



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Silvio Oliveira e Silva Júnior

# **Estudo e Simulação de Roteamento de Pacotes em Redes IoT usando Protocolo RPL com Modelagem Refinada de Canal**

Campinas

2021

Silvio Oliveira e Silva Júnior

**Estudo e Simulação de Roteamento de Pacotes em  
Redes IoT usando Protocolo RPL com Modelagem  
Refinada de Canal**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Telecomunicações e Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Luís Geraldo Pedroso Meloni

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Silvio Oliveira e Silva Júnior, e orientada pelo Prof. Dr. Luís Geraldo Pedroso Meloni.

Campinas

2021

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Si38e Silva Júnior, Silvio Oliveira e, 1985-  
Estudo e simulação de roteamento de pacotes em redes IoT usando protocolo RPL com modelagem refinada de canal / Silvio Oliveira e Silva Júnior. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Luís Geraldo Pedroso Meloni.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Redes de sensores sem fio. 3. Interconexão de redes (Telecomunicações). 4. Rádio - Transmissores e transmissão - Desvanecimento. I. Meloni, Luís Geraldo Pedroso, 1958-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Study and simulation of packet routing in IoT networks using RPL protocol using refined channel modeling

**Palavras-chave em inglês:**

Wireless communication systems

Wireless sensor networks

Network interconnection (Telecommunications)

Radio - Transmitters and transmission - Fading

**Área de concentração:** Telecomunicações e Telemática

**Titulação:** Mestre em Engenharia Elétrica

**Banca examinadora:**

Luís Geraldo Pedroso Meloni [Orientador]

Omar Carvalho Branquinho

Paulo Cardieri

**Data de defesa:** 12-03-2021

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Elétrica

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-6189-298>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/3654856392342817>

## COMISSÃO JULGADORA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Candidato:** Silvio Oliveira e Silva Júnior RA: 211504

**Data de defesa:** 12 de Março de 2021

**Título da Tese:** “Estudo e Simulação de Roteamento de Pacotes em Redes IoT usando Protocolo RPL com Modelagem Refinada de Canal”.

Prof. Dr. Luís Geraldo Pedroso Meloni (Presidente)

Prof. Dr. Paulo Cardieri

Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho

A Ata de Defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

*Dedico este trabalho aos meus pais Luzia e Silvio (in memoriam), e à minha irmã,  
Kamilla.*

# Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, a minha mãe Luzia, por todo sacrifício, amor e carinho. Fonte inesgotável de inspiração;

Ao professor Dr. Luís G. P. Meloni, pela oportunidade, incentivo, amizade e motivação que me dedicou ao orientar esse trabalho;

À Universidade Estadual de Campinas, especialmente à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, pelo incentivo à pós-graduação e por colocar à disposição sua estrutura;

A todos os amigos que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho chegasse até aqui.

*“Thus the thought, for example, which we expressed in the Pythagorean theorem is timelessly true, true independently of whether anyone takes it to be true. It needs no bearer. It is not true for the first time when it is discovered, but is like a planet which, already before anyone has seen it, has been in interaction with other planets”*  
*(Gottlob Frege)*

# Resumo

Simulações precisas visando o planejamento de rede de sensores sem fio (RSSF) podem impactar positivamente as implantações, permitindo a avaliação de métricas de desempenho do sistema antes de sua implantação. Nesta dissertação, o simulador COOJA é configurado para atingir melhor realismo permitido pela plataforma e produzir resultados semelhantes a uma implantação real de uma RSSF. A cidade do Ipiranga, no Paraná, é modelada e inserida no simulador onde dispositivos sensores são emulados como um estudo de caso para redes de medidores inteligentes de energia. A plataforma, auxiliada pelo *Extended Multi-path Ray-tracer Medium* (EMRM) é utilizada, com correções necessárias e suporte adicional para funções de taxa de erro de bit (BER) simultâneas, estas obtidas por simulações com modelos de canais implementados em MATLAB, utilizados como método de avaliação e análise de desempenho da rede sob efeitos adversos. Os resultados mostram a dependência das métricas de rede como taxa de entrega de pacotes (PDR), atraso ponta-a-ponta, jitter de pacote e indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI) em relação aos canais utilizados.

**Palavras-chaves:** WSN; Cooja; MRM, modelos de canal; BER; redes inteligentes.

# Abstract

Accurate simulations aiming the planning of wireless sensor network (WSN) can positively impact deployments allowing estimation of the system's performance metrics prior to installation. In this work, COOJA simulator is configured to achieve the best realism allowed by the platform and to produce results similar to a real deployment of WSN. The city of Ipiranga in Paraná is modeled and inserted into the simulator with emulated sensor nodes as a case-study for smart energy meter networks. The Extended Multi-path Ray-tracer Medium (EMRM) is used and extended with correction and additional support for simultaneous bit error rate (BER) functions, which were generated by MATLAB channel model simulations for comparing how channels affect network performance. The results show for several realistic scenarios channel impact on network metrics as packet delivery rate (PDR), end-to-end delays, packet jitters, and received signal strength indicator (RSSI).

**Keywords:** WSN; cooja; MRM; channel model; BER; smart grid.

# Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Elementos de um dispositivo sensor. . . . .	23
Figura 2.2 – Topologia em estrela. . . . .	25
Figura 2.3 – Topologia em árvore. . . . .	26
Figura 2.4 – Topologia em malha ( <i>mesh</i> ). . . . .	26
Figura 2.5 – Tráfego suportado pelo RPL. . . . .	28
Figura 2.6 – Estrutura genérica das mensagens ICMPv6 no RPL. . . . .	29
Figura 2.7 – Formato do campo <i>Base</i> da mensagem tipo DIO. . . . .	31
Figura 2.8 – Formato do campo <i>Base</i> da mensagem tipo DAO. . . . .	32
Figura 2.9 – Formato do campo <i>Base</i> da mensagem tipo DIS. . . . .	32
Figura 2.10 – Processo de formação de um DODAG. . . . .	33
Figura 2.11 – Fluxograma de operação de um roteador. . . . .	34
Figura 2.12 – Especificação Wi-SUN FAN para dispositivos sensores. . . . .	41
Figura 3.1 – Diagrama em blocos do enlace de comunicações sem fio. . . . .	43
Figura 3.2 – Comportamento típico do sinal recebido. . . . .	44
Figura 3.3 – Obstrução e difração de onda eletromagnética. . . . .	45
Figura 3.4 – Relação entre as funções de Bello . . . . .	46
Figura 3.5 – Perda de percurso Log-normal e FSPL ( $f = 915$ MHz, $G_t$ 0 dBi, $G_r$ 0 dBi, $P_t$ 18 dBm, $\sigma$ 8 dB). . . . .	49
Figura 3.6 – Geometria do modelo terreno plano. . . . .	50
Figura 4.1 – (a) Imagem de satélite e (b) Topologia e posicionamento dos sensores. . . . .	56
Figura 4.2 – Taxa de erro de bit em AWGN. . . . .	58
Figura 4.3 – Perfil de retardo E-ITU P. . . . .	59
Figura 4.4 – Perfil de retardo E-ITU U. . . . .	60
Figura 4.5 – Perfil de retardo COST 207 TU. . . . .	61
Figura 4.6 – Taxa de erro de bit em canais com desvanecimento por multipercursos. . . . .	62
Figura 4.7 – Valores médios das métricas de desempenho. . . . .	64

# Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Tipos de mensagens de controle do RPL. . . . .	30
Tabela 2.2 – Modos de operação do RPL. . . . .	31
Tabela 3.1 – Valores do expoente de perda por percurso . . . . .	49
Tabela 4.1 – Configuração básica do EMRM . . . . .	54
Tabela 4.2 – Configuração da pilha de protocolos e <i>hardware</i> . . . . .	57
Tabela 4.3 – Parâmetros do Sistema. . . . .	57
Tabela 4.4 – Perfil de retardo <i>Extended ITU Pedestrian</i> . . . . .	59
Tabela 4.5 – Perfil de retardo <i>Extended ITU Urban</i> . . . . .	60
Tabela 4.6 – Perfil de retardo <i>COST207 GSM Typical Urban</i> . . . . .	61

# Lista de abreviaturas e siglas

**6LoWPAN** IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks.

**ADC** Analog-to-Digital Converter.

**AMI** Advanced Metering Infrastructure.

**AWGN** Additive White Gaussian Noise.

**Co-RPL** Corona RPL.

**DAG** Direct Acyclic Graph.

**DAO** Destination Advertisement Object.

**DAO-ACK** Destination Advertisement Object Acknowledgement.

**DIO** DODAG Information Object.

**DIS** DODAG Information Solicitation.

**DODAG** Destination Oriented Direct Acyclic Graph.

**DV** Distance-Vector.

**EDC** Estimated Duty Cycled.

**EMRM** Extended Multi-Path Ray Tracer Medium.

**ETX** Expected Transmisison Count.

**FSPL** Free-Space Path Loss.

**ICMPv6** Internet Control Message Protocol version 6.

**IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers.

**IETF** Internet Engineering Task Force.

**IoT** Internet of Things.

**IP** Internet Protocol.

**IPv6** Protocolo de Internet version 6.

**LLN** Low-Power and Lossy Network.

**LoS** Line-of-Sight.

**LR-WPAN** Low-Rate Wireless Personal Area Networks.

**M2M** Machine-to-Machine.

**MP2P** Multipoint-to-Point.

**MRHOF** Minimum Rank with Hysteresis Objective Function.

**MRM** Multi-Path Ray Tracer Medium.

**NLoS** Non Line-of-Sight.

**OF** Objective Function.

**OF-FL** Objective Function Fuzzy Logic.

**OF0** Objective Function Zero.

**ORPL** Opportunistic RPL.

**P2MP** Point-to-Multipoint.

**P2P** Point-to-Point.

**PDP** Power Delay Profile.

**PDR** Packet Delivery Ratio.

**ROLL** Routing Over Low Power and Lossy Networks.

**RPL** IPv6 Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks.

**RSSF** Redes de Sensores Sem Fio.

**RSSI** Received Signal Strength Indication.

**SG** Smart Grids.

**SM** Smart Meters.

**Wi-SUN** Wireless Smart Ubiquitous Networks.

**Wi-SUN FAN** Wi-SUN Field Area Networks.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação</b>	<b>18</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>20</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>Redes de Sensores Sem Fio</b>	<b>22</b>
2.1.1	Requisitos Gerais de Aplicação	23
2.1.2	Topologias	24
2.1.3	Roteamento	26
<b>2.2</b>	<b>Protocolo RPL</b>	<b>27</b>
2.2.1	Mensagens de Controle RPL	29
2.2.2	Operação do Protocolo	32
2.2.3	Algoritmo Trickle	34
2.2.4	Funções Objetivos	36
2.2.4.1	Função Objetivo 0	36
2.2.4.2	Função Objetivo MRHOF	37
2.2.5	Outras Funções Objetivos	38
<b>2.3</b>	<b>Wi-SUN e Padrão IEEE 802.15.4g</b>	<b>40</b>
<b>3</b>	<b>CANAIS DE COMUNICAÇÃO</b>	<b>42</b>
<b>3.1</b>	<b>Multipercurso</b>	<b>43</b>
<b>3.2</b>	<b>Modelos de Propagação</b>	<b>47</b>
3.2.1	Modelo de Propagação no Espaço Livre	47
3.2.2	Modelo Log-Normal com Sombreamento	48
3.2.3	Modelo de Terreno Plano	49
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÕES E RESULTADOS</b>	<b>51</b>
<b>4.1</b>	<b>COOJA</b>	<b>51</b>
<b>4.2</b>	<b>Configurações da Simulação</b>	<b>53</b>
4.2.1	EMRM	53
4.2.2	Cidade de Ipiranga	55
4.2.3	Influência Térmica	56
4.2.4	Sensores e Protocolos	56
<b>4.3</b>	<b>Canais</b>	<b>57</b>
<b>4.4</b>	<b>Resultados</b>	<b>62</b>

<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>65</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos Futuros</b> . . . . .	<b>66</b>
<b>5.2</b>	<b>Publicações</b> . . . . .	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>67</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Somado à necessidade de superação de problemas ambientais e urbanos, além da otimização e efficientização de processos industriais, o desenvolvimento tecnológico “criou” um novo conceito para sistemas de monitoramento e de comunicações, a [Internet of Things \(IoT\)](#). De modo geral, este modelo fundamenta-se nas “coisas” a serem medidas e na interconectividade entre os dispositivos sensores que formam uma rede de sensores sem fio (RSSF), atuando colaborativamente com propósito de coletar, armazenar, processar e transmitir os dados de interesse monitorados ([FERREIRA et al., 2019](#); [ATZORI](#); [IERA](#); [MORABITO, 2010](#)).

[IoT](#) é uma tecnologia que possui ampla aplicação, especialmente no contexto de Cidades Inteligentes, cenário de uso intensivo de tecnologias de informação para gestão urbana e ação social movida a dados. Um sistema IoT formado por RSSF oferece requisitos necessários não apenas para a sustentabilidade e avanço das condições de vida, mas também para o desenvolvimento de uma economia criativa, mediante uma gestão baseada na análise de dados. Representa uma tecnologia chave com potencial de revolucionar a vida humana nos próximos anos, proporcionando ao mesmo tempo, novas oportunidades de negócios. Em termos de economia global, espera-se que a tecnologia IoT seja responsável por um impacto de mais de uma dezena de trilhões de dólares até o fim de 2025 ([MANYIKA et al., 2015](#)).

Principalmente voltadas para consumo racional de recursos, aplicações [IoT](#) em residências consistem em: sistemas de segurança, controle de iluminação, de aquecimento, ventilação e climatização (HVAC). Segundo analistas da Forbes, este mercado “residencial”, apenas, deverá alcançar US\$ 114 bilhões em 2025 ([FORTUNE, 2019](#)). A nível metropolitano, as WSNs já são realidade, sendo responsáveis por monitoramento de nível e qualidade dos reservatórios de água, transporte e logística, saúde, além de aplicações militares, dentre outras ([ATZORI](#); [IERA](#); [MORABITO, 2010](#)).

Geradoras e concessionárias de energia elétrica têm investido agressivamente em tecnologias que possam tornar a rede elétrica mais eficiente e sustentável, objetivando a redução na emissão de  $CO_2$  através da incorporação de tecnologias de geração de energia por fontes renováveis. Isso implica na necessidade de gerenciamento e monitoramento eficiente dos recursos energéticos disponíveis. Desta realidade surgem as modernas [Smart Grids \(SG\)](#). Através de processos automatizados e monitoramento quase instantâneo, torna-se possível a aplicação de redes de sensores que, além de realizarem o monitoramento, passam a atuar sobre o sistema que monitoram. Atualmente, são amplamente aplicadas em redes elétricas, nas linhas de transmissão, subestações, em transformadores e outros

componentes essenciais à geração e transmissão de eletricidade, da usina ao usuário final, seja ele residencial, comercial ou industrial (CUI et al., 2017). Essas redes inteligentes devem ser capazes de antecipar, respondendo agilmente com medidas corretivas, a quaisquer perturbações no sistema a partir de uma autoavaliação contínua, permitindo às concessionárias maior confiabilidade e eficiência na transmissão e distribuição de energia. Também são caracterizadas pela conexão bidirecional de eletricidade, integrando a geração distribuída à rede elétrica.

Ainda nesse contexto, surgem os medidores inteligentes, *Smart Meters (SM)*, dispositivos capazes de medir o consumo de energia, tensão e corrente de fase, potências e energias ativas, reativas e aparentes, além dos indicadores de qualidade de energia, reportando esses dados automaticamente a uma central de controle para armazenamento e processamento. Em geral, fornecem informações de consumo e perfil do consumidor, propiciando às concessionárias o planejamento antecipado através da previsão de carga e de indicadores importantes como o fator de carga, favorecendo o planejamento e balanceamento de carga devido ao perfil de consumo desequilibrado das residências, comércio e indústria, quando necessário. Além disso, os dados de consumo e perfil dos consumidores são disponibilizados, incentivando a interação com as concessionária. Visam despertar o consumidor à realidade sustentável, evitando desperdícios e incentivando a redução, bem como o consumo inteligente.

Existem, entretanto, desvantagens intrínsecas a essas tecnologias. Grande parte dos dispositivos de sensoriamento é caracterizada por severas restrições em termos de processamento, armazenamento, baixa potência de transmissão e capacidade de energia. Além disso, os links de comunicação são caracterizados por alta instabilidade e baixas taxas de transmissão, incorrendo em altas taxas de perda de pacotes. O ambiente em que são instalados também influencia na qualidade do serviço. Várias aplicações possuem ambientes adversos, suscetíveis a altas temperaturas ou intempéries. Em *SG*, os dispositivos estão sujeitos a um ambiente caracterizado por alta interferência eletromagnética e ruídos impulsivos (AGBA et al., 2019). Ademais, o gerenciamento de energia das RSSF, bem como a confiabilidade do sistema, são essenciais, pois deseja-se evitar manutenções desnecessárias ou substituição de equipamentos, asseverando, ainda, a entrega das informações.

Portanto, faz-se necessária a padronização de um conjunto de protocolos de comunicação para redes de sensores, como as redes de utilidade de pública, que permitam a criação de um ecossistema interoperável, especialmente entre dispositivos provenientes de diferentes fabricantes.

## 70 1.1 Motivação

Aplicações em redes de utilidade públicas, tal qual as redes formadas por medidores inteligentes, são caracterizadas por baixas taxas de transmissão de dados e baixo consumo de energia. A especificação aberta [Wireless Smart Ubiquitous Networks \(Wi-SUN\)](#), desenvolvida e gerenciada pela *Wi-SUN Alliance*, consiste em uma especificação  
75 aberta com o objetivo de fornecer comunicação sem fio [Machine-to-Machine \(M2M\)](#) a partir de padrões interoperáveis voltados a sistemas inteligentes fundamentados em [IoT](#) e [Redes de Sensores Sem Fio \(RSSF\)](#). Está entre as diferentes especificações que visam fornecer uma infraestrutura de comunicação sem fio para [SG](#), especialmente em aplicações envolvendo medidores inteligentes, distribuição automática de energia, iluminação pública,  
80 dentre outras. O perfil [Wi-SUN Field Area Networks \(Wi-SUN FAN\)](#) propõe uma pilha de protocolos voltados para dispositivos de baixo desempenho. A pilha é composta por protocolos como [Internet Control Message Protocol version 6 \(ICMPv6\)](#), [Protocolo de Internet version 6 \(IPv6\)](#) e [IPv6 Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks \(RPL\)](#) e [IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks \(6LoWPAN\)](#).

85 A camada física (PHY) e de acesso ao meio (MAC) do padrão Wi-SUN utilizam as especificações estabelecidas pelo padrão IEEE 802.15.4, apresentado em 2003 pelo [Institute of Electrical and Electronics Engineers \(IEEE\)](#), utilizando-se da modulação GFSK especificada pela emenda IEEE 802.15.4g de 2012, com variações de taxa de transmissão de 50 kbps a aproximadamente 300 kbps. Por ser uma especificação aberta e  
90 devido às suas características flexíveis, o perfil WI-SUN FAN está crescendo em interesse, sendo adotado em diferentes aplicações no contexto das *Smart Cities*.

O protocolo de roteamento [RPL \(THUBERT et al., 2012\)](#), foi especificamente projetado para atuar em redes formadas por dispositivos limitados. É baseado em vetor de distância adaptado para uma variedade de tipos de redes [Low-Power and Lossy Network](#)  
95 [\(LLN\)](#), incluindo as [RSSF](#). Desenvolvido com o objetivo de “superar” as limitações de baixa potência de rádio, transmissões envolvendo múltiplos saltos (*multihop*), especialmente em redes de larga escala, mantendo a eficiência, segurança da comunicação e conectividade entre os dispositivos. Apresenta vários recursos como autoconfiguração, autocorreção, prevenção e detecção de *loops*, independência, transparência e a utilização de roteadores  
100 de borda (*Border Routers*) conectados à *Internet* ([GADDOUR; KOUBÂA, 2012](#)).

O interesse industrial em relação ao RPL, deve-se à sua capacidade adaptativa a diversas aplicações distintas, proporcionadas, em parte, pela liberdade de desenvolvimento de funções objetivos, [Objective Function \(OF\)](#). Funções objetivos utilizando apenas uma métrica normalmente valorizam um determinado aspecto da rede e, em muitos casos,  
105 acabam por deteriorar seu desempenho por ignorar possíveis alterações nas características da rede. Acabam por não explorar a capacidade adaptativa do protocolo. A utilização de métricas combinadas, como atraso ponto-a-ponto, energia residual dos dispositivos,

qualidade de enlace de comunicação, dentre outras, visa obter melhores resultados de desempenho a partir do “balanceamento” entre as métricas, otimizando seu funcionamento.

110 Além de métricas combinadas, pesquisas envolvendo RPL utilizam técnicas de inteligência computacional como algoritmos genéticos, redes neurais e modelos de colônias de insetos para otimização do processo de seleção de rotas, dado os requisitos de aplicação das redes LLN e do próprio protocolo. Embora seja um protocolo versátil, o *overhead* em redes de baixa potência com roteamento RPL ainda constitui um problema.

115 A literatura contém centenas de trabalhos utilizando simuladores com código fonte aberto como ferramenta de testes e de avaliação de desempenho, constituindo uma alternativa econômica para testes voltados para futuras implantações de RSSF. Esses simuladores permitem a construção de redes de sensores virtuais, regidas por algoritmos e protocolos pré-definidos pelo simulador ou desenvolvidos pelo usuário. Alguns simuladores  
120 disponíveis são: Network Simulator 2 (NS-2), Network Simulator 3 (NS-3), TOSSIM, COOJA, OMNeT++, dentre outros.

Uma alternativa ao uso de simuladores consiste na utilização de laboratórios como o *FIT IoT-LAB* (ADJIH et al., 2015), que disponibilizam gratuitamente “testbeds”, i.e., disponibilizam uma quantidade limitada de dispositivos formando uma rede de sensores,  
125 de pequeno a médio porte, para testes de algoritmos e protocolos em dispositivos reais. Entretanto, é difícil encontrar uma agenda livre para simulações.

Simuladores como o COOJA, por exemplo, possuem a capacidade de simular diferentes critérios que influenciam na propagação das ondas de rádio. O [Multi-Path Ray Tracer Medium \(MRM\)](#), destaca-se como uma solução interessante, dado que possui  
130 suporte a simulações envolvendo obstáculos, interferência de sinais, colisões, além dos efeitos inerentes à distância, frequência e potência dos transceptores. Além disso, os dispositivos são emulados como um processo nativo do computador, como uma máquina virtual em Java ou como simulação de uma plataforma de rádio suportada (DUNKELS; GRONVALL; VOIGT, 2004). Outra solução recentemente apresentada, o [Extended Multi-Path Ray  
135 Tracer Medium \(EMRM\)](#), consiste em uma extensão dos recursos padrões disponibilizados pelo MRM, adicionando suporte para simulações utilizando funções de taxa de erro de bit, mapeada a partir da relação sinal-ruído calculada pelo *ray-tracer*.

Desta forma, a principal motivação deste trabalho consiste em implementar em MATLAB, a camada física utilizada pela especificação [Wi-SUN FAN](#), especificamente  
140 a modulação 2-GFSK (MR-FSK), utilizada em aplicações como [Advanced Metering Infrastructure \(AMI\)](#), a fim de obter funções que refletem a taxa de erro de bit. As funções são obtidas a partir do uso de canais caracterizados por atenuações e atrasos devido a propagação multipercurso, utilizando as distribuições de desvanecimento Rayleigh e Rician.

Neste trabalho, são utilizados três modelos preexistentes de canais para avaliar

145 o comportamento de uma rede de sensores em simulações desenvolvidas para alçar maior  
realismo. São analisados para este fim os valores de intensidade de sinal, taxa de entrega  
de pacotes e atraso de pacotes. Os modelos selecionados para a obtenção da taxa de  
erro de bit, obtidas por meio de simulações em MATLAB, são: *Extended ITU-Pedestrian*,  
*Extended ITU-Urban* (HERNANDEZ et al., 2012) e o *COST 207 GSM TU* com base nos  
150 valores adotados em Harada (et al.) (HARADA et al., 2017).

São, então, utilizadas como parâmetro de simulação no ambiente COOJA/EMRM,  
com o objetivo de obter maior realismo nas simulações. Entretanto, até o momento, não  
foram obtidos dados reais da implantações, impossibilitando uma análise comparativa.

## 1.2 Objetivos

155 Esta dissertação tem por objetivo avaliar o comportamento de uma rede de  
medidores inteligentes a partir de simulações com modelos de canais distintos, considerando  
cenários com e sem visada direta entre os dispositivos comunicantes.

Especificamente, objetiva-se:

- 160 • Implementação da modulação 2-GFSK, *Gaussian Frequency-shift Keying*, em MA-  
TLAB utilizando as especificações da camada física estabelecidas nas especificações  
Wi-SUN FAN e IEEE 802.15.4g;
- Obtenção de funções que representam a taxa de erro de bit sob o efeito de desvaneci-  
mento Rayleigh e Rician em relação a canais com perfil de retardos distintos como  
o *Extended ITU-Pedestrian*, *Extended ITU-Urban* e o *COST 207 GSM TU*;
- 165 • Avaliar os resultados em termos de taxa de entrega de pacotes, atraso (*delay*),  
instabilidade da rede (*jitter*) e potência de sinal recebido (RSSI).

Possui ainda como motivação o enquadramento na linha de pesquisa do convênio  
com o Instituto Eldorado denominado “Algoritmos e Protocolos de Comunicações para  
Internet das Coisas, Redes Elétricas Inteligentes e Cidades Inteligentes”, onde outras  
170 técnicas, métricas de desempenho, e funções de otimização são pesquisadas.

## 1.3 Organização do Trabalho

A presente dissertação é dividida em cinco Capítulos. Uma breve apresentação,  
bem como as motivações e objetivos são apresentadas no primeiro capítulo. No Capítulo 2 é  
apresentada a fundamentação teórica contemplando as principais características e requisitos  
175 impostos pelas RSSF, a camada física do padrão IEEE 802.15.4g utilizada pela pilha

Wi-SUN FAN, além dos aspectos estruturais e operacionais do protocolo de roteamento RPL.

Aspectos da teoria de propagação em ambientes com multipercursos e modelos de propagação comumente utilizados são abordados no Capítulo 3. O método de avaliação, resultados e discussões são apresentados no Capítulo 4. Por fim, no Capítulo 5, apresentam-se as considerações finais e propostas de trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Redes de Sensores Sem Fio

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) pode ser definida como um conjunto de dispositivos interconectados dotados de capacidades sensoriais com o objetivo de executar tarefas de monitoramento do ambiente circundante de forma colaborativa. Esses dispositivos, além do monitoramento, são responsáveis por medir, registrar e transmitir informações relevantes à aplicação que foram designados, sendo possível, também, sua atuação como mecanismos de controle. RSSF tornaram-se interessantes devida a infinidade de aplicações em automação residencial e predial, monitoramento de pacientes em hospitais e assistência médica remota, monitoramento ambiental, logística, vigilância, controle de tráfego, medidores inteligentes, dentre várias outras.

São categorizadas como redes colaborativas dada a necessidade de roteamento dos pacotes de dados até um dispositivo central conectado à internet (SELMIC; PHOHA; SERWADDA, 2016). Em essência, todos os dispositivos que formam uma RSSF são roteadores capazes de gerar e transmitir pacotes próprios, além de realizar o encaminhamento dos pacotes de dados de outros dispositivos da rede. Essa habilidade cooperativa, garante, em partes, que os pacotes de dados sejam entregues ao ponto concentrador da rede. No contexto das RSSF, os pontos concentradores são denominados roteadores de borda, sorvedouros ou *gateways*, caracterizado por um dispositivo IoT.

Os dispositivos sensores são de baixo custo com limitações quanto ao poder de processamento, memória e capacidade de armazenamento de informações. São também limitados em potência e energia, dado a utilização de baterias como fonte de alimentação. Essas restrições ocasionam altas taxas de perdas de pacotes de dados, alcance de rádio limitado e baixa taxa de transferência de dados. Os elementos típicos de um dispositivo utilizado em RSSF, representado pela Figura 2.1, consistem de quatro unidades: sensoriamento, processamento, comunicação e alimentação.

A unidade de detecção, ou sensoriamento, é composta por um conjunto de transdutores e conversores analógico-digital, *Analog-to-Digital Converter (ADC)*. Os sinais analógicos obtidos a partir dos fenômenos físicos observados são gerados pelos transdutores e convertidos pelo ADC em sinais digitais, sendo posteriormente enviados para unidade de processamento. A unidade de processamento é constituída por um microcontrolador ou microprocessador e uma memória externa. É a unidade responsável pelo controle dos transdutores, dos modos de operação do rádio, processamento e agregação de dados. A unidade de comunicação consiste em um transceptor de curto alcance. Inclui o sistema

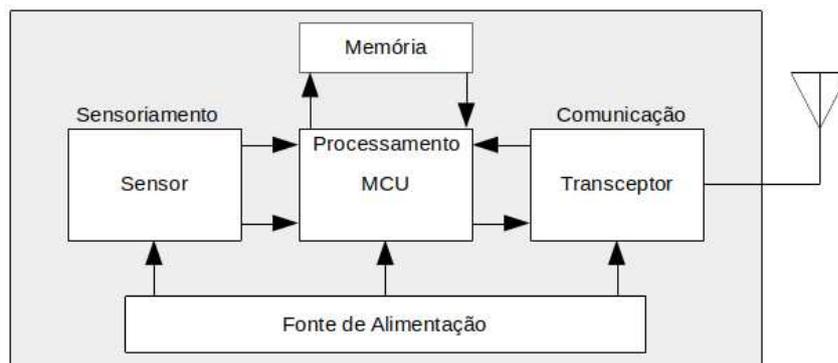


Figura 2.1 – Elementos de um dispositivo sensor.

35 de transmissão, recepção, amplificador e antena. Normalmente, a unidade de alimentação utilizada consiste em uma bateria e/ou em uma unidade de geração de energia associada, como uma célula fotovoltaica. (KOBO; ABU-MAHFOUZ; HANCKE, 2017).

### 2.1.1 Requisitos Gerais de Aplicação

Para que sejam adotadas comercialmente, os sistemas IoT devem atender a  
40 diversos requisitos de aplicações, caracterizados por:

- Disponibilidade
- Conectividade
- Confiabilidade
- Interoperabilidade
- 45 • Escalabilidade
- Controle de Recursos
- Segurança

A disponibilidade exige que qualquer que seja aplicação, o sistema deve poder ser acessado e atuar sobre requisições de clientes. Ou seja, sempre que uma informação é  
50 requisitada via software, realizada de forma remota pelo usuário, a rede deve ser capaz de “buscar” essa informação. Assim, a disponibilidade é uma exigência tanto de *hardware* quanto de software, exigindo a utilização de protocolos adequados voltados à aplicação, além de *hardwares* robustos, embora sejam de baixo custo (MACEDO; GUEDES; SILVA, 2014). A disponibilidade implica na conectividade, capacidade da rede de entregar dados  
55 relevantes e ser solicitada a fornecer qualquer dado a qualquer instante.

Confiabilidade do sistema é uma implicação direta da disponibilidade, com exigências mais rigorosas. Em RSSF, como dito anteriormente, o baixo custo proporciona dispositivos extremamente limitados atuando em diversos tipos de ambientes, seja sob

interferência eletromagnética, térmica ou mecânica. Nesse sentido, um sistema confiável  
60 implica na capacidade de auto-reconfiguração e/ou reorganização da rede em caso de  
falhas nos dispositivos ou perda dos enlaces de comunicação. Razão pela qual trabalhos  
como de Gaddour *et al.*, além de muitos outros, objetivam o aprimoramento dos mais  
diversos protocolos em sistemas de comunicação, neste caso, o de roteamento, visando alta  
taxa de entrega de pacotes, baixa latência e consumo eficiente de energia (GADDOUR;  
65 KOUBÂA; ABID, 2015). Similarmente, a análise de desempenho da rede compreende  
tanto os elementos de *hardware* quanto de *software*, sendo avaliados comparativamente ao  
custo, dadas as restrições e as aplicações.

Interoperabilidade, tanto quanto a conectividade, é um requisito *sine qua non*  
em RSSF, tendo em vista o funcionamento fundamentado na capacidade de disponibilização  
70 de dados. Desta forma, faz-se necessário que cada usuário, independente do equipamento  
utilizado, seja capaz de conectar remotamente a rede, requisitar informações e acessá-las.  
As aplicações devem ser desenvolvidas com claro objetivo de permitir acesso aos dados  
da rede por qualquer plataforma, seja de *hardware* ou *software*, aspecto correlacionado à  
disponibilidade do sistema.

Um aspecto essencial em redes limitadas consiste na capacidade de gerencia-  
75 mento dos recursos disponíveis, como alimentação, processamento e memória. De modo  
geral, os protocolos utilizados em RSSF, independente da camada a que se destinam,  
devem exercer o menor impacto possível de memória, exigindo o mínimo necessário de  
processamento “operacional”. O design de protocolos deve incorporar, preferencialmente,  
80 apenas funções estritamente necessárias, prevenindo o consumo desnecessário dos recursos  
disponíveis.

Diversas aplicações (e.g., agricultura) exigem que o sistema adotado seja es-  
calável. Caso necessário, a rede de sensores instalada deve suportar a adição de novos  
dispositivos e modos de operação, mantendo-se fiel aos requisitos analisados anteriormente.  
85 Por fim, a segurança da informação resulta da preocupação com o sigilo dos dados e  
com o funcionamento adequado do sistema. Em AMI, ataques localizados em medidores  
inteligentes são capazes de inundar a rede com pacotes *dummies*, incorrendo na exaustão de  
recursos energéticos dos dispositivos e banda. Portanto, é necessário garantir a integridade  
das informações e da rede através de controle de acesso eficiente, métodos robustos de  
90 autenticação, avaliação de integridade periódica dos dispositivos, dentre outras técnicas  
(KUMAR *et al.*, 2019).

### 2.1.2 Topologias

Um grande problema ocasionado por alimentação via bateria, consiste na  
determinação de uma forma eficiente para balanceamento do consumo de energia pela  
95 rede, evitando o surgimento de “pontos de enforcamento”, ou seja, dispositivos que lidam

com constante tráfego de dados. Um critério de bastante relevância ao implementar uma RSSF consiste na topologia de rede, podendo ser tratado como um requisito de aplicação, dado que cada topologia se adéqua melhor a determinadas aplicações em detrimento de outras. Em geral, definem-se três topologias: estrela, árvore e malha (*mesh*).

100 As topologias baseadas em estrela são constituídas por um único dispositivo central, conectado a todos os nós da rede, Figura 2.2. Exige-se que o dispositivo concentrador e, portanto, o nó fim da rede, seja robusto, confiável, “inteligente” e seguro, pois todo o tráfego da rede flui para e através deste. A menos que existam dispositivos substitutos, ou seja, que possam desempenhar a função de *gateway*, qualquer falha neste dispositivo seria  
105 catastrófica à rede. Entretanto, consiste em uma topologia muito empregada em Wireless Personal Area Network (WPAN).

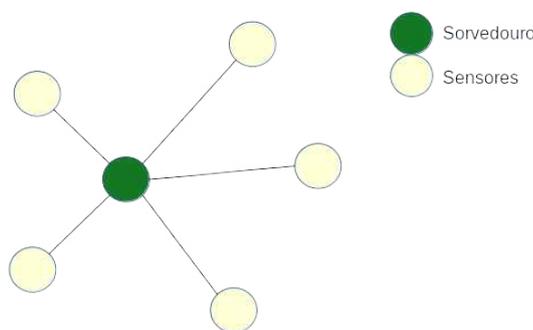


Figura 2.2 – Topologia em estrela.

Uma hierarquia é estabelecida em topologias baseadas em árvore, onde o sorvedouro, neste caso comumente denominado “raiz”, ocupa a posição de nível hierárquico mais elevado. Nesta topologia, os dispositivos mais distantes da raiz são denominados  
110 “folhas”, caracterizados pelos hardwares com menor poder de processamento, portanto, os mais limitados da rede. Esta topologia é muito utilizada por protocolos de roteamento devida sua escalabilidade. Sua simplicidade topológica permite fácil identificação de dispositivos defeituosos. Entretanto, à medida que a quantidade de dispositivos na rede aumenta, maior será a complexidade de gerenciamento e manutenção. Em redes de  
115 múltiplos saltos, é importante manter a conectividade, dado que a remoção de um enlace de comunicação pode acarretar na perda de pacotes de vários outros dispositivos. Assim, protocolos que utilizam essa topologia devem ter a capacidade de auto-reorganização, “contornando” as rotas defeituosas.

A topologia do tipo *mesh* pode ser completa ou parcialmente conectada. Em  
120 redes *mesh* completamente conectadas, ou redes de malha completa, cada dispositivo da rede está conectado a todos os outros, incluindo o *gateway*. Assim, existem diversos percursos ou rotas utilizadas para o roteamento do pacote até o destino em caso de enlaces perdidos (MCGRATH; SCANAILL, 2013). Em redes *mesh* parcialmente conectadas, como

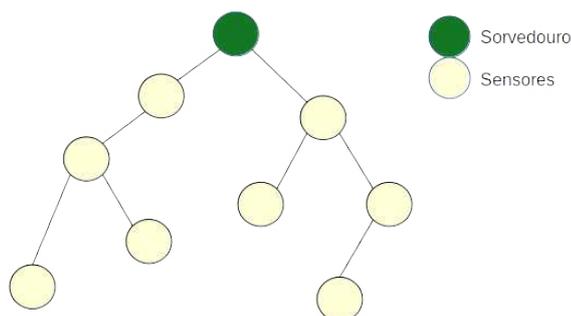
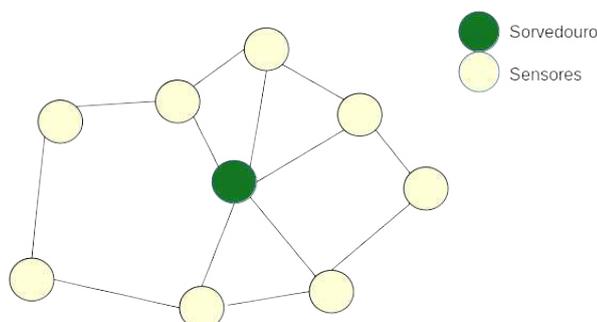


Figura 2.3 – Topologia em árvore.

na Figura 2.4, alguns dispositivos não se conectam a todos os outros, estabelecendo  
125 conexões indiretas, realizando o roteamento através de “saltos”, como é o caso de grande  
parte das RSSF.

Figura 2.4 – Topologia em malha (*mesh*).

### 2.1.3 Roteamento

O roteamento em RSSF constitui uma fértil área de pesquisa. O desenvolvimento  
de protocolos de roteamento para RSSF deve se ater aos requisitos de aplicação, bem  
130 como às limitações intrínsecas dos dispositivos em que serão embarcados. Esses protocolos  
são classificados em: proativos, reativos e híbridos.

Nos protocolos reativos a conexão para fins de roteamento ocorre apenas quando  
uma informação sobre disponibilidade de rotas é solicitada. Não há, neste caso, armazena-  
mento de tabelas de roteamento nos dispositivos. Um clássico exemplo de protocolo reativo  
135 é Ad-Hoc On Demand Distance Vector (AODV). Utiliza-se de requisições sob-demanda  
para determinação de rotas, possuindo dois mecanismos básicos de operação: descobrimento  
de rotas e manutenção. Por outro lado, os proativos, como Optimized Link State Routing  
(OSLR), são caracterizados pelo armazenamento de tabelas, constantemente atualizadas  
por mensagens de controle, propagadas pela rede periodicamente.

140 A hibridização consiste no funcionamento misto, a depender da necessidade.  
Consistem em protocolos desenvolvidos visando o controle de *overhead* dos protocolos

proativos, combinado à redução da latência a partir de “zonas de descobrimento de rotas” (GOVINDASAMY; PUNNIAKODY, 2018). O RPL, embora seja considerado proativo, possui diferentes modos de operação, sendo possível a realização do roteamento sem o armazenamento de endereços em tabelas (TRIPATHI; OLIVEIRA; VASSEUR, 2014).

Mencionado na seção 2.1.2, muitos protocolos de roteamento utilizam uma relação de ordenamento entre os dispositivos. São denominados protocolos hierárquicos, podendo, ou não, estabelecer *clusters* em sua topologia. O protocolo de roteamento *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH), é um exemplo de protocolo hierárquico fundamentado na formação de *clusters*, onde cada líder de um *cluster* é selecionado periodicamente a partir de um algoritmo estocástico.

A utilização de informações relativas à localização geográfica dos dispositivos são úteis em protocolos como o *Geographic Routing* (GR), outro exemplo de roteamento proativo. Utiliza apenas uma mensagem, denominada *Beacon*, enviada periodicamente por todos os dispositivos da rede. É responsável por propagar as coordenadas dos nós aos seus vizinhos. Com isso, são formados “mapas” em cada dispositivo, com a construção das rotas realizadas apenas quando existem dados a serem transmitidos. O nó vizinho mais próximo do ponto coletor da rede é selecionado como rota (KARKAZIS et al., 2012).

De modo geral, a finalidade do roteamento consiste em determinar os melhores percursos possíveis para um pacote de dados, considerando as informações disponíveis, usualmente propagadas a partir de mensagens de controle. Essas informações consistem em níveis da qualidade do enlace de comunicação, indicador de energia residual dos dispositivos vizinhos, número de saltos até o destino, latência, etc.

## 2.2 Protocolo RPL

O grupo de trabalho *Routing Over Low Power and Lossy Networks* (ROLL), da *Internet Engineering Task Force* (IETF), foi criado para desenvolver um protocolo de roteamento eficiente para Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). Especificamente, o objetivo fundava-se na criação de um protocolo capaz de realizar, eficientemente, o roteamento dos pacotes de dados em redes LLN. Inicialmente, foram analisados os principais requisitos para aplicação de redes LLN em ambientes residenciais, prediais, urbanos e industriais. Esses requisitos deram origem às RFCs 5826 (PORCU; BURON; BRANDT, 2010), 5867 (MARTOCCI et al., 2010), 5548 (WATTEYNE et al., 2009) e 5673 (PISTER et al., 2009), respectivamente. Escalabilidade, confiabilidade, estabilidade e segurança são alguns dos principais requisitos a serem atendidos por um protocolo de roteamento. Os esforços do grupo de trabalho resultaram no desenvolvimento do *IPv6 Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks* (RPL). Hodiernamente considerado como o protocolo *de facto* de roteamento para RSSF.

Basicamente, o RPL é um vetor de distância, [Distance-Vector \(DV\)](#), projetado para operar sobre diversos mecanismos de camadas de enlace, especialmente sobre as camadas de enlace (MAC) e física (PHY) padronizadas pelo padrão IEEE 802.15.4. Uma de suas principais características consiste na adaptabilidade, reagindo à alterações na rede através de mecanismos que permitem modificar as rotas preferenciais dos pacotes. Um exemplo comum consiste na perda de enlaces de comunicação entre dois ou mais dispositivos, especialmente em redes compostas por centenas ou milhares de sensores (GADDOUR; KOUBÂA; ABID, 2015). É um protocolo voltado a aplicações de redes LLN baseadas em coleta, onde os nós enviam medições periodicamente a um ponto coletor.

Três tipos de dispositivos são definidos e utilizados: roteadores de borda (*border routers*), roteadores (*routers*) e *hosts*. Os roteadores de borda os dispositivos concentradores da rede e, também, são os responsáveis por iniciar a construção da topologia. Os roteadores são nós que além de gerar tráfego a partir dos dados que coletam, também realizam o encaminhamento (*forwarding*) dos pacotes recebidos dos nós hierarquicamente inferiores. Já os *hosts*, ou *leaf nodes*, são os nós que apenas geram tráfego, normalmente posicionados às “margens” da rede. Hierarquicamente, os *leaf nodes* não estão acima de nenhum dispositivo. Essencialmente, tanto os roteadores quanto os *leaf nodes* possuem o mesmo *hardware* e, serão tratados neste trabalho como sinônimos.

Dada a plethora de funcionalidades disponíveis no RPL, visando atender aos mais diversos requisitos, fez-se necessário o suporte a três padrões de tráfego, ilustrados pela Figura 2.5, característicos: multiponto-a-ponto, [Multipoint-to-Point \(MP2P\)](#); ponto-a-multiponto, [Point-to-Multipoint \(P2MP\)](#) e ponto-a-ponto, [Point-to-Point \(P2P\)](#). A necessidade do MP2P deve-se à transmissão de dados dos nós ao sorvedouro, podendo ser chamado de tráfego de coleta (GADDOUR; KOUBÂA, 2012). O P2MP é utilizado para enviar informações de configuração da raiz aos nós, especialmente durante a formação da rede. Por fim, o tráfego do tipo P2P é utilizado pelos dispositivos sensores para a construção de rotas dos nós à raiz.

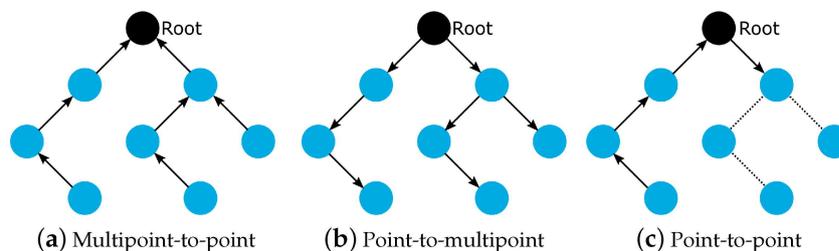


Figura 2.5 – Tráfego suportado pelo RPL.  
Fonte: (SOBRAL et al., 2019)

A estrutura topológica formada nas RSSF com roteamento RPL são similares a uma árvore, baseada no conceito de Grafos Acíclicos Direcionados, [Direct Acyclic Graph \(DAG\)](#). Esse tipo de estrutura permite que seus elementos realizem conexões com

diversos outros, sem que um caminho iniciado em um determinado vértice seja nele mesmo encerrado. Ou seja, a escolha de uma estrutura DAG para aplicações em redes RSSF, deve-se pela impossibilidade de se formarem ciclos na rede, exigindo pontos distintos de origem e destino.

O protocolo RPL, portanto, consiste em um Grafo Acíclico Direcionado Orientado ao Destino, **Destination Oriented Direct Acyclic Graph (DODAG)**. As relações estabelecidas entres os diversos roteadores da rede são definidas através de uma função objetivo (**OF**), responsável por avaliar, atribuir e otimizar a seleção das rotas que serão estabelecidas na etapa operacional do roteamento dos pacotes de dados, tendo como destino os roteadores de borda. A formação da topologia ocorre a partir das mensagens de controle.

### 2.2.1 Mensagens de Controle RPL

São as mensagens responsáveis por propagar os dados de configuração e manutenção da estrutura de roteamento. Utiliza-se, para este fim, o Protocolo de Mensagens de Controle da Internet Versão 6, **ICMPv6**, especificado pela RFC 4443 (GUPTA; CONTA, 2006). Em geral, cada mensagem ICMPv6 é constituída por um cabeçalho contendo os campos *Type*, *Code*, *Checksum* e *Base*, como ilustrado pela Figura 2.6.

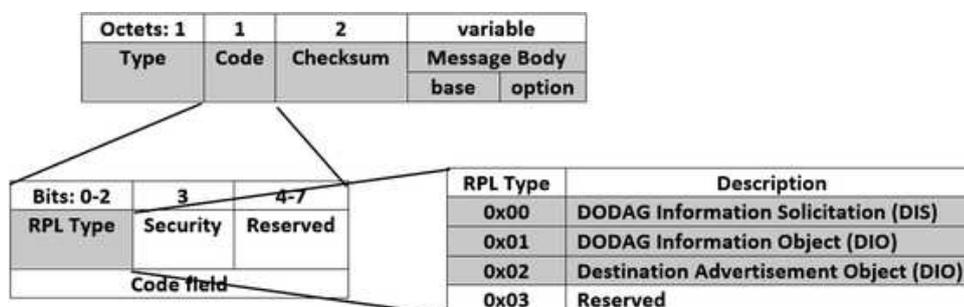


Figura 2.6 – Estrutura genérica das mensagens ICMPv6 no RPL.

(GADDOUR; KOUBÂA, 2012)

O campo *Type* é responsável por identificar a mensagem como sendo do tipo RPL (valor igual a 155). *Code* especifica, dentre os quatro tipos existentes, uma única mensagem de controle ICMPv6 do “tipo” RPL. As quatro mensagens ICMPv6 configuradas no protocolo RPL são apresentadas na Tabela 2.1.

As mensagens do tipo DIO são utilizadas para iniciar o processo de formação do **DODAG**, fomentando a etapa de “descobrimento” dos dispositivos vizinhos, *Neighbor Discovery*. Além disso, são as principais mantenedoras da estrutura no modo de operação padrão. Carregam todos os dados necessários ao funcionamento e manutenção. O formato do campo *Base* de um DIO, representado na Figura 2.7, contém:

Tabela 2.1 – Tipos de mensagens de controle do RPL.

Código	Mensagem de Controle
0x00	Solicitação de Informação do DODAG DODAG Information Solicitation (DIS);
0x01	Objeto de Informação do DODAG DODAG Information Object (DIO)
0x02	Objeto de Anúncio de Destino do DODAG Destination Advertisement Object (DAO)
0x03	Confirmação do Objeto de Anúncio de Destino do DODAG Destination Advertisement Object Acknowledgement (DAO-ACK)

- *RPL Instance ID*: identifica a instância RPL da qual o DODAG faz parte. Uma instância RPL é o conjunto de um ou mais DODAGs, sendo possível que um dispositivo pertença a duas instâncias (THUBERT et al., 2012);
- *Version Number*: identifica a versão atual de um DODAG. Sempre que estrutura da rede é reconstruída ou reconfigurada, atribui-se um novo valor ao *DODAG Version*;
- *Rank*: classificação hierárquica, em relação à raiz, de cada nó pertencente ao DODAG;
- *Grounded (G)*: informa se o roteador de borda desempenha ou não sua finalidade, indicando que a rede é operacional, desempenhado sua finalidade. Caso o valor do indicador G seja 1, os nós são informados que a rede está funcionando e, caso não esteja, o valor será 0;
- *DODAG ID*: é o identificador IPv6 único do DODAG;
- *DODAG Preference (Prf)*: campo utilizado para indicar o grau de utilização da raiz em um DODAG, utilizado quando existem dois ou mais sorvedouros na rede.

O campo MOP indica o Modo de Operação do roteamento, determinando na etapa de construção da topologia como os dispositivos deverão funcionar. Existem quatro opções de MOP, indicados na Tabela 2.2. Diferem em termos de suporte ou não para rotas descendentes, sendo as rotas ascendentes, *upwards*, suportadas por padrão.

O modo de operação com armazenamento ativa a propagação de mensagens do tipo DAO, proveniente de um nó “filho” a seu “pai”. Desta forma, o “pai”, ao receber um DAO, armazena tanto o endereço do emissor quanto do destino da mensagem. Esse processo se repete até que a mensagem alcance a raiz. No modo sem armazenamento, o dispositivo que recebe o DAO simplesmente encaminha para seu “pai preferido”, não existindo neste caso, uma tabela de roteamento armazenada localmente nos dispositivos.

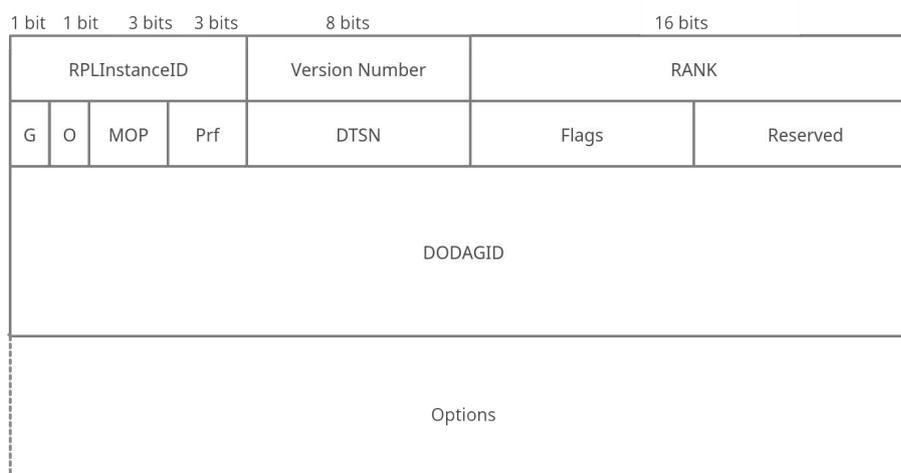


Figura 2.7 – Formato do campo *Base* da mensagem tipo DIO.

Tabela 2.2 – Modos de operação do RPL.

Código	Modo de Operação (MOP)
0	Sem Rota Descendente Mantida pelo RPL
1	Modo de Operação com Armazenamento
2	Modo de Operação sem Armazenamento sem <i>Multicast</i>
3	Modo de Operação com Armazenamento com <i>Multicast</i>

Nesse, caso, é a raiz que armazenará as rotas, através das relações de “parentesco” entre os nós.

As mensagens do tipo DAO são utilizadas para estabelecimento de rotas no sentido reverso, *downward*, habilitando tráfego P2MP. A transmissão de um DAO tem por objetivo anunciar endereço Internet Protocol (IP) do transmissor, permitindo que as tabelas de roteamento de cada um de seus vizinhos sejam preenchidas, desde que habilitado em modo de armazenamento. É também utilizada como mecanismo de reconstrução de rotas. A utilização de mensagens do tipo DAO, seja na etapa de construção, seja para reparação, pode utilizar a mensagem de notificação de recebimento, o DAO-ACK. As informações específicas contidas no campo *Base* de uma mensagem DAO, são:

- *DAO Sequence*: sequência de reconhecimento de um determinado nó, sendo incrementada a cada DAO, garantindo sua atualização.
- *D*: informa a presença da *DODAGID*.
- *K*: informa a necessidade de envio de um DAO-ACK.

Um dispositivo isolado da rede, seja durante a fase de construção, ou devido ao

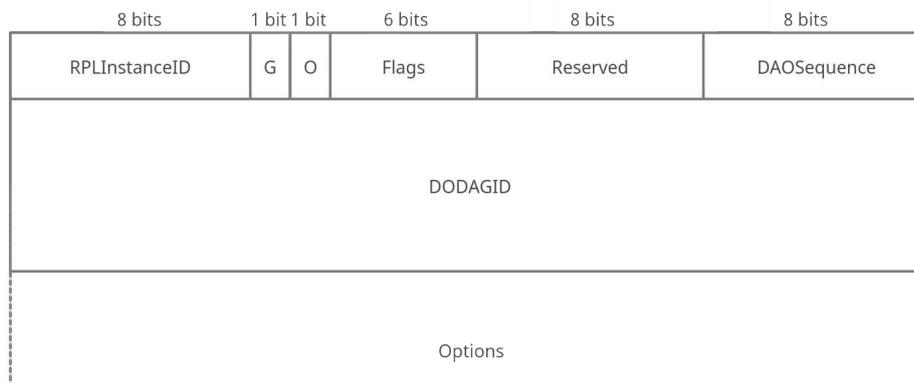


Figura 2.8 – Formato do campo *Base* da mensagem tipo DAO.

*deployment* posterior à formação, disseminará uma mensagem do tipo DIS. Essencialmente, o DIS solicita, a qualquer nó que o receba, uma mensagem do tipo DIO contendo os dados de configuração. Os campos disponíveis no *Base* do DIS, Figura 2.9, não possuem valores ou indicadores especificados.



Figura 2.9 – Formato do campo *Base* da mensagem tipo DIS.

## 2.2.2 Operação do Protocolo

O processo de formação da rede é iniciado pelo roteador de borda através de mensagens do tipo DIO, Figura 2.10, iniciando o processo de descoberta de vizinhos (*Neighbor Discovery*).

O DIO é propagado de forma descendente, Figura 2.10 (a), contendo todas as informações de configuração necessárias. Os nós vizinhos à raiz, ao receberem um DIO, processam as informações de configuração do DODAG que está sendo formado, determinam seu *rank* com base no valor contido no DIO, incrementando-o em 1. Em seguida, os nós adicionam a raiz à sua tabela de roteamento como rota prioritária, atualizam o valor do campo *rank* com o valor calculado e propagam o DIO para seus vizinhos, Figura 2.10 (b). Esse processo será repetido por roteador da rede até que todos tenham se conectado ao DODAG, obtendo os nós com *rank* 2 e 3, Figura 2.10 (c) e (d).

Com o DODAG formado, inicia-se a etapa de seleção de rotas. Cada roteador da rede, à exceção da raiz, selecionará a rota que utilizará para o encaminhamento de

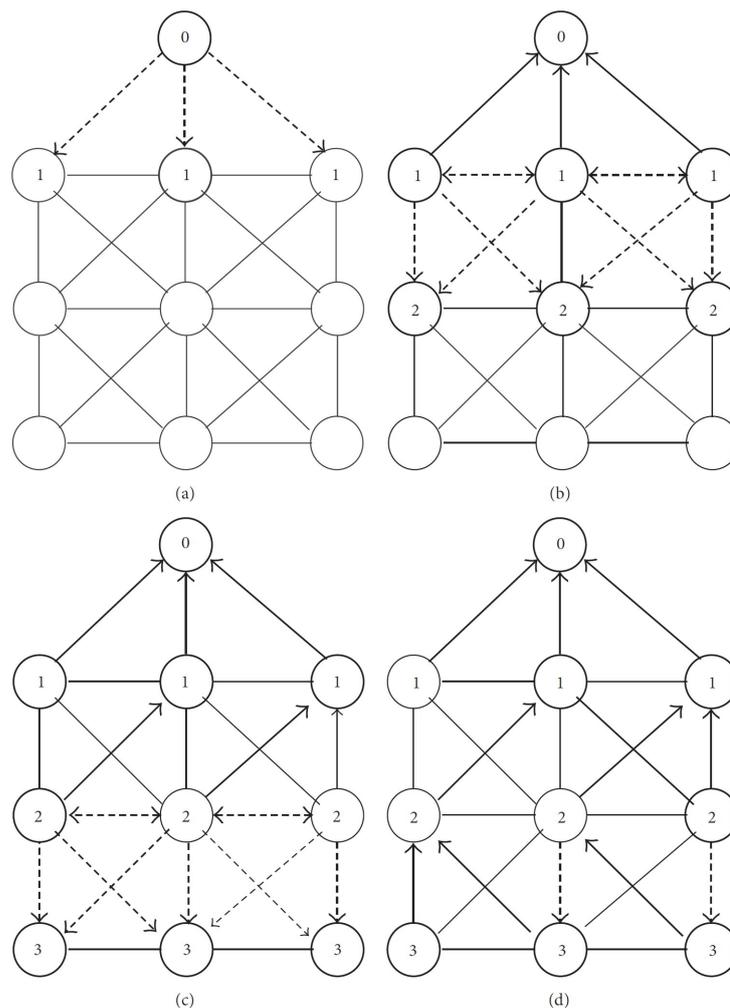


Figura 2.10 – Processo de formação de um DODAG.

Fonte: (MOHAMED; MOHAMED, 2015)

290 pacotes até a raiz. Ao receber um DIO, cada roteador verifica a existência do endereço do emissor em sua tabela de roteamento. Em seguida, analisa o valor do *rank* do emissor, com o objetivo de se posicionar hierarquicamente acima ou abaixo do emissor, ou seja, mais próximo à raiz, ou não.

Assumindo roteamento ascendente, o conjunto de possíveis rotas é armazenado  
 295 em sua tabela de roteamento. Esse conjunto é formado através do recebimento de mensagens do tipo DIO que se originam por toda a rede, podendo ser de nós com *rank* maior ou menor. Dessa forma, ao receber um DIO pela segunda vez, o nó poderá descartar ou não o DIO com base em algum critério (normalmente estabelecido pela OF). Caso seja processado, o nó tem seu *rank* recalculado pela OF, sua tabela atualizada e, posteriormente, propagará  
 300 novamente o DIO, como ilustrado pelo fluxograma, Figura 2.11. Este cálculo do *rank*, utilizando a função “canônica”, **Objective Function Zero (OF0)**, é apresentado na Seção 2.2.4.1. Uma vez que o DODAG é construído e as tabelas preenchidas com as possíveis rotas, o roteamento de pacotes está completamente operacional.

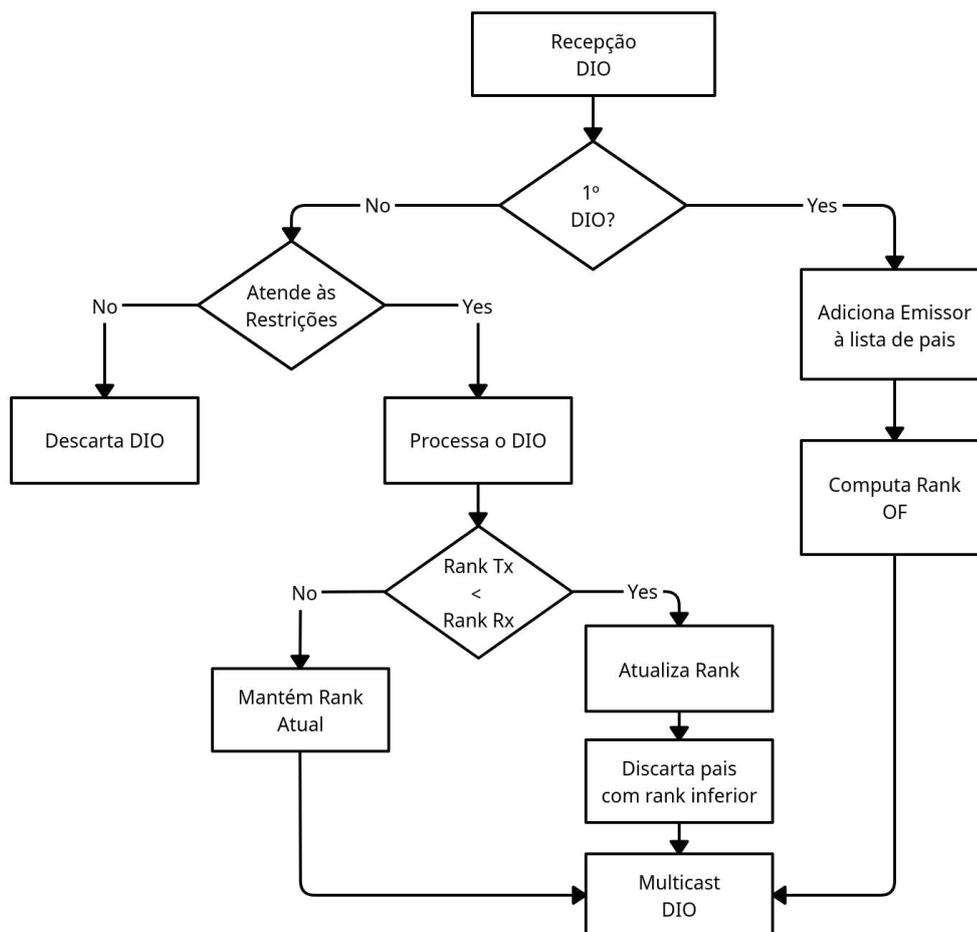


Figura 2.11 – Fluxograma de operação de um roteador.

Eventualmente, duas situações podem ocorrer ao fim da formação e estabelecimento das rotas. A primeira consiste na eventualidade de um nó ter sido isolado da rede, ou seja, as mensagens disseminadas durante as etapas de configuração e de estabelecimento das rotas não o alcançaram. Um segundo cenário ocorre devida a implantação de um novo roteador à rede após o processo de formação e seleção. Nesses casos, a “última” mensagem de controle a ser enviada é o **DIS**, requisitando a qualquer dispositivo em seu alcance de transmissão, informações sobre a existência, ou não, de um DODAG.

### 2.2.3 Algoritmo Trickle

O algoritmo *Trickle* consiste em um *timer* responsável pelo gerenciamento dos disparos de mensagens do tipo DIO em redes roteadas pelo protocolo RPL. Esse gerenciamento, definido pela RFC 6206 (LEVIS et al., 2011), é realizado através de um temporizador que, em situações de estabilidade da rede, reduz a frequência dos disparos de mensagens de controle ICMPv6, evitando *overhead* na rede.

Como mencionado anteriormente, as mensagens de controle são responsáveis

pela construção, manutenção e reparo de uma rede RPL, cada qual desempenhando uma função específica. Desta forma, sempre que uma inconsistência na rede é identificada, os mecanismos de reparo de topologia são acionados. São definidos dois tipos de reparo, um local e um global.

Um reparo local é ativado quando um determinado nó recebe um pacote de dados, orientado à raiz, de outro dispositivo com *rank* hierarquicamente superior, ou seja, o emissor possui um *rank* inferior ao do receptor. Essas inconsistências de roteamento indicam a possível existência de um *loop* na topologia da rede. Ao processar o pacote de dados recebido e comparar seu *rank* com o do emissor, verificando a existência de uma inconsistência, o nó receptor irá automaticamente iniciar o disparo de mensagens do tipo DIO com o objetivo de reparar os enlaces de comunicação que foram perdidos. Entretanto, este primeiro disparo do DIO desencadeará uma sequência de disparos provenientes de outros nós da rede, ocasionando *overhead* e/ou congestionamentos. Em aplicações que necessitam de constante envio de pacotes de dados, congestionamento e *overhead* podem levar ao descarte de uma grande quantidade de pacotes de dados.

O reparo global, por outro lado, é realizado pelo ponto coletor da rede, a raiz. Ocorre sempre que o valor do *DODAGVersionNumber* é incrementado, iniciando uma reconstrução global da topologia. Nesse caso, os nós podem ter suas posições hierárquicas alteradas.

Os mecanismos do *Trickle* responsáveis por determinar a periodicidade dos disparos de mensagens do tipo DIO consistem em três parâmetros configuráveis e três variáveis de controle (LEVIS et al., 2011):

• Parâmetros:

- $I_{min}$ : é o tamanho mínimo do intervalo.
- $I_{max}$ : tamanho máximo assumido para o intervalo, descrito como duplicação do intervalo mínimo  $\log_2(max/min)$  (LEVIS et al., 2011). Alternativamente,  $I_{max}$  pode ser obtido através da equação (2.1).

$$I_{max} = I_{min} 2^{I_{doubling}}, \text{ com } I_{doubling} \in \{1, 2, 4, 8, 16\}. \quad (2.1)$$

–  $k$ : contante de redundância, com  $k > 0$ , responsável por limitar a quantidade de mensagens de controle quando não existir inconsistências na rede.

• Variáveis de controle:

- $I$ : tamanho atual do intervalo.
- $t$ : valor compreendido entre  $\frac{I}{2}$  e  $I$ . O intervalo  $t$  marca o instante em que um DIO pode ser transmitido.

- $c$ : é contador de mensagens consistentes, ou seja, um DIO é considerado consistente caso tenha sido transmitido no instante  $t$  se, e somente se,  $c < k$ .

O valor de  $I$  é escolhido no intervalo  $I_{min} \leq I \leq I_{max}$ , iniciando o primeiro intervalo. Usualmente, em algumas implementações, o valor escolhido é  $I = I_{min}$ . O contador  $c$  é ajustado para zero e  $t$  é sorteado no intervalo  $\frac{I}{2} \leq t < I$ . O intervalo dobrará sempre que o *timer* chegar a zero. Caso ocorra alguma mensagem inconsistente, ou seja,  $t < c$  e  $I > I_{min}$ , o *Trickle* será ajustado, ocasionando o disparo de mensagens de controle na rede.

Um dos principais problemas gerados pelo *Trickle timer* se deve a funções objetivos que, ao mesmo tempo que otimiza e seleciona as melhores rotas possíveis, tendo como referência a lista de dispositivos vizinhos e métricas selecionadas, efetua a alteração de rota constantemente. Essa alteração nas rotas reinicia o temporizador, acionando o reparo local, inundando a rede com mensagens DIO (IOVA; THEOLEYRE; NOEL, 2015b).

## 2.2.4 Funções Objetivos

São definidas, por padrão, duas funções objetivos, a OF0 (*Objective Function Zero*) (THUBERT, 2012) e a MRHOF *Minimum Rank with Hysteresis* (GNAWALI; LEVIS, 2012). Em geral, as OF podem ser desenvolvidas e/ou adaptadas para utilização em aplicação específica, a partir do uso de métricas de roteamento e funções relacionadas, a critério do desenvolvedor. Permitem o cálculo do *rank*, determinando, conseqüentemente, as rotas que serão formadas. Em última análise, as OF restringem e otimizam as rotas selecionadas baseadas em métodos selecionados (GADDOUR; KOUBÂA, 2012).

### 2.2.4.1 Função Objetivo 0

A Função Objetivo 0 (OF0) foi projetada como regra mais simples para o processo de seleção dos nós “pais”. Considera-se apenas a menor quantidade de saltos entre emissor e raiz, permitindo que alterações de rotas ocorram apenas quando o link de comunicação com o “pai” preferido é perdido. Assim, a rota com link defeituoso é substituída pela segunda melhor alternativa presente em sua tabela de roteamento. O cálculo realizado é dado conforme a equação (2.2):

$$R_n = R_p + R_\Delta \quad (2.2)$$

em que  $R_n$  é o *rank* calculado do nó com base nas informações recebidas pelo DIO,  $R_p$  é valor do *rank* do “pai” preferido, ou seja, aquele que representa o menor número de

saltos até a raiz.  $R_\Delta$  consiste em um valor de variação entre o *rank* do “pai” e “filho” (THUBERT, 2012). Este valor é determinado pela equação (2.3).

$$R_\Delta = [(R_f * R_{Sp}) + R_S] * R_{MRI} \quad (2.3)$$

$R_f$  consiste no incremento de *rank*, a RFC 6551 estabelece o valor 1, porém  
 385 consiste em um valor configurável. O passo,  $R_{Sp}$ , determina o incremento do *rank* em uma determinada direção hierárquica do DODAG.  $R_S$  é utilizado para manter a diversidade de rotas, permitindo a escolha de ao menos um sucessor possível. O valor fixo de incremento, dado por  $R_{MRI}$ , representa o menor incremento de *rank* entre um nó e qualquer um de seus possíveis “pais”.

#### 390 2.2.4.2 Função Objetivo MRHOF

Assim como a OF0, a **Minimum Rank with Hysteresis Objective Function (MRHOF)**, apresentada por Gnawali *et al.*, tem por objetivo selecionar a rota que apresenta o menor custo de percurso. Porém, busca evitar trocas desnecessárias das rotas preferenciais de cada dispositivo sensor a partir de informações relativas à qualidade do enlace de  
 395 comunicação. Esse comportamento deve-se ao disparo de mensagens de controle tratado na seção 2.2.3. A MRHOF utiliza-se de dois princípios: determinação do percurso com menor *rank*; e alteração da rota caso um novo percurso, com menor custo relativo à métrica utilizada (ETX), seja encontrado (GNAWALI; LEVIS, 2012). Esta característica é conhecida por histerese, responsável por evitar as alterações desnecessárias de rotas na  
 400 rede.

Esta OF utiliza a **Expected Transmisison Count (ETX)** como métrica de qualidade do enlace de comunicação, mas suporta o uso de métricas como números de saltos (*Hop Count*), latência e energia residual do dispositivo. A utilização da ETX é justificada, visto que é o inverso da **Packet Delivery Ratio (PDR)**. Portanto, um percurso  
 405 com alta taxa de entrega de pacote, possuirá baixa ETX. As equações 2.4 e 2.5, representam os cálculos de custo do percurso e da qualidade do enlace, respectivamente.

$$P_c = \frac{1}{Link_c} + V_c \quad (2.4)$$

$$ETX = \frac{1}{PDR_{link}} = \frac{N_t}{N_s} \quad (2.5)$$

onde  $P_c$ ,  $Link_c$  e  $V_c$  representam os custos do percurso, do enlace de comunicação entre um par de nós e o custo relativo do dispositivo vizinho informado pelo DIO, respectivamente.  $N_t$  e  $N_s$  consistem no número total de transmissões e a quantidade de transmissões  
 410 bem-sucedidas entre um determinado par de sensores, respectivamente.

## 2.2.5 Outras Funções Objetivos

Em Gaddour *et al.* o protocolo RPL é aprimorado através do uso de lógica *fuzzy* com objetivo de garantir qualidade de serviço em redes LLN estáticas e móveis (GADDOUR; KOUBÂA; ABID, 2015). Neste artigo, os autores desenvolveram a Objective Function Fuzzy Logic (OF-FL). Consiste em uma função que combina quatro métricas, utilizando-as como variáveis linguísticas de um sistema de inferência *fuzzy*. As métricas utilizadas foram *end-to-end delay*, número de saltos, ETX e energia residual. Cada uma dessas métricas, quando utilizadas individualmente, otimiza uma determinada característica da rede em detrimento de outras. Desta forma, a utilização de um sistema de inferência *fuzzy* busca equilibrar o impacto individual das métricas, contabilizando-as simultaneamente. Com isso, os autores conseguiram estimar a qualidade do link com mais precisão, além de uma redução no consumo de energia da rede.

Em redes com mobilidade, a OF-FL é combinada a uma extensão do RPL, o Corona RPL (Co-RPL) (GADDOUR *et al.*, 2014). A rede é dividida em coroas circulares em torno da estrutura do grafo DODAG, permitindo a identificação e localização de um nó em movimento, sendo determinado um “pai” alternativo conforme o nó se desloca de uma região a outra. No entanto, os dispositivos móveis devem se deslocar com baixa velocidade.

Em Quan *et al.* foram propostos três esquemas integrados a uma pilha de comunicação IPv6 adaptada: reparo local ágil (*Fast Local Repair*), balanceamento de tráfego com contexto energético (*Energy-awareness Load Balancing*) e uma combinação entre os dois (LE; NGO-QUYNH; MAGEDANZ, 2014). O reparo local ágil é responsável por fornecer redundância de rotas, permitindo que dispositivos com mesmo *rank* possam ser temporariamente selecionados como “pai” preferencial. Este método reduz a quantidade de reparos locais sempre que um link de comunicação é perdido. O balanceamento de tráfego da rede é realizado considerando a energia residual do “pai” preferencial, bem como a frequência com que os possíveis “pais” são escolhidos. Os esquemas apresentados são fundamentados em múltiplas rotas, porém implicam em alterações significativas à estrutura original do RPL.

Em Kim *et al.* foi especificado um método para controle de congestionamento e balanceamento da rede denominado *Queue Utilization based RPL* (QU-RPL). Essencialmente, consiste na utilização de Teoria de Filas, permitindo que os dispositivos da rede alterem o percurso dos pacotes de dados com base na taxa de ocupação de *buffer* de seus vizinhos. A função objetivo utilizada abarca a OF0 combinada à ETX, sendo a OF0 responsável pela determinação do *rank* enquanto a ETX é responsável pela seleção da rota. A teoria de Filas, neste caso, estabelece um fator de utilização dos dispositivos da rede aplicando uma média móvel exponencialmente ponderada à quantidade de saltos, ao valor da ETX e à razão entre a quantidade de pacotes existentes na fila de *buffer* pela sua dimensão. Essa avaliação é realizada em cada dispositivo da rede, à exceção da raiz.

Desta forma, sempre que um novo DIO é recebido, as métricas são atualizadas, o valor do  
450 fator de utilização é processado e recalculado pela função objetivo e, caso o “pai” preferido  
possua um fator de utilização superior ao *threshold*, o nó poderá alterar o destino do  
pacote, selecionando um percurso alternativo disponível dentre as opções existentes em  
sua tabela de roteamento (KIM; PAEK; BAHK, 2015).

Similar à proposta QU-RPL, Al-kashoash *et al.* apresenta a *Congestion-Aware*  
455 *Objective Function* (CA-OF), que faz uso da taxa de ocupação de *buffer* e ETX como  
métricas (AL-KASHOASH; AL-NIDAWI; KEMP, 2016). Diferentemente da proposta  
QU-RPL, a CA-OF consiste em uma função objetivo que utiliza apenas valores percentuais  
relacionados ao *buffer*, percentual de ocupação e desocupação. Assim, a função objetivo  
consiste em uma soma ponderada da ETX e da taxa de ocupação do nó, tendo como peso  
460 os percentuais recebidos através do DIO.

Outras formas de balanceamento e controle de congestionamento em RSSF  
consistem no uso de múltiplos dispositivos atuando como raiz, *border routers*. Os gargalos  
nas redes normalmente são formados pelos nós mais próximos à raiz de um DODAG.  
Desta forma, ao utilizar várias raízes, parte do tráfego é redirecionado, fluindo em direção  
465 aos outros sorvedouros. Neste cenário, como ocorre a formação de mais de um DODAG,  
um por raiz, é possível utilizar OF distintas, uma para cada DODAG. Além disso, ao  
utilizar dois ou mais sorvedouros, obtém-se um aumento de eficiência das funções objetivos  
utilizadas (FAROOQ *et al.*, 2015).

Duquennoy *et al.* utilizam a *Estimated Duty Cycled (EDC)* como métrica do  
470 protocolo *Opportunistic RPL (ORPL)*. A EDC determina a quantidade de ativações de  
rádio (*wake-ups*) necessárias para que um pacote seja entregue à raiz. A seleção das rotas,  
nesta proposta, não é realizada pelos nós transmissores, mas pelos nós que receberem  
o pacote via *anycast*. É necessário a sincronização da rede para que ao menos um nó  
vizinho esteja com seu rádio ativado, receba o pacote e decida encaminhá-lo à raiz. O  
475 encaminhamento é realizado caso o receptor esteja próximo à raiz ou quando o destino  
informado no pacote esteja na tabela de roteamento do receptor. Caso contrário, o pacote  
será ignorado. Um problema nesta abordagem ocorre quando dois ou mais dispositivos  
decidem encaminhar um mesmo pacote, gerando cópias desnecessárias na rede podendo  
incorrer no surgimento de gargalos (DUQUENNOY; LANDSIEDEL; VOIGT, 2013).

480 Iova *et al.* apresentou a *Expected Life Time (ELT)*, uma nova métrica que  
estende o tempo de vida útil da rede a partir de decisões dado o tempo de vida residual  
de cada dispositivo. A identificação dos dispositivos que possuem o menor tempo de vida  
possibilita a escolha de um “pai preferido” alternativo sem que a rede seja reconfigurada  
por desativação de um nó. Desta forma, além da nova métrica, a solução propõe o uso  
485 de múltiplas rotas. Entretanto, sempre que um rota é alterada, mensagens de controle  
são disparadas na rede, dada a reinicialização de *timer* do DIO, acarretando o envio

de mensagens [DIO](#) ([IOVA](#); [THEOLEYRE](#); [NOEL, 2015a](#)). Devido à possibilidade de fragmentação dos pacotes de dados, é possível que certos fragmentos possam ser transmitido para outro “pai preferido”, sendo necessário garantir que um fluxo de transmissão seja  
490 direcionado a um único dispositivo.

[Gedminas et al.](#) propõe um sistema *Max-Min Ant P System* (MMAPS), utiliza um protótipo de feromônios e de regras de atualização, conforme o algoritmo Ant System (AS). MMAPS utiliza estruturas de “membrana” biológica para organizar objetos e estabelecer regras de evolução. As regras evolutivas são definidas como método de  
495 desenvolvimento do sistema, determinando a formiga/agente mais eficiente. As regras de comunicação passam a ser implementadas a partir de atualizações globais e locais de ferormônio. De acordo com os autores, o sistema proposto permite um equilíbrio entre performance, escalabilidade e flexibilidade da rede ([GEDMINAS](#); [DUOBA](#); [NAVAKAUSKAS, 2020](#)).

500 [Thapar e Batra](#) propuseram uma adaptação do ACO à função objetivo MRHOF, otimizando o consumo de energia ([THAPAR](#); [BATRA, 2018](#)). De modo geral, fornece uma correção à MRHOF, que utiliza a ETX entre nó de origem e destino. Na metodologia apresentada, é adicionado um dispositivo dedicado à rede, responsável por reunir dados de consumo de cada rota existente no RPL e determinar o caminho com menor custo  
505 energético, a partir de uma análise dois-a-dois, ou seja, de cada par, da origem ao destino do pacote, buscando uma solução ótima global. Encontrada a solução, o dispositivo dedicado atualiza as tabelas de roteamento dos nós da rede, estabelecendo os “pais” preferidos de cada um. Consiste em uma prova de conceito, visto que a presença do nó dedicado exige uma atualização global do ferormônio, como ocorre no problema do caixeiro-viajante, *Traveling*  
510 *Salesman Problem*. Embora o artigo não mencione, é necessário o uso de mensagens de controle adicionais para viabilizar a comunicação com o nó “fora” da rede, podendo ocasionar maior *overhead*.

## 2.3 Wi-SUN e Padrão IEEE 802.15.4g

A [Wi-SUN](#) é uma especificação aberta baseada no padrão IEEE 802.15.4g e  
515 mantida pela Wi-SUN Alliance. Trata-se de uma aliança global responsável pelo desenvolvimento da especificação, além de garantir a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes. O perfil [Wi-SUN FAN](#) foi desenvolvido para aplicações em *Smart Cities*, [SM](#), [SG](#) e redes de utilidade pública em geral integradas à tecnologia IoT.

A pilha de protocolos abertos utilizados pela [Wi-SUN FAN](#), [Figura 2.12](#),  
520 incluem: o 6LoWPAN, RPL, IPv6, ICMPv6 e UDP (para os roteadores de borda). As camadas PHY e MAC da especificação são definidas pelo padrão IEEE 802.15.4g.

O padrão IEEE 802.15.4 define as especificações da camada física PHY e

<b>Camada de Rede</b>	IPv6/ICMPv6/RPL
	6LoWPAN
<b>DATA LINK</b>	802.15.4/4e
<b>Camada Física</b>	802.15.4g

Figura 2.12 – Especificação Wi-SUN FAN para dispositivos sensores.

MAC para um protocolo de comunicação projetado para satisfazer um conjunto de necessidades para comunicações sem fio com potência limitada e de curto alcance. Foi definido inicialmente em 2003 pelo grupo de trabalho IEEE 802.15, entretanto, uma série de revisões e emendas foram lançadas, como IEEE 802.15.4-2006, IEEE 802.15.4-2011 e IEEE 802.15.4-2015, além da emenda IEEE 802.15.4g-2012, adicionando novos recursos e esclarecimentos às versões existentes.

A emenda 15.4g é específica para [Low-Rate Wireless Personal Area Networks \(LR-WPAN\)](#), com aplicações em redes de utilidades públicas, razão pela qual foi adotada pela [Wi-SUN](#). São definidas três tipos de PHY no padrão: Multi-taxa e Multi-Regional Frequency Shift Keying (MR-FSK), MR-Offset Quadrature-Shift Keying (MR-OQPSK) e MR-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (MR-OFDM).

A PHY MR-FSK possui taxas de dados de até 400 kbps para a modulação 2-GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying). Devido ao envelope constante do sinal de transmissão, apresenta eficiência no consumo dos recursos energéticos necessários para as transmissões e baixa complexidade de implementação. Além disso, opera nas mais variadas faixas de frequências incluindo China, Europa, EUA, Korea, dentre outras.

### 3 Canais de Comunicação

O projeto adequado de um sistema de comunicação deve atender ao propósito fundamental que consiste na transmissão de informações de um dispositivo a outro através de um meio. Esse meio pelo qual a informação é propagada denomina-se canal de comunicação, propiciando a conexão entre transmissor e receptor. Em sistemas de comunicação sem fio, o meio de propagação consiste no ambiente compreendido entre emissor e receptor, em que as ondas eletromagnéticas propagam-se (e.g., água em comunicações subaquáticas e ar em comunicações terrestres).

As ondas eletromagnéticas são submetidas às condições impostas pelo canal, resultando na degradação das informações que transportam. Essa degradação impõe limites de desempenho aos sistemas de comunicação. Com isso, a caracterização estatística do comportamento do canal, a partir da identificação de cada fenômeno interferente, objetiva desenvolver receptores robustos guarnecidos de técnicas de processamento que possam garantir a menor quantidade de erros necessária a correta recuperação dos dados.

O ambiente compreendido entre emissor e receptor apresenta variada diversidade topográfica, propiciando situações envolvendo transmissões com visada direta - [Line-of-Sight \(LoS\)](#) - entre dispositivos transmissores e receptores ou cenários com obstruções por relevo, vegetação ou edificações. Além disso, diferentemente das características previsíveis de canais que utilizam meios de propagação conduzidos (e.g., cabo coaxial, fibra óptica, etc.), os canais com propagação aberta (não-cabeados) apresentam comportamento complexo e não-estacionário. Dada a característica aleatória dos fenômenos, somada à quantidade de fatores que atuam sobre o sinal propagado, faz-se necessário a realização de medições específicas que fundamentem a modelagem estocástica dada ao canal de um determinado sistema de comunicação.

Além disso, os sinais são suscetíveis a ruídos aditivos, como o ruído térmico proveniente do próprio *hardware* devido a temperatura de componentes ativos e passivos. A interferência multiplicativa, por sua vez, ocorre durante o processo de propagação de onda, onde os sinais são submetidos a diversos processos. Esses processos são caracterizados por: reflexão, refração (também denominada transmissão), difração, absorção, espalhamento e pelos padrões de radiação das antenas. São subdivididos em três fenômenos característicos de degradação: perda de percurso, desvanecimento em larga escala e desvanecimento em pequena escala ([SAUNDERS; SIMON, 1999](#)). A Figura 3.1 apresenta o diagrama em blocos de um sistema de comunicação interposto por elementos que compõem um canal de comunicação sem fio.

A variação lenta (*slow fading*) ou desvanecimento em larga escala, pode ser

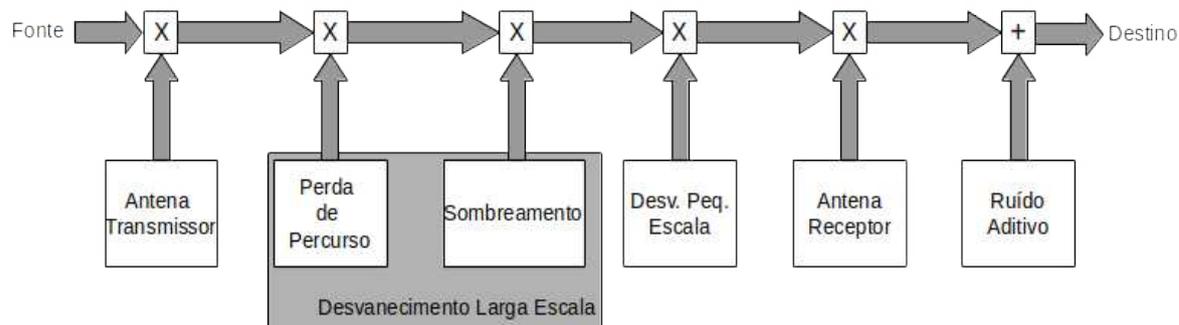


Figura 3.1 – Diagrama em blocos do enlace de comunicações sem fio.  
(SAUNDERS; SIMON, 1999) [Adaptado]

observada a partir de flutuações na intensidade de média do sinal em função da distância. Esse tipo de desvanecimento é caracterizado por perda de percurso e por sombreamento, ocasionado pela presença de obstáculos entre transmissor e receptor como edifícios, montanhas vales, etc. Por outro lado, o desvanecimento em pequena escala, também denominado *fast fading*, é caracterizado por variações nas componentes dos sinais em curtos intervalos de tempo. A reflexão da energia do sinal transmitido por obstáculos geram réplicas atenuadas do sinal original em direções distintas. Essas réplicas são recebidas pelo receptor em diferentes instantes de tempo, dado que cada uma percorre um caminho distinto com comprimentos distintos, caracterizando o chamado multipercurso. O comportamento típico de um sinal, exemplificando efeitos de desvanecimento em canais de comunicações sem fio é apresentado na Figura 3.2.

### 3.1 Multipercurso

Como dito anteriormente, o canal sujeita o sinal a diversos tipos de ruídos, distorções e outras interferências responsáveis pela atenuação da potência do sinal transmitido enquanto propaga do transmissor ao receptor. Os diversos obstáculos presentes no percurso de propagação, especialmente em ambientes urbanos caracterizados pela alta densidade de edificações, degradam os sinais. Estes efeitos exigem maior robustez do receptor para que o sinal transmitido sob o efeito de diversas interações seja recuperado. Além disso, várias réplicas atenuadas e com amplitudes distintas, apresentando deslocamento de fase e atraso em relação ao sinal original, também são recepcionadas. Esse atraso deve-se aos diferentes percursos realizados pelas réplicas originadas pelos fenômenos de reflexão e difração. O sinal resultante recebido sofre flutuações devida a adição construtiva e destrutiva dessas réplicas. Esse efeito proveniente do canal é denominado propagação multipercurso, podendo

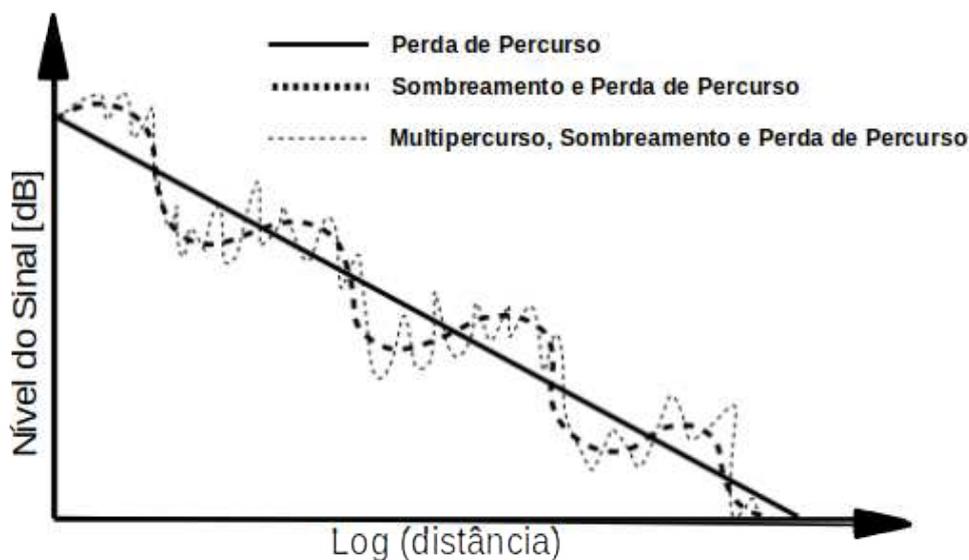


Figura 3.2 – Comportamento típico do sinal recebido.  
(GOLDSMITH, 2005)

ser aproveitado construtivamente em cenários sem visada direta - **Non Line-of-Sight (NLoS)**  
60 - entre os rádios. Em cenários envolvendo percurso livre de obstrução, o receptor recebe o  
sinal o dominante proveniente do percurso direto, além das réplicas atenuadas.

A reflexão ocorre quando ondas de rádio atingem obstáculos com dimensões  
consideravelmente superiores ao seu comprimento de onda, como: edifícios, casas, solo,  
lagos, dentre outros. Ao atingir a superfície com propriedade elétrica distinta do meio em  
65 que propagam-se, parte da energia da onda é refletida para o meio de origem enquanto  
outra parte é refratada (transmitida) pela superfície do objeto de obstrução (e.g., edifícios,  
solo e lagos). Esse último, consiste no fenômeno conhecido por perda refrativa.

A difração consiste na capacidade das ondas eletromagnéticas de irradiarem, de  
forma atenuada, uma região sob efeito de sombreamento provocado pela presença de um  
70 obstáculo. Essa característica, melhor compreendida por meio do princípio de Huygens,  
Figura 3.3, ocorre devido à capacidade das fontes pontuais da onda primária produzirem  
novas fontes, originando ondas esféricas secundárias que se espalham na mesma direção.  
Essas ondas secundárias somam-se às outras frentes de onda, que propagam-se na mesma  
75 direção, possibilitando a irradiação da região sob efeito de sombreamento. Esse fenômeno  
ocorre frequentemente na presença de obstáculos que possuem bordas (e.g., edificações) ou  
apresentam um formato pontiagudo (e.g., obstáculos do tipo “gume-de-faca”). A difração  
depende da geometria da borda, do meio de propagação e das características da onda.

O espalhamento é caracterizado por múltiplas reflexões do sinal sobre uma  
superfície. A incidência de uma onda eletromagnética sobre uma superfície eletricamente  
80 “áspera” resulta na reflexão da onda incidente em várias direções. Nesse caso, a protube-  
rância na superfície do obstáculo possui ordem de grandeza inferior ao comprimento de

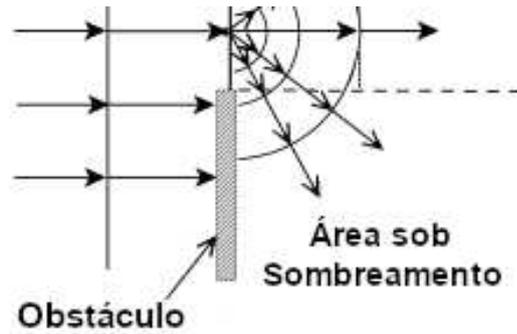


Figura 3.3 – Obstrução e difração de onda eletromagnética.

(FONTAN; ESPIEIRA, 2008) [Adaptado]

onda do sinal. A superfície rugosa e outras irregularidades consistem em árvores, postes de iluminação, placas de sinalização, dentre outras responsáveis pelo espalhamento. Cada nova reflexão da onda eletromagnética contribui para a formação de novos percursos, contribuindo para o desvanecimento por multipercurso.

Conforme indicado anteriormente, o sinal recebido em ambientes multipercursos é composto por um conjunto de réplicas atenuadas, defasadas e atrasadas em relação ao sinal original transmitido. Portanto, é possível tratar o canal como um filtro caracterizado por sua resposta ao impulso (FONTAN; ESPIEIRA, 2008). A resposta ao impulso complexa  $h(\tau)$  pode ser modelada por um filtro linear invariante no tempo, expressa por:

$$h(\tau) = \sum_{n=1}^N a_n e^{-j\theta_n} \delta(\tau - \tau_n) \quad (3.1)$$

em que  $N$ ,  $a_n$  e  $\tau_n$  consistem no total de percursos existente entre o transmissor e receptor, na amplitude do sinal e no atraso em relação ao  $n$ -ésimo percurso, respectivamente. Com fase dada por  $\theta_n$ . Cada onda recebida possui fase e amplitudes independentes do sinal original e das outras réplicas.

Assim, a resposta ao impulso do canal variante no tempo  $h(t, \tau)$  é modelado por um filtro linear e variante no tempo, expresso por:

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^{N(t)} a_n(t) e^{-j\theta_n(t)} \delta(\tau - \tau_n(t)) \quad (3.2)$$

com  $N(t)$ ,  $a_n$ ,  $\tau_n$  e  $\theta_n$  como definidos anteriormente, porém em função do tempo.

Embora o canal de comunicação de rádio possa ser caracterizado pela resposta ao impulso complexa  $h(t, \tau)$  e, assumindo linearidade, o canal de rádio pode ser modelado por funções relacionadas por meio da Transformada de Fourier, denominadas funções de Bello, Figura 3.4. Consistem em quatro funções: resposta impulsiva variante no tempo,

função de transferência variante no tempo, resposta impulsiva Doppler variante e função de transferência Doppler.

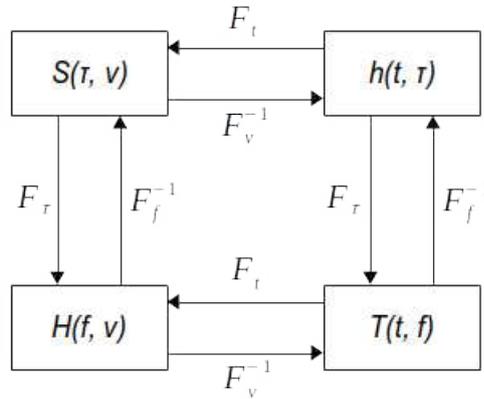


Figura 3.4 – Relação entre as funções de Bello (FONTAN; ESPIEIRA, 2008) [Adaptado]

A função de espalhamento dos retardos (atrasos) ou resposta impulsiva variante no tempo é dada por  $h(t, \tau)$ , equação 3.2. Desta forma, a função de transferência variante no tempo,  $H(t, f)$ , consiste na transformada de Fourier da resposta ao impulso  $h(t, \tau)$  com respeito ao atraso  $\tau$ . É interpretada como uma evolução da função de transferência no tempo, dada por:

$$T(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3.3)$$

A resposta impulsiva Doppler variante no tempo, ou função de espalhamento delay-Doppler  $S(\tau, \nu)$ , representa o espalhamento do sinal de entrada, dado por:

$$S(\tau, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \tau) e^{(-j2\pi\nu t)} dt \quad (3.4)$$

Função de espalhamento Doppler ou função de transferência Doppler,  $H(f, \nu)$ , é dada pela transformada de Fourier da resposta impulsiva variante, com respeito a  $\tau$ . Esta função descreve completamente um canal, expressa por:

$$H(f, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, \nu) e^{(-j2\pi f\tau)} d\tau \quad (3.5)$$

onde  $\tau$ ,  $t$ ,  $\nu$  representam o atraso, o tempo e o deslocamento devido ao efeito Doppler. Com frequência da portadora dada por  $f$ .

## 3.2 Modelos de Propagação

Apesar do mais variados modelos empíricos de propagação desenvolvidos na literatura, muitos não são aplicáveis às [RSSF](#). Desta forma, esta seção apresenta os modelos de propagação básicos e amplamente disponibilizados pelos simuladores de redes.

### 120 3.2.1 Modelo de Propagação no Espaço Livre

O modelo de propagação no espaço livre, [Free-Space Path Loss \(FSPL\)](#), consiste em um método de predição amplamente implementado nos mais diversos simuladores de redes disponíveis para [RSSF](#), como o [COOJA](#), [ns-2](#), [ns-3](#), [OMNet++](#), dentre outros. Neste modelo, os efeitos decorrentes de difração, reflexão, espalhamento, dentre outros possíveis interferentes existentes entre os rádios transmissores e receptores não são caracterizados. Considera-se apenas a existência de um único percurso determinado pelo caminho livre direto, [LoS](#), entre os dispositivos dispostos no espaço livre.

O nível de atenuação do sinal é determinado em função de sua frequência e da distância de separação entre os dispositivos de rádio. Desta forma, tendo em vista os ganhos de antena no transmissor e receptor,  $G_t$  e  $G_r$  respectivamente, com potência transmitida  $P_t$ , a potência do sinal recebido,  $P_r$ , a uma distância  $d$ , dada uma frequência  $f$ , é fornecida pela equação de Friis adaptada ([FRIIS, 1946](#); [KURT](#); [TAVLI, 2017](#)), como:

$$P_r(d, f) = P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.6)$$

em que  $\lambda$  é o comprimento de onda dado por  $\lambda = c/f$ .

A perda devida a propagação,  $L$ , ocasionada pelo percurso no espaço livre é dada pela relação entre as potências recebida e transmitida:

$$L(dB) = 10 \log \left( \frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log \left( G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \right) \quad (3.7)$$

$$L(dB) = -10 \log(G_t) - 10 \log(G_r) + 20 \log(f_{MHz}) + 20 \log(d_m) - 27.55 \quad (3.8)$$

com  $L$  em dB e os ganhos,  $G_t$  e  $G_r$ , em dBi. A atenuação do sinal aumenta com o inverso do quadrado da distância. Ainda que os ganhos das antenas isotrópicas estejam presentes nos cálculos, fundamentalmente, a distância e frequência são os fatores determinantes da atenuação.

140 Apesar de considerar apenas o caminho livre direto, o [FSPL](#) é a referência básica para o desenvolvimento de modelos mais complexos. Existem na literatura adaptações com

diferentes valores para o expoente da equação 3.6, com objetivo de agregar indiretamente efeitos relacionados à urbanização, relevo e/ou vegetação, sendo consideradas medições realizadas em campo (RAMESH et al., 2020).

### 145 3.2.2 Modelo Log-Normal com Sombreamento

Ao contrário do FSPL, no modelo Log-Normal considera-se o efeito da distância e a existência de obstáculos entre o par transmissor-receptor com o propósito de refletir a variação de potência dos sinais recebidos a partir dos percursos em um determinado ambiente devido à existência de diferentes tipos de ruídos e efeitos ocasionados pela  
150 presença de objetos.

Uma versão simplificada deste modelo consiste no modelo *Log-Distance*, que indica a perda média dada uma distância entre transmissor e receptor,  $d_i$ , e pela taxa de perda de percurso  $n$ . É expressa por:

$$L[dB] = L(d_0) + 10n \log\left(\frac{d_i}{d_0}\right) \quad (3.9)$$

De modo geral, o modelo de Log-Normal com sombreamento consiste em uma  
155 adaptação do modelo Livre com duas características distintas. Além da taxa de perdas, modela a variação de potência dos sinais devido à existência de obstáculos a partir de uma variável aleatória Gaussiana, caracterizado do efeito de sombreamento. A perda por percurso deste modelo é expressa por:

$$L(d_i) = L(d_0) + 10n \log\left(\frac{d_i}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3.10)$$

onde  $L(d_i)$  consiste na perda em dB a uma distância  $d_i$ , com  $d_i > d_0$ .  $L(d_0)$  é a atenuação  
160 do espaço livre a uma distância de referência  $d_0$ , determinada pela equação 3.6. A taxa de perdas é indicada por  $n$  (*path-loss rate*).  $X_\sigma$  é uma variável aleatória Gaussiana com desvio padrão  $\sigma$  em dB.

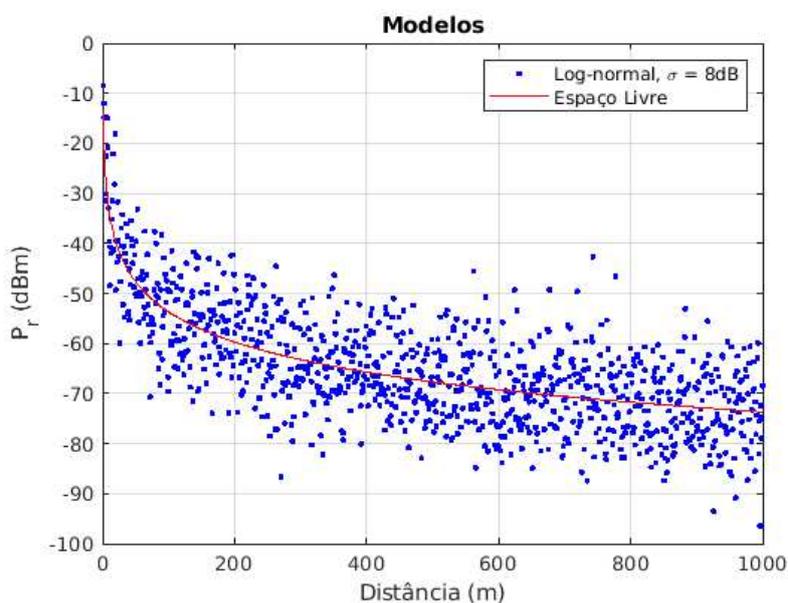
Os valores aplicados para o expoente de perda  $n$  devem ser determinados de acordo com o ambiente de aplicação e a partir de medições em campo. Tabela 3.1 apresenta  
165 exemplos de valores normalmente atribuídos a  $n$  para diferentes ambientes.

A Figura 3.5 apresenta a simulação dos modelos Log-normal, com  $\sigma = 8dB$ , e Espaço Livre. A frequência é de 915 MHz, com potência de transmissão de 18 dBm (potência de transmissão do transceptor Renesas RAA604S00) (RENESAS, 2019) e ganho das antenas, transmissora e receptora, iguais a 0 dBi.

Tabela 3.1 – Valores do expoente de perda por percurso

Ambiente	$n$	$\sigma$ [dB]
Espaço Livre	2	
Área Urbana	2.7 a 3.5	
Área Urbana c/ Sombreamento	3 a 5	3 a 12
Indoor	1.6 a 1.8	

(RöBESAAT et al., 2017) [Adaptada]

Figura 3.5 – Perda de percurso Log-normal e FSPL ( $f = 915$  MHz,  $G_t = 0$  dBi,  $G_r = 0$  dBi,  $P_t = 18$  dBm,  $\sigma = 8$  dB).

### 170 3.2.3 Modelo de Terreno Plano

Assim como no FSPL, o modelo de Dois Raios (*Two-Ray Grounded Reflection*) ou de propagação em “Terreno Plano”, desconsidera a existência de quaisquer tipos de obstáculos entre os dispositivos de rádio. Entretanto, consideram-se dois percursos significativos, um devido à existência de visada direta (LoS) e outro gerado pela reflexão do sinal no solo, integrando o coeficiente de reflexão do solo na composição do modelo (KURT; TAVLI, 2017). A geometria do modelo é ilustrada pela Figura 3.6.

Neste modelo, a potência do sinal recebido é fornecida pela expressão (KLOOS et al., 2006):

$$P_r(d) = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left| \frac{1}{r_1} \exp^{-jkr_1} + \frac{\Gamma_2(\theta_i)}{r_2} \exp^{-jkr_2} \right|^2 \quad (3.11)$$

onde  $k = \frac{2\pi f}{c}$ ,  $r_1$  e  $r_2$  são os comprimentos do percurso direto e refletido, respectivamente.

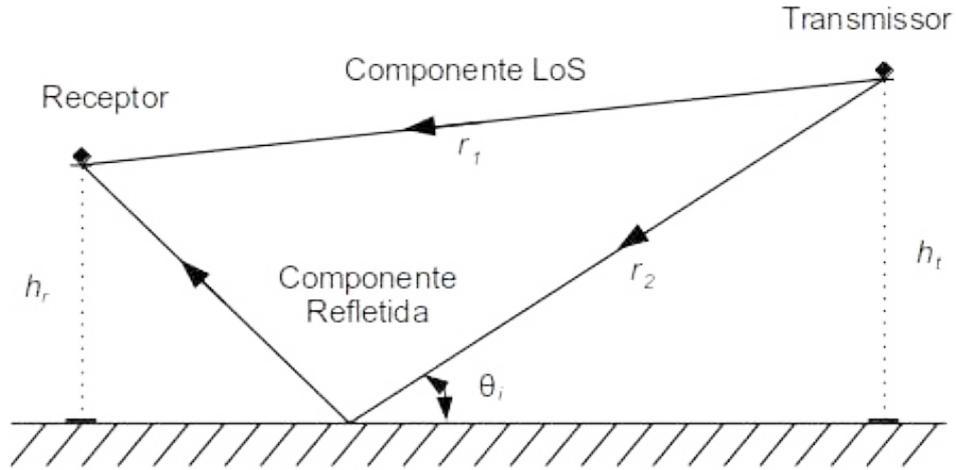


Figura 3.6 – Geometria do modelo terreno plano.

180  $\Gamma_2$  é o coeficiente de reflexão da superfície, com polarização horizontal (3.12) e vertical (3.13), dadas por:

$$\Gamma(\theta) = \frac{\sin \theta - a\sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + a\sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta}} \quad (3.12)$$

$$\Gamma(\theta) = \frac{-\epsilon_r \sin \theta - a\sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta}}{\epsilon_r \sin \theta + a\sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta}} \quad (3.13)$$

com  $\theta = 90 - \theta_i$ ,  $a = 1/\epsilon$  para o caso de polarização vertical,  $a = 1$  para polarização horizontal. A constante dielétrica da superfície é representada por  $\epsilon_r$ .

Na versão simplificada deste modelo, considera-se um coeficiente de reflexão  
 185 perfeito e, assumindo uma distância  $d$  entre transmissor e receptor significativamente superior à soma das alturas das antenas dos dispositivos,  $d \gg h_t + h_r$ . Essas considerações permitem supor que a diferença de fase entre os sinais torna-se pequena o suficiente, cancelando-se. Desta forma, o sinal recebido tem potência dada por 3.14. Já a perda por percurso,  $L$ , neste modelo simplificado, são determinadas pelas equações 3.15 e 3.16  
 190 (KURT; TAVLI, 2017).

$$P_r(d) = P_t G_t G_r \left( \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \right) \quad (3.14)$$

$$L[dB] = 20 \log \left( \frac{d^2}{h_t h_r} \right) \quad (3.15)$$

$$L[dB] = 40 \log(d) - 10(\log G_t + \log G_r + 2 \log h_t + 2 \log h_r). \quad (3.16)$$

## 4 Simulações e Resultados

Neste capítulo apresentam-se os critérios utilizados para realização das simulações. Apresentam-se, também, os resultados de [Received Signal Strength Indication \(RSSI\)](#), [PDR](#), atraso e *jitter* obtidos a partir do simulador de rede COOJA.

### 5 4.1 COOJA

COOJA, acrônimo de COntiki-Os JAva ([OSTERLIND et al., 2006](#)), é um simulador de rede desenvolvido para o sistema operacional Contiki-OS, ambos direcionados para aplicações envolvendo [RSSF \(DUNKELS; GRONVALL; VOIGT, 2004\)](#). Contiki-OS é um sistema operacional composto por microssistemas operando em conjunto compondo um ambiente propício para sistemas embarcados, com suporte a diversas plataformas, necessitando de 10 kB de RAM e 30 kB de ROM. A pilha de protocolos existente é implementada de forma modular, na qual é possível adicionar, remover ou substituir frações do código de forma a adequá-la ao estudo pretendido.

Como elemento do Contiki, COOJA é um simulador utilizado por pesquisadores como ferramenta de validação de algoritmos e de análise de redes, visto que os dispositivos que compõem redes de sensores sem fio podem ser emulados a nível de hardware, provendo maior realismo às simulações. Em particular, o sistema operacional Contiki pode ser completamente executado no simulador COOJA, garantindo assim maior correspondência entre sistemas reais e simulações. Além disso, a partir da biblioteca *MSPSim* é possível a emulação de plataformas de hardware baseadas em MSP-430 da Texas Instruments. As opções de “dispositivos” disponíveis podem ser separados em dois grupos:

- *COOJA Motes*: São nós nativos de simulação do COOJA, ou seja, uma espécie de micromáquinas virtuais que executam o sistema operacional Contiki. Não emulam hardware e possuem recursos como memória e processamento dependentes apenas da capacidade do computador que realiza a simulação;
- *Hardware Motes*: Emulam o funcionamento de um dispositivo ou microprocessador. Para isso, o hardware é simulado com restrições de memória e velocidade de CPU que possuem em dispositivos reais. Alguns *hardwares* suportados, implementados no COOJA, são: Wismote, MicaZ, CC430, Zolertia Z1, TelosB/SkyMote, dentre outros.

Existem três modelos de propagação no simulador COOJA que podem ser selecionados:

- *Unit Disk Graph Medium* (UDGM): Consiste no método básico de simulação do COOJA, dividido em dois modelos independentes: UDGM *Constant Loss* e UDGM *Distance Loss*. No modelo com perda contante, cada dispositivo de rádio possui um raio de cobertura representando seu alcance. Em termos gerais, possui três parâmetros configuráveis pelo usuário: probabilidade de transmissão, probabilidade de recepção e raio do disco (*Range*). Especificamente, um dispositivo  $i$ , com raio de cobertura  $R$ , é capaz de trocar informações com qualquer dispositivo  $j$ , a uma distância  $d$  em relação a  $i$ , com  $d \leq R$ . A probabilidade  $p(r_{ij})$ , de um pacote ser recebido em  $i$  proveniente de  $j$ , consiste no produto das probabilidades de recepção e transmissão com sucesso, determinadas pelo usuário, dada por 4.1 (OSTERLIND, 2006; PULLWITT et al., 2019):

$$p(r_{ij}) = \begin{cases} p(r)p(t) , & \text{com } d_{ij} \leq R \frac{P_{t_i}}{P_{t_{max}}} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.1)$$

- com  $d_{ij}$  indicando a distância entre os dispositivos. A probabilidade de transmissão e de recepção definidas pelo usuário são indicadas por  $p(t)$  e  $p(r)$ , respectivamente.  $P_{t_{max}}$  e  $P_{t_i}$  indicam a potência de transmissão máxima do dispositivo e potência atual, respectivamente. Entretanto, a distância  $d$  entre os dispositivos pode influenciar a recepção dos pacotes, mesmo que estejam no raio de cobertura. Essa influência é caracterizada no modelo *UDGM Distance Loss*. Desta forma, a probabilidade de recepção,  $p(r_{ij})$ , é dada por 4.2 (OSTERLIND, 2006; PULLWITT et al., 2019):

$$p(r_{ij}) = p(t) \left( 1 - (1 - p(r)) \left( \frac{d_{ij}}{R \frac{P_{t_i}}{P_{t_{max}}}} \right)^2 \right) \quad (4.2)$$

- *Directed Graph Radio Medium* (DGRM): Possibilita a configuração de grafos direcionados onde os vértices são os dispositivos de rádio e as arestas são as conexões unidirecionais entre eles. Permite configurar a probabilidade de recepção para cada aresta, *RSSI* e atraso de propagação. Esses parâmetros devem ser configurados manualmente pelo usuário para cada aresta, visando atender os requisitos e limitações desejados para a simulação.
- *Multi-path Ray-tracing Medium* (MRM): Permite uma simulação bidimensional com obstáculos físicos homogêneos, onde a intensidade do sinal e a probabilidade de recepção são calculadas embasadas nas reflexões e refrações. A *RSSI* é determinada a partir da potência de transmissão e da influência total dos percursos realizados pelo sinal original e por réplicas originadas por reflexão, denominado ganho total do percurso  $G(p)$ . Por sua vez, o ganho é obtido pela combinação entre *ray-tracing* e *FSPL*, equação 4.3.

$$G(p) = 10 \left| \sum_{n=1}^L 10^{\frac{G_{L_i}}{10}} \cos \left( 2\pi \left| \frac{l_i - M}{\lambda} \right| \right) \right| \quad (4.3)$$

onde  $G_{L_i}$  e  $l_i$  indicam o ganho e comprimento do percurso  $i$ .  $M$  fornece o comprimento do percurso que apresenta o maior ganho e  $L$  indica o número total de percursos. Com o valor do ganho total do percurso e da RSSI, a probabilidade de recepção é determinada por uma função de distribuição acumulada com média igual ao limiar  $SNR_{th}$ , definido pelo usuário (PULLWITT et al., 2019), dada por:

$$p(r_{ij}) = \Phi \left( \frac{SNR_{th} - SNR}{\sqrt{\sigma_S + \sigma_N}} \right) \quad (4.4)$$

em que  $\sigma_S$  e  $\sigma_N$  indicam o desvio padrão do sinal e ruído, responsáveis por determinar a taxa com a qual a probabilidade aumenta ou diminui, dado o valor  $SNR$  calculado em cada transmissão realizada.

Em Pullwitt *et al.* é desenvolvido o **EMRM**, um *plugin* que estende a capacidade de simulação do MRM em três aspectos: método de recepção, influência devido à variação de temperatura ambiente e modelagem a nível de nó. Entretanto, o EMRM não suporta simulações utilizando obstáculos e, além disso, inconsistências de implementação como a variância do ruído que compõe o cálculo da SNR e a variação da potência de transmissão, não eram considerados. Essas características foram corrigidas e são discutidas na seção 4.2 à medida que as configurações do sistema simulado são apresentadas.

## 4.2 Configurações da Simulação

O objetivo da simulação consiste em desenvolver um modelo computacional capaz de representar, de forma mais realista, condições semelhantes àsquelas que uma RSSF real, composta por medidores inteligentes, estaria sujeita. Nesse caso, esta rede fictícia é simulada a partir de características da cidade de Ipiranga, Paraná. Os dados simulados gerados pelo presente trabalho serão futuramente comparados à rede de medidores inteligentes real, que ainda será implantada em Ipiranga, para análise de eficiência e confiabilidade das simulações.

Para atingir maior realismo, utiliza-se o COOJA com auxílio de algumas funções desenvolvidas e disponibilizadas pelo EMRM (PULLWITT et al., 2019). O processo de configuração, bem como o detalhamento das etapas de modelagem necessárias, são apresentadas nas subseções a seguir. Ao fim deste capítulo, são apresentados os resultados obtidos.

### 4.2.1 EMRM

Na implementação original do EMRM o parâmetro de variância de ruído, utilizado para determinação da relação sinal-ruído (SNR), não era computado. A variável de ganho do sistema, responsável por introduzir variações na potência de transmissão,

95 também era desconsiderada. Ambas são variáveis essenciais à simulação dado que compõem o cálculo da SNR. Desta forma, foram implementados tendo como referência o código fonte do MRM atentando-se às equações 4.3 e 4.4.

Por fim, outra alteração realizada consiste no modelo de utilização de funções que representam a taxa de erro de bit. Originalmente, o EMRM utiliza uma função como parâmetro de configuração, responsável por mapear valores de SNR em taxa de erro. Isto 100 é, dado um valor de SNR calculado pelo EMRM a função fornece a taxa de erro de bit correspondente. Esse conceito foi expandido para permitir o funcionamento simultâneo de duas funções, uma aplicada aos casos que apresentam linha de visada direta entre transmissor e receptor e, outra aplicada apenas em casos onde os percursos são indiretos, 105 ou seja, refletidos e/ou refratados. Essas funções são úteis pois o COOJA utiliza apenas a formatação de quadros (frames) da camada física 802.15.4g, razão pela qual o MATLAB foi utilizado para obtenção das taxas de erro de bit para a modulação 2-GFSK.

Os parâmetros de simulação, como frequência do sinal, potência e sensibilidade do transceptor, definida como a potência mínima do sinal necessária para recepção de 110 pacotes com sucesso, foram configurados com base nas características do transceptor Renesas RAA604S00 (RENESAS, 2019). Outros parâmetros relacionados ao modelo de propagação de rádio, apresentados na Tabela 4.1, foram inspirados em publicações normativas da ANATEL (BRAZILIAN NATION TELECOMMUNICATIONS AGENCY (ANATEL), 2020) e nas referências indicadas para cada parâmetro.

Tabela 4.1 – Configuração básica do EMRM

Parâmetro	Valor	Fonte
Potência do Transmissor	18 dBm	Renesas (RENESAS, 2019)
Sensibilidade do Receptor	-105 dBm (BER < 0,1%)	
Média do Ruído	-95 dBm	Lauridsen <i>et al.</i> (LAURIDSEN <i>et al.</i> , 2017)
Variância do Ruído	10 dB	
Frequência	915 MHz	Anatel
Coefficiente de Reflexão	-7 dB	Okamoto <i>et al.</i>
Coefficiente de Refração	-7 dB	
Atenuação dos Obstáculos (dBm)	-0,4 dB/m	

115 A atenuação dos obstáculos representativos das ruas, como sugerida por Okamoto *et al.* (OKAMOTO; KITAO; ICHITSUBO, 2009), deve ser representada por uma constante de atenuação interna de 0,6 dB/m, independente dos espaços externos e internos. Entretanto, como a representação das ruas no modelo desenvolvido para simulação

são caracterizadas pela ausência de blocos ou preenchimentos, o valor da constante de  
120 atenuação foi configurado em 0,4 dB/m.

### 4.2.2 Cidade de Ipiranga

Um modelo da região central de Ipiranga foi implementado para obtenção de simulações e resultados com maior grau de realismo. O *plugin Area Viewer*, originalmente disponibilizado no MRM, porém removido pelos desenvolvedores do EMRM, foi integrado  
125 à nova versão com ajustes necessários de compatibilidade. Este *plugin* permite que uma imagem *bitmap*, com cores contrastantes, seja interpretada pelo MRM e processada pelo simulador gerando um mapa de obstáculos, onde cores escuras representam obstáculos e cores claras representam espaço livre. Consiste em um mapa representativo das barreiras físicas impostas à propagação das ondas eletromagnéticas consideradas durante o processo  
130 de simulação. Interferem na difusão dos “raios de percurso” (*ray-tracing*), resultando em refrações e reflexões. O *plugin Area Viewer* é responsável, também, pela visualização dos padrões de propagação das ondas quando a interface gráfica do simulador é utilizada.

Imagens de satélite da cidade de Ipiranga foram obtidas a partir do *Google Earth* e modeladas manualmente como uma imagem geométrica através do software *Krita*.  
135 A princípio, desejava-se determinar a geometria de cada edificação e de cada quarteirão individualmente, caracterizando formato e localização. Entretanto, a aplicação MRM suporta apenas obstáculos retangulares “puros”. O uso de imagens compostas, i.e., vários retângulos compondo um objeto maior de forma livre não é suportado no modelo atual do *ray-tracer*.

140 Para simplificar a representação dos obstáculos, os quarteirões da cidade foram modelados como obstáculos sólidos, com ruas e parques representados por espaços livres. Internamente, cada bloco deveria possuir “espaços livres” e construídos, essa característica é considerado no parâmetro de atenuação de obstáculos discutido anteriormente. A imagem resultante consiste em uma área de 5 quadras de largura por 5 de altura, com a praça  
145 principal da cidade localizada ao centro.

Um total de 36 nós sensores foram posicionados na área simulada, com um nó atuando como ponto coletor da rede (raiz) e 35 sensores (roteadores) comuns. O posicionamento dos nós é realizado manualmente para a fronteira entre o quarteirão e a rua para melhor representação da posição real dos medidores de energia sem fio, normalmente  
150 instalados em postes de iluminação ou nas paredes externas das residências. A imagem de satélite de origem e a topologia com obstáculos resultante, com a disposição final dos nós já definida, são exibidas em Figura 4.1.

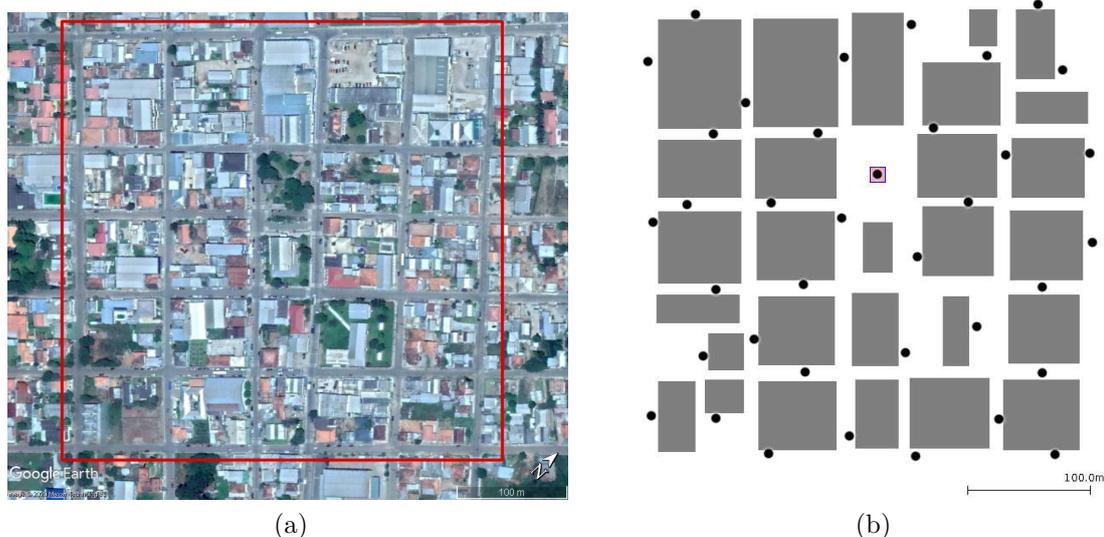


Figura 4.1 – (a) Imagem de satélite e (b) Topologia e posicionamento dos sensores.

### 4.2.3 Influência Térmica

Além de fenômenos eletromagnéticos e espaciais mencionados, as comunicações  
 155 em RSSF podem ser afetadas por condições climáticas que contribuem com o ruído térmico  
 nos transeptores dos dispositivos, afetando a recepção dos dados. No entanto, dados  
 climáticos históricos do Ipiranga revelam que variações de temperatura da cidade não  
 são elevados (CLIMATEMPO, 2020). As mínimas médias durante o inverno são de 10  
 °C, enquanto as máximas médias, durante o verão, são de aproximadamente 26°C. O  
 160 aumento de um grau Celsius na temperatura é responsável por uma redução de 0,09 dB  
 da RSSI. Assim, as variações de temperatura de Ipiranga resultariam em uma variação de  
 apenas 1,44 dB na RSSI (BOANO; CATTANI; RÖMER, 2018). Portanto, a influência da  
 temperatura na recepção dos sinais não foi considerada neste estudo.

### 4.2.4 Sensores e Protocolos

A simulação foi configurada para emular a plataforma Tmote Sky (POLASTRE;  
 165 SZEWCZYK; CULLER, 2005), uma plataforma de hardware para sensoriamento sem fio  
 equipado com o microcontrolador TI MSP430 e *chip* de rádio RF CC2420. A plataforma  
 é emulada, a nível de hardware, através do MSPSim compatível com COOJA. Além  
 disso, a escolha do Tmote Sky como plataforma, deve-se a sua utilização em diversas  
 170 pesquisas envolvendo RSSF na literatura. Cada *Sky mote* virtual executa o *firmware* do  
 Contiki compilado com suporte para a pilha de rede IPv6, camada de transporte UDP,  
 roteamento RPL, 6LoWPAN e formatação de quadros especificadas pelo padrão IEEE  
 802.15.4 utilizando CSMA.

Os dispositivos de sensoriamento executam uma aplicação que simula a trans-

Tabela 4.2 – Configuração da pilha de protocolos e *hardware*.

Sistema Operacional	Contiki-OS v.3.0
Hardware Emulado	Tmote Sky; CC2420
Camada de Transporte	UDP
Camada de Rede	$\mu$ IPv6, 6LoWPAN, RPL
Camada MAC	IEEE 802.15.4
Camada PHY	IEEE 802.15.4g

175 missão de dados periódicos de consumo de energia para o nó concentrador, como em uma rede real de medidores inteligentes. O intervalo de transmissão de pacotes de dados é definido em 20 minutos, onde cada pacote de dados possui 80 *bytes*. O roteador de borda foi programado para receber apenas as mensagens dos dispositivos sensores.

### 4.3 Canais

180 Um sistema de comunicação com modulação 2-GFSK foi implementado utilizando objetos próprios do MATLAB para modulação e demodulação, bem como para modelagem de canal, como [Additive White Gaussian Noise \(AWGN\)](#) e canais com distribuição de Rice e Rayleigh. Para atender às especificações da camada física IEEE 802.15.4g 2-GFSK ([IEEE... , 2020](#)), os parâmetros dos objetos foram configurados conforme descrito  
185 na Tabela 4.3. Ademais, foi utilizado o código recursivo e sistemático (RSC) do tipo de correção de erro antecipada (FEC) como especificado pelo padrão, taxa de código,  $R = 1/2$ , e dois polinômios geradores,  $1 + x + x^2 + x^3$  e  $1 + x^2 + x^3$  ([IEEE... , 2020](#)).

Tabela 4.3 – Parâmetros do Sistema.

Modulação	2-GFSK
Índice de Modulação	1
BT	0.5
Tipo de Pulso	Gaussiano
Oversampling	8 amostras
Codificação de Canal	RSC, $K = 4$ , $R = 1/2$
Decodificação	Algoritmo de Viterbi

Os resultados da simulação de teste em AWGN, com e sem codificação de canal, mostram uma relação sinal-ruído ( $E_b/N_0$ ) com  $BER < 10^{-2}$ , exigidas pela especificação  
190 Wi-SUN, em torno de 5 dB (com FEC) e 8 dB (sem FEC) foram alcançados. As simula-

ções realizadas no COOJA utilizam codificação de canal. As taxas são apresentadas na Figura 4.2.

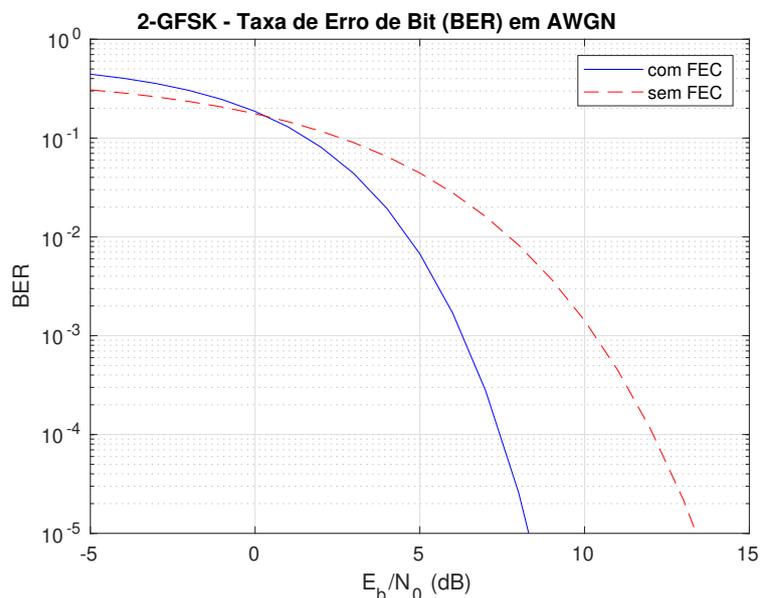


Figura 4.2 – Taxa de erro de bit em AWGN.

Foram realizadas simulações com três modelos distintos de canais multipercursos. Cada modelo é composto por um número específico de atrasos. Os canais multipercursos  
 195 *Extended ITU Outdoor to Indoor and Pedestrian* (E-ITU P) e *Extended ITU Typical Urban* (E-ITU U) possuem uma linha de retardo com 7 e 9 *taps*, respectivamente (HERNANDEZ et al., 2012).

São modelos desenvolvidos a partir de conjunto de dados obtidos através de extensas medições, voltados para sistemas operando em frequências inferiores a 1 GHz,  
 200 2.4 GHz e 5 GHz. As versões estendidas, utilizadas neste trabalho, foram elaboradas para incluir sistemas com largura de banda de até 20 MHz e maior número de atrasos (HERNANDEZ et al., 2012). As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam os parâmetros, enquanto as Figuras 4.4 e 4.3 ilustram o perfil de retardo, *Power Delay Profile* (PDP), destes dois modelos.

205 O modelo COST 207 foi empregado para fins de comparação de desempenho entre a modulação 2-GFSK implementada em MATLAB e os resultados sob multipercursos apresentados por Harada et al. (HARADA et al., 2017). Assim como nos perfis de retardo dos canais ITU, a PDP do modelo COST 207 *Typical Urban* é determinada a fim de evitar periodicidade na função de transferência variante no tempo.

210 Dada a natureza estática da topologia de rede simulada, a caracterização dos efeitos devido à existência de movimento relativo entre os dispositivos não foi considerada. Portanto, como as posições dos nós são fixas, o efeito Doppler não foi considerado. Outra razão que motivou essa desconsideração consiste no péssimo desempenho da modulação

Tabela 4.4 – Perfil de retardo *Extended ITU Pedestrian*.

TAP	Atraso Relativo (ns)	Potência Média (dB)
1	0	0
2	30	-1
3	70	-2
4	80	-3
5	110	-8
6	190	-17.2
7	410	-20.8

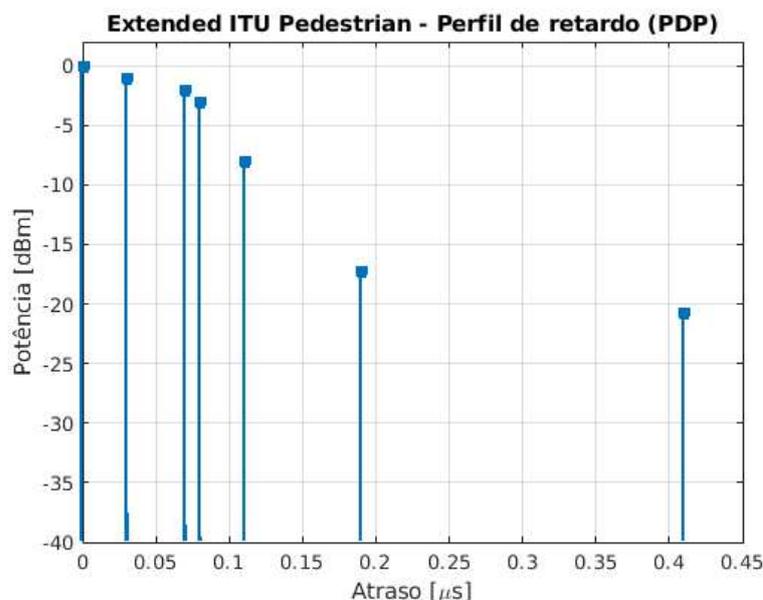


Figura 4.3 – Perfil de retardo E-ITU P.

2-GFSK, sob efeito de multipercursos dos canais utilizados, na presença de Doppler. Para  
 215 modelo COST 207 envolvendo simulações com Doppler para uma frequência de 0,1 Hz,  
 apresenta um limite inferior de performance com taxa de erro de  $10^{-2}$  (HARADA et al.,  
 2017).

Os resultados com distribuição de Rice, como visto em Figura 4.6, apresentam  
 melhor desempenho de taxas de erro que Rayleigh para todos os três modelos de canal  
 220 especificados. Este resultado decorre da existência do elemento predominante, componente  
 LoS entre transmissor e receptor, em detrimento das componentes especulares. Ou seja, a  
 existência da visada direta “fornece” um sinal dominante, enquanto as réplicas decorrentes  
 de reflexões, refrações e difração, atenuadas e defasadas, proporcionam menor interferência.  
 Todos os casos envolvendo a distribuição de Rice, foram simulados com potência do sinal

Tabela 4.5 – Perfil de retardo *Extended ITU Urban*.

TAP	Atraso Relativo (ns)	Potência Média (dB)
1	0	-1
2	50	-1
3	120	-1
4	200	0
5	230	0
6	500	0
7	1600	-3
8	2300	-5
9	5000	-7

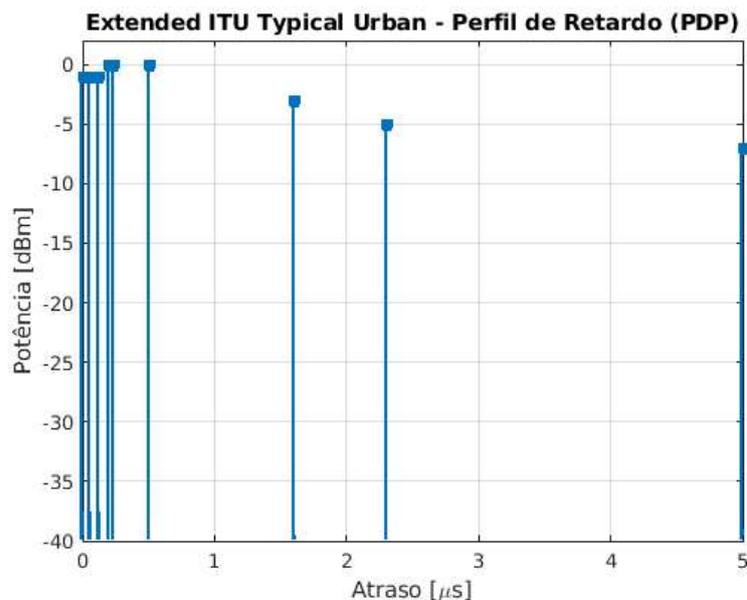


Figura 4.4 – Perfil de retardo E-ITU U.

225 recebido dominante, especificado pelo fator  $K$  de Rice, igual a 3 dB, dado por:

$$K[dB] = 10 \log \frac{a^2}{2\sigma^2} \quad (4.5)$$

com amplitude do sinal dominante dado por  $a$  e potência da componente de espalhamento dada por  $\sigma^2$ . Desta forma, para  $K = 0$  a distribuição de Rice se degenera em uma distribuição de Rayleigh.

A distribuição de Rayleigh, no entanto, considera apenas os componentes  
230 refletidos e refratados, uma vez que existem apenas caminhos sem visada entre os rádios,

Tabela 4.6 – Perfil de retardo *COST207 GSM Typical Urban*.

TAP	Atraso Relativo (ns)	Potência Média (dB)
1	-200	-3
2	0	0
3	300	-2
4	1400	-6
5	2100	-8
6	4800	-10

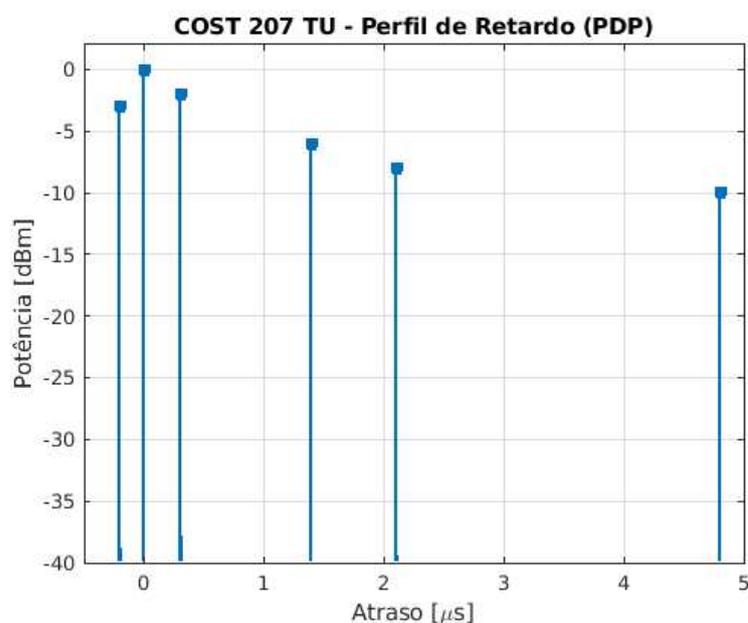


Figura 4.5 – Perfil de retardo COST 207 TU.

acentuando o efeito por multipercurso. Nesse sentido, os resultados obtidos, também em Figura 4.6 eram esperados, considerando a natureza estática do modelo.

As taxas de erro de bit foram estimadas por ajuste exponencial, equação 4.6. Cada modelo de canal foi simulado utilizando distribuições de Rice e Rayleigh.

$$f(x) = a_1 \exp \left[ \frac{-(x - a_2)^{a_3}}{a_4} \right] \quad (4.6)$$

Desta forma, o EMRM determina o valor da relação sinal-ruído para cada transmissão utilizando as taxas de erro de bit obtidas para cenários LoS e NLoS. Com isso, a partir dos traçados “disparados” pelo *ray-tracing* é identificado pelo simulador como LoS ou NLoS. Para o posicionamento apresentado na Figura 4.1 (b), as situações com visada direta entre um par de sensores comunicante são realizadas a partir da função modelada

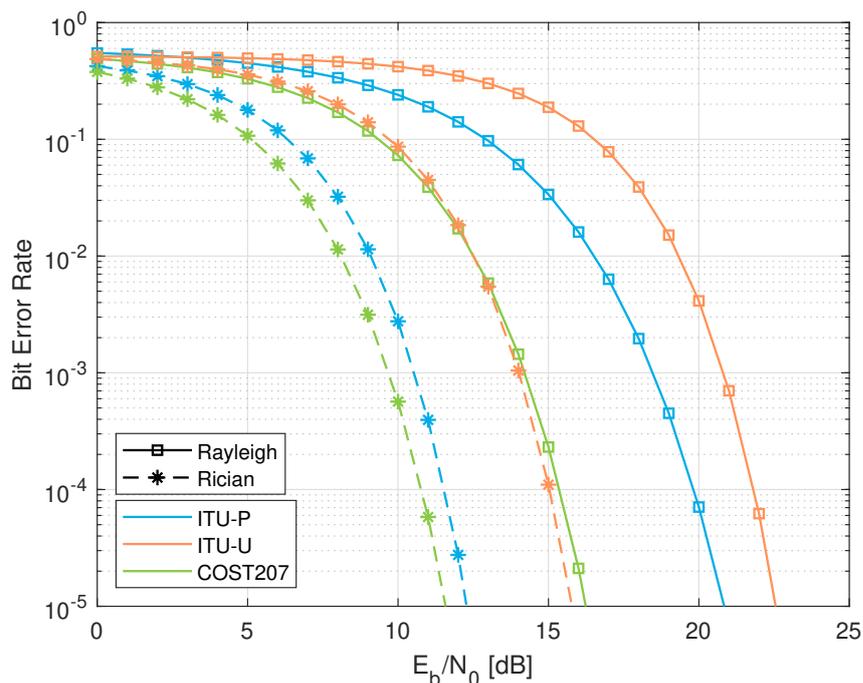


Figura 4.6 – Taxa de erro de bit em canais com desvanecimento por multipercursos.

240 pela distribuição Rice. E, existindo apenas percursos sem visada, utiliza-se a função de taxa de erro modelada a partir da distribuição de Rayleigh.

## 4.4 Resultados

Para cada modelo de canal proposto, o COOJA foi configurado para simular 24 horas de atividade de uma rede SM real, com envio de pacotes a cada 20 minutos. Três repetições da simulação foram realizadas para cada cenário, cada uma utilizando um *seed* aleatório. Os mesmos *seeds* foram usados em cada cenário avaliado. O plugin do script de simulação foi usado para capturar informações sobre a taxa de entrega de pacotes, RSSI, latência e jitter de pacotes médios da rede simulada. A Figura 4.7 exibe as métricas de desempenho de rede e de rádio obtidas para cada um dos modelos de canal.

250 Os resultados mostram que, entre os modelos de canais simulados, COST 207 produziu resultados com PDR de 99,3 %, mesmo apresentando maior atenuação do sinal transmitido. Os resultados de RSSI foram os mais estáveis, com menos de 3 dB de diferença entre o melhor e o pior cenário. Isso pode ser explicado por três fatores: roteamento, a sensibilidade dos receptores e taxa de erro de bit fornecida como parâmetro de entrada.

255 Em relação ao roteamento, a topologia da rede formada estabeleceu rotas com a menor quantidade de saltos possíveis tendo como parâmetro a qualidade do enlace determinados pela função objetivo do protocolo de roteamento. Com isso, a RSSI apresentada no cenário COST 207, resulta de rotas estabelecidas com qualidade de enlace de comunicação inferior aos outros dois cenários, porém com rotas mais curtas. Razão pela qual apresentou

260 menor atraso entre pacotes com maior PDR. A disposição dos sensores, com a presença de  
vários dispositivos próximos ao ponto concentrador, desfavorece a formação de pontos de  
enforcamento na rede, diminuindo a necessidade de retransmissões e de formação de novas  
rotas, neste cenário. De maneira similar, o E-ITU P apresenta resultados equilibrados,  
com PDR e RSSI similares ao modelo COST 207. O maior delay e jitter em relação ao  
265 COST 207, devem-se pela formação de rotas com componentes LoS e NLoS, e por rotas  
unicamente compostas por componentes NLoS.

Os multipercursos por reflexão e refração estabelecidos nas simulações, tendo  
em vista os valores de intensidade do sinal, contribuíram com uma adição destrutiva,  
provocando forte atenuação no sinal resultante em todos os cenários simulados. Neste caso,  
270 o simulador utiliza a taxa de erro de bit modelada em MATLAB a partir da distribuição  
Rayleigh, fornecida como parâmetro de configuração. Já os percursos diretos entre receptor  
e transmissor utilizam a função modelada a partir da distribuição de Rice.

O cenário mais severo, E-ITU U, demonstra que as curvas obtidas a partir de  
simulações em MATLAB, caracterizadas por PDP com diferentes quantidades de *taps*,  
275 influenciaram as métricas de desempenho da rede simulada, à exceção da RSSI, com baixa  
variação entre os cenários. Dada a taxa de erro de bit maior para este cenário, a formação  
da topologia de roteamento DODAG maximiza a quantidade de enlaces com visada direta  
entre os dispositivos. Isso é refletido pelo atraso na entrega dos pacotes, bem como na  
variação desse atraso.

280 Essa hipótese é apoiada com base na análise do atraso fim-a-fim que indica a  
formação de rotas com maior quantidade de saltos entre emissor e raiz. O jitter elevado  
observado nesse cenário, bem como a margem de erro maior, é um indicativo de instabilidade  
da rede. Isso decorre da necessidade de formação de rotas com maior comprimento, além  
da alteração dos percursos durante o processo de roteamento, implicando o disparo de  
285 mensagens de controle e reorganização local do roteamento.

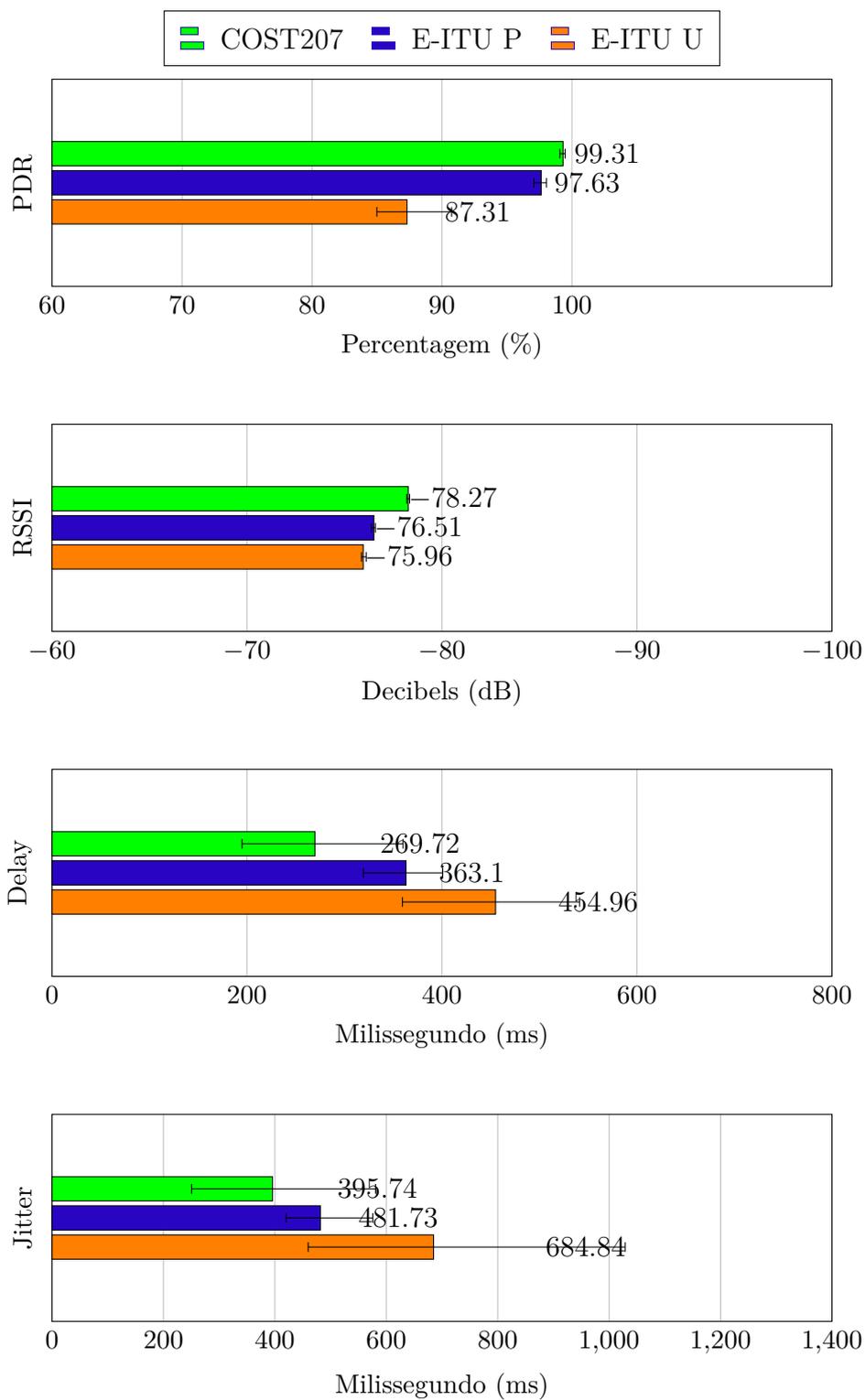


Figura 4.7 – Valores médios das métricas de desempenho.

## 5 Conclusões

Em AMI e rede de medidores inteligentes, a capacidade de entrega de pacotes de dados é imprescindível, caracterizando elemento principal de avaliação das RSSF. Isso, pois a PDR consiste em uma métrica que, quando maximizada, garante a confiabilidade da rede. Para os cenários considerados, os resultados mostraram que modelos de canais representando cidades densas, como E-ITU Urban, a PDR diminuiu, enquanto que atraso e *jitter* aumentaram em comparação com o COST207 e E-ITU Pedestrian. Entretanto, mesmo no pior caso analisado a PDR é de 87%. Em geral, os resultados apresentados obedeceram comportamento das diferentes curvas BER geradas para cada cenário. Esse mesmo comportamento pode ser observado em RSSF reais, uma vez que condições adversas de rádio afetam consideravelmente o desempenho do sistema (LAURIDSEN et al., 2017).

O EMRM, com as alterações realizadas, mesmo desconsiderando os efeitos climáticos na simulação, apresentou resultados lógicos e esperados. O uso de curvas de BER mais precisas, distinguindo as transmissões LoS e NLoS, combinadas a uma representação urbana mais detalhada da cidade alvo (embora ainda simples), permitiu alcançar resultados que indicam maior realismo. Isso, considerando o uso de uma ferramenta consideravelmente simples, o simulador COOJA.

Tecnologias de rádio, voltadas para dispositivos de baixo custo, que adotam o padrão IEEE 802.15.4g são amplamente consideradas como uma solução econômica. A simulação mostra que para os protocolos estabelecidos pela pilha Wi-SUN FAN, a comunicação entre sensores, bem como a capacidade de entrega dos pacotes, é realizada com eficiência, mesmo em modelos com caracterizados por densa urbanização. Considerando o cenário mais severo, E-ITU U, a PDR é superior a 87%, indicando uma robustez e eficiência dos protocolos utilizados.

Deve-se notar, porém, que a quantidade de nós utilizada nas simulações em COOJA e *ray-tracing* é limitada a três traçados. O aumento do número de “raios”, ou seja, a quantidade de réplicas do sinal transmitido e das reflexões e refrações devida aos obstáculos, resulta em um aumento exponencial no tempo de simulação exigindo dias de simulação. Portanto, a simulação de redes maiores e/ou mais densas torna-se extremamente longa utilizando COOJA. Essa limitação obrigou a restringir as simulações a apenas 36 nós, considerando uma porção reduzida do centro da cidade de Ipiranga. O tempo simulado de 24 horas exigiu três dias, para apenas 36 nós com limitada quantidade de obstáculos e somente três traçados (multipercursos). No entanto, os resultados alcançados permitem uma avaliação de protocolo e desempenho da RSSF, para uma área, além de permitir avaliar o efeito de diferentes canais em dispositivos emulados.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Trabalhos futuros podem envolver pesquisas relacionadas ao seguintes temas:

- Análise comparativa dos resultados obtidos nesta dissertação com dados de redes que venham a ser implantadas em Ipiranga.
- 40 • Análise de desempenho e configurações ótimas para redes Wi-SUN sob interferência de redes de redes como: WirelessHart, LoRAWAN, Wi-Fi, dentre outros.
- Desenvolvimento e/ou otimização de simuladores de redes utilizando *ray-tracing* em *Rust* ou *CC++*.

## 5.2 Publicações

- 45 • José Luis Hinostroza N.; Osmar Tormena, Jr; Silvio O. e Silva Jr.; Luís Geraldo P. Meloni; *Improved CFO Synchronization of Dual-Polarized OFDM Systems using Training Symbols*, simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2020).
- Silvio Oliveira, Victor F. Santolim, Luís G. P. Meloni, Márcio B. Hamerschmidt, Eduardo R. de Lima; *Accurate Wireless Channel Modeling for Realistic WSN Simulations*, **artigo submetido** ao IEEE 7th World Forum on Internet of Things, 20-24 June 2021, New Orleans, Louisiana, USA.
- 50 • Victor F. Ferrari, Victor F. Santolim, Luís G. P. Meloni<sup>1</sup>, Silvio O. e Silva Jr, Márcio B. Hamerschmidt and Eduardo R. de Lima; *A Standard Compliant Technique for Improving Reliability in RPL-Routed Smart Ubiquitous Networks*; artigo a ser submetido.
- 55

# Referências

- ADJIH, C. et al. FIT IoT-LAB: A large scale open experimental IoT testbed. In: *2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 459–464. Citado na página 19.
- AGBA, B. L. et al. EMI and wireless communications in power substations. In: \_\_\_\_\_. *Wireless Communications for Power Substations: RF Characterization and Modeling*. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 7–33. ISBN 978-3-319-91328-5. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-319-91328-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91328-5_2)>. Citado na página 17.
- AL-KASHOASH, H. A. A.; AL-NIDAWI, Y.; KEMP, A. H. Congestion-aware RPL for 6LOWPAN networks. In: *2016 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado na página 39.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, v. 54, n. 15, p. 2787 – 2805, 2010. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128610001568>>. Citado na página 16.
- BOANO, C. A.; CATTANI, M.; RÖMER, K. Impact of Temperature Variations on the Reliability of LoRa - An Experimental Evaluation. In: INSTICC. *Proceedings of the 7th International Conference on Sensor Networks - Volume 1: SENSORNETS*,. [S.l.]: SciTePress, 2018. p. 39–50. ISBN 978-989-758-284-4. Citado na página 56.
- BRAZILIAN NATION TELECOMMUNICATIONS AGENCY (ANATEL). *Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências do Brasil*. [S.l.], 2020. Citado na página 54.
- CLIMATEMPO. *Climatologia Ipiranga - PR*. 2020. Available in Portuguese. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/climatologia/2843/ipiranga-pr>>. Citado na página 56.
- CUI, S. et al. Research on the architecture of electric power information communication network for smart grid. In: *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4. Citado na página 17.
- DUNKELS, A.; GRONVALL, B.; VOIGT, T. Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. In: *29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 455–462. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 51.
- DUQUENNOY, S.; LANDSIEDEL, O.; VOIGT, T. Let the Tree Bloom: Scalable Opportunistic Routing with ORPL. In: *Proceedings of the 11th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2013. (SenSys '13). ISBN 9781450320276. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/2517351.2517369>>. Citado na página 39.
- FAROOQ, M. O. et al. RPL-based routing protocols for multi-sink wireless sensor networks. In: *2015 IEEE 11th International Conference on Wireless and Mobile*

- Computing, Networking and Communications (WiMob)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 452–459. Citado na página 39.
- FERREIRA, L. C. B. C. et al. A PBL-Based Methodology for IoT Teaching. *IEEE Communications Magazine*, v. 57, n. 11, p. 20–26, 2019. Citado na página 16.
- FONTAN, F. P.; ESPIEIRA, P. M. *Modelling the Wireless Propagation Channel: A Simulation Approach with Matlab*. [S.l.]: Wiley Publishing, 2008. ISBN 0470727853. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- FORTUNE. *Market Reserch Report*. Fortune Business Insights, 2019. Disponível em: <<https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/home-automation-market-100074>>. Citado na página 16.
- FRIIS, H. T. A Note on a Simple Transmission Formula. *Proceedings of the IRE*, v. 34, n. 5, p. 254–256, May 1946. ISSN 2162-6634. Citado na página 47.
- GADDOUR, O.; KOUBÂA, A. RPL in a nutshell: A survey. *Computer Networks*, v. 56, n. 14, p. 3163 – 3178, 2012. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128612002423>>. Citado 4 vezes nas páginas 18, 28, 29 e 36.
- GADDOUR, O.; KOUBÂA, A.; ABID, M. Quality-of-service aware routing for static and mobile IPv6-based low-power and lossy sensor networks using RPL. *Ad Hoc Networks*, v. 33, p. 233 – 256, 2015. ISSN 1570-8705. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870515000992>>. Citado 3 vezes nas páginas 24, 28 e 38.
- GADDOUR, O. et al. Co-RPL: RPL routing for mobile low power wireless sensor networks using Corona mechanism. In: *Proceedings of the 9th IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES 2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 200–209. ISSN 2150-3117. Citado na página 38.
- GEDMINAS, A.; DUOBA, L.; NAVAKAUSKAS, D. P System Framework for Ant Colony Algorithm in IoT Data Routing. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, The Science and Information Organization, v. 11, n. 4, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110405>>. Citado na página 40.
- GNAWALI, O.; LEVIS, P. *The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function*. RFC Editor, 2012. RFC 6719. (Request for Comments, 6719). Disponível em: <<https://rfc-editor.org/rfc/rfc6719.txt>>. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- GOLDSMITH, A. *Wireless Communications*. USA: Cambridge University Press, 2005. ISBN 0521837162. Citado na página 44.
- GOVINDASAMY, J.; PUNNIAKODY, S. A comparative study of reactive, proactive and hybrid routing protocol in wireless sensor network under wormhole attack. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, v. 5, n. 3, p. 735–744, 2018. ISSN 2314-7172. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2314717217300181>>. Citado na página 27.

GUPTA, M.; CONTA, A. *Internet Control Message Protocol (ICMPv6) for the Internet Protocol Version 6 (IPv6) Specification*. RFC Editor, 2006. RFC 4443. (Request for Comments, 4443). Disponível em: <<https://rfc-editor.org/rfc/rfc4443.txt>>. Citado na página 29.

HARADA, H. et al. IEEE 802.15.4g Based Wi-SUN Communication Systems. *IEICE Transactions on Communications*, E100.B, n. 7, p. 1032–1043, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 20, 58 e 59.

HERNANDEZ, M. et al. *Channel models for TG8*. IEEE P802.15 Wireless Personal Area Networks, 2012. RFC 6719. (Request for Comments, 6719). Disponível em: <[https://mentor.ieee.org/802.15/documents?n=11&is\\_dcn=DCN%2C%20Title%2C%20Author%20or%20Affiliation&is\\_group=0008](https://mentor.ieee.org/802.15/documents?n=11&is_dcn=DCN%2C%20Title%2C%20Author%20or%20Affiliation&is_group=0008)>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 58.

IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)*, p. 1–800, July 2020. Citado na página 57.

IOVA, O.; THEOLEYRE, F.; NOEL, T. Exploiting multiple parents in RPL to improve both the network lifetime and its stability. In: *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 610–616. ISSN 1938-1883. Citado na página 40.

IOVA, O.; THEOLEYRE, F.; NOEL, T. Using multiparent routing in RPL to increase the stability and the lifetime of the network. *Ad Hoc Networks*, v. 29, p. 45 – 62, 2015. ISSN 1570-8705. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870515000311>>. Citado na página 36.

KARKAZIS, P. et al. Geographical routing in wireless sensor networks. In: *2012 International Conference on Telecommunications and Multimedia (TEMU)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 19–24. Citado na página 27.

KIM, H.; PAEK, J.; BAHK, S. QU-RPL: Queue utilization based RPL for load balancing in large scale industrial applications. In: *2015 12th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 265–273. Citado na página 39.

KLOOS, G. et al. Range Based Localisation Using RF and the Application to Mining Safety. In: *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1304–1311. ISSN 2153-0866. Citado na página 49.

KOBO, H. I.; ABU-MAHFOUZ, A. M.; HANCKE, G. P. A Survey on Software-Defined Wireless Sensor Networks: Challenges and Design Requirements. *IEEE Access*, v. 5, p. 1872–1899, 2017. ISSN 2169-3536. Citado na página 23.

KUMAR, P. et al. Smart Grid Metering Networks: A Survey on Security, Privacy and Open Research Issues. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 21, n. 3, p. 2886–2927, thirdquarter 2019. ISSN 1553-877X. Citado na página 24.

KURT, S.; TAVLI, B. Path-Loss Modeling for Wireless Sensor Networks: A review of models and comparative evaluations. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, v. 59, n. 1, p. 18–37, Feb 2017. ISSN 1558-4143. Citado 3 vezes nas páginas 47, 49 e 50.

- LAURIDSEN, M. et al. Interference measurements in the european 868 mhz ism band with focus on lora and sigfox. In: *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. ISSN 1558-2612. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 65.
- LE, Q.; NGO-QUYNH, T.; MAGEDANZ, T. RPL-based multipath Routing Protocols for Internet of Things on Wireless Sensor Networks. In: *2014 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 424–429. ISSN 2162-1039. Citado na página 38.
- LEVIS, P. et al. *The Trickle Algorithm*. RFC Editor, 2011. RFC 6206. (Request for Comments, 6206). Disponível em: <<https://rfc-editor.org/rfc/rfc6206.txt>>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- MACEDO, D.; GUEDES, L. A.; SILVA, I. A dependability evaluation for Internet of Things incorporating redundancy aspects. In: *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 417–422. Citado na página 23.
- MANYIKA, J. et al. *The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype*. McKinsey Global Institute, 2015. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/the-internet-of-things-the-value-of-digitizing-the-physical-world>>. Citado na página 16.
- MARTOCCI, J. et al. *Building Automation Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks*. RFC Editor, 2010. RFC 5867. (Request for Comments, 5867). Disponível em: <<https://rfc-editor.org/rfc/rfc5867.txt>>. Citado na página 27.
- MCGRATH, M. J.; SCANAILL, C. N. Sensor Network Topologies and Design Considerations. In: \_\_\_\_\_. *Sensor Technologies: Healthcare, Wellness, and Environmental Applications*. Berkeley, CA: Apress, 2013. p. 79–95. ISBN 978-1-4302-6014-1. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-1-4302-6014-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4302-6014-1_4)>. Citado na página 25.
- MOHAMED, B.; MOHAMED, F. QoS Routing RPL for Low Power and Lossy Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 11, n. 11, p. 971545, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2015/971545>>. Citado na página 33.
- OKAMOTO, H.; KITAO, K.; ICHITSUBO, S. Outdoor-to-Indoor Propagation Loss Prediction in 800-MHz to 8-GHz Band for an Urban Area. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 58, n. 3, p. 1059–1067, March 2009. ISSN 1939-9359. Citado na página 54.
- OSTERLIND, F. *A Sensor Network Simulator for the Contiki OS*. 1. ed. [S.l.], 2006. 40 p. (SICS Technical Report, 2006:05). Citado na página 52.
- OSTERLIND, F. et al. Cross-Level Sensor Network Simulation with COOJA. In: *Proceedings. 2006 31st IEEE Conference on Local Computer Networks*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 641–648. ISSN 0742-1303. Citado na página 51.
- PISTER, K. et al. *Industrial Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks*. RFC Editor, 2009. RFC 5673. (Request for Comments, 5673). Disponível em: <<https://rfc-editor.org/rfc/rfc5673.txt>>. Citado na página 27.

POLASTRE, J.; SZEWCZYK, R.; CULLER, D. Telos: enabling ultra-low power wireless research. In: *IPSN 2005. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 364–369. Citado na página 56.

PORCU, G.; BURON, J.; BRANDT, A. *Home Automation Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks*. RFC Editor, 2010. RFC 5826. (Request for Comments, 5826). Disponível em: <<https://rfc-editor.org/rfc/rfc5826.txt>>. Citado na página 27.

PULLWITT, S. et al. Towards Accurate Bit Error Simulation in Wireless Sensor Networks Including Environmental Influences. In: *2019 IEEE 16th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 82–90. ISSN 2155-6814. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.

RAMESH, R. et al. LoRaWAN for smart cities: experimental study in a campus deployment. In: CHAUDHARI, B. S.; ZENARO, M. (Ed.). *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*. Academic Press, 2020. p. 327–345. ISBN 978-0-12-818880-4. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128188804000168>>. Citado na página 48.

RENESAS. *Electrical Characteristics of 915-MHz-Band +30dBm RF Transceiver (FCC Part 15.247)*. [S.l.], 2019. Rev. 1.0. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 54.

RÖBESAAT, J. et al. An Improved BLE Indoor Localization with Kalman-Based Fusion: An Experimental Study. *Sensors*, v. 17, n. 5, 2017. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/17/5/951>>. Citado na página 49.

SAUNDERS, S. R.; SIMON, S. R. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. 1st. ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1999. ISBN 0471986097. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.

SELMIC, R. R.; PHOHA, V. V.; SERWADDA, A. WSN Architecture. In: \_\_\_\_\_. *Wireless Sensor Networks: Security, Coverage, and Localization*. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 37–81. ISBN 978-3-319-46769-6. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-319-46769-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46769-6_3)>. Citado na página 22.

SOBRAL, J. V. V. et al. Routing Protocols for Low Power and Lossy Networks in Internet of Things Applications. *Sensors*, MDPI AG, v. 19, n. 9, p. 2144, May 2019. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/s19092144>>. Citado na página 28.

THAPAR, P.; BATRA, U. Implementation of Ant Colony Optimization in Routing Protocol for Internet of Things. In: \_\_\_\_\_. *Innovations in Computational Intelligence : Best Selected Papers of the Third International Conference on REDSET 2016*. Singapore: Springer Singapore, 2018. p. 151–164. ISBN 978-981-10-4555-4. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-981-10-4555-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4555-4_10)>. Citado na página 40.

THUBERT, P. *Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)*. RFC Editor, 2012. RFC 6552. (Request for Comments, 6552). Disponível em: <<https://rfc-editor.org/rfc/rfc6552.txt>>. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

THUBERT, P. et al. *RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*. RFC Editor, 2012. RFC 6550. (Request for Comments, 6550). Disponível em: <<https://rfc-editor.org/rfc/rfc6550.txt>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 30.

TRIPATHI, J.; OLIVEIRA, J. C. de; VASSEUR, J. Proactive versus reactive routing in low power and lossy networks: Performance analysis and scalability improvements. *Ad Hoc Networks*, v. 23, p. 121 – 144, 2014. ISSN 1570-8705. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870514001243>. Citado na página 27.

WATTEYNE, T. et al. *Routing Requirements for Urban Low-Power and Lossy Networks*. RFC Editor, 2009. RFC 5548. (Request for Comments, 5548). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc5548.txt>. Citado na página 27.