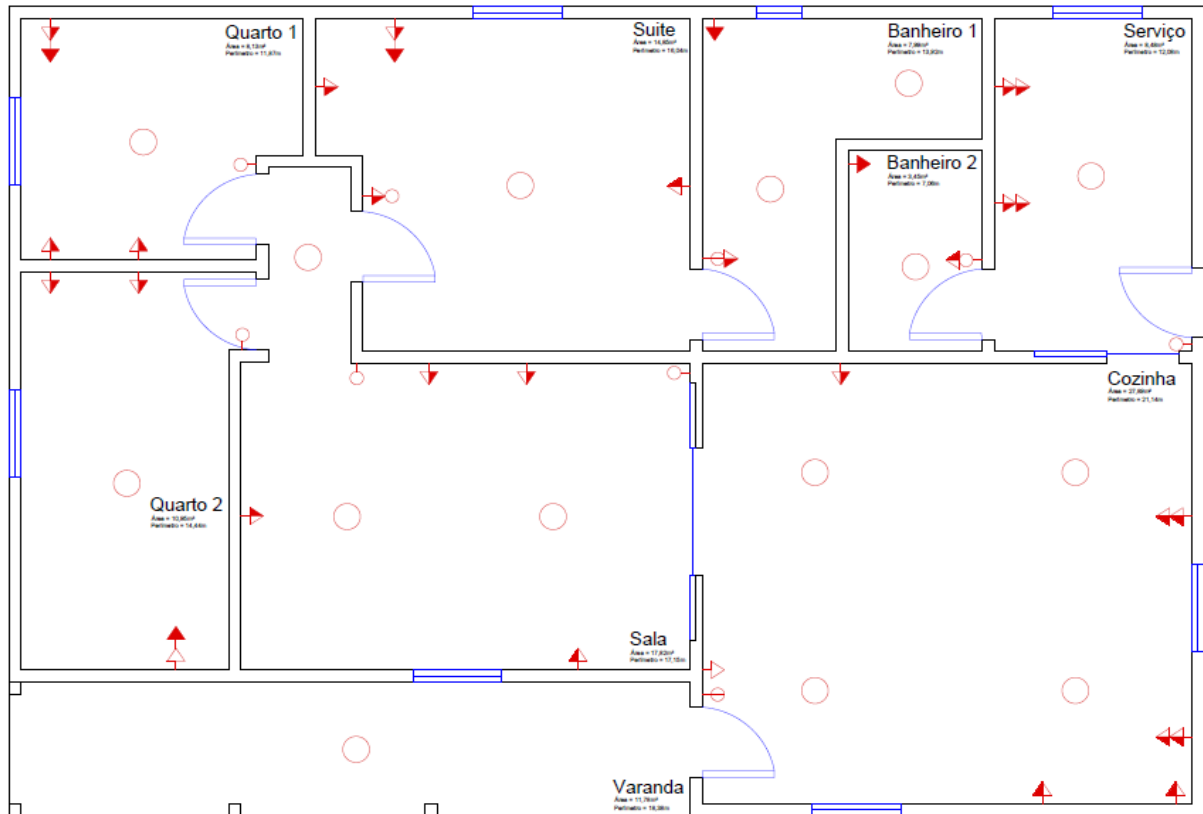
Figura 17 - Quantidade de cômodos das residências avaliadas em São Paulo.



Com os levantamentos realizados na cidade de São Paulo, maior cidade da América Latina, definiu-se o desenho arquitetônico da casa modelo. A planta baixa da experimentação representa a maioria expressiva das casas citadas.

Com base nos dados apresentados por PETRUCCI (2018), foi desenhada uma planta arquitetônica, baseada num modelo real, local onde será realizado o teste prático. A Figura 18 ilustra a residência que será utilizada nas análises.

Figura 18 - Casa com área entre 86 m² e 130 m².



Fonte: do autor.

A próxima etapa é o projeto elétrico da residência modelo, com o intuito de levantar os pontos de tomadas, que numa SH tornam-se nodos de comunicação. As luminárias também são representadas, pois são cargas elétricas que serão controladas e mensuradas.

Para o levantamento dos pontos de tomadas, iluminação e interruptores, foi utilizado a norma NBR 5410: 2014. A quantidade aumenta com acréscimo da área e perímetro dos cômodos, logo residências maiores agravam os problemas para a comunicação, devido ao aumento da distância entre esses e pelo maior número de nodos. Isso ressalta a escolha de uma residência na terceira faixa do gráfico de área.

Com o levantamento dos pontos de iluminação, TUG (Tomadas de Uso Geral) e TUE (Tomadas de Uso Específico), têm-se 47 nodos definidos. Os pontos estão representados nas plantas baixas de acordo com a NBR 5444: 1988, símbolos gráficos para instalações elétricas prediais.

O levantamento foi realizado considerando o número mínimo de pontos por cômodos e tomadas de uso especial dos equipamentos mais utilizados em residências, como: chuveiros elétricos, torneiras elétricas e ares-condicionados. Na iluminação foi considerado como ponto

de comunicação as luminárias, pois percebe-se um padrão de comercialização de lâmpadas inteligentes e utilização de interruptores comuns.

3.5.2 Topologia de rede

Existem diversas topologias de redes que podem ser implementadas, tais como: ponto-a-ponto, barramento, anel, estrela, malha, árvore, híbrida e *daisy chain*. Todas as topologias citadas dividem-se em aplicações centralizadas e descentralizadas.

A topologia ponto-a-ponto conecta dois nodos de maneira homogênea, sem necessidade de rótulos como cliente e servidor. Essa topologia não é recomendada para a solução, pois é necessário o estabelecimento da conexão entre os nodos antes da transmissão, o que acarreta num maior tempo e gasto de energia no processo.

O barramento é uma solução aplicável a comunicações com fio, toda informação é lançada em *broadcast*¹. Essa topologia reduz consideravelmente a taxa de transmissão em tecnologias de rede sem fio, não sendo recomendada.

Topologia em anel conecta os dispositivos em série, fechando um anel de transmissão entre todos os nodos. Um sinal enviado por uma estação é retransmitido pelas seguintes até o destino, isso reduz a complexidade do cabeçalho da informação, porém não é indicado para a maioria das aplicações. Os problemas desse modelo estão na necessidade de uma infraestrutura de rede planejada, complexidade de alteração dos nodos e bloqueio da transmissão geral através de um defeito localizado num dos pontos.

O formato em estrela é o mais empregado atualmente em redes sem fio. No modelo centralizado dessa topologia apresenta facilidade de estruturamento, um mestre por rede e facilidade de comutação dos nodos para entrar e sair da rede. As redes IEEE 802.11 e Ethernet residenciais operam, na maioria dos casos, nessa topologia, logo optou-se por esse modelo para os experimentos serem executados.

A rede em malha, também conhecidas por redes *mesh*, é tida como a sucessora da topologia estrela e surgiu com a evolução das taxas de transmissão. Sua implementação é possível quando existe largura de banda além do suficiente para a execução dos trabalhos, pois esse modelo incrementa a complexidade de operação da rede, aumentando o tamanho do cabeçalho dos pacotes. Sua principal vantagem está no aumento da cobertura da tecnologia, através da rotulação de todos os nodos como *ad-hoc*. Isso permite que cada ponto de

¹ Método de transferência de mensagem para todos os receptores simultaneamente.

transmissão seja uma extensão direta da rede, permitindo que uma estação se comunique com qualquer outra da rede, sem estar ao seu alcance direto.

Mesmo entendendo a importância e ganho de implementação dessa topologia, não se optou pela malha. As redes selecionadas para os testes atendem a área de cobertura da maioria das residências, ambiente da SH, no território brasileiro. Logo, não existe a necessidade do aumento da complexidade e redução do desempenho, em contrapartida do aumento de cobertura.

As redes árvore, híbrida e *daisy chain* apresentam entre os principais ganhos, em comparação com a topologia estrela, o ganho do alcance em troca do aumento da indexação dos nodos. Logo, essas também não são as mais indicadas para implementações em casas inteligentes, atualmente.

3.5.3 Pacote de dados

O primeiro parâmetro a ser definido, vital para a realização dos testes, é o pacote de dados a ser utilizado. É necessário definir esse parâmetro baseado nas aplicações, que são amplas e dispersas entre as mais diversas situações.

Importante ressaltar que o experimento é voltado para o gerenciamento e controle de cargas e demanda de energia, pois é um campo relativamente novo e pertinente de uma SH. Entende-se, que as áreas de entretenimento, saúde e segurança já estão mais avançadas e definidas.

3.5.3.1 Tamanho do pacote de dados

É de conhecimento que o pacote de dados terá variação de tamanho de acordo com o cabeçalho da tecnologia em análise, isso altera o tamanho do pacote como um todo, porém não o tamanho dos dados.

De acordo com a ficha técnica do circuito integrado utilizado para medição de energia elétrica de uma parte dos relógios medidores eletrônicos do mercado, o ADE7753, foi possível estabelecer um tamanho para o pacote de dados (ANALOG DEVICES, 2009).

No exemplo de uma medição básica monofásica de energia (comum aos consumidores residenciais), onde mensuramos a energia ativa, o componente nos apresenta um registrador de 24 bits (3 bytes).

Optando-se por uma medição mais completa, permitindo um maior controle, definiu-se por mensurar também na análise: a corrente eficaz e tensão eficaz. Essas três informações citadas, se somadas chegam em 72 bits (9 bytes) de dados.

A tecnologia com o maior tamanho de pacote é o Wi-Fi com sua estrutura baseada na Figura 19, totalizando 71 bytes. A periodicidade das medições, baseado nas normas da ANEEL, é de 1 minuto. O medidor fica responsável por integrar as informações a cada 15 minutos para impressão no relatório mensal de consumo (CESÁRIO JÚNIOR, 2014).

Figura 19 - Pacote para uma comunicação Wi-Fi para medição elétrica.



Fonte: do autor.

Com o intuito de expandir os testes, serão realizados experimentos com pacotes maiores, logo optou-se por trabalhar com dados de 20 B, 40 B e 60 B.

3.5.3.2 Periodicidade das medições

Levando em conta funções de controle, além da medição citada na primeira análise, uma intervenção a cada minuto inviabiliza qualquer aplicação comparado ao padrão atual da tecnologia. Com a função de controle e medição integradas, conseqüentemente o pacote de dados deverá ser maior e com um intervalo de transmissão reduzido para diminuir o tempo de resposta entre o comando e a ação.

Para o acionamento/desligamento de cargas e medição das grandezas elétricas (fator de deslocamento, potência aparente, potência reativa, entre outros) prevê-se uma necessidade de 20 bytes (ANALOG DEVICES, 2009).

De acordo com Kumar, Ovsthus e Kristensen (2014) existem alguns modelos de aplicação para uso doméstico:

- a) Sistemas seguros;
- b) Sistemas reguladores em malha fechada;
- c) Sistema supervisorio em malha fechada;
- d) Sistema de controle em malha aberta;
- e) Sistema de alerta; e
- f) Sistema centralizador de informação.

As particularidades mais importantes que representam as características são a necessidade da execução de eventos com tempos na casa dos milissegundos e segundos. Envio de informações dentro de um período pré-definido e que possua controle em malha fechada (AKYILDIZ; KASIMOGLU, 2004).

A necessidade de um controle num período menor aumenta a taxa de transmissão dos dados, então define-se como um tempo plausível de envio o cada intervalo de 500 ms. Com essa base de tempo, pacotes com tamanho de 20 bytes, necessitam de uma taxa de transmissão de 1312 bps.

Para uma maior saturação e melhor análise, optou-se por implementar pacotes de dados de 20 B, 40 B e 60 B nos testes, com o envio de um pacote a cada intervalo de tempo de 500 ms, logo esses serão os valores definidos nos experimentos práticos.

3.6 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

A análise experimental é uma importante etapa da pesquisa, pois nesse ponto é apresentado a particularidade do trabalho. O acervo dentro dessa área retrata comparativos entre as tecnologias, porém apenas no âmbito bibliográfico. Os artigos que introduzem testes práticos limitam-se a aplicação de apenas uma tecnologia.

O experimento desse trabalho visa validar um modelo experimental para posterior aumento de pontos de comunicação e a análise das tecnologias por simulação. Assim, será realizado um teste prático em escala menor, com modelos comerciais de módulos de três diferentes tecnologias.

No cenário apresentado, de área de 125 m², são posicionados cinco nodos e realiza-se a comunicação em topologia estrela de quatro clientes com um coordenador. Os pacotes de dados são baseados no levantamento realizado nesse capítulo e a periodicidade das mensagens é de 500 ms, visando boas características de controle de sistemas em malha aberta.

Três rodadas de testes são realizadas para cada tecnologia, Wi-Fi, ZigBee e Sub-GHz, e a duração de cada experimento é de 1 h. Esse tempo foi definido a partir de testes preliminares, onde não se verificou mudança na taxa de sucesso de pacotes recebidos no decorrer das horas do dia. O levantamento foi feito com testes de desempenho durante três dias seguidos.

Os módulos utilizados nos experimentos são comerciais, populares e presente em produtos do mercado. As placas Arduino Uno são responsáveis por gerar os pacotes, temporizar o intervalo de envio, gerenciar o cartão de memória e armazenar os dados. As tecnologias Wi-Fi e ZigBee possuem um controlador interno próprio responsável por gerenciar a camada de

MAC. O módulo Sub-GHz não possui controle dessa camada, o controlador apenas gerencia a camada física.

Ao término do experimento pretende-se verificar o desempenho técnico de cada tecnologia, avaliando número de pacotes perdidos e calculando a eficiência da comunicação.

3.7 SIMULAÇÃO

Para o desenvolvimento das análises por simulação será utilizado o programa OMNeT++, que realiza testes em eventos modulares orientados a objeto. Suas aplicações são voltadas para desenvolvimentos acadêmicos, educacionais e também para pesquisas (ANDRÁS VARGA, 2016). As simulações baseadas nas redes 802.11 e 802.15.4 são implementadas pelo *framework* INET (OLLER et al., 2016). A tecnologia Sub-GHz é testada com a utilização do módulo de rádio genérico.

Os resultados obtidos dos testes práticos são utilizados para depuração do modelo computacional, visando aproximar as interferências, barreiras e disposição geográfica do modelo real ao ambiente de simulação.

Com o modelo validado, a quantidade de nodos é aumentada para os valores levantados no cenário.

A ideia é obter um modelo computacional validado de uma SH, aplicada aos padrões de residência brasileira. Possibilitando realizar um comparativo significativo das tecnologias em ascensão para as aplicações de gerenciamento de energia.

3.8 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica realiza uma comparação entre custo direto e consumo de energia de cada tecnologia, numa análise quantitativa. Os custos não relativos e de componentes externos ao funcionamento de cada módulo serão analisados qualitativamente, devido a difícil previsibilidade dessa área.

O custo da tecnologia é um importante fator para sua popularização, isso permite aos fabricantes implementarem um rádio de comunicação sem interferir muito no preço de mercado.

3.9 CONCLUSÃO

Com a definição da metodologia do trabalho, todas as etapas foram apresentadas e preparadas para a obtenção dos resultados.

As redes sem fio a serem avaliadas foram escolhidas a partir da revisão sistemática. O cenário do experimento foi definido pelo estudo estatístico do padrão de residências da cidade de São Paulo. Os parâmetros utilizados no processo foram definidos com o auxílio da revisão e a partir de dois métodos apresentados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

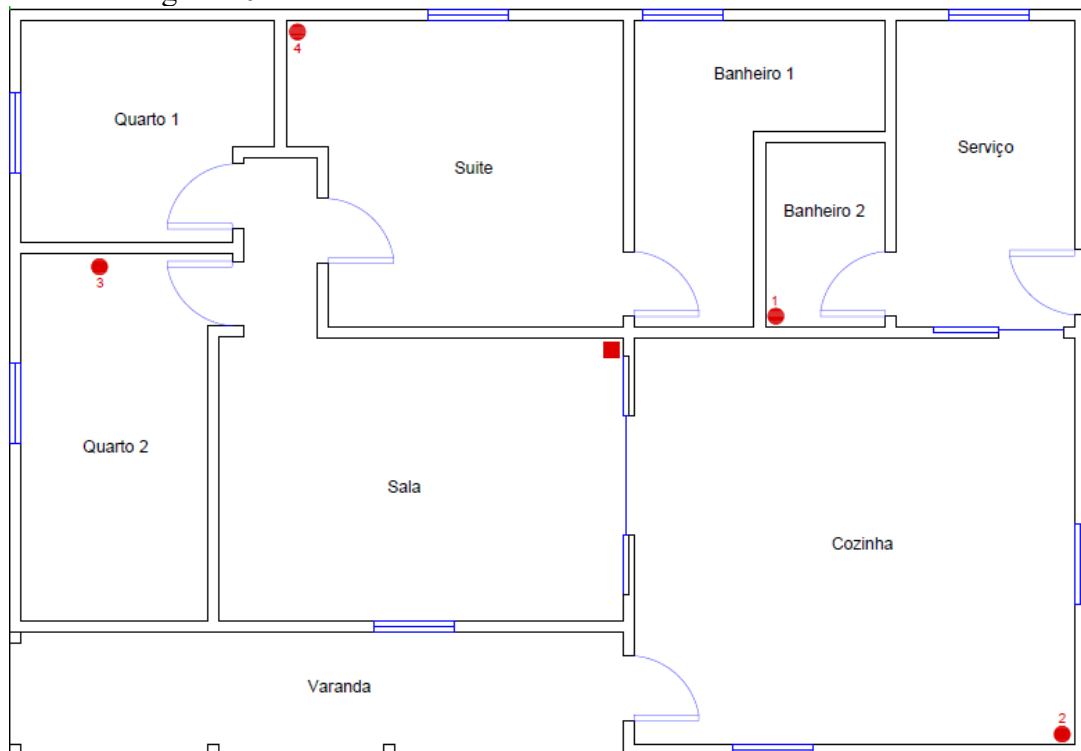
Esse capítulo apresenta os resultados obtidos nas três análises: experimento prático, simulação no ambiente OMNeT++ com *framework* INET e análise econômica.

4.1 EXPERIMENTO PRÁTICO

O experimento prático é o primeiro a ser apresentado, pois este será utilizado como base de validação da simulação. Num espaço físico real, uma residência comum, implementou-se um experimento de comunicação entre 5 pontos em topologia estrela, sendo um nodo o mestre, ou coordenador, e quatro nodos clientes.

O coordenador fica localizado no centro da residência, representado pelo quadrado na Figura 20. Enquanto os clientes ficam posicionados pela residência como se fossem produtos inteligentes de uma SH, identificados pelos círculos.

Figura 20 - Planta baixa da residência com os nodos localizados.



Fonte: do autor.

A configuração representada na Figura 20 foi utilizada nos experimentos com as três tecnologias de redes sem fio avaliadas. Os clientes 2 e 3 estão numa altura média de 1,20 m em relação ao chão, o cliente 1 está numa altura de 2,20 m em relação ao chão e o cliente 4 a uma altura de 0,30 m do chão. O coordenador está numa altura de 1,20 m em relação ao chão.

Os produtos inteligentes, que se comunicam com a Internet, utilizam na maioria sistemas embarcados com menor poder de processamento e que não possuem um sistema operacional. Normalmente, esses produtos utilizam microcontroladores de 8 bits, ou ARMs (*Acorn RISC Machine*).

Para a execução das funções de interação com o módulo de comunicação, geração dos dados, gerenciamento e armazenamento dos dados e cronometragem do tempo de experimento, optou-se pelas populares placas da linha Arduino. Os itens utilizados no controle estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 – Componentes de controle utilizados no experimento.

Componente	Quantidade
Arduino Uno	2
Arduino Mega	3
<i>Datalogger Shield</i> para Arduino	1
Cartão de memória SD 8 GB	1
Fonte CC 9V	5

Fonte: do autor.

Todos os pontos foram alimentados por uma fonte de tensão de corrente contínua 9 V. O coordenador é composto por um Arduino Uno integrado a um *shield datalogger* com um cartão de memória SD de 8 GB. Esse nodo fica incumbido de receber os dados dos quatro clientes, validar a informação do pacote, cronometrar o tempo do experimento, armazenar as informações em documento de texto e comunicar com o módulo de rede sem fio.

Os clientes são compostos por três Arduino Mega e um Arduino Uno, esses pontos ficam responsáveis por gerar os pacotes e enviar ao módulo de comunicação, que transmite as informações ao coordenador.

Os componentes e configuração se repetem nos três experimentos, com alternância dos módulos de comunicação. Foram utilizados três modelos de rádios, baseado nas redes sem fio Sub-GHz, Wi-Fi e ZigBee.

Cada um dos cinco pontos de comunicação utilizam um módulo de comunicação da tecnologia para o experimento, apenas no modelo Wi-Fi que a rede foi gerenciada por um roteador com o intuito de simular uma aplicação SH que aproveita a rede já presente na residência.

Para uma melhor comparação alguns padrões foram definidos:

- a) os módulos vão operar em modo AT;
- b) taxa de comunicação definida em 19.200 bps;
- c) camada MAC e PHY gerenciada pelo módulo, caso possua;
- d) tempo de transmissão de 500 ms;
- e) pacotes de 20 B, 40 B e 60 B; e
- f) duração de uma hora por teste.

Assim, os experimentos foram realizados com os quatros clientes enviando pacotes de dados a cada 500 ms para o coordenador. Cada tecnologia será testada por três horas, sendo uma hora para cada tamanho de pacote. Totalizando 7942 pacotes por rodada de teste.

Os códigos fontes dos programas implementados nos Arduinos encontram-se nos Apêndices D (coordenadores) e E (clientes), as linhas de código diferem pouco entre as redes sem fio.

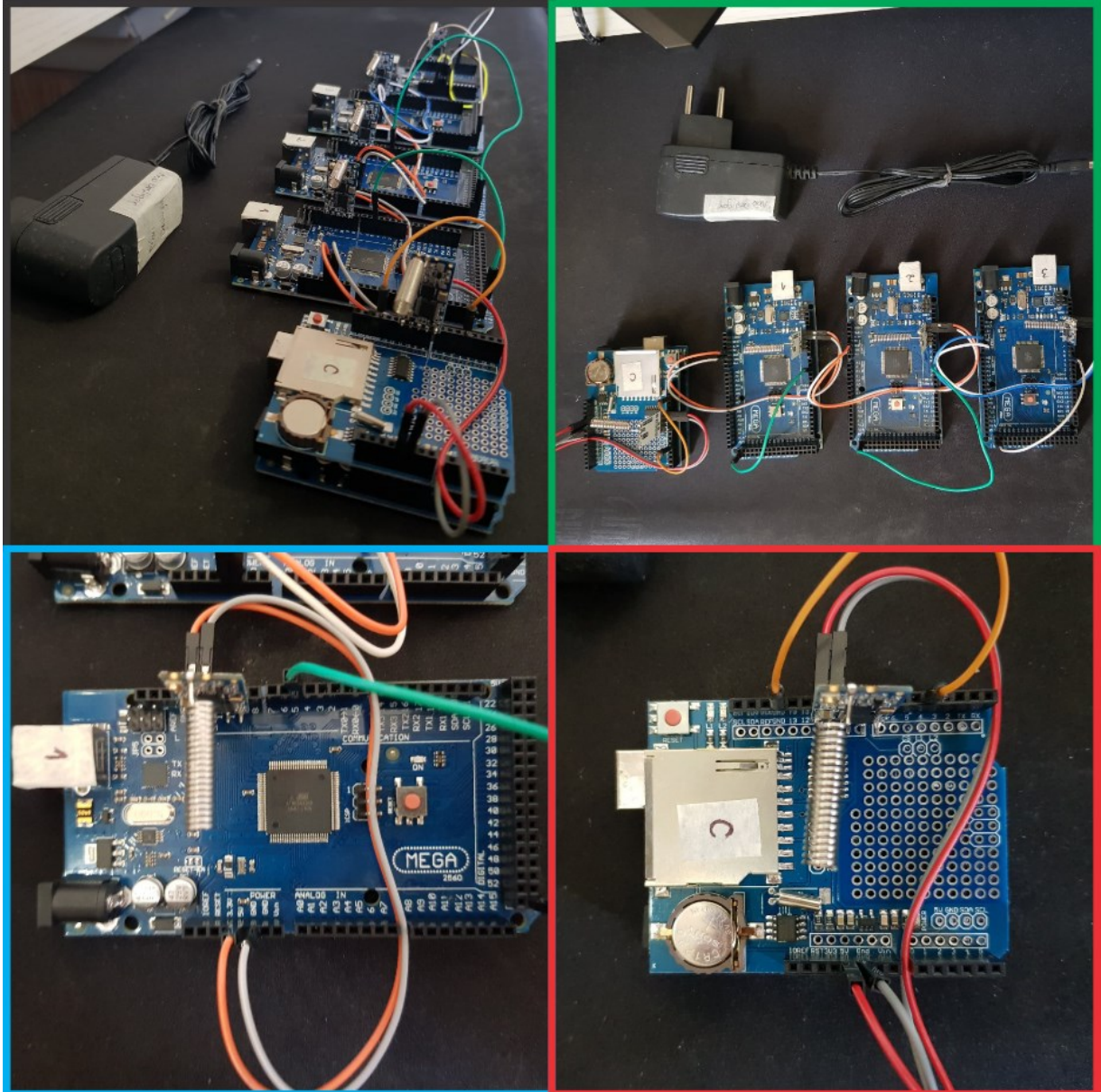
O módulo de comunicação Sub-GHz utilizado foi o HC-12, um modelo com antena externa em formato de mola. Essa solução possui um alcance de até 1000 m em campo aberto e possibilita a comunicação a uma taxa de 236 kbps. Sua frequência de operação está na banda de 433,4 MHz à 473 MHz, com 100 canais individuais (ELECROW, 2012). Este possui um microcontrolador interno dedicado exclusivamente para a função de comunicação e a configuração é realizada através de comandos AT, podendo definir parâmetros como potência de transmissão, canal de comunicação, taxa de *baudrate* e o modo de transferência serial. A Figura 21 apresenta a montagem dos nodos utilizados no experimento com a tecnologia.

A tecnologia Wi-Fi foi implementada com os módulos ESP 8266, no modelo ESP-07. Essa solução opera em 2,4 GHz no padrão IEEE 802.11 b/g/n, com a *stack* de protocolos TCP/IP já implementados. A placa possui um microcontrolador de 32 bits que permite gerenciar saídas/entradas digitais e analógicas, porém essa função não foi utilizada. A antena é cerâmica interna ao módulo e nenhum raio de alcance foi citado pelo fabricante (SHENZHEN ANXINKE TECHNOLOGY, 2015). Nos módulos foram instalados *firmwares* do modelo AT, dessa maneira os parâmetros também são realizados por comandos de texto. Na Figura 22 estão as fotos das montagens utilizadas nos testes com Wi-Fi.

Os testes com a tecnologia ZigBee foram realizados utilizando módulos Xbee da série dois, do fabricante Digi International. O rádio possui microcontrolador que gerencia a comunicação com uma *stack* de protocolos internas, definida no padrão IEEE 802.15.4 na configuração realizada pelo *software* XCTU. É possível controlar saídas/entradas digitais e analógicas. Esses módulos têm uma área de cobertura de 40 m para aplicações internas,

podendo chegar a 120 m em operações ao ar livre sem barreiras e a antena é externa. A taxa máxima de transmissão é de 250 kbps e possui baixo consumo de energia (INTERNATIONAL, 2012). A Figura 23 apresenta imagens dos nodos utilizados no experimento com ZigBee.

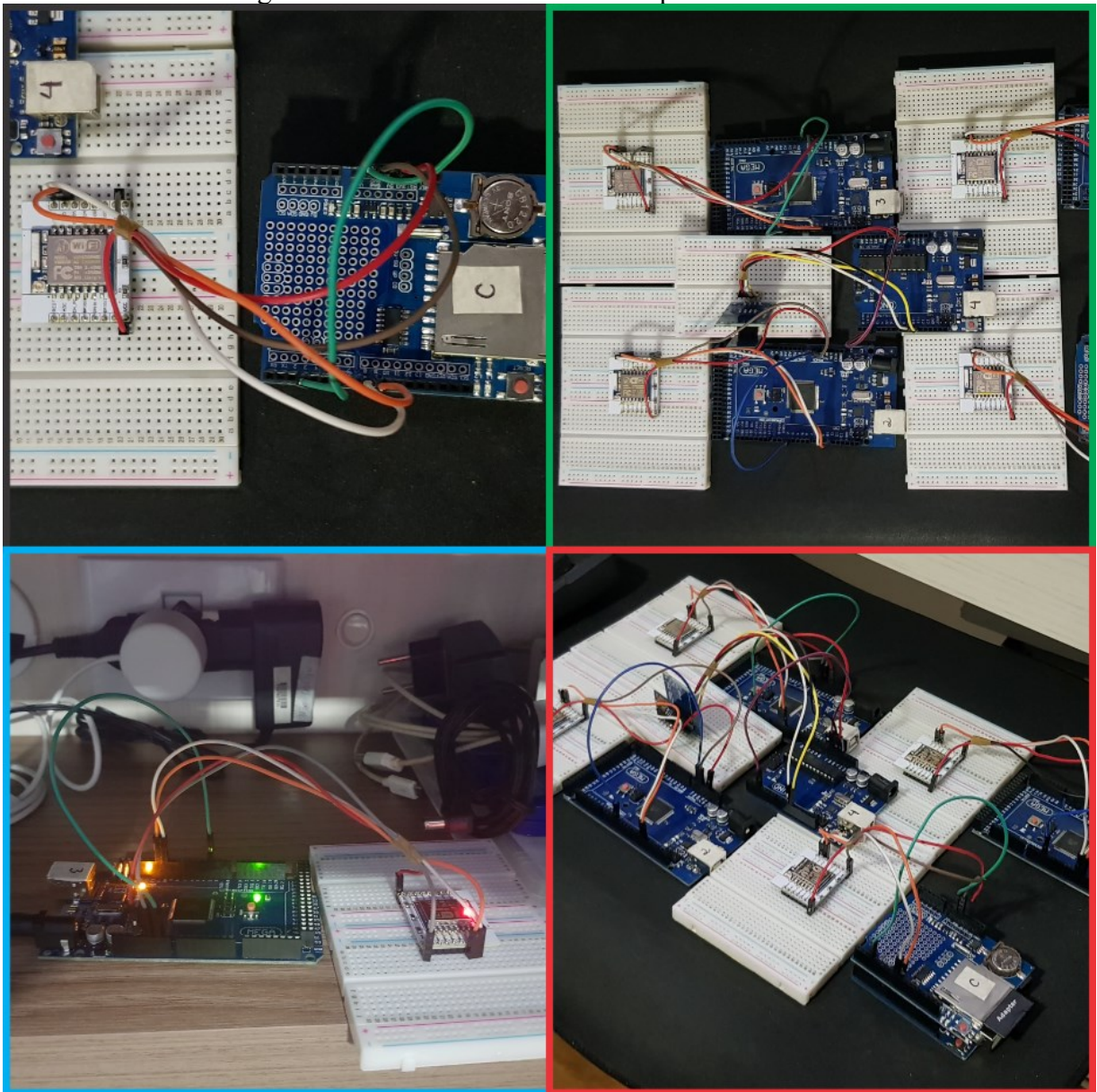
Figura 21 – Módulos utilizados no experimento Sub-GHz.



Fonte: do autor.

Definiu-se um pacote diferente para cada nodo, de mesmo tamanho, para possibilitar a identificação do dispositivo transmissor. Assim, cada nodo envia um pacote com caracteres, como exemplo o transmissor 1 envia um conjunto composto pelo caractere “A”, o transmissor 2 pelo caractere “B”, e assim sucessivamente até o transmissor 4.

Figura 22 - Módulos utilizados no experimento Wi-Fi.

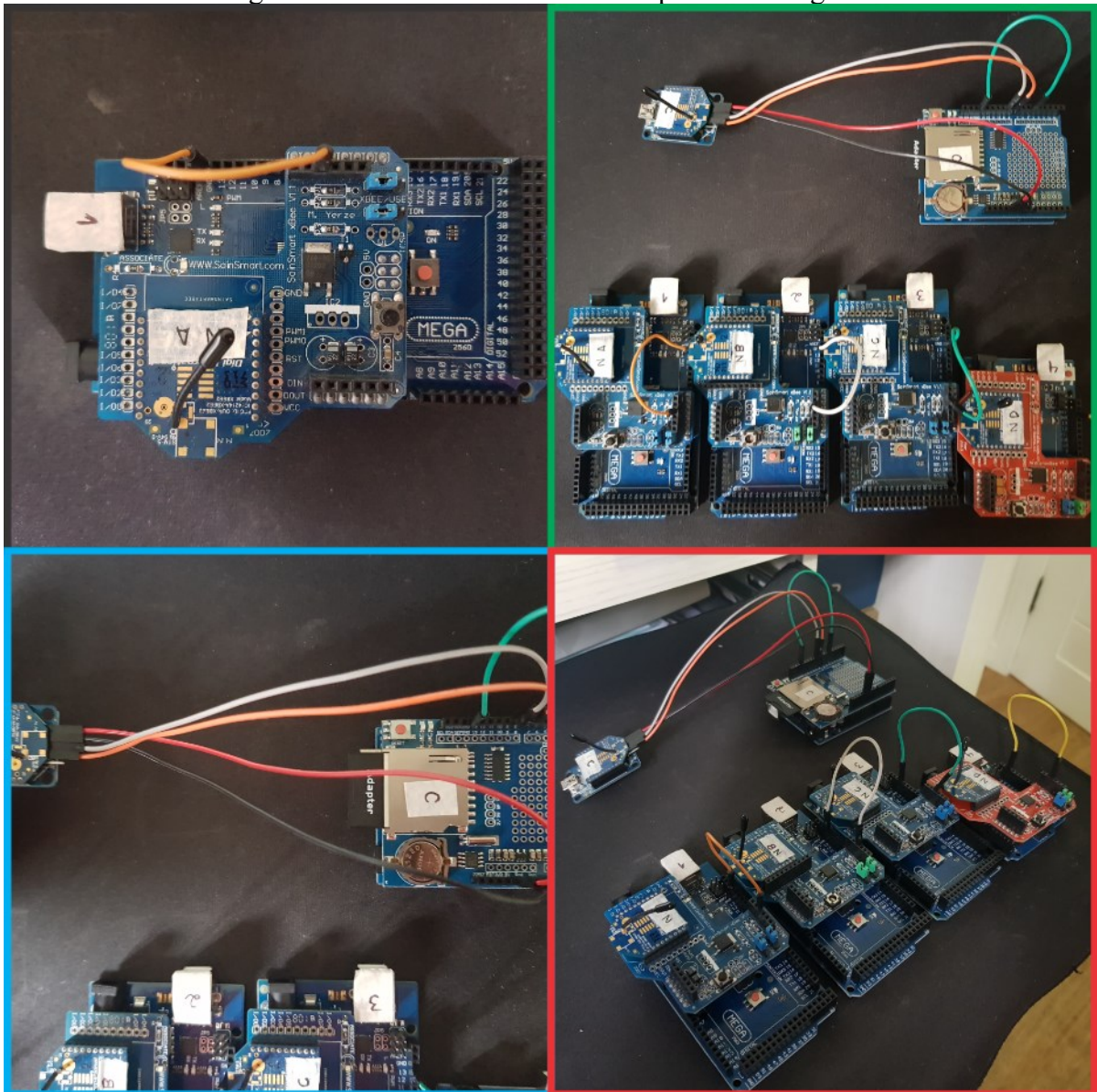


Fonte: do autor.

A primeira tecnologia testada foi a Sub-GHz, devido a transparência na comunicação dos módulos. Isso facilita o desenvolvimento da experiência. Nesse teste, foi definido um caractere inicial e final, para identificação do começo e término do pacote, pois a tecnologia não possui cabeçalho de mensagem.

O teste seguinte foi realizado com os rádios ESP-07, da tecnologia Wi-Fi. Nesse experimento não foram inclusos caracteres iniciais e finais de pacote, pois o módulo já acrescenta um cabeçalho com o direcionamento da mensagem. A comunicação foi realizada em modo TCP, através de um servidor aberto no coordenador na porta de numeração “555”.

Figura 23 - Módulos utilizados no experimento ZigBee.



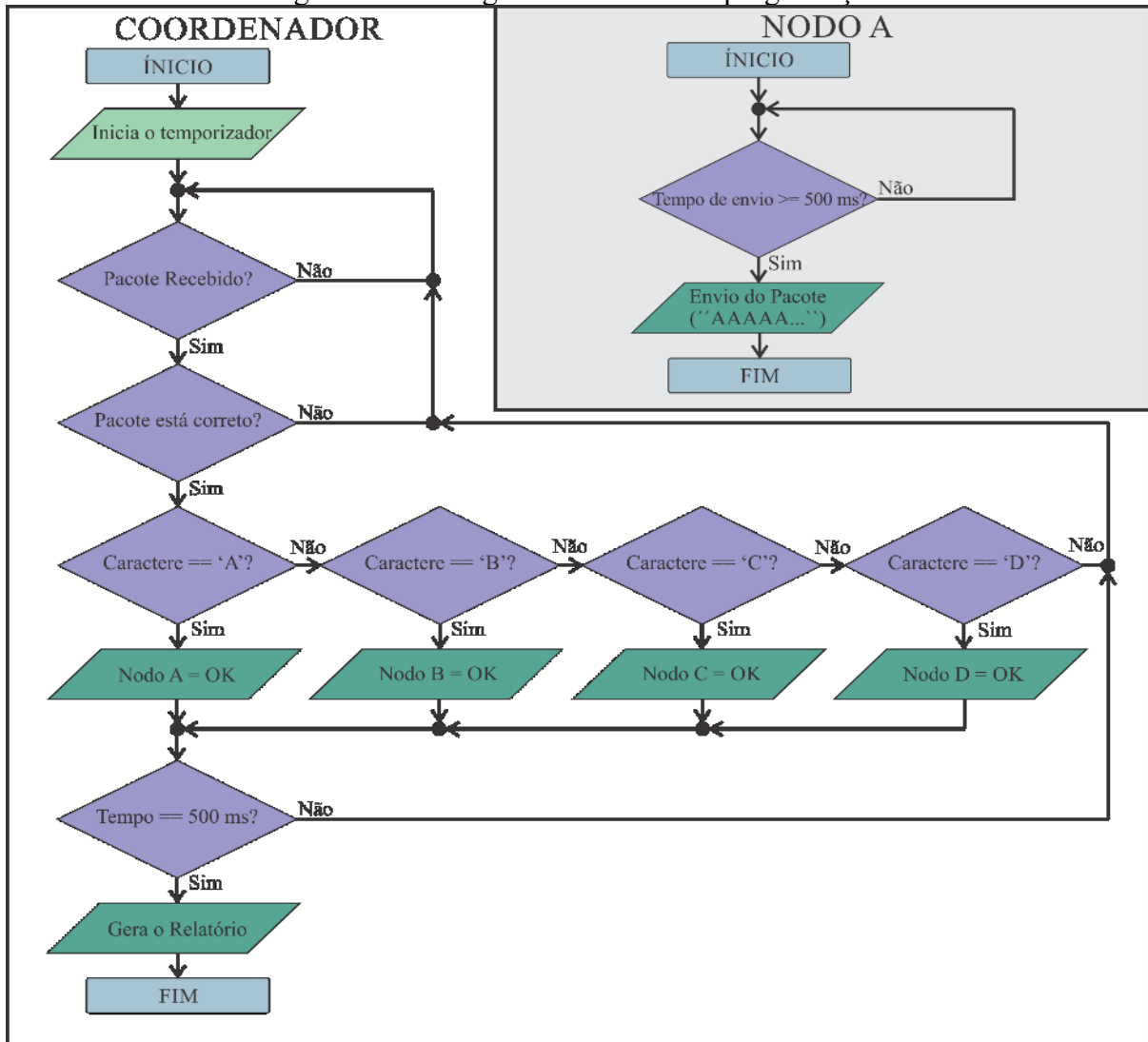
Fonte: do autor.

O último experimento foi realizado com os módulos Xbee, esses foram configurados no modo AT. Foi criada uma rede com SSID de nome “FF” através de um rádio parametrizado como servidor, os outros nodos foram parametrizados como roteadores direcionados para o MAC do servidor.

Com os módulos configurados, deu-se início aos experimentos, sendo executado cada tecnologia de maneira isolada. O coordenador fica responsável por gerar arquivos de texto armazenando os seguintes dados: data, horas, minutos, segundos, número do pacote e confirmação de recebimento/integridade dos dados por nodo.

A Figura 24 apresenta o fluxograma de funcionamento do experimento, para o coordenador e para os clientes.

Figura 24 - Fluxograma resumido da programação.



Fonte: do autor.

Os primeiros resultados obtidos com a transmissão de pacotes de 20 B com valores médios de taxa de sucesso de 88,36% para o Sub-GHz, 93,91% para o Wi-Fi e 99,87% para o ZigBee. O total de pacotes para cada rodada de teste foram 7642, sendo três rodadas por tamanho de pacote. Esses valores foram calculados dividindo o número de pacotes recebidos, descartando os que não chegaram em um intervalo de 500 ms e os corrompidos, pelo número de pacotes enviados.

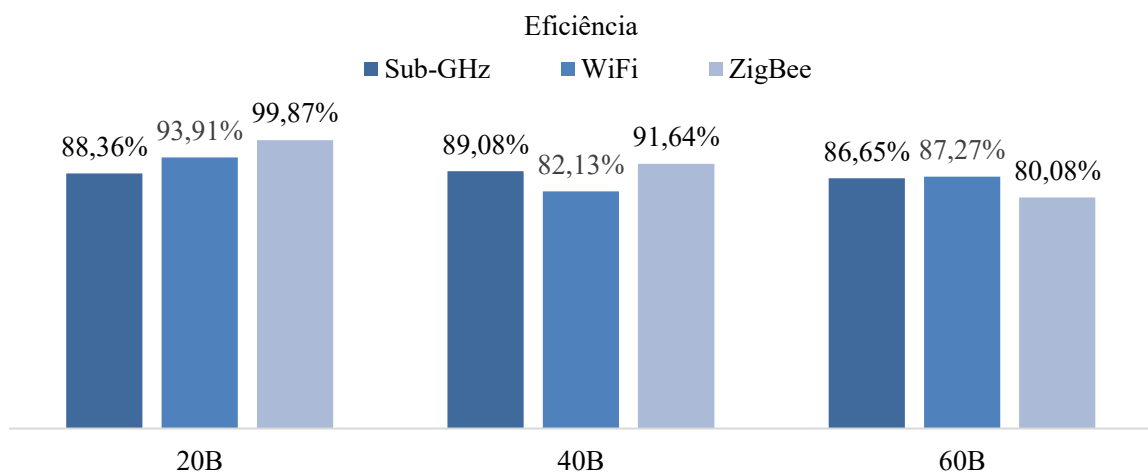
Com o aumento do pacote para 40 B, a rede Wi-Fi e ZigBee apresentam redução da taxa de sucesso para 82,13% e 91,64% respectivamente. Enquanto o Sub-GHz obteve resultado muito similar de 89,08%.

Para testes com pacote de 60 B, os resultados do Sub-GHz apresentaram um pequeno declínio para 86,65%, o Wi-Fi obteve uma melhora em relação ao 40 B atingindo 87,27% de

eficiência e o ZigBee reduziu ainda mais a taxa de sucesso alcançando o menor valor de 80,08%.

O panorama geral dos resultados obtidos pode ser visto na Figura 25. Com os testes completos, é possível afirmar que as tecnologias apresentaram resultados satisfatórios sem longos períodos de não funcionamento. É perceptível que o tamanho do pacote até 60 B não influencia no desempenho das tecnologias Sub-GHz e Wi-Fi, porém no ZigBee existe uma tendência de queda no desempenho com o aumento do tamanho do pacote.

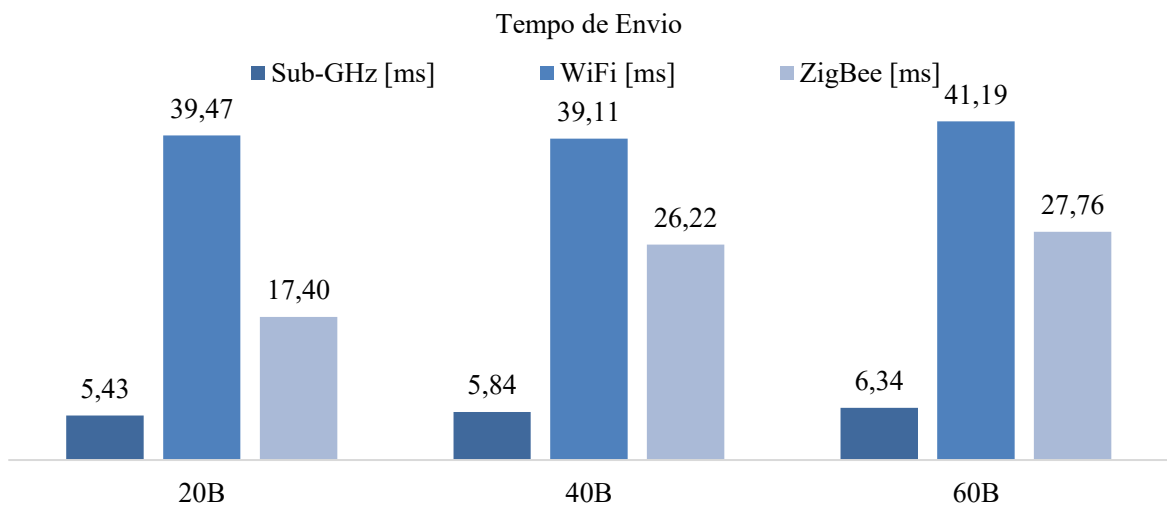
Figura 25 - Eficiência obtida nos testes experimentais.



Fonte: do autor.

O tempo de transmissão das tecnologias não sofreu alteração significativa com a mudança do tamanho do pacote, na Figura 26 estão os resultados obtidos em milissegundos.

Figura 26 - Tempo de envio do pacote do nodo para o coordenador.



Fonte: do autor.

Esses resultados foram utilizados como base do experimento, que visa aumentar o número de nodos comunicando com o coordenador e mensurar o desempenho de cada tecnologia.

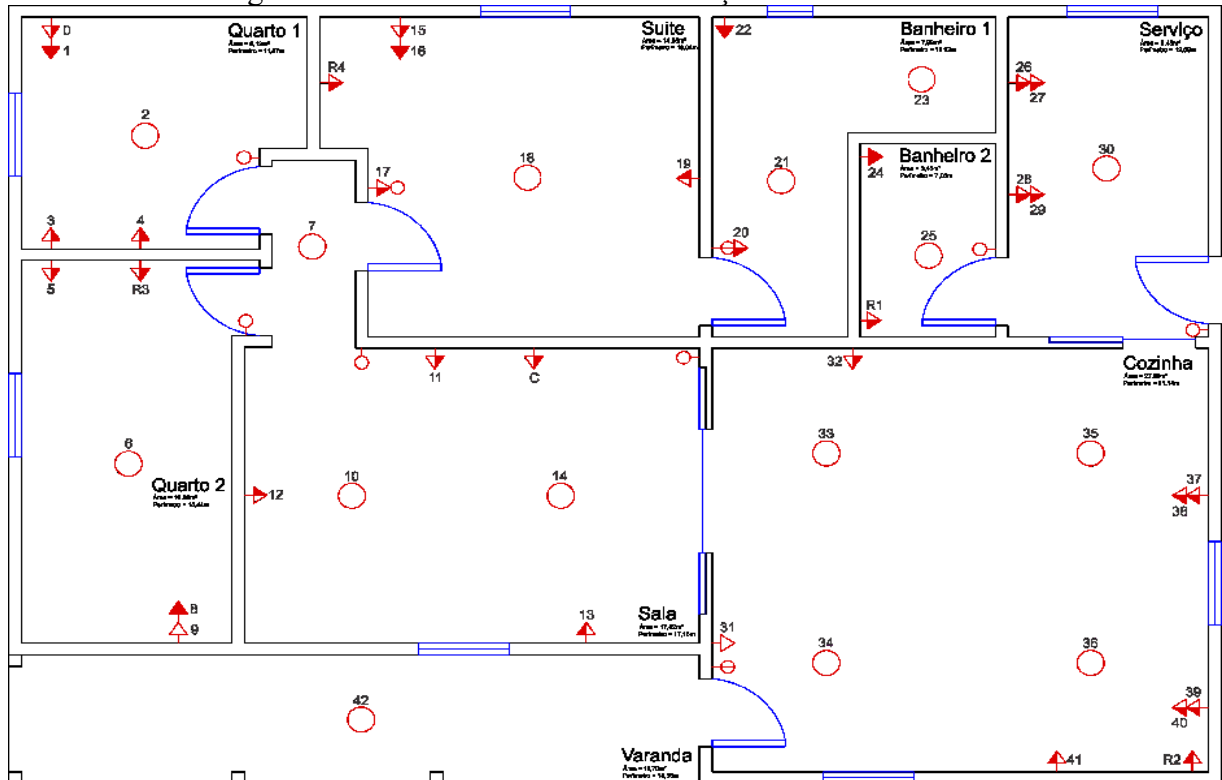
4.2 SIMULAÇÃO

A simulação foi implementada no programa OMNeT++ com o *framework* INET. Inicialmente, foram realizados testes com os exemplos de redes sem fio da própria biblioteca.

Existem muitas documentações e uma comunidade ativa, que auxilia no desenvolvimento de modelo de testes. Encontram-se mais simulações do padrão IEEE 802.11, por segundo o modelo IEEE 802.15.4 e, por fim, poucos exemplos de Sub-GHz. Logo, optou-se por iniciar os testes na solução Wi-Fi.

Todos os testes foram realizados baseados na planta baixa da Figura 27 e as numerações, que representam ponto de energia monitorados, serão utilizadas como referência para demonstração dos resultados.

Figura 27 - Planta baixa com a numeração de todos os nodos.



Fonte: do autor.

O ambiente físico foi inserido utilizando a aplicação denominada *Physical Enviromental* do INET. A criação dos obstáculos foi realizada por coordenadas criadas num arquivo XML, o código fonte está no Apêndice F.

Após a criação do ambiente, cinco nodos foram posicionados na simulação, baseados no experimento prático. Em seguida, iniciou-se os testes para validação da simulação, com o intuito de inserir variáveis de interferência interna e externa ao ambiente. O objetivo é obter valores próximos aos resultados do experimento. Na sequência, a quantidade de nodos é aumentada, conforme a Figura 27.

As variáveis alteradas são denominadas Sigma e *PacketRateError*, ambas interferem nas perdas dos pacotes no envio em relação ao ambiente. Somente utilizando essas variáveis não foi possível obter aproximação, logo optou-se por alterar individualmente a potência de transmissão dos nodos. O processo de obtenção dos resultados foi por tentativa e erro.

Assim, os resultados obtidos na calibração estão representados abaixo, na Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5. Os dados são referentes ao percentual da taxa de sucesso do processo.

Tabela 3 – Taxa de sucesso dos nodos nos testes com Sub-GHz.

Nodo	20B		40B		60B	
	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
R1	93,48%	92,49%	86,51%	86,90%	88,93%	89,03%
R2	87,62%	88,03%	90,17%	90,99%	83,16%	84,44%
R3	88,68%	87,89%	89,49%	88,75%	84,76%	84,79%
R4	83,67%	83,72%	90,17%	89,37%	89,76%	88,93%

Fonte: do autor.

Tabela 4 – Taxa de sucesso dos nodos nos testes com Wi-Fi.

Nodo	20B		40B		60B	
	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
R1	97,33%	97,35%	79,90%	79,21%	84,81%	84,19%
R2	97,32%	97,31%	79,65%	79,08%	82,42%	82,42%
R3	81,53%	81,31%	88,38%	88,46%	85,92%	85,83%
R4	99,45%	99,43%	80,58%	80,40%	95,92%	95,85%

Fonte: do autor.

Os resultados possuem divergência máxima de 1,48% de erro em valores absolutos, ocorrida no Nodo 1 da simulação com pacotes de 60 B do ZigBee.

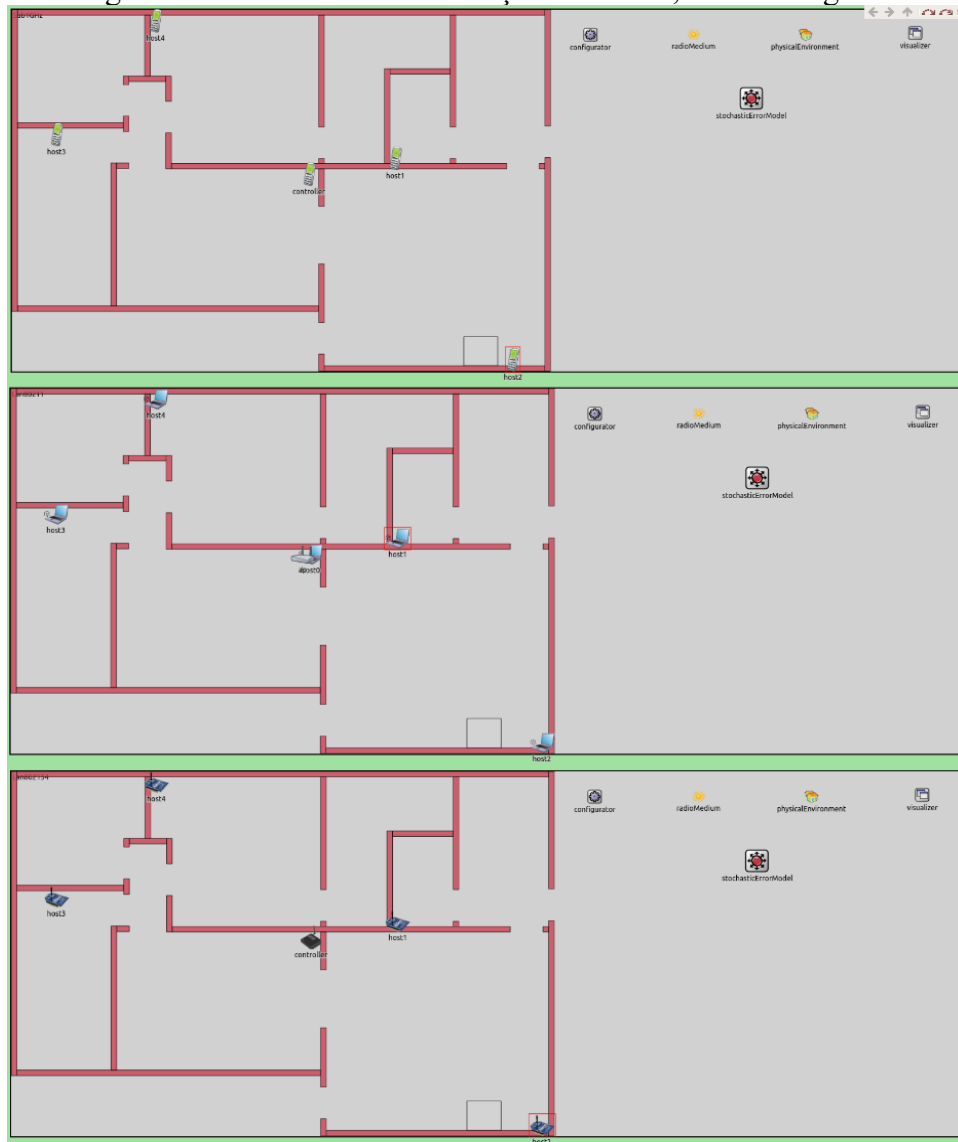
Tabela 5 – Taxa de sucesso dos nodos nos testes com ZigBee.

Nodo ZigBee	20B		40B		60B	
	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
R1	99,86%	99,85%	92,30%	92,98%	81,54%	83,02%
R2	99,92%	99,83%	93,94%	93,47%	80,55%	81,94%
R3	99,89%	99,56%	88,05%	88,00%	80,99%	80,67%
R4	99,81%	99,83%	92,27%	93,37%	77,25%	78,34%

Fonte: do autor.

As simulações criadas no simulador OMNeT++ podem ser vistas na Figura 28.

Figura 28 - Ambientes de simulação Sub-GHz, Wi-Fi e ZigBee.



Fonte: do autor.

Logo, os ambientes estão preparados para a segunda etapa de teste, com a inserção dos 47 nodos que representam os pontos de energia da residência. A potência de transmissão dos nodos virtuais foi inserida através de um mapeamento baseado nos resultados reais.

Os nodos foram inseridos em diferentes alturas, sendo 0,30 m para os pontos de tomada baixa, 1,2 m para as tomadas de nível médio, 2 m para as tomadas altas e 2,5 m para os pontos de luz.

A inserção dos 47 nodos causa um impacto negativo na qualidade da comunicação, pois aumenta o tráfego de dados e as interferências. Logo, os resultados obtidos condizem com a teoria sobre redes sem fio, observando que todos os nodos tiveram redução de desempenho.

A simulação utilizando a rede Sub-GHz apresentou significativa redução da taxa de sucesso. Essa drástica diminuição do desempenho ocorreu devido a ausência de um controle de acesso ao meio do rádio e sua baixa taxa de transmissão. O nodo 1 apresentou a maior taxa de sucesso em todos os testes, este encontra-se a uma distância maior em relação a vários outros pontos da casa. O nodo 11 apresentou o pior resultado no teste com 20 B, sendo que esse ponto é o mais próximo ao coordenador e sem barreiras.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos na simulação com 5 e 47 nodos, representados, respectivamente, por “Antes” e “Depois” e com diferentes tamanhos de pacotes (20, 40 e 60 bytes). É importante mencionar que o cenário com 5 nodos é o mesmo do experimento prático.

Tabela 6 - Taxa de sucesso dos nodos R1 a R4 da simulação Sub-GHz.

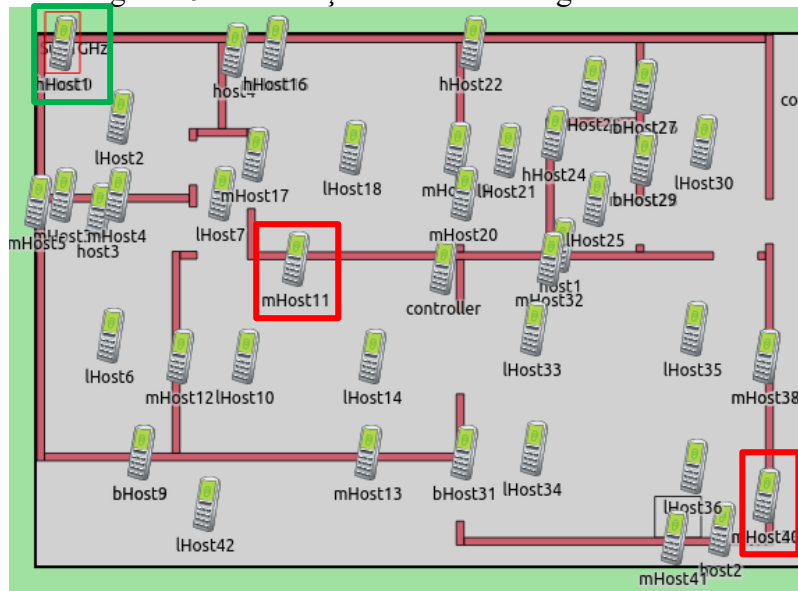
Nodo	20B		40B		60B	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
R1	93,48%	37,08%	86,51%	37,08%	88,93%	35,42%
R2	87,62%	47,36%	90,17%	47,36%	83,16%	30,83%
R3	88,68%	37,22%	89,49%	37,22%	84,76%	44,44%
R4	83,67%	42,22%	90,17%	42,22%	89,76%	27,50%
Valor Médio	88,36%	44,09%	89,08%	45,19%	86,65%	36,38%
Melhor Caso	Nodo 1		Nodo 1		Nodo 1	
Pior Caso	Nodo 11		Nodo 39		Nodo 39	

Fonte: do autor.

A Figura 29 apresenta uma representação gráfica da simulação com a tecnologia Sub-GHz construída no OmNET++, a qual serve de complemento à Tabela 6. Nesta figura, os nodos

com as piores taxas de sucesso estão circulados em vermelho e os nodos com as melhores taxas estão demarcados em verde.

Figura 29 - Simulação com a tecnologia Sub-GHz.



Fonte: do autor.

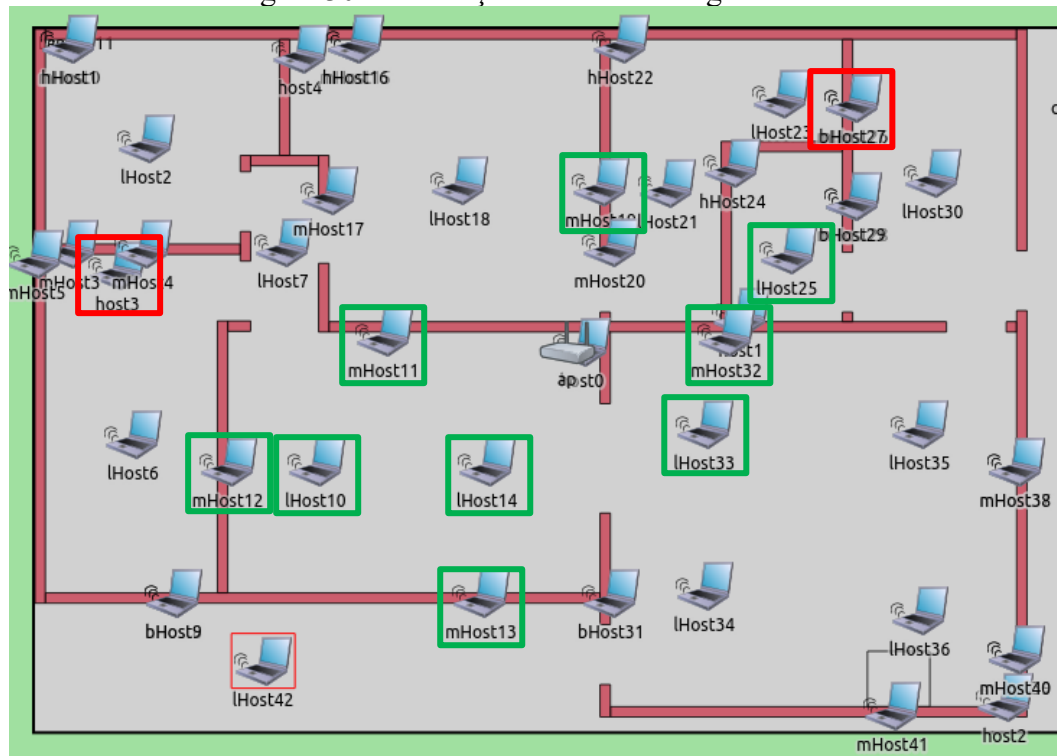
Os resultados da simulação com a rede sem fio Wi-Fi podem ser observados na Tabela 7. A tecnologia do padrão IEEE 802.11 obteve as maiores taxas de sucesso, com valores médios próximos a 90%. Os nodos R1, R2, R3 e R4 apresentam leve redução de desempenho, porém o valor médio teve melhora em comparação aos testes com apenas os 4 nodos. A Figura 30 ilustra essa simulação realizada com a tecnologia Wi-Fi.

Tabela 7 - Resultados da taxa de sucesso dos nodos R1 a R4 da simulação Wi-Fi.

Nodo	20B		40B		60B	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
R1	97,35%	96,53%	79,21%	78,19%	84,19%	84,72%
R2	97,31%	96,81%	79,08%	75,83%	82,42%	80,83%
R3	81,31%	77,92%	88,46%	85,97%	85,83%	84,03%
R4	99,43%	99,03%	80,40%	74,03%	95,85%	94,03%
Valor Médio	93,91%	95,29%	82,13%	86,63%	87,27%	89,03%
Melhor Caso	Nodos 11,13,14,19, 20, 21, 25, 32, 33		Nodos 10, 12, 13, 14		Nodos 10,11,12,13, 14, 19, 20, 21, 32	
Pior Caso	Nodo 3		Nodo 27		Nodo 3	

Fonte: do autor.

Figura 30 - Simulação com a tecnologia Wi-Fi.



Fonte: do autor.

Os testes com o ZigBee foram os únicos que apresentaram uma relação entre taxa de sucesso e tamanho do pacote, onde a simulação com mensagens de 60 B tiveram os piores resultados. A tecnologia obteve significativa redução de desempenho com a inserção dos 47 nodos, o impacto diminui a taxa de sucesso para valores médios próximo a 30%. Os resultados apresentados na Tabela 8 comprovam que uma taxa de transmissão menor, na escala de Kbps, não é suficiente para lidar com a quantidade de pontos de comunicação apresentados.

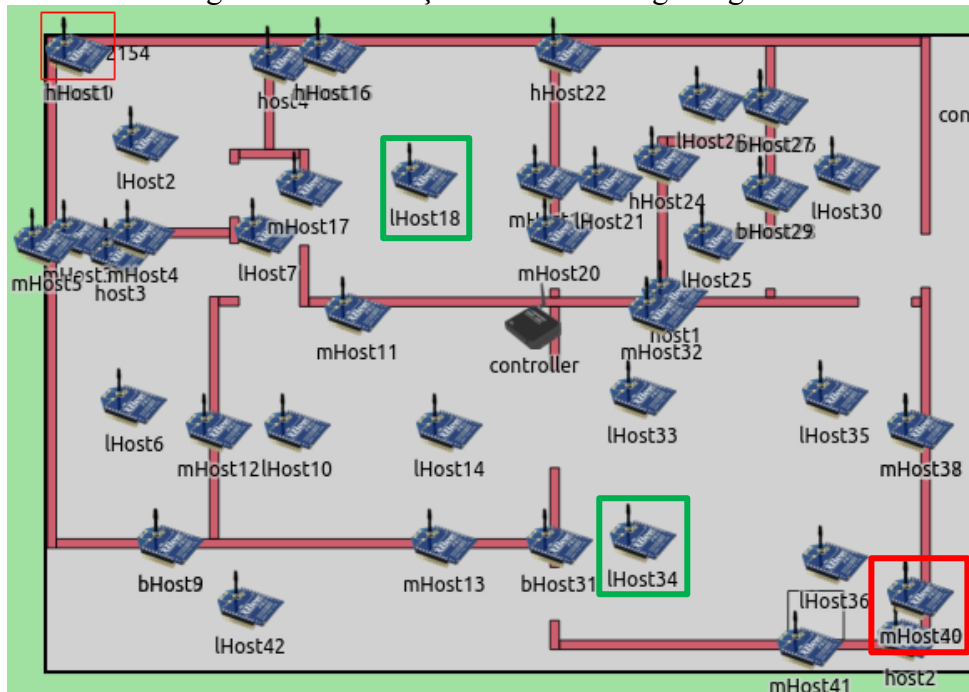
Tabela 8 - Resultados da taxa de sucesso dos nodos R1 a R4 da simulação ZigBee.

Nodo	20B		40B		60B	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
R1	99,85%	56,25%	92,98%	22,92%	83,02%	20,83%
R2	99,83%	60,14%	93,47%	38,33%	81,94%	31,53%
R3	99,56%	67,08%	88,00%	28,06%	80,67%	24,86%
R4	99,83%	70,83%	93,37%	34,17%	78,34%	29,03%
Valor Médio	99,87%	63,00%	91,64%	33,96%	80,08%	30,78%
Melhor Caso	Nodo 34		Nodo 18		Nodo 18	
Pior Caso	Nodo 39		Nodo 39		Nodo 39	

Fonte: do autor.

Por fim, para complemento da Tabela 8, apresenta-se a Figura 31, com o demonstrativo dos nodos com melhor e pior taxas de sucesso da simulação com a tecnologia ZigBee.

Figura 31 - Simulação com a tecnologia ZigBee.



Fonte: do autor.

Analisando os melhores e piores nodos, em referência a porcentagem de pacotes recebidos, é possível concluir:

- a) no Wi-Fi existem diversos nodos que obtiveram 100% de taxa de sucesso. O principal fator que reduz o desempenho da tecnologia é a interferência e a distância entre o coordenador e os nodos, pois os pontos com maiores taxas estão mais próximo ao AP e o piores casos mais distantes;
- b) Sub-GHz teve seu desempenho prejudicado por falta de um controle MAC, esse foi desativado na simulação também. A distância e as barreiras não impactam o desempenho da tecnologia, dentro da realidade de residências, pois a melhor taxa foi do Nodo 1 que está mais distante em relação a outros; e
- c) o ZigBee foi afetado pelo aumento do número de nodos, mesmo tendo um controle de acesso ao meio. Os nodos com maior taxa de pacotes enviados estão próximos ao coordenador e o pior caso foi o Nodo 39, este está distante e com uma barreira significativa.

Em vista dos argumentos apresentados e dados obtidos, conclui-se que o Wi-Fi é a melhor solução do ponto de vista de técnico. Sua média de taxa de sucesso foi de 90,32%, em comparação com o Sub-GHz de 41,89% e o ZigBee de 42,68%. O padrão 802.11 é a rede sem fio mais utilizada no mundo, sendo que um alto percentual de residências no Brasil já possui um AP com essa solução difundida. A criação do padrão ah, mixando Wi-Fi e Sub-GHz aumentam a gama de aplicações, oportunizando a utilização deste modelo em produtos alimentados por bateria. A alta taxa transmissão permite que o Wi-Fi atenda uma grande quantidade de requisições com pacotes de tamanho expressivos e ainda possibilita a utilização de diferentes topologias de rede com o modo ad hoc.

4.3 ANÁLISE ECONÔMICA

Um ponto muito importante para a popularização da SH é o custo acrescido nos produtos, por isso que a tecnologia precisa ter um amplo espaço consolidado no mercado e pouco impacto no preço final.

O custo direto de cada solução foi levantado a partir de uma pesquisa com fornecedores, onde o valor está baseado no preço FOB² (*Free On Board*, tradução livre para Livre a Bordo) em dólares. A quantidade utilizada na cotação foi de dez mil unidades de módulos, com o intuito de reduzir o preço e simular uma negociação de nível industrial. A cotação foi realizada através de contato direto, através de e-mail e pelo próprio *site*, com fornecedores certificados da loja on-line Alibaba. Na Tabela 9 consta os valores orçados.

Tabela 9 - Custo direto dos módulos baseado num orçamento de dez mil unidades.

Tecnologia	Custo Direto (US\$)
Sub-GHz	0,56
Wi-Fi	1,00
ZigBee	3,70

Fonte: (ALIBABA, 2017a, 2017b, 2018).

A tecnologia Wi-Fi e Sub-GHz ficaram com custos diretos próximos, na faixa abaixo de um dólar, enquanto o ZigBee possui um preço consideravelmente mais elevado.

Na relação custo direto e benefício, o Wi-Fi apresenta maiores ganhos, mesmo com um valor pouco maior que o Sub-GHz, pois a solução vem com um microcontrolador integrado

² Nesta modalidade de compra a mercadoria fica disponível para frete, cabendo ao comprador arcar com os custos de transporte e seguro.

com GPIO digitais e analógicas. Isso possibilita que apenas o módulo sirva como solução de algumas implementações, permitindo o controle e sensoriamento em conjunto com a comunicação. Outro benefício, é a existência de uma pilha de protocolos já implementada no módulo, com aplicações TCP/IP e UDP, facilitando o desenvolvimento de um produto com a tecnologia.

As tecnologias que operam no espectro do Sub-GHz estão em processo de normatização, sendo visada como co-solução, junto ao Wi-Fi, para aplicações de gerenciamento de demanda e energia dentro de uma SH. Os módulos presentes no mercado possuem ampla gama de utilizações, sendo escolhido para operações de pequenas automações residenciais ponto-a-ponto. Esses fatores tornam os rádios Sub-GHz competitivos na questão de custo direto. O modelo selecionado para o experimento é um módulo de comunicação puro, sem a possibilidade de operações com GPIO (*General Purpose Input Output*) e nenhum protocolo inserido no protocolo. Isso exige que o módulo opere com uma placa com sistema embarcado para controlar e realizar o sensoriamento da aplicação, como também um trabalho mais árduo de projeto e desenvolvimento de um protocolo de comunicação.

Por fim, na análise de custo direto, o módulo ZigBee apresentou maior valor de mercado e solução semelhante ao rádio Wi-Fi. Os modelos encontrados possuem microcontroladores embarcados com possibilidade de controle e sensoriamento simples através de GPIO. Os rádios já vêm com uma pilha de protocolos do padrão IEEE 802.15.4, facilitando o projeto e desenvolvimento de produtos com essa tecnologia.

O segundo aspecto importante a ser analisado é o consumo de energia de cada tecnologia. Esse custo possui diversos fatores, que são de difícil previsibilidade e não estarão previstos nesse trabalho, como: tipo de alimentação, variação do preço de energia, grupos tarifários, entre outros.

Logo, essa etapa da análise apenas retrata o consumo direto de energia de cada tecnologia e apresenta um resultado qualitativo classificado de acordo com as possíveis aplicações de gerenciamento de energia dentro de uma SH.

O consumo de energia de cada componente varia de acordo com o modo de operação, normalmente dividido nos modos: dormindo, recebendo e transmitindo. A Tabela 10 apresenta os consumos de corrente de cada tecnologia nos diferentes modos.

Todos os módulos utilizados possuem modo dormindo, nesse tipo de operação o microcontrolador tem seu funcionamento suspenso, sendo acordado por um sinal externo via serial, e apenas os componentes passivos consomem energia. Isso acarreta num valor baixo de corrente na casa dos microamperes.

Tabela 10 - Consumo de corrente nos diferentes modos de operação.

Tecnologia	Dormindo [μA]	Recebendo [mA]	Transmitindo [mA]
Sub-GHz	80	16	100
Wi-Fi	10	50	170
ZigBee	1,10	40	40

Fonte: (ELECROW, 2012; INTERNATIONAL, 2012; SHENZHEN ANXINKE TECHNOLOGY, 2015).

No modo de recepção o componente permanece num estado mais passivo, aguardando a chegada de informações e utilizando o microcontrolador para interpretar a mensagem. Assim, o consumo normalmente é reduzido em relação ao modo de transmissão.

Quando o módulo vai transmitir a informação existe o maior consumo de corrente, esse modo é mais ativo e requer mais energia para polarizar a antena e via onda eletromagnética enviar os dados.

Comparando as tecnologias, observa-se que a tecnologia Wi-Fi possui o maior consumo, como alertado pelos autores na revisão sistemática. Isso é um problema relatado em diversos trabalhos devido a associação entre SH e IoT, onde existem numerosas aplicações com alimentação à bateria. Analisando num âmbito isolado de casa inteligente, é perceptível que as soluções para gerenciamento de energia sempre estarão conectadas à rede elétrica, pois, é o objetivo principal é o controle da demanda das cargas ligadas.

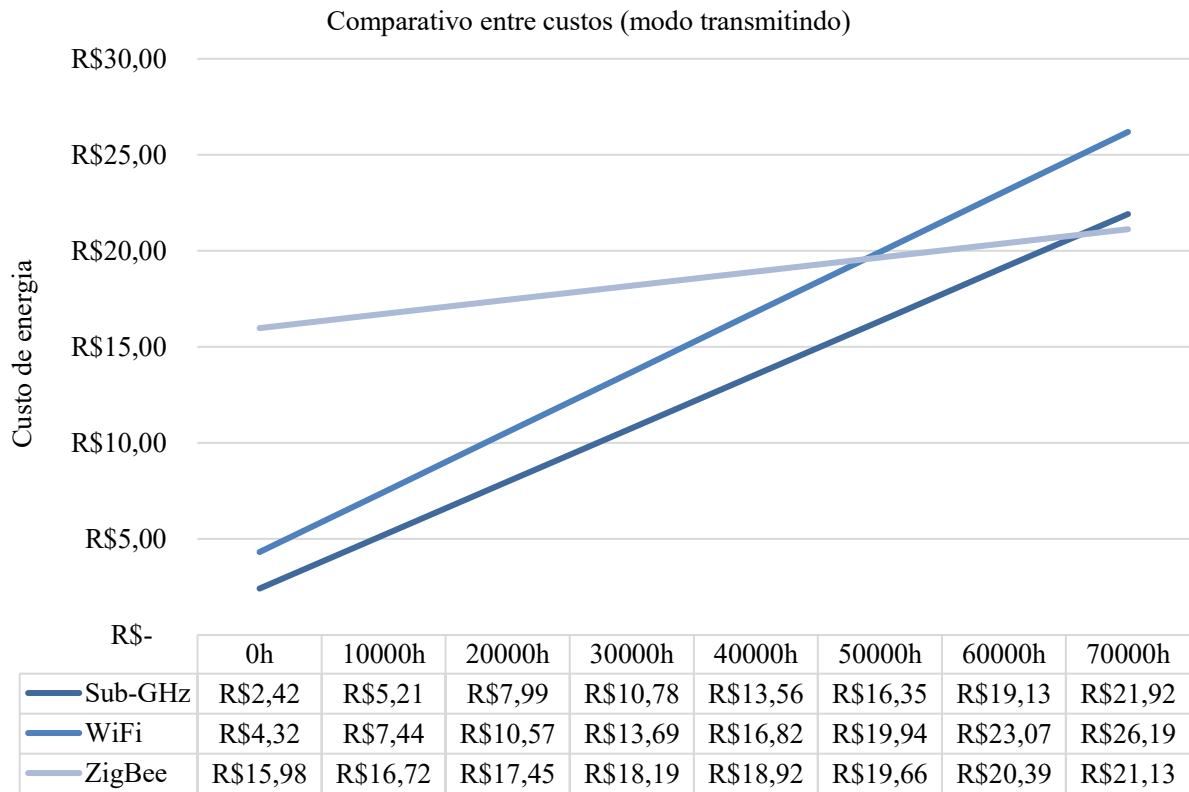
Logo, a análise econômica centraliza no consumo de energia elétrica proveniente da rede da concessionária. O perfil de uso interfere na energia solicitada pelo módulo, pois existem aplicações onde um nodo é apenas receptor, ou transmissor, com operação em modo dormindo ou sem.

Assim, realizou-se três comparações e correlação entre custo direto e consumo de energia nos três modos. O caso onde o ponto de equilíbrio entre as tecnologias é alcançado em menor tempo é quando operando em transmissão, analisando o custo inicial e acrescentando o valor da energia considerando tempo de uso. Baseado na tarifa atual da CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina) de R\$ 0,557 por kWh e cotação do dólar de R\$ 4,32, montou-se o gráfico apresentado na Figura 32.

Existem dois pontos de equilíbrio, para a comparação entre o Wi-Fi e o ZigBee, a segunda tecnologia se torna viável após 5,57 anos de uso. Enquanto relacionando o Sub-GHz e o ZigBee, a viabilidade do segundo modelo é alcançado com 7,55 anos. Esses valores estão

baseados em custos atuais e podem sofrer variação de acordo com a tarifa de energia elétrica, preço dos módulos, manutenção dos equipamentos, dentre outros fatores.

Figura 32 - Comparativo entre os custos de operação das tecnologias.



Fonte: do autor.

Porém, esse panorama de operação apenas em modo de transmissão durante todo o período de funcionamento não deve ocorrer, pois os nodos necessitam enviar um pacote num valor base de tempo. Esses intervalos acarretam num perfil misto de trabalho intercambiando nos três modos.

Quando comparamos nos perfis dormindo e recebendo, o tempo para o ponto de equilíbrio aumenta para valores superiores a 70 anos. Logo, conclui-se que economicamente o ZigBee, mesmo tendo as menores correntes de consumo, é a solução menos viável, devido ao alto preço da tecnologia. Ressalta-se que não estão sendo considerados os desgastes dos componentes e nem a interferência do ambiente sobre o funcionamento dos módulos.

As tecnologias Sub-GHz e Wi-Fi possuem vantagens e desvantagens numa faixa de custo aproximada. Enquanto o módulo Wi-Fi possui microcontrolador, protocolo implementado e maior taxa de transmissão, o rádio Sub-GHz tem um maior alcance, menor consumo de corrente e custo inicial. Assim, a escolha dentre as duas soluções depende da aplicação e custo de projeto.

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo encontram-se as considerações finais da dissertação. Inicialmente são revisadas as motivações e objetivos, é reforçada a visão geral do trabalho realizada e são discutidas as principais conclusões do trabalho de pesquisa proposto nesta dissertação. Ainda são sugeridos temas para futuros trabalhos visando a continuidade da pesquisa apresentada.

5.1 REVISÃO DAS MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS

O conceito da Casa Inteligente (*smart homes*) traz diversos benefícios para o consumidor e o sistema elétrico como um todo, essas vantagens vêm acompanhadas de barreiras e desafios para sua implementação. As principais soluções para a comunicação entre os dispositivos dentro de uma SH são as redes sem fio.

O gerenciamento de demanda de energia é uma atividade que emprega pacotes de dados de tamanho pequeno e periodicidade na casa das centenas de milissegundos, visto que pode ser enquadrado como uma operação de controle em malha aberta. Logo, a rede sem fio deve conseguir realizar a comunicação de acordo com esses requisitos de dezenas, ou centenas, de nodos em operação centralizada.

Além do desafio técnico, existe a barreira econômica que caso a implementação de um módulo de comunicação aumente seu custo consideravelmente, a expansão para todos os dispositivos será prejudicada.

Assim, esse trabalho buscou as respostas sobre a tecnologia de rede sem fio que melhor atenderá o gerenciamento e demanda de uma SH técnica e economicamente. A resposta, baseado em dados obtidos de simulações e análise de custos atualmente, indica que o Wi-Fi é a tecnologia mais adequada para tal implementação. Existe a possibilidade implementação de um modelo 802.11ah, desenvolvido para aplicações IoT, sendo essa a melhor alternativa, operando com duas frentes de transmissão. A saturação não demonstrou ser um problema para a aplicação em SH, observou-se que a alta taxa de transmissão da tecnologia, em conjunto com os pacotes com poucos bytes utilizados no gerenciamento, permitiu obter bons resultados de pacotes enviados/recebidos. Existem inúmeros módulos Wi-Fi e esses são os que possuem os menores valores de mercado. Uma outra grande vantagem do Wi-Fi é a sua ampla e adequada padronização, o que facilita o projeto de novos dispositivos, reduzindo o custo não relativo.

5.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO

Esse trabalho auxilia na busca pela rede sem fio com os melhores resultados do ponto de vista técnico e econômico, aplicada num ambiente de SH, onde todos os pontos de tomadas e iluminação são considerados nodos de comunicação.

5.3 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

A definição da melhor tecnologia de rede sem fio permite um avanço mais rápido da *smart grid*, visto que uma das barreiras mais relatadas pelos autores para sua expansão é a grande oferta de tecnologias de comunicação e a falta de interoperabilidade entre elas.

Esse trabalho contribui com uma análise técnica e econômica das três principais tecnologias apontadas no mercado. A fim de elencar uma solução de rede sem fio para aplicações em SH para o gerenciamento de demanda e energia.

Considerando os resultados obtidos na simulação, calibrada através dos resultados de experimentos práticos, e a análise econômica correlacionando custo direto e consumo de energia, optou-se por indicar o padrão IEEE 802.11 como principal candidato para gerenciamento de energia e demanda em SH.

As principais contribuições dessa dissertação estão relacionadas com a elaboração da revisão sistemática elaborada sobre o tema, os algoritmos implementados em Arduino para comunicação de três modelos de redes sem fio, os algoritmos escritos para o OmNET++ no framework INET e os resultados obtidos no experimento prático e na simulação.

Os resultados obtidos do trabalho foram utilizados para a elaboração de um artigo que se encontra em revisão para possível publicação na revista *IEEE Latin America Transactions*.

5.4 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se pesquisas nos seguintes temas:

- a) aplicar a metodologia experimental de uma SH em escalas reais;
- b) realizar o comparativo econômico mais apurado, com a inserção dos custos não relativos;
- c) realizar o comparativo técnico de redes sem fio com protocolos proprietários;
- d) aplicar metodologia para implementação do novo padrão 802.11ah; e
- e) realizar uma análise técnica baseada em mais cenários.

REFERÊNCIAS

AKYILDIZ, I. F.; KASIMOGLU, I. H. A protocol suite for wireless sensor and actor networks. **Radio and Wireless Conference, 2004 IEEE**, p. 11–14, 2004.

ALI, A. et al. **Technologies and challenges in developing Machine-to-Machine applications: A survey** *Journal of Network and Computer Applications* Academic Press, , 1 abr. 2017.

ALIBABA. **Esp-12 Esp 8266 Módulo Wi-fi Transceptor Sem Fio**. Disponível em: <<https://portuguese.alibaba.com/product-detail/esp8266-esp-12-serial-wifi-module-wireless-transceiver-esp-8266-module-60805062148.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.78147ab1KqSflK>>. Acesso em: 5 fev. 2020a.

ALIBABA. **433 MHz HC-12 SI4463 Módulo Sem Fio**. Disponível em: <<https://portuguese.alibaba.com/product-detail/433mhz-hc-12-si4463-wireless-serial-port-module-1000m-replace-blue-tooth-new-62031552763.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.44f139cczrMPw8>>. Acesso em: 5 fev. 2020b.

ALIBABA. **IEEE 802.15.4 Zigbee CC2530 Módulo Sem Fio**. Disponível em: <<https://portuguese.alibaba.com/product-detail/2-4g-ieee-802-15-4-programmed-tuya-home-automation-cc2530-wireless-module-zigbee-module-zigbee-62364508896.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.1461713dJLKtft>>. Acesso em: 5 fev. 2020.

ANALOG DEVICES. Single-Phase Multifunction Metering IC with di / dt Sensor Interface. **Communications**, 2009.

ANDRÁS VARGA. **OMNeT++: User Guide**, 2016. Disponível em: <<https://omnetpp.org/doc/omnetpp/UserGuide.pdf>>. Acesso em: 3 jun. 2018

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 375, de 25 de agosto de 2009**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2009375.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2019a.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 395, de 15 de dezembro de 2009**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ect1996005_2.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2019b.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2019a.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 479, de 03 de abril de 2012**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012479.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2019b.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 502, de 07 de agosto de 2012**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012502.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2019c.

ASHTON, K. **That “Internet of Things” Thing: In the real world, things matter more than ideas.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>>. Acesso em: 9 jun. 2019.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**, v. 54, p. 2787–2805, 2010.

AUST, S.; PRASAD, R. V.; NIEMEGERES, I. G. M. M. **Performance evaluation of Sub 1 GHz wireless sensor networks for the smart grid.** Proceedings - Conference on Local Computer Networks, LCN. **Anais...2012**

BARROS, B. F. et al. **Sistema Elétrico De Potência: Guia Prático SEP.** 1. ed. [s.l.] Érica, 2012.

BELCREDI, G. et al. **An implementation of a home energy management platform for Smart Grid.** 2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America, ISGT LATAM 2015. **Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.**, 12 jan. 2016

BERRÍO, L.; ZULUAGA, C. **Concepts, standards and communication technologies in smart grid.** 2012 IEEE 4th Colombian Workshop on Circuits and Systems, CWCAS 2012 - Conference Proceedings. **Anais...2012**

BURUNKAYA, M.; PARS, T. **A smart meter design and implementation using ZigBee based Wireless Sensor Network in Smart Grid.** 2017 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE 2017. **Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.**, 30 maio 2017

CARVALHO, P. DE. **Smart Grid in Brazil: perspective and possibilities.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://marinasilva.org.br/dia-de-realizar-sonhos/>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

CECILIA, A. A.; SUDARSANAN, K. **A survey on smart grid.** 1st International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science, ICETETS 2016 - Proceedings. **Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.**, 19 out. 2016

CESÁRIO JÚNIOR, J. M. **Um medidor de energia elétrica integrado em redes de comunicações.** [s.l.] UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE TECNOLOGIA, 2014.

CGEE. **Redes Elétricas Inteligentes: contexto nacional.** Brasília: [s.n.]. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Redes_Eletricas_Inteligentes_22mar13_9539.pdf/36f87ff1-43ed-4f33-9b53-5c869ace9023?version=1.1>. Acesso em: 16 jan. 2019.

CHEN, S.-L.; CHANG, S.-K.; CHEN, Y.-Y. Development of a Multisensor Embedded Intelligent Home Environment Monitoring System Based on Digital Signal Processor and Wi-Fi. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 11, n. 6, p. 171365, jun. 2015.

CHHAYA, L. et al. Communication theories and protocols for smart grid hierarchical network. **Journal of Electrical and Electronics Engineering**, v. 10, n. 1, p. 43–48, 2017.

COLLOTTA, M.; PAU, G. Bluetooth for Internet of Things: A fuzzy approach to improve

power management in smart homes. **Computers and Electrical Engineering**, v. 44, p. 137–152, 1 maio 2015a.

COLLOTTA, M.; PAU, G. A Solution Based on Bluetooth Low Energy for Smart Home Energy Management. **Energies**, v. 8, n. 10, p. 11916–11938, 21 out. 2015b.

DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: Hit or hype? [Industry Forum]. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 8, n. 2, p. 56–58, 2014.

EL-HAWARY, M. E. The smart grid - State-of-the-art and future trends. **Electric Power Components and Systems**, v. 42, n. 3–4, p. 239–250, 2014.

ELECROW. **HC-12 Wireless Serial Port Communication Module User Manual**. [s.l.: s.n.].

EMMANUEL, M.; RAYUDU, R. **Communication technologies for smart grid applications: A survey** *Journal of Network and Computer Applications* Academic Press, , 1 out. 2016.

EVANS, D. A Internet das Coisas: Como a próxima evolução da Internet está mudando tudo. 2011.

FLICKENGER, R. **Redes sem fio no Mundo em Desenvolvimento**. 3ª ed. [s.l.] Hacker Friendly, 2008.

GALO, J. J. M. et al. Criteria for smart grid deployment in Brazil by applying the Delphi method. **Energy**, p. 7, 2014.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. [s.l.: s.n.].

GHOSH, A.; CHAKRABORTY, N. **Design of smart grid in an University Campus using ZigBee mesh networks**. 1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, ICPEICES 2016. **Anais...**Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 13 fev. 2017

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 5ª ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GREGIO, K. et al. A review on smart grids and experiences in Brazil. 2015.

GUNGOR, V. C. et al. **Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/18406/Gungor_Smart%282011%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 jan. 2019.

GUNGOR, V. C. et al. Smart Grid and Smart Homes: Key Players and Pilot Projects. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, n. december, p. 18–34, 2012.

GUNGOR, V. C. et al. A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 9, n. 1, p. 28–42, fev. 2013.

HADLACH, H. et al. Modeling of a Smart Grid Monitoring System X sing Power Line Communication. **2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference**

(IRSEC), p. 1–4, 2017.

HUQ, M. Z.; ISLAM, S. Home Area Network technology assessment for demand response in smart grid environment. **AUPEC 2010 - 20th Australasian Universities Power Engineering Conference: “Power Quality for the 21st Century”**, 2010.

IEA. **Technology Roadmap: Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.iea.org/about/copyright.asp>. Acesso em: 15 jan. 2019.

IEA. **Key world energy statistics**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2019.

INTERNATIONAL, D. XBee ® / XBee-PRO ® ZB RF Modules Digi International Inc . **Digi International Inc**, n. March, p. 1–155, 2012.

JORDÁN CÓRDOVA, C. E. P. et al. Overview and Comparison of Leading Communication Standard Technologies for Smart Home Area Networks Enabling Energy Management Systems. **46th International Universities’ Power Engineering Conference**, n. September, p. 1–6, 2011.

KAILAS, A.; CECCHI, V.; MUKHERJEE, A. **A survey of communications and networking technologies for energy management in buildings and home automation** *Journal of Computer Networks and Communications*, 2012.

KUMAR, A. A.; OVSTHUS, K.; KRISTENSEN, L. M. An industrial perspective on wireless sensor networks-a survey of requirements, protocols, and challenges. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 16, n. 3, p. 1391–1412, 2014.

KUZLU, M.; PIPATTANASOMPORN, M.; RAHMAN, S. **Review of communication technologies for smart homes/building applications**. Proceedings of the 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, ISGT ASIA 2015. **Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.**, 19 jan. 2016

MAHMOOD, A.; JAVAID, N.; RAZZAQ, S. **A review of wireless communications for smart grid** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Elsevier Ltd, , 2015.

MENDES, T. D. P. et al. Smart home communication technologies and applications: Wireless protocol assessment for home area network resources. **Energies**, v. 8, n. 7, p. 7279–7311, 2015a.

MENDES, T. D. P. et al. **Smart and energy-efficient home implementation: Wireless communication technologies role**. 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG). **Anais...IEEE**, maio 2015b Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7266346/>>. Acesso em: 12 jun. 2017

MME. **Programa Luz para Todos**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/6-programa-luz-para-todos.>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

MULLA, A. Y. et al. **Implementation of ZigBee/802.15.4 in Smart Grid communication and analysis of power consumption: A case study.** 11th IEEE India Conference: Emerging Trends and Innovation in Technology, INDICON 2014. **Anais...**Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 3 fev. 2015

MUQSIT, S. et al. Effective Smart Home System Based On Flexible Cost In Pakistan. **Hct Information Technology Trends**, n. Itt, p. 25–26, 2017.

NGUYEN, T. et al. **A Miniature Smart Home Testbed for Research and Education.** 2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems, CYBER 2017. **Anais...**Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 24 ago. 2018

OLLER, J. et al. Has Time Come to Switch from Duty-Cycled MAC Protocols to Wake-up Radio for Wireless Sensor Networks? **IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING**, 2016.

OZCELIK, I. M.; KORPEOGLU, I.; AGRAWALA, A. Energy Efficient IP-Connectivity with IEEE 802.11 for Home M2M Networks. **Computer Journal**, v. 60, n. 6, p. 883–897, 1 jun. 2017.

PEREIRA, R. **O que é Geração Distribuída – GD.** Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/o-que-e-geracao-distribuida.html>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

PETRUCCI, C. **Mercado Imobiliário.** São Paulo: SECOVI, 2018Disponível em: <<http://www.secovi.com.br/downloads/pesquisas-e-indices/balancos-do-mercado/2017/arquivos/anuario-do-mercado-imobiliario-2017-celso-petrucci.pdf>>. Acesso em: 31 maio. 2018

PINTO, M. DE O. **Energia Elétrica: Geração, Transmissão e Sistemas Interligados.** 1ª ed. [s.l.] LTC, 2013.

RIVERA, R.; ESPOSITO, A. S.; TEIXEIRA, I. **Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2927/1/RB_40_Redetes_el%C3%A9tricas_inteligentes_P.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2019.

SAAD AL-SUMAITI, A.; AHMED, M. H.; SALAMA, M. M. A. Smart home activities: A literature review. **Electric Power Components and Systems**, v. 42, n. 3–4, p. 294–305, 2014.

SANTOS, B. P. et al. **Internet das Coisas: da Teoria à Prática.** Belo Horizonte: [s.n.]. Disponível em: <<https://homepages.dcc.ufmg.br/~mmvieira/cc/papers/internet-das-coisas.pdf#page=46&zoom=100,0,356>>. Acesso em: 9 jun. 2019.

SARIJARI, M. A. et al. **Coexistence of Heterogeneous and Homogeneous Wireless Technologies in Smart Grid-Home Area Network.** 2013 International Conference on Parallel and Distributed Systems. **Anais...IEEE**, dez. 2013Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6808240/>>. Acesso em: 18 jul. 2017

SETHI, P.; SARANGI, S. R. **Internet of Things: Architectures, Protocols, and**

Applications Journal of Electrical and Computer Engineering Hindawi Publishing Corporation, , 2017.

SHENZHEN ANXINKE TECHNOLOGY. **ESP-07 WiFi Module**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.ai-thinker.com>>. Acesso em: 19 jan. 2020.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. [s.l: s.n.].

SNYDER, A. F.; GUNTHER, E.; GRIFFIN, S. **The smart grid homeowner: An IT guru?** FIIW 2012 - 2012 Future of Instrumentation International Workshop Proceedings. **Anais...2012 T. SCHNEIDER. IoT: Is tech the easy part?** Disponível em: <<https://gcn.com/articles/2015/05/19/iot-policy-lags-technology.aspx>>. Acesso em: 24 mar. 2018.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. J. **Computer Networks**. [s.l: s.n.].

TASCIKARAOGLU, A.; BOYNUEGRI, A. R.; UZUNOGLU, M. A demand side management strategy based on forecasting of residential renewable sources: A smart home system in Turkey. **Energy and Buildings**, v. 80, p. 309–320, 2014.

TOSCHI, G. M.; CAMPOS, L. B.; CUGNASCA, C. E. Home automation networks: A survey. **Computer Standards and Interfaces**, v. 50, p. 42–54, 1 fev. 2017.

TSANG, D. H. K. et al. Vehicle-To-Grid Networks. **IEEE Network**, v. 31, n. 2, p. 6–7, 2017.
USMAN, A.; SHAMI, S. H. **Evolution of communication technologies for smart grid applications** **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2013.

VERMA, P. K. et al. A novel hybrid medium access control protocol for inter-M2M communications. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 75, p. 77–88, 2016.

WOLLSCHLAEGER, M.; SAUTER, T.; JASPERNEITE, J. The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 11, n. 1, p. 17–27, 2017.

XU, L. DA; HE, W.; LI, S. Internet of things in industries: A survey. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 10, n. 4, p. 2233–2243, 2014.

YOOST, A.; PETERSON, D. J. **Embracing Global Megatrends**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.longviewglobal.com/wp-content/uploads/2015/10/HowMegatrendsShapeGlobalBusiness.pdf>>. Acesso em: 26 maio. 2019.

ZANELLA, A. et al. Internet of things for smart cities. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 1, n. 1, p. 22–32, 1 fev. 2014.

ZHOU, Y.; LI, X. Vehicle to grid technology: A review. **Chinese Control Conference, CCC**, v. 2015- Septe, p. 9031–9036, 2015.

APÊNDICE A – Lista de Artigos da Primeira Síntese

Planilha 1 - Artigos que citam redes sem fio baseados em protocolos do IEEE 802.11 e 802.15.4.

Autores	Título	Tecnologia			
		Wi-Fi	ZigBee	Sub-GHz	Outros
A. Tascikaraoglu, A.R. Boynuegri, M. Uzunoglu	A demand side management strategy based on forecasting of residential renewable sources: A smart home system in Turkey		X		
T. Nguyen et al.	A Miniature Smart Home Testbed for Research and Education	X	X		
Yichi Zhang, Weiqing Sun, Lingfeng Wang, Hong Wang, R. C. Green and M. Alam	A multi-level communication architecture of smart grid based on congestion aware wireless mesh network	X	X		X
M. Collotta and G. Pau	A Novel Energy Management Approach for Smart Homes Using Bluetooth Low Energy				X
Pawan Kumar Verma, Rajesh Verma, Arun Prakash, Rajeev Tripathi, Kshirasagar Naik	A novel hybrid medium access control protocol for inter-M2M communications	X			
Y. Liang, P. Liu and J. Liu	A Realities Model Simulation Platform of Wireless Home Area Network in Smart Grid		X		
R. P. V. chander, S. Elias, S. Shivashankar and M. P	A REST based design for Web of Things in smart environments				X
Lobaccaro, Gabriele ; Carlucci, Salvatore ; Löfström, Erica	A Review of Systems and Technologies for Smart Homes and Smart Grids	X	X	X	X
Anzar Mahmood, Nadeem Javaid, Sohail Razzaq	A review of wireless communications for smart grid	X	X	X	X
M. Burunkaya and T. Pars	A smart meter design and implementation using ZigBee based Wireless Sensor Network in Smart Grid		X		
Collotta, Mario ; Pau, Giovanni	A Solution Based on Bluetooth Low Energy for Smart Home Energy Management				X

Kailas, Aravind ; Cecchi, Valentina ; Mukherjee, Arindam	A Survey of Communications and Networking Technologies for Energy Management in Buildings and Home Automation	X	X	X	X
A. A. Cecilia and K. Sudarsanan	A survey on smart grid	X	X	X	X
Kabalci, Yasin	A survey on smart metering and smart grid communication	X	X		X
R. Vinob chander, Saswati Mukherjee, Susan Elias	An applications interoperability model for heterogeneous internet of things environments	X	X	X	X
G. Belcredi, P. Modernell, N. Sosa, L. Steinfeld and F. Silveira	An implementation of a home energy management platform for Smart Grid		X		
D. Bian, M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn and S. Rahman	Assessment of communication technologies for a home energy management system	X	X		
Yi-Chang Li, Seung Ho Hong	BACnet–EnOcean Smart Grid Gateway and its application to demand response in buildings		X		X
M. Collotta, G. Pau	Bluetooth for Internet of Things: A fuzzy approach to improve power management in smart homes				X
M. A. Sarijari, A. Lo, M. S. Abdullah, S. H. D. Groot, I. G. M. M. Niemegeers and R. A. Rashid	Coexistence of Heterogeneous and Homogeneous Wireless Technologies in Smart Grid-Home Area Network	X	X		X
K. Lee, C. Chae, T. Sung and J. Kang	Cognitive beamforming based smart metering for coexistence with wireless local area networks		X		
Michael Emmanuel, Ramesh Rayudu	Communication technologies for smart grid applications: A survey	X	X	X	X
Chhaya, Lipi ; Sharma, Paawan ; Kumar, Adesh ; Bhagwatikar, Govind	Communication Theories and Protocols for Smart Grid Hierarchical Network	X	X	X	X
L. Berrío and C. Zuluaga	Concepts, standards and communication technologies in smart grid	X	X	X	

Donohoe, Michael ; Jennings, Brendan ; Balasubramaniam, Sasitharan	Context-awareness and the smart grid: Requirements and challenges	X	X		
M. S. Kim, S. R. Kim, J. Kim and Y. Yoo	Design and Implementation of MAC Protocol for SmartGrid HAN Environment	X	X		
A. Ghosh and N. Chakraborty	Design of smart grid in an University Campus using ZigBee mesh networks		X		
Shang-Liang, Chen ; Shu-Kai, Chang ; Yun-Yao, Chen	Development of a Multisensor Embedded Intelligent Home Environment Monitoring System Based on Digital Signal Processor and Wi-Fi	X			
H. Elkhorchani, M. Idoudi and K. Grayaa	Development of communication architecture for intelligent energy networks	X	X		X
Ozcelik, Ihsan Mert ; Korpeoglu, Ibrahim ; Agrawala, Ashok	Energy Efficient IP-Connectivity with IEEE 802.11 for Home M2M Networks	X			
Usman, Ahmad ; Shami, Sajjad Haider	Evolution of Communication Technologies for Smart Grid applications	X	X	X	X
Sofana, Reka ; Dragičević, Tomislav ; Siano, Pierluigi ; Prabakaran, Sahaya	Future Generation 5G Wireless Networks for Smart Grid: A Comprehensive Review				X
S. Zahurul, N. Mariun, I.V. Grozescu, Hanamoto Tsuyoshi, Yasunori Mitani, M.L. Othman, H. Hizam, I.Z. Abidin	Future strategic plan analysis for integrating distributed renewable generation to smart grid through wireless sensor network: Malaysia prospect	X	X	X	X
M. Z. Huq and S. Islam	Home Area Network technology assessment for demand response in smart grid environment	X	X	X	X
Toschi, Guilherme Mussi ; Campos, Leonardo Barreto ; Cugnasca, Carlos Eduardo	Home automation networks: A survey	X	X	X	X
A. Y. Mulla, J. J. Baviskar, F. S. Kazi and S. R. Wagh	Implementation of ZigBee/802.15.4 in Smart Grid communication and analysis of power consumption: A case study		X		

Mohammadi Nejad, Hossein ; Movahhedinia, Naser ; Khayyambashi, Mohammad	Improving the reliability of wireless data communication in Smart Grid NAN	X			
Kuang-Yow Lian, Sung-Jung Hsiao, Wen-Tsai Sung	Intelligent multi-sensor control system based on innovative technology integration via ZigBee and Wi-Fi networks	X	X		
Ruiz-Rosero, Juan ; Ramirez-Gonzalez, Gustavo ; Williams, Jennifer ; Liu, Huaping ; Khanna, Rahul ; Pisharody, Greeshma	Internet of Things: A Scientometric Review	X	X	X	X
Sethi, Pallavi ; Sarangi, Smruti ; Sethi, Pallavi ; Sarangi, Smruti	Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications	X	X	X	X
C. Diwaker, A. Sharma and P. Tomar	IoT's Future Aspects and Environment Surrounding IoT	X	X	X	X
J. van Kerkhoven et al.	IPv6-Based Smart Grid Communication over 6LoWPAN				X
P. Anush and P. Karthigaikumar	MicroGrid: Utilizing and allocating the available resources efficiently	X	X		
A.M. Vega, F. Santamaria, E. Rivas	Modeling for home electric energy management: A review	X	X		
Kiran Ahuja, Arun Khosla	Network selection criterion for ubiquitous communication provisioning in smart cities for smart energy system	X	X	X	X
Y. Miyahara	Next-generation wireless technologies trends for ultra low energy	X	X	X	X
Elkhorchani, Habib ; Grayaa, Khaled	Novel home energy management system using wireless communication technologies for carbon emission reduction within a smart grid		X		X
P. Han, J. Wang, Y. Han and Q. Zhao	Novel WSN-based residential energy management scheme in smart grid		X		
T. Lee and Z. Tsai	On the Capacity of Smart Grid Wireless Backhaul With Delay Guarantee and Packet Concatenation		X		

C. E. P. J. CArdova, B. Asare-Bediako, G. M. A. Vanalme and W. L. Kling	Overview and Comparison of Leading Communication Standard Technologies for Smart Home Area Networks Enabling Energy Management Systems	X	X	X	
A. Haidine, A. Aqqal and A. Dahbi	Performance Evaluation of Low-Power Wide Area based on LoRa Technology for Smart Metering				X
S. Aust, R. V. Prasad and I. G. M. M. Niemegeers	Performance evaluation of Sub 1 GHz wireless sensor networks for the smart grid			X	
N. Langhammer and R. Kays	Performance Evaluation of Wireless Home Automation Networks in Indoor Scenarios		X		
Dinh, Nga ; Lim, Sangsoon	Performance Evaluations for IEEE 802.15.4-based IoT Smart Home Solution		X		
H. N. Saha, A. Mandal and A. Sinha	Recent trends in the Internet of Things	X	X	X	X
Y. Tsado, D. Lund and K. Gamage	Resilient wireless communication networking for Smart grid BAN	X			
M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn and S. Rahman	Review of communication technologies for smart homes/building applications	X	X	X	X
Li, Weilin ; Zhang, Xiaobin	Simulation of the smart grid communications: Challenges, techniques, and future trends	X	X	X	X
Tatiana G. Bonifácio, Rodrigo Palucci Pantoni, Dennis Brandão	SMAC multi-hop mesh routing protocol using IEEE 802.15.4		X		
Mendes, Tiago ; Godina, Radu ; Rodrigues, Eduardo ; Matias, João ; Catalão, João	Smart Home Communication Technologies and Applications: Wireless Protocol Assessment for Home Area Network Resources	X	X	X	X
Bin Zhou, Wentao Li, Ka Wing Chan, Yijia Cao, Yonghong Kuang, Xi Liu, Xiong Wang	Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies		X		
Galinina, Olga ; Mikhaylov, Konstantin ; Andreev, Sergey ;	Smart home gateway system over Bluetooth low energy with wireless energy transfer capability				X

Turlikov, Andrey ; Koucheryavy, Yevgeni					
S. Singh, A. Roy and M. P. Selvan	Smart Load Node for Nonsmart Load Under Smart Grid Paradigm: A New Home Energy Management System	X			
Diego V. Queiroz, Marcelo S. Alencar, Ruan D. Gomes, Iguatemi E. Fonseca, Cesar Benavente-Peces	Survey and systematic mapping of industrial Wireless Sensor Networks		X	X	X
M. Starsinic	System architecture challenges in the home M2M network	X	X	X	X
Anum Ali, Ghalib A. Shah, Muhammad Omer Farooq, Usman Ghani	Technologies and challenges in developing Machine-to-Machine applications: A survey	X	X	X	X
J. R. Kumar	Telecommunication revolution changed life	X	X		
Balta-Ozkan, Nazmiye ; Davidson, Rosemary ; Bicket, Martha ; Whitmarsh, Lorraine	The development of smart homes market in the UK	X			X
A. F. Snyder, E. Gunther and S. Griffin	The smart grid homeowner: An IT guru?	X	X	X	X
M. Vo, M. Nguyen, T. Nguyen, C. Le and H. Huynh	Towards residential smart grid: A practical design of wireless sensor network and Mini-Web server based low cost home energy monitoring system		X		
T. Godfrey and C. Rodine	Unified Metrics for Management of Smart Grid Home Area Networks	X	X	X	
A. Qaddus and A. A. Minhas	Wireless communication a sustainable solution for future smart grid networks			X	
N. C. Batista, R. Melicio, J. C. O. Matias and J. P. S. Catalão	ZigBee wireless area network for home automation and energy management: Field trials and installation approaches		X		

Fonte: do autor.

APÊNDICE B – Lista de Artigos da Segunda Síntese

Planilha 2 - Artigos que contém citações de redes sem fio não baseadas no padrão IEEE.

Autores	Título	Tecnologia			
		Wi-Fi	ZigBee	Sub-GHz	Outros
Yichi Zhang, Weiqing Sun, Lingfeng Wang, Hong Wang, R. C. Green and M. Alam	A multi-level communication architecture of smart grid based on congestion aware wireless mesh network	X	X		X
M. Collotta and G. Pau	A Novel Energy Management Approach for Smart Homes Using Bluetooth Low Energy				X
R. P. V. chander, S. Elias, S. Shivashankar and M. P	A REST based design for Web of Things in smart environments				X
Lobaccaro, Gabriele ; Carlucci, Salvatore ; Löfström, Erica	A Review of Systems and Technologies for Smart Homes and Smart Grids	X	X	X	X
Anzar Mahmood, Nadeem Javaid, Sohail Razzaq	A review of wireless communications for smart grid	X	X	X	X
Collotta, Mario ; Pau, Giovanni	A Solution Based on Bluetooth Low Energy for Smart Home Energy Management				X
Kailas, Aravind ; Cecchi, Valentina ; Mukherjee, Arindam	A Survey of Communications and Networking Technologies for Energy Management in Buildings and Home Automation	X	X	X	X
A. A. Cecilia and K. Sudarsanan	A survey on smart grid	X	X	X	X
Kabalci, Yasin	A survey on smart metering and smart grid communication	X	X		X

R. Vinob chander, Saswati Mukherjee, Susan Elias	An applications interoperability model for heterogeneous internet of things environments	X	X	X	X
M. Collotta, G. Pau	Bluetooth for Internet of Things: A fuzzy approach to improve power management in smart homes				X
M. A. Sarijari, A. Lo, M. S. Abdullah, S. H. D. Groot, I. G. M. M. Niemegeers and R. A. Rashid	Coexistence of Heterogeneous and Homogeneous Wireless Technologies in Smart Grid-Home Area Network	X	X		X
Michael Emmanuel, Ramesh Rayudu	Communication technologies for smart grid applications: A survey	X	X	X	X
Chhaya, Lipi ; Sharma, Paawan ; Kumar, Adesh ; Bhagwatikar, Govind	Communication Theories and Protocols for Smart Grid Hierarchical Network	X	X	X	X
L. Berrío and C. Zuluaga	Concepts, standards and communication technologies in smart grid	X	X	X	
H. Elkhorchani, M. Idoudi and K. Grayaa	Development of communication architecture for intelligent energy networks	X	X		X
Usman, Ahmad ; Shami, Sajjad Haider	Evolution of Communication Technologies for Smart Grid applications	X	X	X	X
Sofana, Reka ; Dragičević, Tomislav ; Siano, Pierluigi ; Prabakaran, Sahaya	Future Generation 5G Wireless Networks for Smart Grid: A Comprehensive Review				X
S. Zahurul, N. Mariun, I.V. Grozescu, Hanamoto Tsuyoshi, Yasunori Mitani, M.L. Othman, H. Hizam, I.Z. Abidin	Future strategic plan analysis for integrating distributed renewable generation to smart grid through wireless sensor network: Malaysia prospect	X	X	X	X

M. Z. Huq and S. Islam	Home Area Network technology assessment for demand response in smart grid environment	X	X	X	X
Toschi, Guilherme Mussi ; Campos, Leonardo Barreto ; Cugnasca, Carlos Eduardo	Home automation networks: A survey	X	X	X	X
Ruiz-Rosero, Juan ; Ramirez-Gonzalez, Gustavo ; Williams, Jennifer ; Liu, Huaping ; Khanna, Rahul ; Pisharody, Greeshma	Internet of Things: A Scientometric Review	X	X	X	X
Sethi, Pallavi ; Sarangi, Smruti ; Sethi, Pallavi ; Sarangi, Smruti	Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications	X	X	X	X
C. Diwaker, A. Sharma and P. Tomar	IoT's Future Aspects and Environment Surrounding IoT	X	X	X	X
J. van Kerkhoven et al.	IPv6-Based Smart Grid Communication over 6LoWPAN				X
Kiran Ahuja, Arun Khosla	Network selection criterion for ubiquitous communication provisioning in smart cities for smart energy system	X	X	X	X
Y. Miyahara	Next-generation wireless technologies trends for ultra low energy	X	X	X	X
Elkhorchani, Habib ; Grayaa, Khaled	Novel home energy management system using wireless communication technologies for carbon emission reduction within a smart grid		X		X
C. E. P. J. CA ³ rdova, B. Asare-Bediako, G. M. A. Vanalme and W. L. Kling	Overview and Comparison of Leading Communication Standard Technologies for Smart Home Area Networks	X	X	X	

	Enabling Energy Management Systems				
A. Haidine, A. Aqqal and A. Dahbi	Performance Evaluation of Low-Power Wide Area based on LoRa Technology for Smart Metering				X
S. Aust, R. V. Prasad and I. G. M. M. Niemegeers	Performance evaluation of Sub 1 GHz wireless sensor networks for the smart grid			X	
H. N. Saha, A. Mandal and A. Sinha	Recent trends in the Internet of Things	X	X	X	X
M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn and S. Rahman	Review of communication technologies for smart homes/building applications	X	X	X	X
Li, Weilin ; Zhang, Xiaobin	Simulation of the smart grid communications: Challenges, techniques, and future trends	X	X	X	X
Mendes, Tiago ; Godina, Radu ; Rodrigues, Eduardo ; Matias, João ; Catalão, João	Smart Home Communication Technologies and Applications: Wireless Protocol Assessment for Home Area Network Resources	X	X	X	X
Galinina, Olga ; Mikhaylov, Konstantin ; Andreev, Sergey ; Turlikov, Andrey ; Koucheryavy, Yevgeni	Smart home gateway system over Bluetooth low energy with wireless energy transfer capability				X
Diego V. Queiroz, Marcelo S. Alencar, Ruan D. Gomes, Iguatemi E. Fonseca, Cesar Benavente-Peces	Survey and systematic mapping of industrial Wireless Sensor Networks		X	X	X
M. Starsinic	System architecture challenges in the home M2M network	X	X	X	X
Anum Ali, Ghalib A. Shah, Muhammad Omer Farooq, Usman Ghani	Technologies and challenges in developing Machine-to-Machine applications: A survey	X	X	X	X

Balta-Ozkan, Nazmiye ; Davidson, Rosemary ; Bicket, Martha ; Whitmarsh, Lorraine	The development of smart homes market in the UK	X			X
A. F. Snyder, E. Gunther and S. Griffin	The smart grid homeowner: An IT guru?	X	X	X	X
T. Godfrey and C. Rodine	Unified Metrics for Management of Smart Grid Home Area Networks	X	X	X	
A. Qaddus and A. A. Minhas	Wireless communication a sustainable solution for future smart grid networks			X	

Fonte: do autor.

APÊNDICE C – Lista de Artigos da Terceira Síntese

Planilha 3 - Artigos com as conclusões sobre comunicação dentro de uma SH.

Autores	Título	Conclusão
Yichi Zhang, Weiqing Sun, Lingfeng Wang, Hong Wang, R. C. Green and M. Alam	A multi-level communication architecture of smart grid based on congestion aware wireless mesh network	Realizou testes no HAN utilizando topologia <i>mesh</i> e taxa de transmissão de 250 kbps.
Anzar Mahmood, Nadeem Javaid, Sohail Razzaq	A review of wireless communications for smart grid	As tecnologias de redes sem fio para HANs não precisam de uma taxa de transmissão elevada, pois os pacotes para gerenciamento de demanda são pequenos.
Kailas, Aravind ; Cecchi, Valentina ; Mukherjee, Arindam	A Survey of Communications and Networking Technologies for Energy Management in Buildings and Home Automation	Concluí que as redes sem fio são as melhores soluções na relação custo/benefício.
A. A. Cecilia and K. Sudarsanan	A survey on smart grid	Determinar a melhor solução de comunicação é a etapa mais difícil para a implementação da <i>smart grid</i> .
G. Belcredi, P. Modernell, N. Sosa, L. Steinfeld and F. Silveira	An implementation of a home energy management platform for Smart Grid	Obteve resultados do experimento de tempo fim-a-fim de comunicação na casa dos 500 ms e comprovou aceitável para aplicações SH.
D. Bian, M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn and S. Rahman	Assessment of communication technologies for a home energy management system	Implementou uma simulação com redes sem fio operando numa taxa de 800 bits/s e obteve os resultados para ZigBe, Wi-Fi e Ethernet trabalhando em diferentes configurações.
M. A. Sarijari, A. Lo, M. S. Abdullah, S. H. D. Groot, I. G. M. M. Niemegeers and R. A. Rashid	Coexistence of Heterogeneous and Homogeneous Wireless Technologies in Smart Grid-Home Area Network	Avaliou a performance da rede para diferentes tamanhos de pacotes entre 2 bytes até 50 bytes.
Michael Emmanuel, Ramesh Rayudu	Communication technologies for smart grid applications: A survey	Definiu os parâmetros para implementação de um bom controle de resposta de demanda.
Chhaya, Lipi ; Sharma, Paawan ; Kumar, Adesh ; Bhagwatikar, Govind	Communication Theories and Protocols for Smart Grid Hierarchical Network	A escolha do protocolo de comunicação depende diretamente da aplicação.

Toschi, Guilherme Mussi ; Campos, Leonardo Barreto ; Cugnasca, Carlos Eduardo	Home automation networks: A survey	A quantidade de redes sem fio é um gargalo para a evolução da <i>smart home</i> como previsto.
S. Aust, R. V. Prasad and I. G. M. M. Niemegeers	Performance evaluation of Sub 1 GHz wireless sensor networks for the smart grid	Módulos Sub-GHz garantem uma maior área de cobertura, maior penetração e menor consumo de energia elétrica.
N. Langhammer and R. Kays	Performance Evaluation of Wireless Home Automation Networks in Indoor Scenarios	Misturar duas tecnologias de redes sem fio para soluções com mais de um andar.
Mendes, Tiago ; Godina, Radu ; Rodrigues, Eduardo ; Matias, João ; Catalão, João	Smart Home Communication Technologies and Applications: Wireless Protocol Assessment for Home Area Network Resources	Para aplicações em HAN é indicado o uso de redes sem fio com baixo consumo de energia e baixa taxa de transmissão.

Fonte: do autor.

APÊNDICE D – Linhas de código implementados no coordenador

Planilha 4 - Linhas de código no modelo Sub-GHz e ZigBee.

```
#include <EEPROM.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <RTClib.h>

//Serial pins
SoftwareSerial mySerial(8, 9); // RX, TX

//SD PIN
const int chipSelect = 10;

// RTC
RTC_DS1307 rtc;

//Archives
const uint16_t maxPackets = 360;
uint16_t receivedPackets = 0;
const uint8_t maxArchives = 10;
uint8_t createdArchives = 0;
uint8_t arcCount = 0;
uint8_t payloadLength = 0;

//create the sd object
String archiveName;
File myFile;

//variables of the payload
char initial = ',';
char fin = '$';
bool nodeA = 0;
bool nodeB = 0;
bool nodeC = 0;
bool nodeD = 0;

//time variables
uint32_t prevPayload = 0;
uint32_t timeNode1 = 0;
uint32_t timeNode2 = 0;
uint32_t timeNode3 = 0;
uint32_t timeNode4 = 0;
uint32_t sentTime = 0;

//communication Variables
bool ini = 0;
```

```

uint8_t i = 0;

void setup() {
  // Open serial communications and wait for port to open:
  Serial.begin(115200);

  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(5, INPUT_PULLUP);
  pinMode(4, INPUT_PULLUP);
  pinMode(3, INPUT_PULLUP);
  if (digitalRead(5) == LOW) {
    payloadLength = 20;
    Serial.println("Teste de 20B");
  } else if (digitalRead(4) == LOW) {
    payloadLength = 40;
    Serial.println("Teste de 40B");
  } else if (digitalRead(3) == LOW) {
    payloadLength = 60;
    Serial.println("Teste de 60B");
  }

  //EEPROM.write(0,0);
  Serial.print("Posição do último teste 0 a 10: ");
  Serial.println(EEPROM.read(0));

  // set the data rate for the SoftwareSerial port
  mySerial.begin(19200);

  if (!rtc.begin()) {
    Serial.println("RTC não encontrado!");
    while (1);
  }
  if (!rtc.isrunning()) {
    Serial.println("RTC não operante!");
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
  }

  if (!SD.begin(10)) {
    Serial.println("Initialization failed!");
    while (1);
  }

  arcCount = EEPROM.read(0);

  DateTime now = rtc.now();
  Serial.print("Data/hora: ");
  Serial.print(now.day() < 10 ? "0" : "");
  Serial.print(now.day(), DEC);
  Serial.print('/');
  Serial.print(now.month() < 10 ? "0" : "");

```



```

Serial.print(now.month(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(now.year(), DEC);
Serial.print(' ');
Serial.print(now.hour() < 10 ? "0" : "");
Serial.print(now.hour(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(now.minute() < 10 ? "0" : "");
Serial.print(now.minute(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(now.second() < 10 ? "0" : "");
Serial.print(now.second(), DEC);
Serial.print(' ');

Serial.println("Initialization done.");
Serial.println("Starting the experiment!");
Serial.print("3..");
delay(1000);
Serial.print("2..");
delay(1000);
Serial.print("1..");
delay(1000);
Serial.print("BEGIN!");
}

void loop() { // run over and over
char payload[62];

for (arcCount = arcCount; arcCount <= maxArchives; arcCount++) {
  if (payloadLength == 20) archiveName = "2B" + (String)arcCount + ".txt";
  else if (payloadLength == 40) archiveName = "4B" + (String)arcCount + ".txt";
  else if (payloadLength == 60) archiveName = "6B" + (String)arcCount + ".txt";
  myFile = SD.open(archiveName, FILE_WRITE);
  prevPayload = timeNode1 = timeNode2 = timeNode3 = timeNode4 = millis();
  receivedPackets = 0;
  while (receivedPackets <= maxPackets) {
    if (mySerial.available() && ini == 0) {
      payload[0] = mySerial.read();
      if (payload[0] == '$') {
        ini = 1;
        i++;
      }
    } else if (mySerial.available() && ini == 1) {
      payload[i] = mySerial.read();
      i++;
      if (payload[payloadLength + 1] == ';') {
        char data = payload[1];
        int8_t solv = 0;
        for (int j = 1; j < (payloadLength + 1); j++) solv = solv + data - payload[j];
        if (data == 'A' && solv == 0 && nodeA == 0) {

```

```

timeNode1 = millis() - timeNode1;
nodeA = 1;
} else if (data == 'B' && solv == 0 && nodeB == 0) {
timeNode2 = millis() - timeNode2;
Serial.print(payload[2]);
nodeB = 1;
} else if (data == 'C' && solv == 0 && nodeC == 0) {
timeNode3 = millis() - timeNode3;
nodeC = 1;
} else if (data == 'D' && solv == 0 && nodeD == 0) {
timeNode4 = millis() - timeNode4;
nodeD = 1;
}
}
if (i == (payloadLength + 2)) {
ini = 0;
for (int j = 0; j < (payloadLength + 2); j++) {
payload[j] = '2';
}
i = 0;
}
}
if (millis() - prevPayload >= 500) {
if (myFile) {
DateTime now = rtc.now();
myFile.print(now.day() < 10 ? "0" : "");
myFile.print(now.day(), DEC);
myFile.print("/");
myFile.print(now.month() < 10 ? "0" : "");
myFile.print(now.month(), DEC);
myFile.print("/");
myFile.print(now.year(), DEC);
myFile.print(',');
myFile.print(now.hour() < 10 ? "0" : "");
myFile.print(now.hour(), DEC);
myFile.print(':');
myFile.print(now.minute() < 10 ? "0" : "");
myFile.print(now.minute(), DEC);
myFile.print(':');
myFile.print(now.second() < 10 ? "0" : "");
myFile.print(now.second(), DEC);
myFile.print(',');
myFile.print(receivedPackets);
myFile.print(',');
myFile.print(timeNode1);
myFile.print(',');
myFile.print(timeNode2);
myFile.print(',');
myFile.print(timeNode3);
myFile.print(',');

```

```

myFile.print(timeNode4);
myFile.print(',');
myFile.print(nodeA);
myFile.print(',');
myFile.print(nodeB);
myFile.print(',');
myFile.print(nodeC);
myFile.print(',');
myFile.print(nodeD);
myFile.println(' ');
Serial.print(receivedPackets);
Serial.print(',');
Serial.print(timeNode1);
Serial.print(',');
Serial.print(timeNode2);
Serial.print(',');
Serial.print(timeNode3);
Serial.print(',');
Serial.print(timeNode4);
Serial.print(',');
Serial.print(nodeA);
Serial.print(',');
Serial.print(nodeB);
Serial.print(',');
Serial.print(nodeC);
Serial.print(',');
Serial.print(nodeD);
Serial.println();
prevPayload = timeNode1 = timeNode2 = timeNode3 = timeNode4 = millis();
nodeA = nodeB = nodeC = nodeD = 0;
}
receivedPackets++;
}
}
myFile.close();
EEPROM.write(0, (arcCount + 1));
}
EEPROM.write(0, 0);
digitalWrite(13, HIGH);
while (1);
}

```

Fonte: do autor.

Planilha 5 - Linhas de código da tecnologia Wi-Fi.

```

#include <EEPROM.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Wire.h>
#include <SPL.h>
#include <SD.h>
#include <RTClib.h>

```

```
//Serial pins
SoftwareSerial mySerial(8, 9); // RX, TX

//SD PIN
const int chipSelect = 10;

// RTC
RTC_DS1307 rtc;

//Archives
const uint16_t maxPackets = 360;
uint16_t receivedPackets = 0;
const uint8_t maxArchives = 10;
uint8_t createdArchives = 0;
uint8_t arcCount = 0;
uint8_t payloadLength = 0;

//create the sd object
String archiveName;
File myFile;

//variables of the payload
char initial = ',';
char fin = '$';
bool nodeA = 0;
bool nodeB = 0;
bool nodeC = 0;
bool nodeD = 0;

//time variables
uint32_t prevPayload = 0;
uint32_t timeNode1 = 0;
uint32_t timeNode2 = 0;
uint32_t timeNode3 = 0;
uint32_t timeNode4 = 0;
uint32_t sentTime = 0;

//communication Variables
bool ini = 0;
uint8_t i = 0;

void setup() {
  // Open serial communications and wait for port to open:
  Serial.begin(19200);

  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(5, INPUT_PULLUP);
  pinMode(4, INPUT_PULLUP);
  pinMode(3, INPUT_PULLUP);
  if (digitalRead(5) == LOW) {
```

```

payloadLength = 20;
Serial.println("Teste de 20B");
} else if (digitalRead(4) == LOW) {
  payloadLength = 40;
  Serial.println("Teste de 40B");
} else if (digitalRead(3) == LOW) {
  payloadLength = 60;
  Serial.println("Teste de 60B");
}

//EEPROM.write(0,0);
Serial.print("Posição do último teste 0 a 10: ");
Serial.println(EEPROM.read(0));

// set the data rate for the SoftwareSerial port
mySerial.begin(19200);

if (!rtc.begin()) {
  Serial.println("RTC não encontrado!");
  while (1);
}
if (!rtc.isrunning()) {
  Serial.println("RTC não operante!");
  rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
}

if (!SD.begin(10)) {
  Serial.println("Initialization failed!");
  while (1);
}

arcCount = EEPROM.read(0);

mySerial.print("AT+CIPMUX=1\r\n");
delay(100);
while(mySerial.available()) Serial.write(mySerial.read());
Serial.println();
mySerial.print("AT+CIPSERVER=1,555\r\n");
delay(100);
while(mySerial.available()) Serial.write(mySerial.read());
Serial.println();

DateTime now = rtc.now();
Serial.print("Data/hora: ");
Serial.print(now.day() < 10 ? "0" : "");
Serial.print(now.day(), DEC);
Serial.print("/");
Serial.print(now.month() < 10 ? "0" : "");
Serial.print(now.month(), DEC);
Serial.print("/");

```

```

Serial.print(now.year(), DEC);
Serial.print(' ');
Serial.print(now.hour() < 10 ? "0" : "");
Serial.print(now.hour(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(now.minute() < 10 ? "0" : "");
Serial.print(now.minute(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(now.second() < 10 ? "0" : "");
Serial.print(now.second(), DEC);
Serial.print(' ');

Serial.println("Initialization done.");
Serial.println("Starting the experiment!");
Serial.print("3..");
delay(1000);
Serial.print("2..");
delay(1000);
Serial.print("1..");
delay(1000);
Serial.print("BEGIN!");
}

void loop() { // run over and over
char payload[payloadLength+2];

for (arcCount = arcCount; arcCount <= maxArchives; arcCount++) {
  if (payloadLength == 20) archiveName = "2B" + (String)arcCount + ".txt";
  else if (payloadLength == 40) archiveName = "4B" + (String)arcCount + ".txt";
  else if (payloadLength == 60) archiveName = "6B" + (String)arcCount + ".txt";
  myFile = SD.open(archiveName, FILE_WRITE);
  prevPayload = timeNode1 = timeNode2 = timeNode3 = timeNode4 = millis();
  receivedPackets = 0;
  while (receivedPackets <= maxPackets) {
    if (mySerial.available() && ini == 0) {
      payload[0] = mySerial.read();
      if (payload[0] == ':') {
        ini = 1;
        i++;
      }
    } else if (mySerial.available() && ini == 1) {
      payload[i] = mySerial.read();
      Serial.print(payload[i]);
      i++;
      if (i == (payloadLength + 1)) {
        Serial.println();
        Serial.flush();
        char data = payload[1];
        int8_t solv = 0;
        for (int j = 1; j < (payloadLength + 1); j++) solv = solv + data - payload[j];
      }
    }
  }
}
}

```

```
if (data == 'A' && solv == 0 && nodeA == 0) {
    timeNode1 = millis() - timeNode1;
    nodeA = 1;
} else if (data == 'B' && solv == 0 && nodeB == 0) {
    timeNode2 = millis() - timeNode2;
    Serial.print(payload[2]);
    nodeB = 1;
} else if (data == 'C' && solv == 0 && nodeC == 0) {
    timeNode3 = millis() - timeNode3;
    nodeC = 1;
} else if (data == 'D' && solv == 0 && nodeD == 0) {
    timeNode4 = millis() - timeNode4;
    nodeD = 1;
}
}
if (i == (payloadLength + 2)) {
    ini = 0;
    for (int j = 0; j < (payloadLength + 2); j++) {
        payload[j] = '2';
    }
    i = 0;
}
}
if (millis() - prevPayload >= 500) {
    if (myFile) {
        DateTime now = rtc.now();
        myFile.print(now.day() < 10 ? "0" : "");
        myFile.print(now.day(), DEC);
        myFile.print("/");
        myFile.print(now.month() < 10 ? "0" : "");
        myFile.print(now.month(), DEC);
        myFile.print("/");
        myFile.print(now.year(), DEC);
        myFile.print(',');
        myFile.print(now.hour() < 10 ? "0" : "");
        myFile.print(now.hour(), DEC);
        myFile.print(':');
        myFile.print(now.minute() < 10 ? "0" : "");
        myFile.print(now.minute(), DEC);
        myFile.print(':');
        myFile.print(now.second() < 10 ? "0" : "");
        myFile.print(now.second(), DEC);
        myFile.print(',');
        myFile.print(receivedPackets);
        myFile.print(',');
        myFile.print(timeNode1);
        myFile.print(',');
        myFile.print(timeNode2);
        myFile.print(',');
        myFile.print(timeNode3);
```

```

myFile.print(',');
myFile.print(timeNode4);
myFile.print(',');
myFile.print(nodeA);
myFile.print(',');
myFile.print(nodeB);
myFile.print(',');
myFile.print(nodeC);
myFile.print(',');
myFile.print(nodeD);
myFile.println(' ');
Serial.print(receivedPackets);
Serial.print(',');
Serial.print(timeNode1);
Serial.print(',');
Serial.print(timeNode2);
Serial.print(',');
Serial.print(timeNode3);
Serial.print(',');
Serial.print(timeNode4);
Serial.print(',');
Serial.print(nodeA);
Serial.print(',');
Serial.print(nodeB);
Serial.print(',');
Serial.print(nodeC);
Serial.print(',');
Serial.print(nodeD);
Serial.println();
prevPayload = timeNode1 = timeNode2 = timeNode3 = timeNode4 = millis();
nodeA = nodeB = nodeC = nodeD = 0;
}
receivedPackets++;
}
}
myFile.close();
EEPROM.write(0, (arcCount + 1));
}
EEPROM.write(0, 0);
digitalWrite(13, HIGH);
while (1);
} #include <EEPROM.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <RTClib.h>

//Serial pins
SoftwareSerial mySerial(8, 9); // RX, TX

```



```
//SD PIN
const int chipSelect = 10;

// RTC
RTC_DS1307 rtc;

//Archives
const uint16_t maxPackets = 360;
uint16_t receivedPackets = 0;
const uint8_t maxArchives = 10;
uint8_t createdArchives = 0;
uint8_t arcCount = 0;
uint8_t payloadLength = 0;

//create the sd object
String archiveName;
File myFile;

//variables of the payload
char initial = ',';
char fin = '$';
bool nodeA = 0;
bool nodeB = 0;
bool nodeC = 0;
bool nodeD = 0;

//time variables
uint32_t prevPayload = 0;
uint32_t timeNode1 = 0;
uint32_t timeNode2 = 0;
uint32_t timeNode3 = 0;
uint32_t timeNode4 = 0;
uint32_t sentTime = 0;

//communication Variables
bool ini = 0;
uint8_t i = 0;

void setup() {
  // Open serial communications and wait for port to open:
  Serial.begin(19200);

  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(5, INPUT_PULLUP);
  pinMode(4, INPUT_PULLUP);
  pinMode(3, INPUT_PULLUP);
  if (digitalRead(5) == LOW) {
    payloadLength = 20;
    Serial.println("Teste de 20B");
```

```

} else if (digitalRead(4) == LOW) {
  payloadLength = 40;
  Serial.println("Teste de 40B");
} else if (digitalRead(3) == LOW) {
  payloadLength = 60;
  Serial.println("Teste de 60B");
}

//EEPROM.write(0,0);
Serial.print("Posição do último teste 0 a 10: ");
Serial.println(EEPROM.read(0));

// set the data rate for the SoftwareSerial port
mySerial.begin(19200);

if (!rtc.begin()) {
  Serial.println("RTC não encontrado!");
  while (1);
}
if (!rtc.isrunning()) {
  Serial.println("RTC não operante!");
  rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
}
if (!SD.begin(10)) {
  Serial.println("Initialization failed!");
  while (1);
}
arcCount = EEPROM.read(0);
mySerial.print("AT+CIPMUX=1\r\n");
delay(100);
while(mySerial.available()) Serial.write(mySerial.read());
Serial.println();
mySerial.print("AT+CIPSERVER=1,555\r\n");
delay(100);
while(mySerial.available()) Serial.write(mySerial.read());
Serial.println();

DateTime now = rtc.now();
Serial.print("Data/hora: ");
Serial.print(now.day() < 10 ? "0" : "");
Serial.print(now.day(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(now.month() < 10 ? "0" : "");
Serial.print(now.month(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(now.year(), DEC);
Serial.print(' ');
Serial.print(now.hour() < 10 ? "0" : "");
Serial.print(now.hour(), DEC);
Serial.print(':');

```

```

Serial.print(now.minute() < 10 ? "0" : "");
Serial.print(now.minute(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(now.second() < 10 ? "0" : "");
Serial.print(now.second(), DEC);
Serial.print(' ');

Serial.println("Initialization done.");
Serial.println("Starting the experiment!");
Serial.print("3..");
delay(1000);
Serial.print("2..");
delay(1000);
Serial.print("1..");
delay(1000);
Serial.print("BEGIN!");
}

void loop() { // run over and over
char payload[payloadLength+2];
for (arcCount = arcCount; arcCount <= maxArchives; arcCount++) {
  if (payloadLength == 20) archiveName = "2B" + (String)arcCount + ".txt";
  else if (payloadLength == 40) archiveName = "4B" + (String)arcCount + ".txt";
  else if (payloadLength == 60) archiveName = "6B" + (String)arcCount + ".txt";
  myFile = SD.open(archiveName, FILE_WRITE);
  prevPayload = timeNode1 = timeNode2 = timeNode3 = timeNode4 = millis();
  receivedPackets = 0;
  while (receivedPackets <= maxPackets) {
    if (mySerial.available() && ini == 0) {
      payload[0] = mySerial.read();
      if (payload[0] == ':') {
        ini = 1;
        i++;
      }
    } else if (mySerial.available() && ini == 1) {
      payload[i] = mySerial.read();
      Serial.print(payload[i]);
      i++;
      if (i == (payloadLength + 1)) {
        Serial.println();
        Serial.flush();
        char data = payload[1];
        int8_t solv = 0;
        for (int j = 1; j < (payloadLength + 1); j++) solv = solv + data - payload[j];
        if (data == 'A' && solv == 0 && nodeA == 0) {
          timeNode1 = millis() - timeNode1;
          nodeA = 1;
        } else if (data == 'B' && solv == 0 && nodeB == 0) {
          timeNode2 = millis() - timeNode2;
          Serial.print(payload[2]);

```

```
nodeB = 1;
} else if (data == 'C' && solv == 0 && nodeC == 0) {
    timeNode3 = millis() - timeNode3;
    nodeC = 1;
} else if (data == 'D' && solv == 0 && nodeD == 0) {
    timeNode4 = millis() - timeNode4;
    nodeD = 1;
}
}
if (i == (payloadLength + 2)) {
    ini = 0;
    for (int j = 0; j < (payloadLength + 2); j++) {
        payload[j] = '2';
    }
    i = 0;
}
}
if (millis() - prevPayload >= 500) {
    if (myFile) {
        DateTime now = rtc.now();
        myFile.print(now.day() < 10 ? "0" : "");
        myFile.print(now.day(), DEC);
        myFile.print("/");
        myFile.print(now.month() < 10 ? "0" : "");
        myFile.print(now.month(), DEC);
        myFile.print("/");
        myFile.print(now.year(), DEC);
        myFile.print(',');
        myFile.print(now.hour() < 10 ? "0" : "");
        myFile.print(now.hour(), DEC);
        myFile.print(':');
        myFile.print(now.minute() < 10 ? "0" : "");
        myFile.print(now.minute(), DEC);
        myFile.print(':');
        myFile.print(now.second() < 10 ? "0" : "");
        myFile.print(now.second(), DEC);
        myFile.print(',');
        myFile.print(receivedPackets);
        myFile.print(',');
        myFile.print(timeNode1);
        myFile.print(',');
        myFile.print(timeNode2);
        myFile.print(',');
        myFile.print(timeNode3);
        myFile.print(',');
        myFile.print(timeNode4);
        myFile.print(',');
        myFile.print(nodeA);
        myFile.print(',');
        myFile.print(nodeB);
```

```
myFile.print(',');
myFile.print(nodeC);
myFile.print(',');
myFile.print(nodeD);
myFile.println(' ');
Serial.print(receivedPackets);
Serial.print(',');
Serial.print(timeNode1);
Serial.print(',');
Serial.print(timeNode2);
Serial.print(',');
Serial.print(timeNode3);
Serial.print(',');
Serial.print(timeNode4);
Serial.print(',');
Serial.print(nodeA);
Serial.print(',');
Serial.print(nodeB);
Serial.print(',');
Serial.print(nodeC);
Serial.print(',');
Serial.print(nodeD);
Serial.println();
prevPayload = timeNode1 = timeNode2 = timeNode3 = timeNode4 = millis();
nodeA = nodeB = nodeC = nodeD = 0;
}
receivedPackets++;
}
}
myFile.close();
EEPROM.write(0, (arcCount + 1));
}
EEPROM.write(0, 0);
digitalWrite(13, HIGH);
while (1);
}
```

Fonte: do autor.

APÊNDICE E – Linhas de código implementadas no cliente

Planilha 6 - Linhas de código da tecnologia Sub-GHz.

```

#include <SoftwareSerial.h>

SoftwareSerial mySerial(10, 11); // RX, TX

const char caractere = 'A'; //A, B, C, D
String packet;
bool state = 0;
uint8_t n = 0;
uint32_t interval;

void setup() {
  // Open serial communications and wait for port to open:
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial) {
    ;// wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
  }
  // set the data rate for the SoftwareSerial port
  mySerial.begin(19200);

  pinMode(5, INPUT_PULLUP);
  pinMode(4, INPUT_PULLUP);
  pinMode(3, INPUT_PULLUP);
  if (digitalRead(5) == LOW) n = 20;
  else if (digitalRead(4) == LOW) n = 40;
  else if (digitalRead(3) == LOW) n = 60;
  packet = "";
  packet.concat("$");
  for (int j = 1; j < (n + 1); j++) packet.concat(caractere);
  packet.concat(';');

  Serial.println("Starting the experiment!");
  Serial.print("3..");
  delay(1000);
  Serial.print("2..");
  delay(1000);
  Serial.print("1..");
  delay(1000);
  Serial.print("BEGIN!");
  interval = millis();
}

void loop() { // run over and over
  if (millis() - interval >= 500) {
    interval = millis();
    mySerial.print(packet);
    Serial.println(packet);
  }
}

```

```

}
}

```

Fonte: do autor.

Planilha 7 - Linhas de código da tecnologia ZigBee.

```

const char caractere = 'A'; //A, B, C, D
String packet;
bool state = 0;
uint8_t n = 0;
uint32_t interval;

void setup() {
  // Open serial communications and wait for port to open:
  Serial.begin(19200);
  while (!Serial) {
    ;// wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
  }
  pinMode(5, INPUT_PULLUP);
  pinMode(4, INPUT_PULLUP);
  pinMode(3, INPUT_PULLUP);
  if (digitalRead(5) == LOW) n = 20;
  else if (digitalRead(4) == LOW) n = 40;
  else if (digitalRead(3) == LOW) n = 60;
  packet = "";
  packet.concat("$");
  for (int j = 1; j < (n + 1); j++) packet.concat(caractere);
  packet.concat(';');

  delay(3000);
  interval = millis();
}

void loop() { // run over and over
  if (millis() - interval >= 480) {
    interval = millis();
    Serial.print(packet);
  }
}
}

```

Fonte: do autor.

Planilha 8 - Linhas de código da tecnologia Wi-Fi.

```

#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial mySerial(10, 11); // RX, TX
const char caractere = 'A'; //A, B, C, D
String packet;
String com;
bool state = 0;
uint8_t n = 0;
uint32_t interval;

```

```

void setup() {
  // Open serial communications and wait for port to open:
  Serial.begin(19200);
  while (!Serial) {
    ;// wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
  }
  // set the data rate for the SoftwareSerial port
  mySerial.begin(19200);

  pinMode(5, INPUT_PULLUP);
  pinMode(4, INPUT_PULLUP);
  pinMode(3, INPUT_PULLUP);
  if (digitalRead(5) == LOW) {
    n = 20;
    com = "AT+CIPSEND=20\r\n";
  }
  else if (digitalRead(4) == LOW) {
    n = 40;
    com = "AT+CIPSEND=40\r\n";
  }
  else if (digitalRead(3) == LOW) {
    n = 60;
    com = "AT+CIPSEND=60\r\n";
  }
  packet = "";
  for (int j = 0; j < (n); j++) packet.concat(caractere);
  mySerial.print("AT+CWJAP_DEF=\"dlink\", \"Wifiteste\"\r\n");
  delay(100);
  while(mySerial.available()) Serial.write(mySerial.read());
  Serial.println();
  Serial.println("Starting the experiment!");
  Serial.print("3..");
  delay(1000);
  Serial.print("2..");
  delay(1000);
  Serial.print("1..");
  delay(1000);
  Serial.print("BEGIN!");
  mySerial.print("AT+CIPSTART=\"TCP\", \"192.168.0.100\", 555\r\n");
  delay(100);
  mySerial.flush();
  interval = millis();
}

void loop() { // run over and over
  if (millis() - interval >= 450) {
    mySerial.print(com);
    delay(10);
    interval = millis();
  }
}

```



```
} else if (mySerial.available()) {  
  char c = mySerial.read();  
  if (c == '>') {  
    mySerial.flush();  
    mySerial.print(packet);  
  }  
  else if (c == 'E') {  
    if (mySerial.read() == 'R') {  
      mySerial.flush();  
      mySerial.print("AT+CIPSTART=\"TCP\", \"192.168.0.100\", 555\r\n");  
      Serial.print("OK");  
    }  
  }  
}  
}
```

Fonte: do autor.

APÊNDICE F – Arquivo de criação do ambiente de simulação

Planilha 9 - Linhas de código do arquivo XML de criação do ambiente.

```

<environment>
<!-- Products -->
<!--material id="1" resistivity="20" relativePermittivity="4.5"-->
<object position="min 11.27 8.42 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.845 0.75 1.88" material="metal" fill-color="211 211 211"
opacity="0.8"/>

  <!-- Horizontal walls -->
  <object position="min 0.14 0 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 13.15 0.14 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 2.92 1.71 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.92 0.14 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 0.14 2.91 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 2.64 0.14 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 2.61 3.95 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.31 0.14 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 0.14 7.63 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 7.51 0.14 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 3.98 3.96 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 8.36 0.14 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 9.43 1.52 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 1.5 0.14 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 13.15 3.96 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 0.14 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 7.79 9.17 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 5.5 0.14 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>

  <!-- Vertical walls -->
  <object position="min 0 0 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 7.77 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 2.78 2.74 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 0.4 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 2.47 3.95 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 3.68 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 3.31 0.14 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 1.57 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 2.78 1.71 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 0.22 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 3.84 1.71 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 0.65 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 3.84 3.17 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 0.93 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 7.65 0.14 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 2.88 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 7.65 3.83 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 0.13 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>

```

```
<object position="min 7.65 4.1 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 0.97 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 7.65 8.87 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 0.44 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 9.29 1.52 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 2.44 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 10.93 0.14 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 2.88 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 10.93 3.83 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 0.13 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 13.29 0 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 3 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 13.29 3.81 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 5.5 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
  <object position="min 7.65 6.55 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 0.14 1.51 2.6" material="concrete" fill-color="203 65 84"
opacity="0.8"/>
</environment>
```

Fonte: do autor.

APÊNDICE G – Modelo Wi-Fi do OmNET++

Planilha 10 - Linhas de código do arquivo NED da simulação do padrão IEEE 802.11.

```

package inet.examples.wireless.Mestrado;

import inet.environment.common.PhysicalEnvironment;
import inet.networklayer.configurator.ipv4.Ipv4NetworkConfigurator;
import inet.node.inet.WirelessHost;
import inet.node.wireless.AccessPoint;
import inet.physicallayer.errormodel.packetlevel.StochasticErrorModel;
import inet.physicallayer.ieee80211.packetlevel.Ieee80211ScalarRadioMedium;
import inet.visualizer.contract.IIntegratedVisualizer;

network Lan80211
{
  parameters:
    int numHosts;
    **.mgmt.numChannels = 2;
  submodules:
    visualizer: <default("IntegratedVisualizer")> like IIntegratedVisualizer if hasVisualizer() {
      parameters:
        @display("p=22.53405,0.60090804;is=s");
    }
    //error: ErrorModelBase {
      // parameters:
      //@display("p=22.53405,2.618242;is=s");
    //}
    physicalEnvironment: PhysicalEnvironment {
      parameters:
        @display("p=19.787043,0.64383;is=s");
    }
    //visualizer: <default("IntegratedCanvasVisualizer")> like IIntegratedVisualizer if hasVisualizer() {
      //parameters:
      //@display("p=12.843584,0.69335544;is=s");
    //}
    configurator: Ipv4NetworkConfigurator {
      parameters:
        @display("p=14.421793,0.64383;is=s");
        config = xml("<config><interface hosts='*' address='145.236.x.x' netmask='255.255.0.0'/></config>");
    }
    radioMedium: Ieee80211ScalarRadioMedium {
      parameters:
        @display("p=16.997112,0.64383;is=s");
    }
    //host[numHosts]: WirelessHost {
      //@display("r=, #7070");
      //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
      //wlan[*].agent.typename = "";
    //}

```

```

host0: WirelessHost {
    @display("p=7.41, 4.24");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
host1: WirelessHost {
    @display("p=9.56, 3.83");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
host2: WirelessHost {
    @display("p=13.13, 9.04");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
host3: WirelessHost {
    @display("p=1.12, 3.21");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
host4: WirelessHost {
    @display("p=3.59, 0.28");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
ap: AccessPoint {
    @display("p=7.21, 4.24;r=, #707070");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtApSimplified";
}
stochasticErrorModel: StochasticErrorModel {
    @display("p=18.438683,2.285787");
}
mHost0: WirelessHost {
    @display("p=0.47,0.14");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost1: WirelessHost {
    @display("p=0.47,0.14");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost2: WirelessHost {
    @display("p=1.51,1.49");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost3: WirelessHost {
    @display("p=0.47,2.91");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
}

```

```
wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost4: WirelessHost {
    @display("p=1.46,2.91");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost5: WirelessHost {
    @display("p=0.0.47,3.05");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost6: WirelessHost {
    @display("p=1.33,5.49");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost7: WirelessHost {
    @display("p=3.36,2.89");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost8: WirelessHost {
    @display("p=1.88,7.63");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
bHost9: WirelessHost {
    @display("p=1.88,7.63");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost10: WirelessHost {
    @display("p=3.8,5.87");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost11: WirelessHost {
    @display("p=4.72,4.1");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost12: WirelessHost {
    @display("p=2.61,5.86");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost13: WirelessHost {
    @display("p=6.04,7.63");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
```

```
wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost14: WirelessHost {
    @display("p=6.12,5.87");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost15: WirelessHost {
    @display("p=4.34,0.14");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost16: WirelessHost {
    @display("p=4.34,0.14");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost17: WirelessHost {
    @display("p=3.98,2.18");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost18: WirelessHost {
    @display("p=5.75,2.06");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost19: WirelessHost {
    @display("p=7.65,2.07");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost20: WirelessHost {
    @display("p=7.79,2.9");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost21: WirelessHost {
    @display("p=8.56,2.1");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost22: WirelessHost {
    @display("p=7.93,0.14");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost23: WirelessHost {
    @display("p=10.11,0.88");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
```

```
wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost24: WirelessHost {
    @display("p=9.43,1.81");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost25: WirelessHost {
    @display("p=10.19,2.99");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost26: WirelessHost {
    @display("p=11.07,0.93");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
bHost27: WirelessHost {
    @display("p=11.07,0.93");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost28: WirelessHost {
    @display("p=11.07,2.26");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
bHost29: WirelessHost {
    @display("p=11.07,2.26");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost30: WirelessHost {
    @display("p=12.16,1.95");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
bHost31: WirelessHost {
    @display("p=7.79,7.63");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost32: WirelessHost {
    @display("p=9.35,4.1");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost33: WirelessHost {
    @display("p=9.06,5.36");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
```



```

wlan[*].agent.typename = "";
}
IHost34: WirelessHost {
    @display("p=9.06,7.54415");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
IHost35: WirelessHost {
    @display("p=11.98,5.36");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
IHost36: WirelessHost {
    @display("p=11.98,7.87");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost37: WirelessHost {
    @display("p=13.29,5.87");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost38: WirelessHost {
    @display("p=13.29,5.87");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost39: WirelessHost {
    @display("p=13.29,8.4");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost40: WirelessHost {
    @display("p=13.29,8.4");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost41: WirelessHost {
    @display("p=11.61,9.17");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
IHost42: WirelessHost {
    @display("p=3.09,8.55");
    wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    wlan[*].agent.typename = "";
}
}

```

Fonte: do autor.

Planilha 11 - Linhas de código do arquivo INI da simulação do padrão IEEE 802.11.

```
[General]
network = Lan80211
#cmdenv-output-file = omnetpp.log
#debug-on-errors = true
#record-eventlog = true

**.constraintAreaMinX = 0m
**.constraintAreaMinY = 0m
**.constraintAreaMinZ = 0m
**.constraintAreaMaxX = 13.43m
**.constraintAreaMaxY = 9.31m
**.constraintAreaMaxZ = 2.6m
*.physicalEnvironment.config = xmldoc("indoor.xml")
###.visualizer.canvasVisualizer.sceneVisualizer.viewAngle = "isometric"

# access point
**.ap.wlan[*].address = "10:00:00:00:00:00"
**.host*.**.mgmt.accessPointAddress = "10:00:00:00:00:00"
**.lHost*.**.mgmt.accessPointAddress = "10:00:00:00:00:00"
**.hHost*.**.mgmt.accessPointAddress = "10:00:00:00:00:00"
**.mHost*.**.mgmt.accessPointAddress = "10:00:00:00:00:00"
**.bHost*.**.mgmt.accessPointAddress = "10:00:00:00:00:00"
###.mgmt.frameCapacity = 10

# mobility
###.host[*].mobility.typename = "MassMobility"
###.host[*].mobility.changeInterval = truncnormal(2ms, 0.5ms)
###.host[*].mobility.angleDelta = normal(0deg, 30deg)
###.host[*].mobility.speed = truncnormal(20mps, 8mps)
###.host[*].mobility.updateInterval = 100ms
**.ap.mobility.typename = "StationaryMobility"
**.ap.mobility.initialX = 7.21m
**.ap.mobility.initialY = 4.24m
**.ap.mobility.initialZ = 0.5m
**.host*.mobility.typename = "StationaryMobility"
**.host0.mobility.initialX = 7.41m
**.host0.mobility.initialY = 4.24m
**.host0.mobility.initialZ = 1.5m
**.host1.mobility.initialX = 9.56m
**.host1.mobility.initialY = 3.83m
**.host1.mobility.initialZ = 1.9m
**.host2.mobility.initialX = 13.13m
**.host2.mobility.initialY = 9.04m
**.host2.mobility.initialZ = 0.9m
**.host3.mobility.initialX = 1.12m
**.host3.mobility.initialY = 3.21m
**.host3.mobility.initialZ = 1.7m
**.host4.mobility.initialX = 3.59m
**.host4.mobility.initialY = 0.28m
```

```

**.host4.mobility.initialZ = 1m

**.Host*.mobility.typename = "StationaryMobility"
**.lHost*.mobility.initialZ = 2.55m
**.hHost*.mobility.initialZ = 2m
**.mHost*.mobility.initialZ = 1.2m
**.bHost*.mobility.initialZ = 0.3m

# ping app (host[0] pinged by others)
**.numApps = 1
**.app[0].typename = "PingApp"
**.host0.app[0].destAddr = ""
**.host*.app[0].destAddr = "host0"
**.host*.app[0].sendInterval = 500ms
**.Host*.app[0].destAddr = "host0"
**.Host*.app[0].sendInterval = 500ms

# nic settings
**.wlan*.bitrate = 2Mbps

**.wlan[*].mac.retryLimit = 7
**.wlan[*].mac.dcf.channelAccess.cwMin = 7
**.wlan[*].mac.cwMinBroadcast = 31

**.wlan[*].radio.transmitter.bitrate = 2Mbps
**.wlan[*].radio.transmitter.headerLength = 38B
**.wlan[*].radio.transmitter.carrierFrequency = 2.4GHz
**.wlan[*].radio.receiver.sensitivity = -60dBm
**.wlan[*].radio.receiver.snirThreshold = 2dB
****.analogModel.ignorePartialInterference = true

# Loss
*.radioMedium.obstacleLoss.typename = "DielectricObstacleLoss" # module type
*.radioMedium.pathLoss.typename = "LogNormalShadowing" # module type
*.radioMedium.propagation.typename = "ConstantSpeedPropagation" # module type
*.radioMedium.propagation.propagationSpeed = 299792458 mps # speed of light

# Error model
**.stochasticErrorModel.packetErrorRate = 1 #${factor=0..1 step 0.1}

[Config Packet20B]
description = "Pinging with 20B Packet"
***.numHosts = 1

# Principal Hosts
*.host0.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.host1.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.94mW
*.host2.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.47mW
*.host3.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.47mW
*.host4.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.61mW

```

```
# Virtual Hosts
*.mHost0.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW
*.hHost1.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW
*.lHost2.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.mHost3.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.47mW
*.mHost4.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.47mW
*.mHost5.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.47mW
*.lHost6.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.lHost7.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW
*.hHost8.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.bHost9.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.lHost10.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.9mW
*.mHost11.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.mHost12.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.mHost13.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.9mW
*.lHost14.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.mHost15.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.hHost16.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.mHost17.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.lHost18.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.mHost19.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.mHost20.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.lHost21.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.9mW
*.hHost22.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.lHost23.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.hHost24.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.lHost25.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.9mW
*.mHost26.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.bHost27.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.mHost28.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.bHost29.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.lHost30.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.bHost31.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.mHost32.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.9mW
*.lHost33.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.9mW
*.lHost34.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.lHost35.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.lHost36.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.mHost37.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.mHost38.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.mHost39.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW
*.mHost40.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW
*.mHost41.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.4mW
*.lHost42.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW

**.host*.app[0].packetSize = 20B
**.Host*.app[0].packetSize = 20B
*.radioMedium.pathLoss.sigma = 13
```

```

[Config Packet40B] # __interactive__
description = "Pinging with 40B Packet"
***.numHosts = 1
# Principals Hosts
*.host0.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.host1.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.243mW
*.host2.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.115mW
*.host3.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.03mW
*.host4.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.063mW

# Virtual Hosts
*.mHost0.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.hHost1.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.lHost2.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.mHost3.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.03mW
*.mHost4.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.03mW
*.mHost5.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.03mW
*.lHost6.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.lHost7.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.hHost8.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.bHost9.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.lHost10.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.9mW
*.mHost11.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.mHost12.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.9mW
*.mHost13.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.lHost14.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.mHost15.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.hHost16.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost17.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.lHost18.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost19.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost20.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.lHost21.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.hHost22.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.lHost23.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.hHost24.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.lHost25.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost26.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.bHost27.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost28.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.bHost29.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.lHost30.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.bHost31.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost32.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.4mW
*.lHost33.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.4mW
*.lHost34.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.lHost35.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.lHost36.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost37.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost38.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW

```

```

*.mHost39.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost40.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost41.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.lHost42.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW

**.host*.app[0].packetSize = 40B
**.Host*.app[0].packetSize = 40B
*.radioMedium.pathLoss.sigma = 11

[Config Packet60B] # __interactive__
description = "Pinging with 60B Packet"
**.*.numHosts = 1

# Principals Hosts
*.host0.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.host1.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.358mW
*.host2.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.16mW
*.host3.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.04mW
*.host4.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.224mW

# Virtual Hosts
*.mHost0.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.hHost1.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.lHost2.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.mHost3.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.04mW
*.mHost4.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.04mW
*.mHost5.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.04mW
*.lHost6.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.lHost7.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.hHost8.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.bHost9.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.lHost10.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.9mW
*.mHost11.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.mHost12.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.9mW
*.mHost13.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.lHost14.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.mHost15.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.hHost16.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost17.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.3mW
*.lHost18.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.3mW
*.mHost19.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.3mW
*.mHost20.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.3mW
*.lHost21.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.3mW
*.hHost22.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.lHost23.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.hHost24.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.3mW
*.lHost25.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.4mW
*.mHost26.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.bHost27.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost28.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.3mW

```

```
*.bHost29.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.3mW
*.lHost30.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.3mW
*.bHost31.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost32.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.4mW
*.lHost33.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.4mW
*.lHost34.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.lHost35.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.lHost36.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost37.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost38.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost39.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost40.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost41.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.lHost42.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW

**.host*.app[0].packetSize = 60B
**.Host*.app[0].packetSize = 60B
*.radioMedium.pathLoss.sigma = 10
```

Fonte: do autor.

APÊNDICE H – Modelo ZigBee do OmNET++

Planilha 12 - Linhas de código do arquivo NED da simulação do padrão IEEE 802.15.4.

```

package inet.examples.wireless.Mestrado802154;

import inet.networklayer.configurator.ipv4.Ipv4NetworkConfigurator;
import inet.node.ethernet.Eth100M;
import inet.node.inet.SensorNode;
import inet.node.inet.StandardHost;
import inet.node.inet.WirelessHost;
import inet.physicallayer.apskradio.packetlevel.ApskScalarRadioMedium;
import inet.physicallayer.ieee802154.bitlevel.Ieee802154UwbIrRadioMedium;
import inet.physicallayer.ieee802154.packetlevel.Ieee802154NarrowbandScalarRadioMedium;
import inet.visualizer.integrated.IntegratedMultiVisualizer;
import inet.visualizer.integrated.IntegratedVisualizer;
import inet.environment.common.PhysicalEnvironment;
import inet.visualizer.contract.IIntegratedVisualizer;
import inet.physicallayer.errormodel.packetlevel.StochasticErrorModel;

network Lan802154
{
  parameters:
    int numHosts;
    **.mgmt.numChannels = 2;
  submodules:
    visualizer: <default("IntegratedVisualizer")> like IIntegratedVisualizer if hasVisualizer() {
      parameters:
        @display("p=22.53405,0.60090804;is=s");
    }
    physicalEnvironment: PhysicalEnvironment {
      parameters:
        @display("p=19.787043,0.64383;is=s");
    }
    configurator: Ipv4NetworkConfigurator {
      parameters:
        @display("p=14.421793,0.64383;is=s");
        //config = xml("<config><interface hosts='*' address='145.236.x.x' netmask='255.255.0.0'/></config>");
    }
    radioMedium: Ieee802154NarrowbandScalarRadioMedium {
      parameters:
        @display("p=16.997112,0.64383;is=s");
    }
    stochasticErrorModel: StochasticErrorModel {
      @display("p=18.438683,2.285787");
    }
    controller: SensorNode {
      @display("p=7.41, 4.24;i=misc/sensorgateway");
      //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
      //wlan[*].agent.typename = "";
    }
  }
}

```



```

}
host1: SensorNode {
    @display("p=9.56, 3.83;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
host2: SensorNode {
    @display("p=13.13, 9.04;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
host3: SensorNode {
    @display("p=1.12, 3.21;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
host4: SensorNode {
    @display("p=3.59, 0.28;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost0: SensorNode {
    @display("p=0.47,0.14;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost1: SensorNode {
    @display("p=0.47,0.14;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost2: SensorNode {
    @display("p=1.51,1.49;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost3: SensorNode {
    @display("p=0.47,2.91;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost4: SensorNode {
    @display("p=1.46,2.91;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost5: SensorNode {
    @display("p=0.0.47,3.05;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
}

```

```

//wlan[*].agent.typename = "";
}
IHost6: SensorNode {
  @display("p=1.33,5.49;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
IHost7: SensorNode {
  @display("p=3.36,2.89;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost8: SensorNode {
  @display("p=1.88,7.63;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
bHost9: SensorNode {
  @display("p=1.88,7.63;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
IHost10: SensorNode {
  @display("p=3.8,5.87;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost11: SensorNode {
  @display("p=4.72,4.1;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost12: SensorNode {
  @display("p=2.61,5.86;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost13: SensorNode {
  @display("p=6.04,7.63;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
IHost14: SensorNode {
  @display("p=6.12,5.87;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost15: SensorNode {
  @display("p=4.34,0.14;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
}

```

```

//wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost16: SensorNode {
  @display("p=4.34,0.14;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost17: SensorNode {
  @display("p=3.98,2.18;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost18: SensorNode {
  @display("p=5.75,2.06;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost19: SensorNode {
  @display("p=7.65,2.07;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost20: SensorNode {
  @display("p=7.79,2.9;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost21: SensorNode {
  @display("p=8.56,2.1;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost22: SensorNode {
  @display("p=7.93,0.14;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost23: SensorNode {
  @display("p=10.11,0.88;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost24: SensorNode {
  @display("p=9.43,1.81;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost25: SensorNode {
  @display("p=10.19,2.99;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";

```

```

//wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost26: SensorNode {
  @display("p=11.07,0.93;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
bHost27: SensorNode {
  @display("p=11.07,0.93;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost28: SensorNode {
  @display("p=11.07,2.26;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
bHost29: SensorNode {
  @display("p=11.07,2.26;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost30: SensorNode {
  @display("p=12.16,1.95;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
bHost31: SensorNode {
  @display("p=7.79,7.63;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost32: SensorNode {
  @display("p=9.35,4.1;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost33: SensorNode {
  @display("p=9.06,5.36;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost34: SensorNode {
  @display("p=9.06,7.54415;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost35: SensorNode {
  @display("p=11.98,5.36;i=misc/sensor");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";

```

```

//wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost36: SensorNode {
    @display("p=11.98,7.87;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost37: SensorNode {
    @display("p=13.29,5.87;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost38: SensorNode {
    @display("p=13.29,5.87;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost39: SensorNode {
    @display("p=13.29,8.4;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost40: SensorNode {
    @display("p=13.29,8.4;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost41: SensorNode {
    @display("p=11.61,9.17;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost42: SensorNode {
    @display("p=3.09,8.55;i=misc/sensor");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
}

```

Fonte: do autor.

Planilha 13 - Linhas de código do arquivo INI da simulação do padrão IEEE 802.15.4.

```

[General]
network = Lan802154

**.arp.typename = "GlobalArp"
**.netmaskRoutes = ""

*.radioMedium.backgroundNoise.power = -110dBm

*.configurator.config = xmldoc("startopology.xml")
*.configurator.addStaticRoutes = false

```

```

**.constraintAreaMinX = 0m
**.constraintAreaMinY = 0m
**.constraintAreaMinZ = 0m
**.constraintAreaMaxX = 13.43m
**.constraintAreaMaxY = 9.31m
**.constraintAreaMaxZ = 2.6m
*.physicalEnvironment.config = xmldoc("indoor.xml")

**.mobility.typename = "StationaryMobility"
**.controller.mobility.initialX = 7.41m
**.controller.mobility.initialY = 4.24m
**.controller.mobility.initialZ = 1.5m
**.host1.mobility.initialX = 9.56m
**.host1.mobility.initialY = 3.83m
**.host1.mobility.initialZ = 1.9m
**.host2.mobility.initialX = 13.13m
**.host2.mobility.initialY = 9.04m
**.host2.mobility.initialZ = 0.9m
**.host3.mobility.initialX = 1.12m
**.host3.mobility.initialY = 3.21m
**.host3.mobility.initialZ = 1.7m
**.host4.mobility.initialX = 3.59m
**.host4.mobility.initialY = 0.28m
**.host4.mobility.initialZ = 1m

**.Host*.mobility.typename = "StationaryMobility"
**.lHost*.mobility.initialZ = 2.55m
**.hHost*.mobility.initialZ = 2m
**.mHost*.mobility.initialZ = 1.2m
**.bHost*.mobility.initialZ = 0.3m

# ping app (host[0] pinged by others)
**.numApps = 1
**.app[0].typename = "PingApp"
**.controller.app[0].destAddr = ""
**.host*.app[0].destAddr = "controller"
**.host*.app[0].sendInterval = 500ms
**.Host*.app[0].destAddr = "controller"
**.Host*.app[0].sendInterval = 500ms

# Loss
*.radioMedium.obstacleLoss.typename = "DielectricObstacleLoss" # module type
*.radioMedium.pathLoss.typename = "LogNormalShadowing" # module type
*.radioMedium.propagation.typename = "ConstantSpeedPropagation" # module type
*.radioMedium.propagation.propagationSpeed = 299792458 mps # speed of light

# Error model
**.stochasticErrorModel.packetErrorRate = 1 #${factor=0..1 step 0.1}

```

```
[Config Packet20B]
description = "Pinging with 20B Packet"
***.numHosts = 5
*.controller.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.host*.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.Host*.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
**.host*.app[0].packetSize = 20B
*.radioMedium.pathLoss.sigma = 39
```

```
[Config Packet40B] # __interactive__
description = "Pinging with 40B Packet"
***.numHosts = 5
*.controller.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.host*.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.Host*.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
**.host*.app[0].packetSize = 40B
*.radioMedium.pathLoss.sigma = 139
```

```
[Config Packet60B] # __interactive__
description = "Pinging with 60B Packet"
***.numHosts = 5
*.controller.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.host*.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.Host*.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
**.host*.app[0].packetSize = 60B
*.radioMedium.pathLoss.sigma = 300
```

Fonte: do autor.

APÊNDICE I – Modelo Sub-GHz do OmNET++

Planilha 14 - Linhas de código do arquivo NED da simulação do padrão Sub-GHz.

```

package inet.examples.wireless.MestradoSG;

import inet.networklayer.configurator.ipv4.Ipv4NetworkConfigurator;
import inet.node.inet.AdhocHost;
import inet.physicallayer.ieee80211.packetlevel.Ieee80211ScalarRadioMedium;
import inet.visualizer.contract.IIntegratedVisualizer;
import inet.visualizer.integrated.IntegratedMultiVisualizer;
import inet.visualizer.integrated.IntegratedVisualizer;
import inet.environment.common.PhysicalEnvironment;
import inet.visualizer.contract.IIntegratedVisualizer;
import inet.physicallayer.errormodel.packetlevel.StochasticErrorModel;

network Sub1GHz
{
  submodules:
    visualizer: <default("IntegratedVisualizer")> like IIntegratedVisualizer if has Visualizer() {
      parameters:
        @display("p=22.53405,0.60090804;is=s");
    }
    physicalEnvironment: PhysicalEnvironment {
      parameters:
        @display("p=19.787043,0.64383;is=s");
    }
    configurator: Ipv4NetworkConfigurator {
      parameters:
        @display("p=14.421793,0.64383;is=s");
    }
    radioMedium: Ieee80211ScalarRadioMedium {
      parameters:
        @display("p=16.997112,0.64383;is=s");
    }
    stochasticErrorModel: StochasticErrorModel {
      @display("p=18.438683,2.285787");
    }
    controller: AdhocHost {
      @display("p=7.41, 4.24");
      //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
      //wlan[*].agent.typename = "";
    }
    host1: AdhocHost {
      @display("p=9.56, 3.83");
      //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
      //wlan[*].agent.typename = "";
    }
    host2: AdhocHost {

```



```

    @display("p=12.490302,9.01362");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
host3: AdhocHost {
    @display("p=1.12, 3.21");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
host4: AdhocHost {
    @display("p=3.59, 0.28");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost0: AdhocHost {
    @display("p=0.47,0.14");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost1: AdhocHost {
    @display("p=0.47,0.14");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost2: AdhocHost {
    @display("p=1.51,1.49");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost3: AdhocHost {
    @display("p=0.47,2.91");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost4: AdhocHost {
    @display("p=1.46,2.91");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost5: AdhocHost {
    @display("p=0.0.47,3.05");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost6: AdhocHost {
    @display("p=1.33,5.49");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost7: AdhocHost {

```

```

    @display("p=3.36,2.89");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost8: AdhocHost {
    @display("p=1.88,7.63");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
bHost9: AdhocHost {
    @display("p=1.88,7.63");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost10: AdhocHost {
    @display("p=3.8,5.87");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost11: AdhocHost {
    @display("p=4.72,4.1");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost12: AdhocHost {
    @display("p=2.61,5.86");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost13: AdhocHost {
    @display("p=6.04,7.63");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost14: AdhocHost {
    @display("p=6.12,5.87");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost15: AdhocHost {
    @display("p=4.34,0.14");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost16: AdhocHost {
    @display("p=4.34,0.14");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost17: AdhocHost {

```

```

    @display("p=3.98,2.18");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
IHost18: AdhocHost {
    @display("p=5.75,2.06");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost19: AdhocHost {
    @display("p=7.65,2.07");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost20: AdhocHost {
    @display("p=7.79,2.9");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
IHost21: AdhocHost {
    @display("p=8.56,2.1");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost22: AdhocHost {
    @display("p=7.93,0.14");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
IHost23: AdhocHost {
    @display("p=10.11,0.88");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
hHost24: AdhocHost {
    @display("p=9.43,1.81");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
IHost25: AdhocHost {
    @display("p=10.19,2.99");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost26: AdhocHost {
    @display("p=11.07,0.93");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
bHost27: AdhocHost {

```

```
@display("p=11.07,0.93");
//wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
//wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost28: AdhocHost {
  @display("p=11.07,2.26");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
bHost29: AdhocHost {
  @display("p=11.07,2.26");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost30: AdhocHost {
  @display("p=12.16,1.95");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
bHost31: AdhocHost {
  @display("p=7.79,7.63");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost32: AdhocHost {
  @display("p=9.35,4.1");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost33: AdhocHost {
  @display("p=9.06,5.36");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost34: AdhocHost {
  @display("p=9.06,7.54415");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost35: AdhocHost {
  @display("p=11.98,5.36");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost36: AdhocHost {
  @display("p=11.98,7.87");
  //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
  //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost37: AdhocHost {
```

```

    @display("p=13.29,5.87");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost38: AdhocHost {
    @display("p=13.29,5.87");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost39: AdhocHost {
    @display("p=13.29,8.4");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost40: AdhocHost {
    @display("p=13.29,8.4");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
mHost41: AdhocHost {
    @display("p=11.61,9.17");
    //wlan[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
lHost42: AdhocHost {
    @display("p=3.09,8.55");
    //[*].mgmt.typename = "Ieee80211MgmtStaSimplified";
    //wlan[*].agent.typename = "";
}
}
}

```

Fonte: do autor.

Planilha 15 - Linhas de código do arquivo INI da simulação do padrão Sub-GHz.

```

[General]
network = Sub1GHz

**.constraintAreaMinX = 0m
**.constraintAreaMinY = 0m
**.constraintAreaMinZ = 0m
**.constraintAreaMaxX = 13.43m
**.constraintAreaMaxY = 9.31m
**.constraintAreaMaxZ = 2.6m
*.physicalEnvironment.config = xmldoc("indoor.xml")

**.mobility.typename = "StationaryMobility"
**.controller.mobility.initialX = 7.41m
**.controller.mobility.initialY = 4.24m
**.controller.mobility.initialZ = 1.5m
**.host1.mobility.initialX = 9.56m
**.host1.mobility.initialY = 3.83m

```

```

** .host1.mobility.initialZ = 1.9m
** .host2.mobility.initialX = 13.13m
** .host2.mobility.initialY = 9.04m
** .host2.mobility.initialZ = 0.9m
** .host3.mobility.initialX = 1.12m
** .host3.mobility.initialY = 3.21m
** .host3.mobility.initialZ = 1.7m
** .host4.mobility.initialX = 3.59m
** .host4.mobility.initialY = 0.28m
** .host4.mobility.initialZ = 1m

**.*Host*.mobility.typename = "StationaryMobility"
**.lHost*.mobility.initialZ = 2.55m
**.hHost*.mobility.initialZ = 2m
**.mHost*.mobility.initialZ = 1.2m
**.bHost*.mobility.initialZ = 0.3m

# ping app (host[0] pinged by others)
** .numApps = 1
** .app[0].typename = "PingApp"
** .controller.app[0].destAddr = ""
** .host*.app[0].destAddr = "controller"
** .host*.app[0].sendInterval = 500ms
**.*Host*.app[0].destAddr = "controller"
**.*Host*.app[0].sendInterval = 500ms

# Loss
*.radioMedium.obstacleLoss.typename = "DielectricObstacleLoss" # module type
** .radioMedium.obstacleLoss.typename = "IdealObstacleLoss"
*.radioMedium.pathLoss.typename = "LogNormalShadowing" # module type
*.radioMedium.propagation.typename = "ConstantSpeedPropagation" # module type
*.radioMedium.propagation.propagationSpeed = 299792458 mps # speed of light

# Error model
** .stochasticErrorModel.packetErrorRate = 1 #${factor=0..1 step 0.1}

# antenna
*.radioMedium.backgroundNoise.power = -90dBm
** .wlan[*].radio.antenna.typename = "IsotropicAntenna"
** .wlan[*].radio.transmitter.carrierFrequency = 433MHz
** .wlan[*].radio.bandwidth = 400kHz
** .wlan[*].radio.receiver.sensitivity = -20dBm
** .host*.*.bitrate = 150kbps
** .wlan[*].radio.receiver.snrThreshold = 0.2dB

[Config Packet20B]
description = "Pinging with 20B Packet"
*.controller.wlan[*].radio.transmitter.power = 4mW
*.host1.wlan[*].radio.transmitter.power = 4mW

```

```
*.host2.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.01mW
*.host3.wlan[*].radio.transmitter.power = 2mW
*.host4.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW

# Virtual Hosts
*.mHost0.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.hHost1.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.lHost2.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.2mW
*.mHost3.wlan[*].radio.transmitter.power = 2mW
*.mHost4.wlan[*].radio.transmitter.power = 2mW
*.mHost5.wlan[*].radio.transmitter.power = 2mW
*.lHost6.wlan[*].radio.transmitter.power = 2.5mW
*.lHost7.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.hHost8.wlan[*].radio.transmitter.power = 3mW
*.bHost9.wlan[*].radio.transmitter.power = 3mW
*.lHost10.wlan[*].radio.transmitter.power = 4mW
*.mHost11.wlan[*].radio.transmitter.power = 4mW
*.mHost12.wlan[*].radio.transmitter.power = 4mW
*.mHost13.wlan[*].radio.transmitter.power = 3.8mW
*.lHost14.wlan[*].radio.transmitter.power = 4mW
*.mHost15.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.4mW
*.hHost16.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.4mW
*.mHost17.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.lHost18.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.9mW
*.mHost19.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.5mW
*.mHost20.wlan[*].radio.transmitter.power = 2mW
*.lHost21.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.8mW
*.hHost22.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.5mW
*.lHost23.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.8mW
*.hHost24.wlan[*].radio.transmitter.power = 4mW
*.lHost25.wlan[*].radio.transmitter.power = 4mW
*.mHost26.wlan[*].radio.transmitter.power = 3mW
*.bHost27.wlan[*].radio.transmitter.power = 3mW
*.mHost28.wlan[*].radio.transmitter.power = 3.2mW
*.bHost29.wlan[*].radio.transmitter.power = 3.2mW
*.lHost30.wlan[*].radio.transmitter.power = 3.3mW
*.bHost31.wlan[*].radio.transmitter.power = 3.8mW
*.mHost32.wlan[*].radio.transmitter.power = 4mW
*.lHost33.wlan[*].radio.transmitter.power = 4mW
*.lHost34.wlan[*].radio.transmitter.power = 4mW
*.lHost35.wlan[*].radio.transmitter.power = 2mW
*.lHost36.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.mHost37.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.5mW
*.mHost38.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.5mW
*.mHost39.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.05mW
*.mHost40.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.05mW
*.mHost41.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.01mW
*.lHost42.wlan[*].radio.transmitter.power = 3.5mW

**.host*.app[0].packetSize = 20B
```

```

**.*Host*.app[0].packetSize = 20B
*.radioMedium.pathLoss.sigma = 80

[Config Packet40B] # __interactive__
description = "Pinging with 40B Packet"
*.controller.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.host1.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.01mW
*.host2.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.01mW
*.host3.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.8mW
*.host4.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.3mW

# Virtual Hosts
*.mHost0.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.5mW
*.hHost1.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.5mW
*.lHost2.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.6mW
*.mHost3.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.8mW
*.mHost4.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.8mW
*.mHost5.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.8mW
*.lHost6.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.8mW
*.lHost7.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.5mW
*.hHost8.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.2mW
*.bHost9.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.2mW
*.lHost10.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.mHost11.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.mHost12.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.2mW
*.mHost13.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.9mW
*.lHost14.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
*.mHost15.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.2mW
*.hHost16.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.2mW
*.mHost17.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.3mW
*.lHost18.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.2mW
*.mHost19.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW
*.mHost20.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.lHost21.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.hHost22.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.lHost23.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.hHost24.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.lHost25.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost26.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.bHost27.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost28.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.bHost29.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.lHost30.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.bHost31.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost32.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.lHost33.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.lHost34.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.lHost35.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.lHost36.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost37.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW

```



```

*.mHost38.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost39.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost40.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost41.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.lHost42.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW

**.host*.app[0].packetSize = 40B
**.Host*.app[0].packetSize = 40B
*.radioMedium.pathLoss.sigma = 100

[Config Packet60B] # __interactive__
description = "Pinging with 60B Packet"
*.controller.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.host1.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW
*.host2.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.01mW
*.host3.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.host4.wlan[*].radio.transmitter.power = 2mW

# Virtual Hosts
*.mHost0.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.1mW
*.hHost1.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.1mW
*.lHost2.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.1mW
*.mHost3.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.mHost4.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.mHost5.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.6mW
*.lHost6.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.4mW
*.lHost7.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.3mW
*.hHost8.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.bHost9.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.lHost10.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost11.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost12.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost13.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.lHost14.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.mHost15.wlan[*].radio.transmitter.power = 2mW
*.hHost16.wlan[*].radio.transmitter.power = 2mW
*.mHost17.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.5mW
*.lHost18.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.5mW
*.mHost19.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.1mW
*.mHost20.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.9mW
*.lHost21.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.8mW
*.hHost22.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.lHost23.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.7mW
*.hHost24.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW
*.lHost25.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW
*.mHost26.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.4mW
*.bHost27.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.4mW
*.mHost28.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW
*.bHost29.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW
*.lHost30.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.5mW

```

```
*.bHost31.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost32.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.3mW
*.lHost33.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.3mW
*.lHost34.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.lHost35.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.2mW
*.lHost36.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost37.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost38.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost39.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost40.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.mHost41.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW
*.lHost42.wlan[*].radio.transmitter.power = 0.1mW

**.host*.app[0].packetSize = 60B
**.Host*.app[0].packetSize = 60B
*.radioMedium.pathLoss.sigma = 90
```

Fonte: do autor.