

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

GUILHERME LOPES DA SILVA

Metodologia para Avaliar a Qualidade de Serviço em Redes de Sensores Sem Fio para Internet das Coisas

Campinas

2019



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

GUILHERME LOPES DA SILVA

Metodologia para Avaliar a Qualidade de Serviço em Redes de Sensores Sem Fio para Internet das Coisas

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.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cardieri

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno GUILHERME LOPES DA SILVA, e orientada pelo Prof. Dr. Paulo Cardieri

> Campinas 2019

Ficha catalográfica Universidade Estadual de Campinas Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Silva, Guilherme Lopes da, 1991-Metodologia para avaliar a qualidade de serviço em redes de sensores sem fio para internet das coisas / Guilherme Lopes da Silva. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.
Orientador: Paulo Cardieri. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
1. Internet das coisas. 2. Telecomunicações. 3. Redes de sensores sem fio.
4. Gerência. I. Cardieri, Paulo, 1964-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Methodology to evaluate quality of Service to internet of things Palavras-chave em inglês: Internet of things Telecommunications Wireless sensors networks Proxy manager Área de concentração: Telecomunicações e Telemática Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica Banca examinadora: Paulo Cardieri [Orientador] Renato da Rocha Lopes Ricardo Augusto da Silva Júnior Data de defesa: 18-12-2019 Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a) - ORCID do autor: https://orcid.org/0000-0002-1958-8743 - Currículo Lattes do autor: http://lattes.cnpq.br/0409322444427227

COMISSÃO JULGADORA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato: Guilherme Lopes da Silva RA: 208916 **Data da Defesa:** 18 de dezembro de 2019 **Título da Tese:** "Metodologia para Avaliar a Qualidade de Serviço em Redes de Sensores Sem Fio para Internet das Coisas".

Prof. Dr. Paulo Cardieri (Presidente) Prof. Dr. Ricardo Augusto da Silva Júnior Prof. Dr. Renato da Rocha Lopes

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 esta dissertação a Deus e aos meus familiares.

Agradecimentos

Agradeço

A Deus, por ter me dado forças e bom ânimo.

Aos meus pais, por me apoiarem nesta jornada.

A minha namorada, Camila O.Vaz, por me acompanhar nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Dr.Paulo Cardieri, pela oportunidade que me ofereceu de fazer o Mestrado, e também por todas as orientações e contribuições que fez durante a execução deste trabalho.

"O Senhor é meu pastor e nada me faltará" (Salmo 23:1)

Resumo

Nos últimos anos tem-se observado o aumento da importância das aplicações de Internet das Coisas (IoT) nas diversas atividades humanas. Isso tem exigido que as redes de sensores que suportam tais aplicações atendam a requisitos de qualidade de serviço (QoS) cada vez mais exigentes, e que tenham seu desempenho monitorado continuamente. Em um cenário típico de IoT, a rede sem fio que conecta os sensores aos outros componentes do sistema é a parte mais vulnerável, devido às características intrínsecas do meio sem fio. O presente trabalho apresenta uma metodologia e uma ferramenta que permitem aos provedores de serviço de rede sem fio monitorar e avaliar a qualidade de serviço dos enlaces sem fio de suas redes. A metodologia é baseada no uso de mapas de ambientes rádio, construídos por meio de ferramentas de geoestatística, o que possibilita a visualização das métricas de desempenho ao longo da região de serviço. Duas fases compõem a metodologia: a Fase I destina-se à estimação da cobertura do serviço de rede, a partir de medições em campo do sinal recebido e do uso de ferramentas da geoestatística; a Fase II visa a monitoração contínua da qualidade da rede, a partir de medidas feitas pelos nós sensores instalados na rede. A ferramenta proposta permite, portanto, que o provedor de rede identifique problemas relacionados à propagação do sinal de radiofrequência, possibilitando uma rápida intervenção. Além disso, essa ferramenta fornece informações para embasar a definição de parâmetros de QoS em contratos de prestação serviços, os chamados Contratos de Nível de Serviço (SLA).

Palavras-chaves: Telecomunicações; Internet das Coisas; Redes de Sensores Sem Fio; Gerência de Rede; Qualidade de Serviço; Mapas de Ambiente Rádio.

Abstract

In recent years, the increasing importance of Internet of Things (IoT) applications in many human activities has demanded that sensor networks that support such applications meet strict quality of service (QoS) requirements and have their performance continuously monitored. In a typical IoT scenario, the wireless network is the most vulnerable part due to the intrinsic characteristics of the wireless medium. This dissertation presents a methodology and a tool that enable wireless network service providers to monitor and evaluate the quality of service of wireless links in their networks. The methodology is based on the use of radio environment maps, built using geostatistics tools, which allows the visualization of performance metrics along the service region. Two phases make up the methodology: the first phase is for the estimation of network service coverage, based on some field measurements of the received signal and the use of geostatistics tools; The second phase aims at the continuous monitoring of the network quality, based on measurements made by the sensor nodes installed in the network. Therefore, the proposed tool allows the network provider to identify problems related to radio frequency signal propagation, allowing for rapid intervention. Also, this tool provides information to support the definition of QoS parameters in service contracts, the so-called Service Level Agreements (SLAs).

Keywords: Telecommunications; Internet of Things; Wireless Sensor Networks; Proxy Manager; Quality of Service; Radio Environment Map.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Módulos de um nó sensor genérico.	30
Figura 2.2 – Rede de sensores sem fio genérica	31
Figura 2.3 – Comunicação com repetição – três saltos	33
Figura 2.4 – RSSF baseada no Wi-Fi	34
Figura 2.5 – RSSF baseada no IoT Proxy Manager.	35
Figura 3.1 – Cadeia de Markov de 2 estados geral	40
Figura 3.2 – Cadeia de Markov de 2 estados	41
Figura 3.3 – Modelo de Gilbert Elliot	42
Figura 3.4 – Exemplo de transmissão sequencial de pacotes.	43
Figura 3.5 – Exemplos de sequências de transmissão.	44
Figura 3.6 – Exemplo de Semivariograma e Covariograma.	53
Figura 3.7 – Scatter Plot das variáveis V e R	54
Figura 3.8 – Dispersão espacial da variável aleatória $P(s_i)$	55
Figura 3.9 – Modelos analíticos de semivariograma e covariograma	57
Figura 3.10–Variação do parâmetro α	57
Figura 3.11–Variável Regionalizada	58
Figura 3.12–Realização de um processo aleatório espacial.	59
Figura 3.13–Interpolação.	60
Figura 3.14–Exemplo de aplicação da técnica KO	63
Figura 3.15–Ambiente rádio	66
Figura 3.16–Etapas para a geração dos mapas REM	67
Figura 3.17–Grade quadrada de lado d_{des}	70
Figura 3.18–Cálculo do desvanecimento em S_P	71
Figura 3.19–Desvane cimento correlacionado em 2D – Presença de aglomerados in-	
dicando correlação espacial	72
Figura 3.20–Desvane cimento correlacionado em 3D – Presença de "ondulações" indicam	
a influência que o meio físico causa na potência de recepção	73
Figura 3.21–Potência de recepção – Potência média + sombreamento correlacionado.	73
Figura 4.1 – Distribuição espacial dos valores regionalizados	75
Figura 4.2 – Semivariograma e covariograma	76
Figura 4.3 – Mapas de ambiente Rádio	76
Figura 4.4 – Mapas reais em três dimensões	78
Figura 4.5 – Mapas reais em duas dimensões	79
Figura 4.6 – Comparação entre os mapas reais e os mapas REM	80

Figura 4.7 – Magnitude da diferença entre valores reais e estimados	80
Figura 4.8 – Comparação dos semivariogramas e covariogramas	81
Figura 4.9 – Comparação entre REMs da potência de recepção. $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	82
Figura 4.10–Comparação entre REMs da PSR	82
Figura 4.11–Erro quadrático do REM da potência de recepção	83
Figura 4.12–Módulo do erro do REM da PSR	83
Figura 4.13–Histograma do RMSE para a potência de recepção	85
Figura 4.14–Comparação entre os histogramas do RMSE – Potência de recepção.	85
Figura 4.15–RMSE em função de N e d_{des} – Potência de recepção	87
Figura 4.16–Histograma do RMSE em função da d_{des} – Potência de recepção	87
Figura 4.17–RMSE da potência recebida – Variando N para diversos valores de $\alpha.$.	89
Figura 4.18–Alteração da localização da ERB	90
Figura 4.19–Aumento de potência nos transmissores.	91
Figura 4.20–REM da potência de recepção - ERB e repetidores	92
Figura 4.21–REM da PSR - ERB e repetidores	93
Figura 4.22–REM com repetição.	93
Figura 4.23–Enlaces com PSRs próximas de 50%.	94
Figura 5.1 – Praça da paz - Unicamp	96
Figura 5.2 – Módulo de RF CC1101. \ldots	97
Figura 5.3 – Kit de desenvolvimento de IoT – IoTools.	98
Figura 5.4 – Equipamentos de medição – ERB e Nó Sensor.	99
Figura 5.5 – Nó Sensor com display	99
Figura 5.6 – Etapas da Fase I	100
Figura 5.7 – Semivariogramas e covariogramas	102
Figura 5.8 – REM da potência e da PSR	103
Figura 5.9 – REM da potência de recepção em três dimensões	104
Figura 5.10–REM da PSR em três dimensões.	104
Figura 5.11–Variância Kriging.	105
Figura 5.12–REM da potência de recepção com os pontos de validação cruzada	105
Figura 5.13–REM da PSR com os pontos de validação cruzada.	106
Figura 5.14–Etapas da fase II	109
Figura 5.15–Arquitetura da rede de sensores	110
Figura 5.16–Informações da aplicação.	111
Figura 5.17–Informações fornecidas pela ferramenta de gerência	112
Figura 5.18–Divisão em duas instâncias: do cliente e do operador	112
Figura 5.19–Detecção de oscilações de potência.	113
Figura 5.20–Detecção de assimetria entre as potências de Downlink e de Uplink	114
Figura 5.21–Atualização do REM	115

Figura 5.22–Fluxograma	da	Fase II								•										•			•					11	6
------------------------	----	---------	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	---	--	--	--	--	----	---

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Resultados do GEM	45
Tabela 3.2 – Perda de percurso determinística para diferentes ambientes. \ldots \ldots	47
Tabela 3.3 – Valores dos parâmetros da Figura 3.9.	57
Tabela 3.4 – Informações para a aplicação da técnica KO	64
Tabela 3.5 – Valores dos parâmetros para a geração do desvanecimento correlacionado.	72
Tabela 4.1 – Parâmetros de simulação.	75
Tabela 4.2 – RMSE e V_{PSR} para a realização espacial da Figura 4.5	80
Tabela 4.3 – RMSE e V_{PSR} em função de $N.$	84
Tabela 4.4 – Análise do $RMSE$ para a potência de recepção – Variando N	86
Tabela 4.5 – Análise do $RMSE$ para a potência de recepção – Variando d_{des}	88
Tabela 4.6 – Localização dos elementos de rede.	92
Tabela 4.7 – Valores dos parâmetros de simulação do GEM	94
Tabela 5.1 – Valores dos parâmetros do teste prático 1	01
Tabela 5.2 – Validação cruzada do mapa da potência de recepção 1	07
Tabela 5.3 – Validação cruzada do mapa da PSR	.07

Lista de Acrônimos e Abreviações

- ANATEL Agência Nacional de Telecomunicações
- AWGN Additive White Gaussian Noise
- B.L.U.E Best Linear Unbiased Estimator
- CH Cluster Head
- dB decibel
- DIKA Distributed Iterative Kriging Algorithm
- DW Data Whitening
- EEPROM erasable programmable read-only memory
- ERB Estação Rádio Base
- FEC Forward Error Correction
- GAF Geographic Adaptative Fidelity
- GEAR Geographic and Energy Aware Routing
- GEM Gilbert Elliot Model
- GPS Global Positioning System
- IA Inteligência Artificial
- IoT Internet of Things
- IP Internet Protocol
- IPM IoT Proxy Manager
- ISM Industrial, Scientific and Medical
- KO Krigagem Ordinária
- LCD Liquid Crystal Display
- LEACH Low Energy Adaptarive Clustering Hierarchy
- LED Light Emitting Diode

LoRa Long Range

LoRaWAN Long Range Wide Area Network

LOS Line Of Sight

LPWAN Low Power Wide Area Network

MoM Método dos Momentos de Matheron

MPPT Maximum Power Point Tracker

MSFC Modelo Shadow-Fading Correlacionado

NLOS Non-Line of Sight

NS Nó Sensor

NSA Nó Sensor de Atuação

NSM Nó Sensor de Monitoramento

NSR Nó Sensor de Repetição

PEGASIS Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems

QoS Quality of Service

REM Environment Maps

RMSE Root Mean Square Error

RR Routing Reflector

RSME Root Mean Square Error

RSSF Redes de Sensores Sem Fio

SLA Service Level Agreement

SM Sleep Mode

SPI Serial Peripheral Interface

SRAM Static Randon Access Memory

TCP Transmission Control Protocol

TEEN Thereshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network

TORA Temporally Ordered Routing Algorithm

- UART Universal Asynchrounous Receiver/Transmiter
- USB Universal Serial Bus
- VaR Variável Regionalizada
- VK Variância Kriging
- VR Valor Regionalizado
- WAIA Weighted Average Interpolation
- WRP Wireless Routing Protocol
- WSN Wireless Sensor Networks

Sumário

1	Intr	odução		19
	1.1	Fontes	de Degradação da Qualidade do Enlace	21
	1.2	Trabal	hos relacionados	22
	1.3	Objeti	vos e Contribuições	24
	1.4	Organi	ização do Trabalho	25
	1.5	Public	ações	25
2	Red	es de S	ensores sem Fio	27
	2.1	Caract	erísticas das Redes de Sensores	27
	2.2	Aplica	\tilde{coes} de RSSF	29
	2.3	Concei	tos Básicos	30
	2.4	Rotear	nento e Repetição de sinal	32
	2.5	Gereno	ciamento e Interconexão com a Internet	33
	2.6	Métric	as de Qualidade de Enlace de RF	36
3	Fun	dament	аção Теórica	39
	3.1	Métod	o Gilbert Elliot	39
		3.1.1	Cadeia de Markov discreta de dois estados	39
		3.1.2	Características do GEM	42
		3.1.3	Exemplo de implementação do GEM	44
	3.2	Modela	agem do canal de propagação	46
	3.3	Probal	pilidade de Sucesso de Recepção	48
	3.4	Funda	mentos da Geoestatística	49
		3.4.1	Processos Estocásticos Espaciais	49
		3.4.2	Semivariograma e Covariograma	51
		3.4.3	Variável Regionalizada	58
		3.4.4	Krigagem Ordinária	59
	3.5	Modela	agem do Ambiente Rádio	65
		3.5.1	Modelagem da tendência espacial	68
		3.5.2	Geração de Desvanecimento correlacionado	70
4	Tral	balho de	e Simulação	74
	4.1	Geraçã	ío dos Mapas de Ambiente Rádio	74
	4.2	Valida	ção	77
	4.3	A influ	iência do número de valores regionalizados e da distância de descor-	
		relação	$ ho$ espacial \ldots	81
		4.3.1	A influência de N na qualidade das estimativas $\ldots \ldots \ldots \ldots$	81

		4.3.2	Avaliando a distância de descorrelação
	4.4	Anális	se do parâmetro $\alpha - stable \dots \dots$
	4.5	Aplica	ações
		4.5.1	Alteração da localização da ERB
		4.5.2	Alteração da potência de transmissão dos dispositivos 90
		4.5.3	Detecção de Desvanecimento
		4.5.4	Estações Repetidoras de Sinal
	4.6	Simula	ação do GEM
5	Tral	balho E	Experimental e Ferramenta de Gerenciamento
	5.1	Cenár	io de testes $\ldots \ldots 95$
		5.1.1	Características Físicas do Ambiente
		5.1.2	Tecnologia utilizada nos testes
		5.1.3	Procedimentos experimentais
	5.2	Fase I	- Teste de Cobertura de RF
		5.2.1	Apresentação dos Resultados Experimentais $\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .$ 101
		5.2.2	Validação Cruzada
	5.3	Fase I	I - Monitoramento em Tempo Real
		5.3.1	Obtenção das Métricas de Rede e da Aplicação
		5.3.2	Apresentação do sistema de Gerência
		5.3.3	Detecção de Falhas e Oscilações
		5.3.4	Atualização do REM
		5.3.5	Visão Geral da Fase II
C	onclu	são	
R	oforôr	ncias	110
			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

1 Introdução

A Internet das Coisas (Internet of Things, IoT) tem sido reconhecida como uma das maiores revoluções tecnológicas da atualidade [1]. Consiste, basicamente, em conectar as "coisas" na Internet, disponibilizando informações úteis às pessoas para a solução de problemas específicos. Clássicas aplicações de IoT envolvem eletrodomésticos inteligentes, automóveis, celulares inteligentes (Smartphones), Tablets, relógios inteligentes, etc. Todos esses dispositivos utilizam a infraestrutura de alguma tecnologia que ofereça conectividade e, assim, disponibilizam suas informações por meio da Internet. Um automóvel, por exemplo, poderia disponibilizar informações como velocidade, temperatura ambiente, consumo de combustível, etc. Já um eletrodoméstico, como a geladeira, poderia disponibilizar informações a respeito da quantidade de mercadorias armazenadas no seu interior, data de validade dos alimentos, realizar compras via *web*, etc.

Estimativas realizadas pela empresa Juniper Research apontam que o ramo de IoT crescerá cerca de 140% até o ano de 2022, totalizando 50 bilhões de dispositivos conectados na Internet (mais que o dobro computado no ano 2019, de 20 bilhões de dispositivos) [2]. Nesse cenário, muitas oportunidades de prestação de serviço surgirão nos próximos anos, principalmente nas áreas de desenvolvimento de sistemas embarcados com sensores e atuadores, Edge Computing [3], segurança da informação [4], Big Data [5][6], processamento de dados e análises estatísticas [7], aprendizagem de máquinas com Machine Learning [8], Inteligência Artificial (IA) [9], entre outras. Por conta desse novo mercado, empresas como IBM, Microsoft, Intel e BOSCH estão investindo tanto no desenvolvimento de plataformas de IoT [10][11][12][13] como no desenvolvimento de sensores e microcontroladores para a implementação de novos dispositivos [14]. Exemplos práticos de IoT já estão sendo explorados em universidades ao redor do mundo com projetos internos sobre o "Campus Inteligente" (Smart Campus), relativos ao conceito de cidades inteligentes (Smart Cities) [15].

Na maioria das aplicações envolvendo IoT, as informações são transmitidas utilizando comunicação sem fio. Nesse sentido, a implementação de aplicações de IoT requer redes que forneçam infraestrutura e conectividade, de modo que as informações saiam do ponto da coleta de dados e cheguem aos servidores de aplicação, na Internet. É nesse contexto que se destacam as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) ou *Wireless Sensor Networks* (WSN) [16]. Tratam-se de redes que atendem requisitos específicos de acordo com a aplicação, sendo que o principal objetivo é fornecer suporte para a coleta e transmissão de dados de sensores e para a transmissão de comandos para atuadores. No universo de RSSF, principalmente no contexto de IoT, as redes de longo alcance, baixo consumo de energia e baixas taxas de transmissão de dados (Low Power Wide Area Network, LPWAN) merecem destaque devido às vantagens que estão apresentando [17][18]. Em parte das aplicações de IoT, não são necessárias altas taxas transmissão de dados, uma vez que a troca de informação é realizada com frequência baixa (períodos de minutos, horas ou mesmo dias) e com pacotes de informação de poucos bytes. Baixas taxas de transmissão permitem distâncias elevadas entre transmissor e receptor, o que é essencial para aplicações cujas distâncias são da ordem de quilômetros. Além disso, outro requisito relevante é o baixo consumo de energia, principalmente quando os dispositivos são instalados em ambientes que não apresentam infraestrutura com rede elétrica convencional, requerendo o uso de baterias. Um exemplo de rede LPWAN são as RSSFs baseadas no protocolo LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) e na tecnologia de comunicação LoRa (Long Range) [19][20]. Essa tecnologia de comunicação é baseada em espalhamento espectral, que permite o estabelecimento de enlaces de longa distância às custas da redução da taxa de transmissão.

Nesse cenário, surge a figura da operadora de redes sem fio destinada a atender as necessidades de conectividade das aplicações de IoT, conectando sensores à Internet [21]. Parte desses serviços prestados serão oferecidos utilizando a infraestrutura de redes LPWAN, que operam na banda Industrial, Científica e Médica (Industrial,Scientific and Medical, ISM) nas frequências de 433, 868 e 915 MHz¹. Tais operadoras deverão garantir a Qualidade de Serviço (Quality of Service, QoS) de suas redes, o que tipicamente é objeto de contrato entre a servidora e o cliente, os chamados Acordos de Nível de Serviço (Service Level Agreement, SLA) [21]. A qualidade de serviço de uma rede de comunicação pode ser medida de diversas formas, como a probabilidade de disponibilidade do serviço (tanto no domínio espacial, como no temporal), a taxa de transmissão média ou mínima garantida, a probabilidade de sucesso na transmissão de mensagens, entre outras.

Redes de comunicação sem fio estão sujeitas a um grande número de efeitos que degradam seu desempenho, e que podem afetar de maneira decisiva as aplicações de IoT. Dentre esse efeitos, aqueles associados aos mecanismos de propagação têm destaque, como o desvanecimento de longo e de curto prazo [22], dado à natureza aleatória dos mesmos, o que dificulta a mitigação de seus efeitos. Nesse cenário, torna-se essencial para o atendimento dos requisitos de QoS de redes de comunicação sem fio a monitoração do estado da rede, em termos de métricas de QoS. Tal monitoração poderá auxiliar o operador da rede sem fio para IoT na identificação de problemas na rede, e na busca das causas e das soluções, antes que o cliente sofra com a degradação do desempenho. O presente tra-

¹ A banda de 868 MHz é amplamente utilizada nos Estados unidos, mas não é empregada no Brasil para serviços do tipo ISM.

balho apresenta uma proposta de metodologia, e a ferramenta associada, para monitorar e avaliar a qualidade de serviço de uma rede sem fio para IoT. No desenvolvimento desse trabalho, teve-se em mente o cenário típico de pequenos operadores de redes com recursos financeiros limitados. Dessa forma, foram empregadas ferramentas de baixo custo.

1.1 Fontes de Degradação da Qualidade do Enlace

A comunicação sem fio está sujeita aos efeitos dos mecanismos de propagação e aos aspectos intrínsecos do processo de comunicação, que causam a degradação na qualidade da transmissão dos sinais e do serviço de uma forma geral. Considerando os cenários de interesse nesse trabalho, os principais efeitos de degradação da qualidade de serviço são:

- Desvanecimento a longo prazo É a atenuação do sinal de RF devido tipicamente a obstáculos localizados entre as antenas transmissora e receptora, como vegetação, prédios, torres, etc. [23][24][22]. Esse desvanecimento pode ser entendido como uma forma de modelar variações na atenuação determinística (aquela devido à distância de separação entre as antenas transmissora e receptora), devido à heterogeneidade do ambiente de propagação.
- Desvanecimento a curto prazo Este é o efeito causado pela propagação em múltiplos percursos. Em um cenário típico de propagação, o sinal de RF percorre inúmeros caminhos até chegar ao receptor [22]. Assim, o sinal recebido é a soma de múltiplas réplicas do sinal transmitido, com desvios aleatórios de amplitude e fase que, dependendo da situação, podem gerar variações abruptas em curtas distâncias. Existem na literatura inúmeros modelos estatísticos para a descrição das variações da amplitude e da fase de sinais que sofrem esse tipo de desvanecimento, como os modelos de Rayleigh, Nakagami, α κ μ, entre outros [25], [26].
- Problemas físicos e de conexões A qualidade do sinal recebido pode também ser afetada por problemas causados por componentes e dispositivos empregados nos enlaces, como a má escolha das antenas de transmissão e de recepção, problemas de calibração da frequência de operação, problemas no ajuste da potência no transmissor ou na sensibilidade do receptor, defeitos em conectores e cabos, entre outros [27]. Note-se que esses problemas podem se manifestar como um efeito determinístico ou aleatório.

Como ficará claro nos próximos capítulos, serão considerados na metodologia de monitoração da qualidade da rede apenas os efeitos do desvanecimento de longo prazo

e dos problemas físicos e de conexões, pois tais efeitos apresentam uma variação temporal mais lenta, permitindo o acompanhamento pelas ferramentas a serem utilizadas.

1.2 Trabalhos relacionados

Nessa seção são abordados alguns trabalhos relacionados à medição da qualidade de serviço em redes sem fio e IoT. Em [21] é apresentado uma arquitetura sistêmica para estabelecer um SLA para RSSF. Essa arquitetura é formada por módulos (a maioria deles são programas inteligentes) que operam para gerenciar a rede. Os componentes que formam a arquitetura do SLA em questão são os seguintes [21]:

- Cliente do serviço: Trata-se do cliente que está interessado em contratar um serviço, com necessidades que deverão ser satisfeitas pelo serviço contratado. Os responsáveis por fornecer o serviço devem analisar e decidir se o novo cliente poderá ser admitido e atendido com uma QoS satisfatória.
- Operador da RSSF: O Operador da RSSF é o responsável por fazer a comunicação com os clientes, que irão apresentar suas necessidades. Além disso, é função do operador estabelecer a interface com os outros módulos que compõem o SLA (apresentadas a seguir), que fazem as análises em relação à viabilidade da inclusão de novos serviços na RSSF.
- Registro de Serviço: Para contribuir com o aumento da QoS, é conveniente que os dados brutos da rede sejam armazenados em um banco de dados. Assim, o sistema poderá recorrer ao histórico coletado no passado e, em alguns casos, prever possíveis falhas que possam ocorrer no futuro. Nesse sentido, destaca-se o Registro de Serviço. Trata-se de um banco de dados que armazena as informações brutas a respeito da RSSF.
- Observador SLA: O Observador SLA é encarregado de coletar informações a respeito do desempenho dos terminais de rede, que serão salvas no Registro de Serviço.
- Admitidor SLA: É o responsável por fazer o controle e admissão de novos clientes na RSSF. O Admitidor SLA também cumpre a tarefa de atuar como interface entre o Operador da RSSF e os outros módulos da Arquitetura do SLA. Isso envolve tarefas como a de receber requisições dos clientes trazidas pelo Operador da RSSF, avaliar o estado atual da RSSF utilizando o Registro de Serviços, analisar a viabilidade da inclusão de novos serviços e, finalmente, decidir se é possível incluir novos serviços;

- Gerenciador SLA: É o módulo responsável por controlar e relatar o estado da RSSF, representando a parte mais inteligente de toda a arquitetura do SLA apresentado em [21]. Considerado como software central de todo o sistema, é integrado com o Operador da RSSF, Admitidor SLA, Serviço de Registro e Executor SLA. Além disso, pode fornecer informações diretamente para os clientes do serviço, como informações de tráfego, desempenho, alarmes, entre outras [21]. Também é função do Gerenciador SLA a emissão de relatórios a respeito do estado da RSSF, análise de desempenho e disparo de mudanças de configurações com base nos dados do Registro de Serviço;
- Executor SLA: É o módulo que executa as configurações de rede, estando diretamente ligado ao Observador SLA e, portanto, ao Registro de Serviço, e ao Gerenciador SLA;

Em [28] é abordado um sistema de gerência de RSSF para IoT, com a implementação de protocolos de roteamento. A proposta foi fundamentada no IoT Proxy Manager (IPM), que consiste em um sistema que é capaz de descobrir as melhores rotas para os pacotes de dados por meio de algumas métricas de rede. Toda a construção foi feita com base nas cinco áreas clássicas de gerência em redes de computadores: configuração, desempenho, falhas, contabilização e segurança. Com isso, foi desenvolvido um sistema de monitoramento *Web* para a exibição das informações capturadas pela RSSF.

O autor de [29] propõe um modelo de referência de código aberto (*Open - Source*) para aplicações de IoT utilizando RSSF. Neste modelo, são apresentados diversos exemplos de aplicações com sensores e atuadores, construídos com base no IPM e visando atender requisitos de QoS. As aplicações de IoT são divididas em níveis bem definidos, como descrito a seguir:

- Nível das Coisas: É a etapa em que as informações dos sensores são coletadas;
- Nível dos Dispositivos, Condicionamento e Controle: Representa a implementação de algoritmos para a tomada de decisão local, ou seja, a inserção de rotinas pré-definidas no microcontrolador;
- Nível de Conectividade: Trata-se da rede sem fio que proverá a conectividade para a transmissão dos dados coletados pelos sensores;
- Nível de Borda: É representado pelo elemento responsável por receber as informações que chegam da RSSF;
- Nível de Armazenamento São os bancos de dados disponíveis em servidores na Internet para o armazenamento das informações coletadas pelos sensores;

- Nível de Abstração: É a etapa em que os dados são explorados para a geração de informações úteis aos usuários;
- Nível de Apresentação: Está relacionado à exibição das informações para o usuário final.

Diferentemente dos trabalhos descritos acima, o presente trabalho apresenta uma maior ênfase nos aspectos relacionados ao enlace de comunicação sem fio. Como já mencionado acima, o enlace sem fio pode ser considerado a parte mais vulnerável do sistema, devido aos mecanismos de propagação de RF, merecendo, portanto, atenção especial no contexto de qualidade de serviço.

1.3 Objetivos e Contribuições

O presente trabalho propõe uma metodologia e uma ferramenta associada para monitorar e avaliar a qualidade de serviço prestada por sistemas LPWAN no cenário de IoT. A metodologia proposta utiliza modelos matemáticos do ambientes rádio, atrelados a ferramentas fundamentadas na geoestatística. São gerados os mapas de ambiente rádio, apresentados no Capítulo 3, com o objetivo de produzir estimativas de métricas de qualidade que auxiliem os prestadores de serviços nas etapas de pré-instalação e de operação da rede. Durante a operação da rede, a ferramenta poderá ser utilizada para a etapa de gerência, por meio do monitoramento contínuo das métricas de qualidade de serviço em um painel acessado via *Web*. As contribuições deste trabalho são:

- A metodologia proposta, que é dividida em duas fases, utiliza ferramentas fundamentadas na geoestatística para gerar Mapas de Ambiente Rádio (Radio Environment Maps, REM) com informações a respeito da qualidade do enlace em função da localização dos dispositivos. Com tais informações, o Operador da RSSF terá maior percepção do serviço que está sendo oferecido, permitindo a tomada de decisões visando a melhoria da qualidade da rede. Além disso, o operador terá indicações sobre a qualidade do serviço que poderá oferecer aos seus clientes, podendo assim estabelecer contratos de serviço com maiores garantias de atendimento. Na Fase I da metodologia, estão previstos os procedimentos de pré-instalação de uma rede. Na Fase II, é suposto que os dispositivos dos clientes já estão instalados, e além de transmitir as métricas da aplicação, também enviarão as informações sobre o desempenho da rede, necessárias para a gerência da rede.
- A ferramenta visa também a detecção da degradação da qualidade do serviço prestado, por meio da monitoração contínua das métricas de desempenho. Os valores

das métricas dos enlaces da rede são continuamente coletados, e apresentados periodicamente nas janelas da ferramenta, por meio de mostradores numéricos. Essas indicações permitem ao operador conhecer o estado da rede em tempo real. A coleta contínua das métricas de desempenho abre a possibilidade do uso de ferramentas estatísticas visando a predição do estado da rede. Este tópico é deixado para trabalhos futuros.

1.4 Organização do Trabalho

O trabalho é organizado da seguinte maneira:

- Capítulo 2: Resume os principais conceitos sobre as redes de sensores sem fio, bem como suas especificações. Serão apresentadas as principais tecnologias disponíveis no mercado, protocolos de comunicação, hierarquia de funcionamento e outras informações relevantes;
- Capítulo 3: Destaca a fundamentação teórica necessária para a compreensão do trabalho, envolvendo técnicas fundamentadas na geoestatística, modelos de propagação de sinais e estratégias para mensurar a qualidade do enlace de RF;
- Capítulo 4: Aborda os trabalhos de simulação relativos aos mapas REM, explorando os parâmetros envolvidos para a sua geração; também explora as simulações de um modelo baseado em uma cadeia de Markov de dois estados, apontando suas devidas utilidades no âmbito da avaliação da qualidade das RSSFs;
- Capítulo 5: Apresenta os trabalhos experimentais em campo e o desenvolvimento da metodologia proposta. Destaca a utilização de uma ferramenta de gerência que torne possível a aplicação da metodologia, envolvendo as tecnologias necessárias;
- Conclusão: Apresenta as conclusões do trabalho e aponta as perspectivas futuras.

1.5 Publicações

As publicações geradas no contexto deste trabalho de mestrado são as seguintes:

 G. Lopes e P. Cardieri, "Mapas de Ambiente Rádio Aplicados às Redes de Sensores Sem Fio", XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT), Out. 2019. G. Lopes, P. Cardieri, E. Lima, O. Carvalho, P. Chaves, R. Montali e F. Fruett, "RSSI Signatures for Outdoor WSN Applied to IoT and Smart Campus", *The Se*venth International Conference on Smart Cities, Systems, Devices and Technologies (SMART, IARIA), July. 2018.

2 Redes de Sensores sem Fio

2.1 Características das Redes de Sensores

As RSSFs podem ser definidas como estruturas que fornecem conectividade sem fio para o tráfego de dados de sensores e atuadores. Geralmente, os dispositivos que compõem as RSSFs são bastante compactos fisicamente, aumentando assim as aplicações para esse tipo de rede. Esses dispositivos são integrados a microcontroladores, que possuem capacidade de processamento reduzida. Operam com baixo consumo de energia, o que é adequado para aplicações cuja alimentação do dispositivo é tipicamente feita por bateria. As principais características desse tipo de rede são:

- Ser resiliente a falhas O sistema deverá apresentar robustez aos possíveis problemas que possam ocorrer, pois isso irá garantir maior qualidade de serviço [28]. Muitos fatores podem contribuir para a ocorrência de falhas, como a implementação ineficiente dos algoritmos de controle da rede, utilização de componentes físicos de baixa qualidade, seleção inadequada da posição geográfica do terminal de rede e a escolha inapropriada das antenas dos módulos de transmissão e de recepção.
- Segurança Uma RSSF deve garantir a segurança da informação. Nesse sentido, técnicas de criptografia devem ser implementadas para que o tráfego das informações ocorra de forma segura [30].
- Ser escalável e reativa Uma rede de sensores precisa ser facilmente reproduzida e incrementada [21]. Os algoritmos de controle devem permitir que, de maneira simples, novos terminais de rede possam ser incluídos sem que o sistema necessite ser reiniciado. Já a reatividade está relacionada à capacidade da rede de reagir às oscilações causadas pelo meio externo. Por exemplo, fortes variações de temperatura, mobilidade urbana, inclusão de novos objetos obstruindo a linha de visada entre os equipamentos rádio, etc.
- Ter baixo custo de implementação Os custos de implementação incluem os de infraestrutura e os dos terminais da rede. Em termos de infraestrutura, a maior preocupação é a instalação da estação central, que se comunica com os demais terminais da rede. A base rádio deve ser instalada em um local estratégico e privilegiado fisicamente, a uma altura elevada para estabelecer linha de visada (Line Of Sight, LOS). Além disso, é indispensável a presença de antenas de ganho elevado. Já a in-

fraestrutura dos terminais de rede pode ser mínima, tanto em locais *indoor* quanto em *outdoor*.

Baixo consumo de energia - Dependendo da aplicação, o consumo de energia pode ser um parâmetro crucial, principalmente em locais onde não é possível energizar um terminal de rede utilizando a rede elétrica padrão, o que obriga o uso de baterias. A duração de uma bateria está diretamente relacionada ao consumo do dispositivo que, por sua vez, é definido por diversas particularidades. Por exemplo, quanto maior for a taxa de dados, maior será o consumo de energia. Além disso, existem modos de operação para o dispositivo que permitem a economia de energia, como o Modo Dormir (*Sleep Mode, SM*), cujo suporte já é oferecido pela maioria das tecnologias de RSSF atuais [31]. Na literatura, são encontrados alguns estudos de RSSF com a utilização de fontes alternativas de energia, como os painéis solares. Em [32], é apresentado o desenvolvimento de um controlador de carga com um rastreador do ponto de máxima potência (Maximum Power Point Tracker, MPPT) voltado para aplicações em RSSF com bateria.

Há diversas tecnologias disponíveis para a implementação de redes de sensores, como Bluetooth [33], Wi-Fi [34], Zigbee [35], SigFox [36], LoRa [19] e NB-IoT [37]. Todas elas têm peculiaridades que as tornam apropriadas para alguns tipos de aplicações e inadequadas para outras. Por exemplo, redes sem fio baseadas na tecnologia Bluetooth, que empregam o protocolo IEEE 802.15.1, operam com baixas distâncias entre transmissor e receptor, e suficientes taxas de dados para tráfego de vídeos, imagens e outros tipos de arquivos. As redes empregando a tecnologia Zigbee, protocolo 802.15.4, operam com baixas taxas de dados e distâncias. Além da topologia de operação ponto-multiponto, que é o padrão para a maioria das RSSFs, o Zigbee pode operar em topologias de malha ou árvore. Nessas duas configurações, existirão terminais de rede capazes de realizar repetição de sinal, permitindo que o sistema funcione com maiores distâncias entre transmissor e receptor.

Já as redes Wi-Fi, protocolo IEEE 802.11, operam com taxas de dados maiores se forem comparadas com as tecnologias Bluetooth e Zigbee. Basicamente, a cada dispositivo eletrônico presente em uma rede Wi-Fi (computadores, celulares, tablets, etc) é atribuido um endereço de Internet (Internet Protocol, IP). Por meio do IP, todos os dispositivos presentes na rede são mapeados, de forma que o ponto central (Gateway) seja capaz de transmitir e receber informações desses dispositivos. E por fim, as redes LoRaWAN, SigFox e NB-IoT, caracterizadas como redes LPWAN, visam baixo consumo de energia, baixas taxas de transmisão de dados e longas distâncias entre transmissor e receptor [17][18]. Em [38] é apresentado um estudo a respeito de tecnologias LPWAN existentes no mercado, com foco em cobertura de sinal de RF para redes LoRaWAN, NB-IoT e SigFox.

2.2 Aplicações de RSSF

As aplicações para RSSF vislumbradas ou já implementadas hoje em dia são inúmeras. Alguns detalhes das aplicações nas áreas citadas são apresentadas a seguir.

- Agronegócio Na agricultura, destacam-se as aplicações de monitoramento de grandezas físicas (temperatura e umidade do ar, do solo, etc), de agrotóxicos, pesticidas e de pragas. Em termos de controle, pode-se citar a automatização dos sistemas de irrigação. Na pecuária, destacam-se as aplicações de monitoramento e controle de temperatura, umidade e luminosidade para ovinos e suínos [39], e outras como o monitoramento do nível de atividade dos animais de grande porte (alimentação, ruminação e cio) e pesagem eletrônica.
- Saúde Nesta área, é possível trabalhar com o monitoramento de grandezas referentes aos pacientes de hospitais, tais como o monitoramento de temperatura corpórea, pressão sanguínea, batimentos cardíacos, oximetria, gasometria, entre outros [16].
- Ambiental Na área ambiental, as RSSFs podem contribuir com o monitoramento de grandezas físicas do solo, água, atmosfera, vegetação e condições climáticas. Além disso, pode-se citar a detecção de incêndios em florestas, detecção de desmoronamentos, estudo e controle de gases estufa. Outras aplicações de RSSF em áreas ambientais foram exploradas em [31], em que o autor estuda algumas estratégias de monitoramento envolvendo baixo consumo de energia elétrica.
- Residencial No âmbito residencial, várias aplicações com RSSFs podem ser utilizadas especialmente nas áreas de automação e de cidades inteligentes [40]. Nessas áreas, destacam-se a instalação de sensores como de chuva, gás de cozinha, luminosidade, incêndio, detectores de intrusos na residência, consumo de água e monitoramento inteligente de energia elétrica [28].
- Ambiente Industrial 4.0 Na indústria, as RSSFs são utilizadas em aplicações como monitoramento e controle de máquinas elétricas de grande porte, automatização e controle da logística interna, desenvolvimento de robôs equipados com sensores, rastreamento inteligente de veículos, gerenciamento de equipamentos com o auxílio de inteligência artificial, etc. Em [41], foi realizado um estudo de caso de RSSFs aplicadas a ambientes industriais, envolvendo métricas de qualidade do enlace de

RF e explorando possíveis interferências eletromagnéticas causadas por máquinas de grande porte. Também são apresentados estudos, desafios e implementações de RSSF no ambiente industrial 4.0 em [42][43];

• Militar - Há um interesse dos militares em RSSF, pois se trata de sistemas de baixo custo, fácil instalação e elevada tolerância a falhas (robustez). Exemplos de aplicações incluem sistemas de vigilância, reconhecimento de forças inimigas, sistemas inteligentes de mira, monitoramento de munições, reconhecimento de ataques nucleares, químicos e biológicos, entre outros [28][44][16].

2.3 Conceitos Básicos

De maneira genérica, independentemente da tecnologia utilizada, uma RSSF é composta por uma Estação Rádio Base (ERB), Nós Sensores de Monitoramento (NSM), Nós Sensores de Atuação (NSA) e, em algumas ocasiões, Nós Sensores de Repetição (NSR). A ERB conecta-se por meio de enlaces rádio a todos os outros dispositivos da rede.



Figura 2.1 – Módulos de um nó sensor genérico.

Cada um desses elementos são compostos pelas partes mostradas na Figura 2.1. Detalhes a respeito de cada uma delas são apresentados na sequência [45].

• Interface de comunicação sem fio - Trata-se da interface utilizada para enviar as informações via comunicação por radiofrequência. O envio de informações pode envolver a ERB e os terminais de rede, ou até mesmo os terminais entre si.

- Sensores São dispositivos eletrônicos capazes de medir grandezas físicas, sendo, portanto, as fontes de dados da rede. Exemplos são os sensores de temperatura, umidade, luminosidade, pressão, qualidade do ar, gases, peso, fogo e chuva.
- Atuadores São estruturas capazes de atuar em algum processo em execução. Atuadores comumente encontrados no mercado são Diodos Emissores de Luz (Light Emitting Diode, LEDs), displays, lâmpadas, relés, válvulas solenóides, etc;
- Microcontrolador Sendo o "cérebro" do terminal de rede, o microcontrolador é responsável tanto por coletar as informações dos sensores e atuadores, como por estabelecer a comunicação com a interface de comunicação RF. Os microcontroladores são estruturas de baixo custo e geralmente consomem pouca energia. São compostos por memórias *FLASH* (memória não volátil), EEPROM (memória não volátil) e *SRAM* (memória volátil). É na memória *FLASH* que o software embarcado, também conhecido como *Firmware*, é armazenado; a memória EEPROM desempenha a função de armazenar alguns bytes de informação que não se perdem ao desligar a energia e a memória *SRAM* é destinada ao armazenamento e alocação de variáveis, utilizadas na composição do *Firmware*;
- Fonte de energia Fornece a alimentação aos dispositivos eletrônicos, podendo vir da rede elétrica ou por meio de baterias.





Figura 2.2 – Rede de sensores sem fio genérica.

A ERB deve ser capaz de se comunicar com todos os NS, estando conectada a uma unidade central de processamento para que as informações coletadas possam ser interpretadas e, posteriormente, armazenadas. Assim, tanto a ERB quanto os demais terminais da rede devem apresentar um endereço, que é definido de acordo com o protocolo de comunicação. Dessa forma, a ERB pode se comunicar com os terminais de rede individualmente (comunicação ponto-a-ponto) para, por exemplo, solicitar a leitura de um sensor ou controlar um elemento de atuação. Além disso, também é possível o envio de mensagens *Broadcast*, que são destinadas a todos os terminais que compõem a rede.

2.4 Roteamento e Repetição de sinal

As estratégias de repetição de sinal e roteamento são amplamente utilizadas para aumentar a área de cobertura e controle de uma ERB. A ideia é fazer a mensagem percorrer uma rota de múltiplos saltos envolvendo os dispositivos da rede, até chegar ao destino final. Em tecnologias como Wi-Fi e Zigbee, as estratégias de repetição são importantes devido às limitações de distância de transmissão. Em geral, os protocolos de roteamento são divididos em três classes: Flat, hierárquicos e baseados em localização geográfica [46]. Uma breve descrição dessas classes é apresentada a seguir.

- Hierárquicos Como o próprio nome sugere, esse tipo de roteamento é baseado em uma hierarquia entre os terminais. Cada NS pertence a um subgrupo da RSSF denominado *Cluster*. Além de desempenhar tarefas de monitoramento e atuação, cada NS também pode trabalhar com repetição de sinal, dentro do seu *Cluster* [28]. Cada *Cluster* possui um NS denominado Central do *Cluster* (*Cluster* Head, CH), que é o responsável por encaminhar os pacotes de dados para os níveis superiores na hierarquia do sistema. Alguns exemplos de protocolos hierárquicos utilizados em sistemas de roteamento são: *PEGASIS* (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)[47], *TEEN*(Thereshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network) e *LEACH* (Low Energy Adaptarive Clustering Hierarchy) [48] [46].
- *Flat* Nesta classe, os nós sensores podem operar com monitoramento e atuação e, além disso, realizar repetição de sinal sem uma estrutura de hierarquia. Duas sub-classes aparecem aqui [28]: a dos protocolos pró-ativos, em que todas as rotas possíveis são pré-determinadas logo após a inicialização do sistema; e a dos protocolos reativos, em que as rotas são identificadas conforme a necessidade do sistema, ou seja, sob demanda. Alguns exemplos de protocolos da classe *Flat* são: TORA (Temporally Ordered Routing Algotithm), RR (Routing Reflector). WRP (Wireless Routing Protocol), entre outros [46];

• Baseados em localização - Tratam-se dos protocolos que utilizam a localização geográfica dos NS como parâmetro para estabelecimento das rotas. Esse tipo de protocolo requer que algum tipo de mecanismo de localização seja empregado nos terminais, como *GPS* (Global Positioning System). Exemplos de protocolos dessa classe são: *GAF* (Geographic Adaptative Fidelity) e *GEAR* (Geographic and Energy Aware Routing) [28].

A Figura 2.3 ilustra uma situação em que dois terminais são empregados na rota para conectar a ERB e o nó destino.



Figura 2.3 – Comunicação com repetição – três saltos.

Note-se que os terminais intermediários na rota podem ser os nós sensores da rede, ou ainda terminais instalados na rede com a função específica de retransmitir o sinal dos nós sensores e da ERB.

2.5 Gerenciamento e Interconexão com a Internet

Nessa Seção são apresentadas duas estratégias de gerenciamento de RSSF e interconexão com a *Internet*, com o objetivo de mapear, sucintamente, as soluções existentes no mercado [49].

A primeira estratégia consiste em fazer com que cada NS possua suporte direto ao protocolo TCP/IP. Neste caso, os NS precisam estar conectados a uma rede Wi-Fiou possuir acesso às redes de celular (2G, 3G, 4G e 5G). Em ambos os casos, a gerência dos dados brutos deve ser realizada no interior de cada terminal de rede, o que obriga cada um deles possuir poder de processamento alto. Note-se que o fato de os terminais acessarem as redes Wi-Fi ou celular acarreta em alto consumo de energia nos terminais. A Figura 2.4 mostra um exemplo de RSSF com a tecnologica Wi-Fi, empregando essa estratégia de gerenciamento.



Figura 2.4 – RSSF baseada no Wi-Fi.

Neste caso, observa-se que o papel da ERB é desempenhado pelo roteador Wi-Fi da rede. Sendo assim, todos os dispositivos enviam suas informações para o roteador que, por sua vez, realiza a interface de comunicação com a Internet. É importante ressaltar que uma estratégia de gerenciamento deve ser implementada localmente em cada NS, priorizando o envio de informações úteis. Por exemplo, tratativas estatísticas podem ser aplicadas aos dados brutos coletados no interior do NS, e apenas as informações úteis serão enviadas para a Internet.

A segunda estratégia consiste em utilizar a gerência centralizada [28][50][29]. Nesse caso, a ERB é conectada a uma unidade com alto poder de processamento, que possui interface com a Internet. Essa unidade é conhecida como *Gateway*, uma vez que atua como nível intermediário entre a rede de sensores e a Internet [31][41][29][51]. Basicamente, o *Gateway* é responsável pelas seguintes tarefas:

- Coleta de informações da RSSF Todas as informações coletadas pela ERB são enviadas ao *Gateway* por meio de uma comunicação *Serial*, como, por exemplo, a comunicação Universal Assíncrona de Transmissão e Recepção de Dados (Universal Asynchrounous Receiver/Transmiter, UART). Isso permite que a comunicação seja do tipo bidirecional e que estratégias de gerência possam ser implementadas no próprio *Gateway*.
- Tratativa de dados brutos Possuindo elevado poder de processamento, o *Ga-teway* é capaz de receber dados de diversos terminais de rede para posteriormente processá-los. Além disso, pode-se utilizar ferramentas de análise estatística a fim de oferecer informações de maior qualidade para os usuários finais. Dessa maneira, os

terminais de rede não precisarão ter alto poder de processamento, o que reduz o custo e o consumo de energia.

- Conexão com a Internet O *Gateway* é o único equipamento da RSSF que possui conexão com a *Internet*. As informações são centralizadas para que posteriormente sejam enviadas e exibidas em servidores na Internet [29]. Além disso, também é possível que a comunicação ocorra no sentido inverso, ou seja, dos servidores de aplicação até os NS, necessariamente passando pelo *Gateway*. Essas situações são comuns em aplicações de controle, como, por exemplo a utilização de botões lógicos para acionar atuadores presentes nos terminais de rede.
- Roteamento Em algumas estratégias, o *Gateway* é responsável pela definição das rotas pelas quais um pacote de dados irá percorrer até chegar ao destino final. Uma estratégia de roteamento robusta foi apresentada em [28], em que a inteligência do sistema foi implementada no *Gateway*.

Em [28], foi apresentada a proposta de uma RSSF gerenciada pelo sistema Gerenciador Proxy IoT (IoT Proxy Manager, IPM). Este permite a implantação de uma estratégia centralizada em RSSF, em que as informações coletadas são concentradas no IPM para a tomada de decisões e gerenciamento.



Figura 2.5 – RSSF baseada no IoT Proxy Manager.

Na Figura 2.5 é apresentada a RSSF baseada no IPM. Os dados da RSSF são coletados pela ERB e posteriormente encaminhados para o IPM. Em seguida, tratativas estatísticas podem ser aplicadas com o objetivo de gerar informações úteis a partir dos dados brutos. Essas informações, então, são enviadas aos servidores na *Internet* e exibidas aos usuários (gerentes da rede ou clientes).

Observa-se na literatura, que os sistemas LPWAN estão sendo cada vez mais utilizados e o exemplo mais atual de mercado são as redes baseadas no protocolo Lo-RaWAN (tecnologia LoRa) [19]. Por esses motivos, a estratégia de gerência centralizada, fundamentada nos conceitos do IPM, foi a escolhida para as implementações realizadas neste trabalho.

2.6 Métricas de Qualidade de Enlace de RF

As principais métricas de desempenho empregadas em redes de comunicação sem fio e em RSSF são descritas a seguir [22][52][16]:

- Taxa de erro de bit (*Bit Error Rate, BER*): É uma estimativa a probabilidade de um bit ser recebido com erro. A BER pode ser determinada experimentalmente como a razão entre o número de bits recebidos com erro e o número total de bits transmitidos.
- Taxa de erro de pacote (Packet Error Rate, PER) Se trata de uma estimativa probabilidade de um pacote ser recebido com erro, e pode ser calculado como sendo a razão entre o número de pacotes recebidos com erro e o número total de pacotes considerados. A PER está relacionada com a BER, mas essa relação depende da definição de pacote recebido com erro. Uma outra métrica relacionada a pacotes é a taxa de sucesso de pacotes (Packet Success Rate, PSR), dada por PSR = 1 PER.
- Received Signal Strength Indicator, RSSI É um número que indica a intensidade de sinal recebido, sendo, portanto, relacionado à potência de recepção. Os transceptores comumente empregados na implementação dos nós da RSSF já fornecem a medida do RSSI. Para os experimentos em campo realizados nesse trabalho, foi utilizado o transceptor CC1101 da Texas Instruments [53], em que o RSSI é apresentado em uma palavra binária de 8 bits em representação de complemento de dois, e a relação entre o valor do RSSI e a potência recebida, em dBm, é

$$P_{Rx} = \begin{cases} \frac{RSSI-256}{2} - 74, & RSSI \ge 128\\ \frac{RSSI}{2} - 74, & c.c \end{cases}$$
(2.1)

• Link Quality Indicator, LQI - Mensura a qualidade do pacote recebido. Essa métrica possui diferentes interpretações dependendo do tipo de transceptor de RF utilizado na RSSF. Por exemplo, para o transceptor CC1101, a LQI varia entre
0 e 127 e mensura o quão facilmente o sinal recebido foi demodulado no receptor, levando em consideração a magnitude do erro entre a constelação do sinal recebido e a constelação ideal. Em ambientes com poucos efeitos de degradação provocados pelo canal, como em propagação com visada direta, as variações de LQI são pequenas. Entretanto, em ambientes de propagação sem visada direta (Non-Line of Sight, NLOS), influenciados pelos desvanecimentos de curto e longo prazo, a LQI tende a sofrer forte variações em curtos intervalos de tempo [54].

As métricas mencionadas acima indicam a qualidade do enlace rádio ERB-NS, que pode variar ao longo de uma área, devido a fatores como distância entre a ERB e o NS, obstruções, e outros efeitos de propagação. A visualização do comportamento dessas métricas na região de serviço torna-se, portanto, uma ferramenta importante no planejamento e na gerência de redes sem fio, incluindo as RSSFs. Nesse contexto surgem os mapas REM. Através do uso de técnicas fundamentadas na geoestatística, é possível construir tais mapas com a estimação dos valores das métricas de desempenho, obtidas a partir coletas realizadas em alguns pontos da região. A fundamentação teórica para a construção desses mapas e o uso dos mesmos na avaliação e gerência de uma RSSF serão objetos dos próximos capítulos desse trabalho.

O uso do REM na análise do desempenho de redes também foi explorado em diversos trabalhos encontrados na literatura. Em [55] [56], os autores investigam o uso do REM na estimativa da qualidade de uma rede de comunicações móveis, com foco no problema da incerteza de localização nas amostragem da potência recebida. Os autores de [57] estudam a aplicação do modelo geoestatístico denominado "Krigagem Ordinária" em RSSF para a produção de mapas REM. A partir desse estudo, foram apresentados frameworks para a geração desses mapas, desenvolvidos na linguagem de programação **R**. Em [58], são discutidas as ferramentas de geoestatística utilizadas para geração de mapas REM em sistemas de comunicação sem fio, procurando validar as técnicas de estimativa por meio da Raíz do Erro Quadrático Médio (Root Mean Square Error, RMSE).

Em RSSF, pode-se citar a utilização do REM nas referências [59], [60] e [61]. Em [59], os autores abordam a construção do REM utilizando diferentes técnicas de predição espacial, como *Random Forest*, Redes Neurais, Árvores de Decisão, Krigagem e outras. O foco está na construção de um sistema de gerência para aplicações de IoT, utilizando como infraestrutura de conectividade sem fio as redes celulares. Em [60], a Krigagem é utilizada para solucionar problemas de predição espacial, em que é proposto um algoritmo de Krigagem Iterativa Distribuída (Distributed Iterative Kriging Algorithm, DIKA), avaliando sua complexidade. Por fim, em [61], a abordagem da geoestatística é recorrida em RSSF no contexto de geração do REM em sistemas de Rádio Cognitivo com o acesso dinâmico ao espectro, com o objetivo de avaliar a densidade espectral de potência do sinal de RF.

3 Fundamentação Teórica

Nesse capítulo são apresentadas as formulações matemáticas que fundamentam este trabalho. Inicialmente, são apresentadas as formulações do Método de Gilbert Elliot (Gilbert Elliot Model, GEM), que é baseado em uma cadeia de Markov de dois estados. O foco está na utilização de uma métrica que caracteriza o nível de oscilação do canal, da qual pode-se obter informações interessantes em RSSF, em especial para os enlaces com PSRs próximas de 50%.

Em seguida, será apresentada a modelagem de propagação do meio sem fio, envolvendo o cálculo da potência média e do desvanecimento correlacionado. Por fim, os fundamentos da geoestatística serão abordados, como processos gaussianos espacialmente correlacionados, condições de estacionariedade, métricas para a captura de correlação espacial e técnicas de interpolação para a geração de predições espaciais. Esses assuntos serão essenciais para a geração dos mapas REM.

3.1 Método Gilbert Elliot

Nessa seção são apresentados os embasamentos teóricos que formulam o GEM, que é baseado em uma cadeia de Markov de dois estados. Este método contribui na estimação da qualidade do enlace de RF pela PSR, e se baseia na transmissão de pacotes de dados via comunicação sem fio. Neste caso, considere as seguintes situações: se o pacote transmitido for recebido corretamente, então o sistema se encontra no estado "Bom". Caso contrário, o sistema irá para o estado "Ruim". Neste trabalho, o maior interesse na utilização do GEM está na avaliação de uma métrica que caracteriza a oscilação do enlace em função da recepção de pacotes. Serão avaliadas as oscilações entre pacotes recebidos corretamente e pacotes perdidos ao longo de um conjunto de transmissões, visando diferenciar os possíveis problemas que estão contribuindo para que a PSR seja baixa (por volta de 50%). Mais detalhes a respeito do funcionamento deste modelo serão apresentados a seguir, iniciando com uma revisão a respeito do funcionamento da cadeia de Markov de dois estados.

3.1.1 Cadeia de Markov discreta de dois estados

Seja X um processo aleatório e X_n suas devidas representações ao longo do tempo discreto, com n = 1, 2, 3, ... e P_r as probabilidades de transição de estado. Este

processo será caracterizado como de Markov se [62]:

$$P_r(X_{n+1} = i/X_n = i_n, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) = P_r(X_{n+1} = j/X_n = i_n).$$
(3.1)

Neste caso, é possível observar que a probabilidade de o sistema ir para um estado, no futuro, depende apenas do que aconteceu no presente, e não do passado. Com isso, considere a cadeia de Markov apresentada pela Figura 3.1, em que 1 e 2 são os estados e P_{ij} representa a probabilidade de transição de estado, com i, j podendo assumir quaisquer pares de estados. Assim, as quatro possibilidades existentes são as seguintes:

- P_{11} Probabilidade retornar ao estado 1 dado que estava no estado 1;
- P_{12} Probabilidade de sair do estado 1 e ir para o estado 2;
- P_{22} Probabilidade retornar ao estado 2 dado que estava no estado 2;
- P_{21} Probabilidade de sair do estado 2 e ir para o estado 1;



Figura 3.1 – Cadeia de Markov de 2 estados geral.

Algumas propriedades devem ser citadas no que diz respeito às probabilidades de transição [62]:

- Propriedade 1 o somatório das probabilidades de transição que saem de um estado j, levando em consideração o número i de estados da cadeia de Markov, deve ser igual a 1. Matematicamente, $\sum_{j=1}^{N} P_{ij} = 1$
- Propriedade 2 para todos os estados, as probabilidades de transição não podem assumir valores negativos, portanto $P_{ij} \ge 0$ para quaisquer pares i, j

Com a obtenção das probabilidades de transição de estados, é possível obter as probabilidades estacionárias dos estados $i \in j$, pois são métricas que serão inseridas no contexto de comunicação sem fio nas próximas seções desse trabalho. A probabilidade estacionária é definida como a probabilidade do sistema estar em um determinado estado após ter passado um longo intervalo de tempo. A seguir, serão apresentadas as metodologias necessárias para se obtê-las. Para tanto, considere a cadeia de Markov da Figura 3.2.



Figura 3.2 – Cadeia de Markov de 2 estados.

Neste caso, existem apenas dois estados possíveis (1 e 2) e duas probabilidades de transição para cada estado. Ao aplicar as propriedades 1 e 2, é possível observar que as probabilidades de transição, levando em consideração qualquer um dos estados, são complementares. Por exemplo, se $P_{12} = a$, então $P_{11} = 1 - a$. Da mesma maneira, se $P_{21} = b$, então $P_{22} = 1 - b$. Isso permite modelar a cadeia de Markov por meio de sua matriz de transição, P, dada por:

$$P = \begin{bmatrix} 1-a & a \\ b & 1-b \end{bmatrix}$$
(3.2)

Para o cálculo das probabilidades estacionárias, é necessário definir uma variável que caracterize a mudança de estados da cadeia de Markov. Portanto, seja n o número de transições realizadas no sistema, ou seja, o número de vezes que ocorreu transição de estado. Supondo n = 2, por exemplo, pode-se escrever a nova matriz de transição de estados em função de P, por meio de:

$$P^{(2)} = P.P = \begin{bmatrix} 1-a & a \\ b & 1-b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1-a & a \\ b & 1-b \end{bmatrix}$$
(3.3)

será:

em que $P^{(2)}$ é a matriz de transição que representa o sistema para n = 2. Genericamente, a matriz de transição para um estado qualquer do sistema, representado por n, é descrita por:

$$P^{(n)} = P \times P \times \dots \times P = \begin{bmatrix} 1-a & a \\ b & 1-b \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1-a & a \\ b & 1-b \end{bmatrix} \times \dots \times \begin{bmatrix} 1-a & a \\ b & 1-b \end{bmatrix}$$
(3.4)

Fazendo $n \to \infty,$ é possível mostrar que a matriz de transição para n transições

$$\lim_{n \to \infty} = \begin{bmatrix} P_{11}^{(n)} & P_{12}^{(n)} \\ P_{21}^{(n)} & P_{22}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{b}{a+b} & \frac{a}{a+b} \\ \frac{b}{a+b} & \frac{a}{a+b} \end{bmatrix}$$
(3.5)

As probabilidades $P_{ij}^{(n)}$ representam as probabilidades de partir do estado ie chegar ao estado j, após n transições. Por meio da equação 3.5, é possível observar que $P_{11}^{(n)} = P_{21}^{(n)}$ e $P_{12}^{(n)} = P_{22}^{(n)}$. Isso mostra que existe uma independência do estado de partida i, considerando um mesmo j como estado atual. Assim, a probabilidade da cadeia de Markov, após um número elevado de transições, estacionar no estado j, pode ser definida genericamente por

$$\lim_{n \to \infty} P_{ij}^{(n)} = \pi_j. \tag{3.6}$$

Então, considerando as Figuras 3.1 e 3.2, a probabilidade do sistema "estacionar" no estado 1 é $\pi_1 = \frac{b}{a+b}$. Da mesma maneira, considerando o estado 2, $\pi_2 = \frac{a}{a+b}$.

3.1.2 Características do GEM

Como mencionado na Subseção 3.1.1, a cadeia de Markov de dois estados possui duas probabilidades estacionárias, denominadas como π_i .



Figura 3.3 – Modelo de Gilbert Elliot.

Na Figura 3.3 é apresentado o GEM, em que as probabilidades de transição de estado são $p \in r$. [63][54]. A primeira representa a probabilidade do sistema atual ir para o estado "Ruim" dado que estava no estado "Bom". Analogamente, r é a probabilidade do sistema ir para o estado "Bom" dado que estava no estado "Ruim". Na modelagem de um sistema de comunicação, é possível obter as probabilidades estacionárias $\pi_B \in \pi_R$. Para tanto, deve-se considerar uma sequência de pacotes transmitidos em sequência, de acordo com a Figura 3.4 [64][65][54].



Figura 3.4 – Exemplo de transmissão sequencial de pacotes.

Considerando uma comunicação ponto a ponto entre ERB e NS e assumindo que esses dispositivos são capazes de transmitir e receber informações, todo pacote transmitido pela ERB deve ser recebido corretamente pela mesma. Esse processo pode ser modelado pelo GEM da seguinte maneira: se o pacote transmitido for recebido corretamente, então a cadeia de markov está no estado "Bom". Caso haja perda de pacote, então a cadeia de Markov está no estado "Ruim". Nesse sentido, a sequência de pacotes transmitidos pode ser representada por uma sequência de bits, em que o bit 0 significa que o pacote foi perdido e o bit 1 simboliza um pacote recebido corretamente. Após a finalização da transmissão sequencial de pacotes, é possível contabilizar quais deles foram recebidos corretamente. A matriz de transição de estados da cadeia de Markov, escrita em função das probabilidades $p \in r$, é dada por:

$$M = \begin{bmatrix} 1-p & p \\ r & 1-r \end{bmatrix}$$
(3.7)

e as probabilidades estacionárias π_B e π_R são

$$\pi_B = \frac{r}{p+r} \tag{3.8}$$

е

$$\pi_R = \frac{p}{p+r}.\tag{3.9}$$

Além das equações (3.8) e (3.9), é possível computar a métrica μ , que caracteriza a oscilação do enlace em termos da PSR

$$\mu = 1 - p - r, \qquad -1 \le \mu \le 1. \tag{3.10}$$

A métrica μ é capaz de mensurar o nível de oscilação do canal. De acordo com (3.10), quanto maiores forem os valores de $p \in r$, menor é o valor de μ . Logo, quanto mais próxima de -1 a métrica μ se encontrar, maior é o número de transições de estados do enlace de RF, apresentando características de oscilação. De maneira oposta, se μ se aproximar de 1, o sistema deve apresentar rajadas de 1's ou 0's e, portanto, duas situações são possíveis: rajadas de 1's significam que o sistema está em operação com estabilidade, sem oscilações e; rajadas de 0's caracterizam um sistema com vários pacotes perdidos em sequência. Nesse sentido, a métrica μ é complementar às probabilidades estacionárias para estimar a qualidade do enlace, pois existem situações em que apenas a taxa de sucesso de pacotes não é suficiente para descrever o comportamento do canal [63]. Sendo assim, a métrica μ contribui para verificar possíveis oscilações entre pacotes recebidos corretamente e pacotes perdidos ¹.

3.1.3 Exemplo de implementação do GEM

Nessa Subseção é apresentado um exemplo de aplicação do GEM. Para tanto, considere que a ERB transmitiu vinte pacotes em três situações distintas, e os resultados foram de acordo com as sequências apresentadas na Figura 3.5.

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Sequência 1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	Sequência 2
0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	Sequência 3

Figura 3.5 – Exemplos de sequências de transmissão.

A sequência 1 representa uma situação ideal, em que todos os pacotes solicitados pela ERB foram recebidos corretamente pela mesma. Já no enlace da sequência 2, apenas dois pacotes não foram recebidos corretamente e; na sequência 3 observa-se que o enlace de RF está oscilando, ou seja, hora o pacote é recebido corretamente, hora é perdido. As probabilidades de transição que, compõem as matrizes M_1 , M_2 e M_3 das

 $^{^1~}$ Por curiosidade, o GEM é bastante utilizado na tecnologia Wi-Fi [63].

sequências 1, 2 e 3, foram calculadas da seguinte maneira: (*i*) utiliza-se uma janela deslizante capturando dois bits vizinhos; (*ii*) é contabilizado o número de vezes que ocorrem as sequências 10 e 01; (*iii*) p é obtido pela razão entre o número de ocorrências da sequência 10 e a quantidade total de vezes em que o primeiro bit é 1 e; (*iv*) r é obtido pela razão entre o número de ocorrências da sequência 01 e a quantidade total de vezes em que o primeiro bit é 0. Considerando as Sequências 1, 2 e 3, é possível calcular as matrizes de transição de estado, M_1 , M_2 e M_3 :

$$M_1 = \left[\begin{array}{cc} 1 & 0\\ 0 & 1 \end{array} \right] \tag{3.11}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 0,941 & 0,059\\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$
(3.12)

$$M_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1\\ 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

Dessa maneira, se pode calcular as probabilidades estacionárias e o μ por meio das equações (3.8), (3.9) e (3.10). Na Tabela 3.1 são apresentados os resultados.

Tabela 3.1 – Resultados do GEM.

	р	r	π_B	π_R	μ
Sequência 1	$_{0,0}$	0,0	$1,\!0$	$0,\!0$	$1,\!0$
Sequência 2	0,059	1	0,944	0,056	-0,059
Sequência 3	1,0	1,0	$0,\!5$	$0,\!5$	-1,0

No enlace de RF representado pela Sequência 1, se observa que as probabilidades de transição $p \in r$ são nulas e a probabilidade do sistema estabilizar no estado "Bom"é de 100%, considerando que o sistema iniciou no estado "Bom". Isso significa que todos os pacotes solicitados pela ERB foram recebidos corretamente e, portanto, não houveram transições de estado na cadeia de Markov. Além disso, é importante destacar que a métrica μ resultou em 1, indicando que o enlace de RF pode ser caracterizado como não oscilante. Já no enlace de RF representado pela Sequência 2, se observa que existem transições de estado de acordo com os valores de $p \in r$. O valor de p foi baixo porque as transições do estado "Ruim", considerando que a cadeia estava no estado "Bom", ocorreram apenas duas vezes ao longo das transmissões. Analogamente, o valor de r foi elevado pelo fato de que, em 100% dos casos, a cadeia de Markov foi para o estado "Bom", dado que estava no estado "Ruim". Observou-se, também, que π_B foi muito superior à π_R , uma vez que, na maior parte do processo, a cadeia de Markov ficou no estado "Bom". Com relação a μ , ficou claro que essa métrica detectou as ocilações que ocorreram durante o processo. Entretanto, $\mu = -0,0588$ não é um valor suficientemente elevado para caracterizar o enlace como oscilante, já que está mais próximo de zero do que de -1. Por fim, a Sequência 3 representou um enlace oscilante, em que a cadeia de Markov ficou alternando de estado durante todo o processo. Por esse motivo, p = r = 1 e $\mu = -1$. Nesse caso, as probabilidades estacionárias foram iguais, já que o sistema mudou de estado a cada transmissão de pacote.

Como já mencionado, neste trabalho há interesse em investigar a métrica μ nas situações em que a PSR do enlace está por volta de 50%, vislumbrando destacar as diferenças entre enlaces com PSRs parecidas, porém com métricas μ distintas. No Capítulo 4 será apresentada uma simulação para destacar essas características e no Capítulo 5 o GEM será implementado em uma ferramenta de gerência para oferecer informações úteis aos operadores da rede.

3.2 Modelagem do canal de propagação

Nessa seção é apresentado o modelo do canal de propagação rádio utilizado neste trabalho, bem como suas especificações. Tal modelo é essencial para a abordagem do ambiente rádio e geração dos mapas REM, que serão discutidos em seções posteriores. Um dos modelos de propagação mais difundidos na literatura, utilizado para calcular a potência recebida em um receptor de RF, leva em consideração a perda de percurso determinística e o desvanecimento de longo prazo ou de larga escala (*Shadowing*), em que a potência média pode ser computada pelos modelos de Friis e de Lee (Log-distância). O modelo de Friis é válido para a condição de visada direta (Line Of Sight, LOS), levando em consideração a frequência de operação, a distância entre transmissor e receptor, a potência de transmissão e o ganho das antenas de transmissão e recepção. Sendo assim, a potência média de recepção, em condições LOS e dada em dBm, pode ser calculada por

$$\overline{P}_{rx}(d) = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L, \qquad (3.14)$$

em que P_{Tx} é a potência do transmissor, G_{Tx} e G_{Rx} são os ganhos das antenas de transmissão e de recepção, e L é a atenuação, dada por [22]

$$L = 20\log(f) + 20\log(d) + 32,44, \tag{3.15}$$

em que f é a frequência em MHz e d é a distância entre transmissor e receptor, em Km. Note-se que esse modelo assume que a potência média de recepção cai com o quadrado da distância.

Um modelo de potência média de recepção alternativo àquele apresentado acima descreve a potência de recepção em função da potência medida em uma distância de referência e considera que a potência de recepção cai com expoente arbitrário β da distância, isto é [22]

$$\overline{P}_{rx}(d) = \overline{P}_{rx}(d_0) - 10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right), \qquad (3.16)$$

em que d_0 é uma distância de referência, $\overline{P}_{rx}(d_0)$ é a potência média de recepção observada à distância d_0 , e β é o chamado expoente de perda de percurso. Note que o termo $\overline{P}_{rx}(d_0)$ engloba fatores como ganhos das antenas, potência de transmissão e outros.

Na Tabela 3.2 são apresentados exemplos de ambientes e seus respectivos valores de β [66]. Observa-se que a degradação média do sinal de RF varia de acordo com o tipo de ambiente, em função do coeficiente de perda de percurso.

Ambiente de propagação	β
Espaço livre	2
Ambiente urbano	2,7-3,5
Ambiente urbano sombreado	3 - 5
Linha de visada em edifícios	1,6-1,8
Obstrução em edifícios	4 - 6
Obstrução em fábricas	2 - 3

Tabela 3.2 – Perda de percurso determinística para diferentes ambientes.

Sabe-se que os modelos 3.14 e 3.16 fornecem a potência determinística, isto é, sem os efeitos de desvanecimento. Também é possível notar que a potência média de recepção, em dB, sofre atenuações de acordo com o logaritmo da distância, apresentando o mesmo comportamento em todas as direções.

Além da perda de percurso, o sinal transmitido sofre o desvanecimento de longo prazo, causado pelo sombreamento devido obstruções provocadas por grandes objetos, como já discutido no Capítulo 1. Os efeitos desse desvanecimento podem ser modelados por meio de uma variável aleatória gaussiana de média nula e somado à potência média, esta expressada em dBm. Assim, a potência recebida, considerando-se o desvanecimento de longo prazo, é dada por [22]

$$P_{rx}(d) = \overline{P}_{rx}(d_0) - 10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}, \qquad (3.17)$$

em que X_{σ} é uma VA de distribuição gaussiana de média nula e variância σ_{dB}^2 .

Como mencionado acima, o desvanecimento de larga escala é provocado por obstruções causadas por grandes objetos, como prédios, veículos, árvores, etc. Assim, dois pontos de recepção próximos entre si tendem a apresentar a mesma intensidade do desvanecimento, ou seja, o desvanecimento de larga escala é tipicamente correlacionado espacialmente. Nesse sentido, define-se a distância de descorrelação, denotada por d_{des} , a partir da qual dois pontos de recepção observam níveis de desvanecimento praticamente descorrelacionados. Vários modelos podem ser utilizados para a geração do desvanecimento em larga escala com correlação. Dentre eles, pode-se citar métodos baseados em filtragem regressiva de primeira ordem, decomposição de *Cholesky*, soma de senóides, transformações de Fourier e o Modelo *Shadow-Fading* com Correlação [56]. O método adotado nas simulações deste trabalho foi o Modelo *Shadow-Fading* com Correlação (MSFC), devido a sua larga utilização no contexto de redes celulares na década de 90, além de exigir baixo custo computacional. O MSFC será apresentado na Subseção 3.5.2.

3.3 Probabilidade de Sucesso de Recepção

A PSR pode ser obtida a partir da potência de recepção. Para um pacote de L bits e assumindo que (i) a recepção correta de um pacote ocorrerá apenas se todos os bits forem recebidos corretamente e (ii) os erros de bits são independentes entre si, então a probabilidade de sucesso instantânea de recepção de pacote P_{suc} pode ser calculada por

$$P_{suc} = (1 - P_b)^L, (3.18)$$

em que P_b a probabilidade de erro de bit. Essa probabilidade P_b dependerá da modulação empregada na transmissão e da qualidade do sinal recebido. Em um caso mais geral de comunicação sem fio, a qualidade do sinal recebido pode ser degradada pelo ruído térmico Aditivo, Branco e Gaussiano (Additive White Gaussian Noise, AWGN) e por sinais interferentes. Neste trabalho, foi assumido que as transmissões não sofrem interferência, de forma que a única fonte de degradação é o ruído térmico AWGN. Considerando o uso de modulação 2-FSK pelos módulos transmissores e receptores da RSSF, a probabilidade de erro de bit P_b para a recepção não coerente é dada por [16]

$$P_b = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right),\tag{3.19}$$

em que E_b/N_0 é a relação entre a energia do bit e a densidade espectral de potência do ruído térmico, obtida a partir de

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_{rx}}{Z} \frac{B_w}{R_b},\tag{3.20}$$

em que B_w é a largura de banda em Hz, R_b é a taxa de transmissão de bits, e Z é a potência do ruído. A potência ruído pode ser estimada por [52]

$$Z = kTB_w, (3.21)$$

em que k é a constante de Boltzmann² e T é a temperatura em Kelvin do sistema. Com essas equações e com as condições de contorno aqui apresentadas, estima-se a PSR do enlace de RF.

² A constante de Boltzmann vale 1, 380650 × 10⁻²³ $m^2 kg s^{-2} K$.

3.4 Fundamentos da Geoestatística

Nessa seção é apresentado o embasamento teórico fundamentado na geoestatística. São abordados os seguintes assuntos:

- Processos Estocásticos Espaciais É a base da modelagem geoestatística para definir as condições de contorno do ambiente rádio que será abordado;
- Semivariograma e Covariograma São as ferramentas da geoestatística (funções e partes experimentais) necessárias para realizar a captura de correlação espacial entre as variáveis que compõem o processo aleatório;
- Variável Regionalizada Trata-se da nomenclatura utilizada na geoestatística referente à realização de um processo aleatório espacial. Essas variáveis são definidas por suas coordenadas espaciais, e compõem o processo estocástico espacialmente correlacionado.
- Krigagem Ordinária É um método de predição espacial, cujo objetivo é prever os valores de uma determinada grandeza em locais onde não foram realizadas amostragens. Neste trabalho, a Krigagem Ordinária será utilizada para prever a potência de recepção em terminais de RSSF.

Todos os conceitos aqui apresentados serão essenciais para a geração dos mapas de ambiente rádio, apresentados nas próximas seções.

3.4.1 Processos Estocásticos Espaciais

Um processo estocástico espacial pode ser definido como um conjunto de variáveis aleatórias amostradas em uma determinada região espacial de domínio D, onde torna-se possível a captura de correlação espacial entre as VAs. No campo da geoestatística, várias modelagens matemáticas podem ser utilizadas para descrever os processos estocásticos em função de suas coordenadas espaciais $\boldsymbol{s} = (\boldsymbol{s}_x, \boldsymbol{s}_y)$. Dentre elas, a que possui uma relação direta com o modelo de propagação de RF que será utilizado neste trabalho é descrita por meio de um valor médio somado a uma perturbação aleatória. Essa é uma das modelagens mais difundidas no campo da geoestatística, podendo ser descrita como

$$P(\boldsymbol{s}) = \mu(\boldsymbol{s}) + \eta(\boldsymbol{s}), \boldsymbol{s} \in D, \qquad (3.22)$$

em que $P(\mathbf{s})$ é o processo estocástico espacial, $\mu(\mathbf{s})$ representa o valor médio e $\eta(\mathbf{s})$ é a perturbação aleatória do processo $P(\mathbf{s})$. A equação (3.22) é definida em todo o domínio espacial D com duas dimensões, existindo infinitos pontos $P(\mathbf{s}_i)$ que o compõem. Dessa

maneira, a distribuição de probabilidade que modela $P(\mathbf{s})$, em função das infinitas VAs denotadas como $P(\mathbf{s}_i)$, pode ser obtida pela expressão

$$F_p = Prob\{P(s_1) < p(s_1), P(s_2) < p(s_2), \dots, P(s_i) < p(s_i)\},$$
(3.23)

em que $s_1, s_2, s_3, ..., s_i$ são as coordenadas espaciais.

O processo estocástico abordado nos estudos presentes neste trabalho será gerado a partir da distribuição de probabilidade gaussiana multivariada [67]. Isso significa que cada VA, computada em uma região espacial do domínio D, será gerada a partir da distribuição log-normal, que é associada à distribuição normal, porém com níveis de grandeza medidos em escala decibel (dB) [68][69]. Os processos gaussianos são apresentados de acordo com sua média $\mu(s)$ e covariância $C(s_i, s_j)$. Note-se que $\mu(s) = \mathbb{E}\{P(s)\}$, em que $\mathbb{E}\{.\}$ é o operador esperança e, para cada coordenada espacial s_i , $\mu(s_i) = \mathbb{E}\{P(s_i)\}$. Neste caso, se o processo gaussiano P(s) possuir valores de $\mu(s)$ distintos para as coordenadas espaciais s_i das VAs, então é dito que P(s) apresenta um comportamento tendencioso no domínio D. Portanto, nessas situações, P(s) apresenta uma característica denominada como tendência espacial. Posteriormente, será apresentado uma modelagem matemática para eliminar a tendência espacial, pois esta pode produzir um *REM* com estimativas enviesadas (ou tendenciosas) [56].

Além de $\mu(\mathbf{s})$, outro parâmetro relevante no estudo de processos estocásticos espaciais é a variância σ^2 . Trata-se de um parâmetro de dispersão do processo $P(\mathbf{s})$, quantificando sua variabilidade. Cada $P(\mathbf{s}_i)$, associado à coordenada \mathbf{s}_i , apresenta uma variância σ_i^2 e, portanto, $\sigma^2(\mathbf{s}_i) = Var\{P(\mathbf{s}_i)\}$. Para as simulações que serão apresentadas neste trabalho, são supostas algumas condições estatísticas de contorno como assumir que a variância de $P(\mathbf{s})$ é constante. Nesse momento, é necessário argumentar sobre algumas propriedades de estacionariedade envolvidas na teoria de processos estocásticos [70][71]:

- Estacionariedade em Sentido Restrito Essa condição impõe que um processo estocástico espacial é estritamente estacionário se suas VAs puderem ser caracterizadas pela mesma função de distribuição de probabilidade conjunta, F_p . Nessas condições, isso deverá ocorrer para todo o domínio espacial D, independentemente de possíveis translações vetoriais causadas pelo vetor de separação \mathbf{h} , em que $|\mathbf{h}| = |\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j|$;
- Estacionariedade de Segunda Ordem Para que um processo estocástico espacial possa ser considerado estacionário de segunda ordem, é necessário que: (i) o primeiro momento deverá existir e ser constante, portanto μ(s) = E{P(s)} = μ e; (ii) a covariância espacial entre duas VAs, denotada por C(s_i, s_j), não deverá sofrer alterações com as possíveis translações espaciais, dependendo somente do vetor de separação espacial h. Em outras palavras, pode-se afirmar que C(s_i, s_i+h) = C(h);

 Estacionariedade intrínseca – O processo será intrinsecamente estacionário se as diferenças P(s_i + h) – P(s_i) satisfizerem a propriedade de estacionariedade de segunda ordem, para todo o domínio D. Essas condições devem ser obedecidas para qualquer distância de separação h.

Considerando a condição de estacionariedade de Segunda Ordem, propriedades importantes para a função de covariância merecem ser destacadas, pois serão úteis para a geração dos mapas REM [72]:

- $C(P(s_i), P(s_i+0)) = Var\{P(s)\} = C(0);$
- $C(0) \ge |C(\mathbf{h})|;$
- $C(h) = C(P(s_i), P(s_i + h)) = C(P(0), P(h)).$

A utilização das condições de estacionariedade deve ser feita principalmente por três razões: (i) existência da tendência espacial, nas situações em que a média do processo espacial pode assumir diferentes valores ao longo do domínio D; (ii) a variância do processo pode não ser constante e; (iii) presença de correlação espacial estruturada, que é fundamental na geração dos mapas REM [56]. Na geração dos mapas REM que serão apresentados neste trabalho, foram assumidas as seguintes condições de contorno: (i) a tendência espacial existe e precisa ser corrigida para que as estimativas produzidas utilizando técnicas geoestatística não sejam envisadas; (ii) o processo estocástico espacial que modela o ambiente rádio apresenta variância constante ao longo do domínio espacial D e; (iii) removendo a tendência espacial e considerando (ii), é possível capturar a variabilidade espacial por meio das funções semivariograma e covariograma, que serão apresentadas na sequência.

3.4.2 Semivariograma e Covariograma

As funções semivariograma (semivariância espacial) e covariograma (covariância espacial) são essenciais para a modelagem do ambiente rádio adotada neste trabalho. Tais funções são utilizadas para a captura de correlação espacial entre pares de VAs distanciadas pelo vetor de separação **h**. O semivariograma mensura a dissimilitude entre pares de VAs separadas de $|\mathbf{h}|$ metros, em que $|\mathbf{h}|$ depende das coordenadas espaciais s_i, s_j . Por outro lado, o covariograma mensura a similitude entre pares de VAs separadas de $|\mathbf{h}|$ metros. Formalmente, a função covariograma é definida por [73][74][70]

$$C(\boldsymbol{s}_i, \boldsymbol{s}_j) = Cov(P(\boldsymbol{s}_i, P(\boldsymbol{s}_j))) = \mathbb{E}\{(P(\boldsymbol{s}_i) - \mu(\boldsymbol{s}_j))(P(\boldsymbol{s}_j) - \mu(\boldsymbol{s}_j))\}.$$
(3.24)

Considerando as pressuposições de estacionariedade de segunda ordem, a equação (3.24) pode ser simplificada de acordo com

$$C(\mathbf{s}_i, \mathbf{s}_i + \mathbf{h}) = \mathbb{E}\{(P(\mathbf{s}_i) - \mu)(P(\mathbf{s}_i + \mathbf{h}) - \mu\} = C(\mathbf{h}).$$
(3.25)

Nessas condições, observa-se que $C(\mathbf{h})$ depende somente da distância de separação $|\mathbf{h}|$ e, na medida que essa distância aumenta $(|\mathbf{h}| \to \infty)$, o covariograma diminui $(C(\mathbf{h}) \to 0)$. Além das suposições de estacionariedade de segunda ordem, é importante ressaltar a propriedade de isotropia. Trata-se de uma propriedade que é satisfeita se a correlação espacial independer da direção, ou seja, do ângulo θ de separação entre as VAs avaliadas [75][76].

Na mesma linha de raciocínio, porém analisando a variância entre pares de VAs, define-se formalmente o semivariograma por

$$\gamma(\boldsymbol{s}_i, \boldsymbol{s}_j) = \frac{1}{2} \mathbb{E}\{ [P(\boldsymbol{s}_i) - P(\boldsymbol{s}_j) - \mathbb{E}\{P(\boldsymbol{s}_i) - P(\boldsymbol{s}_j)\}]^2 \}.$$
 (3.26)

Novamente, aplicando as condições de estacionariedade de segunda ordem, a equação (3.26) pode ser desenvolvida da seguinte forma:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} Var\{P(\mathbf{s}_i + \mathbf{h}) - P(\mathbf{s}_j)\}$$

= $\frac{1}{2} \mathbb{E}\{[P(\mathbf{s}_i) - P(\mathbf{s}_j) - \mathbb{E}\{P(\mathbf{s}_i) - P(\mathbf{s}_j)\}]^2\}$ (3.27)
= $\frac{1}{2} \mathbb{E}\{[P(\mathbf{s}_i + \mathbf{h}) - P(\mathbf{s}_i)]^2\}.$

Encontra-se na literatura a nomenclatura de $\gamma(\mathbf{h})$ como semivariograma e $2\gamma(\mathbf{h})$ como variograma, em que o variograma se resume ao dobro do semivariograma. Mesmo assim, ambas funções apresentam o objetivo de mensurar a variância, transmitindo o mesmo raciocínio de dissimilitude ou dispersão. A partir das equações (3.25) e (3.27) referentes ao covariograma e semivariograma e, assumindo as pressuposições de estacionariedade do processo estocástico espacial, é possível encontrar uma relação entre elas. Dessa vez, usando o variograma, desenvolve-se a equação (3.27) por meio de:

$$2\gamma(\mathbf{h}) = \mathbb{E}\{[P(\mathbf{s}_{i} + \mathbf{h}) - P(\mathbf{s}_{i})]^{2}\}$$

= $\mathbb{E}\{P^{2}(\mathbf{s}_{i})\} + \mathbb{E}\{P^{2}(\mathbf{s}_{i} + \mathbf{h})\} - 2\mathbb{E}\{P(\mathbf{s}_{i})\}\mathbb{E}\{P(\mathbf{s}_{i} + \mathbf{h})\}$
= $Var\{P(\mathbf{s}_{i})\} + Var\{P(\mathbf{s}_{i} + \mathbf{h})\} - 2Cov\{P(\mathbf{s}_{i}), P(\mathbf{s}_{i} + \mathbf{h})\}.$ (3.28)

Assumindo que as variáveis pertencem ao mesmo domínio espacial, ou seja, $Var\{P(\mathbf{s}_i)\} = Var\{P(\mathbf{s}_i + \mathbf{h})\}$, e que $Cov\{P(\mathbf{s}_i, P(\mathbf{s}_i + \mathbf{h}))\} = C(\mathbf{h})$, é possível reescrever (3.28), relacionando diretamente as funções $C(\mathbf{h})$ e $\gamma(\mathbf{h})$ [74]

em que S é denominado como variância Sill, que representa o máximo valor das funções semivariograma e covariograma. Além de S, existem mais dois parâmetros relevantes para as funções semivariograma e covariograma. O primeiro deles é o Efeito Pepita ou variância *nugget* (c_0), cuja tarefa é indicar um efeito de descontinuidade nos pontos de origem dessas funções. O segundo parâmetro é o *range* (r), que possui relação direta com o crescimento de $\gamma(\mathbf{h})$ e decrescimento de $C(\mathbf{h})$. Na Figura 3.6 é apresentado um exemplo de semivariograma e covariograma para S = 25, r = 4 metros e $c_0 = 5$. Com relação ao semivariograma, nota-se que os valores aumentam a medida que $|\mathbf{h}| \rightarrow \infty$. Isso ocorre porque a dissimilitude entre pares de variáveis que compõem o processo aleatório espacial está aumentando com o crescimento da distância $|\mathbf{h}|$. Sendo assim, valores elevados do semivariograma implicam em baixa correlação espacial. Por outro lado, o covariograma se inicia na variância Sill, que se trata da maior correlação espacial presente no processo. Observa-se que, ao atingir $|\mathbf{h}| = r = 4$, a função covariograma tende a zero, indicando a ausência de correlação espacial nessas distâncias.



Figura 3.6 – Exemplo de Semivariograma e Covariograma.

Na geoestatística, técnicas de estimação das funções semivariograma e covariograma são empregadas para se obter tais funções experimentalmente. O semivariograma e covariograma experimentais são respectivamente denominados como $\hat{\gamma}(\mathbf{h})$ e $\hat{C}(\mathbf{h})$, e consistem em estimativas empíricas de $\gamma(\mathbf{h})$ e $C(\mathbf{h})$ necessárias para a geração dos mapas REM. A estimação dessas funções experimentais é baseada em dois conceitos: (*i*) na interpretação geométrica de um gráfico de dispersão e; (*ii*) na utilização do método dos momentos de *Matheron* (MoM), utilizando parte da teoria do momento de inércia [56][77]. Neste momento, será abordada a dedução da equação do semivariograma experimental e, utilizando a equação (3.29), será obtida a expressão do covariograma. Mediante os conceitos (i) e (ii), a interpretação física do semivariograma pode ser inicialmente idealizada de acordo com uma ferramenta da estatística clássica bivariada denominada *Scatter Plot*. Essa ferramenta consiste em comparar realizações de VAs, medindo o grau de dispersão entre elas. Na Figura 3.7 são apresentadas duas situações de *Scatter Plot*, tomando como exemplo a correlação entre as variáveis $V \in R$. Nota-se que em 3.7a os pontos foram refletidos exatamente na reta R = V, apresentando dispersão zero e coeficiente de correlação máximo. Neste caso, como os pontos não estão dispersos em relação à reta de correlação perfeita, é dito que o momento de inércia da nuvem de pontos é igual a zero. Por outro lado, em 3.7b, observa-se que as variáveis $V \in R$ são correlacionadas, porém com dispersão diferente de zero. Isso significa que cada ponto representa uma variabilidade, ou um "braço de alavanca"ao comparar com a reta R = V. Esse "braço de alavanca", gerado por cada ponto, contribuirá para o aumento do momento de inércia da nuvem de pontos em relação à correlação perfeita.



Figura 3.7 - Scatter Plot das variáveis V e R.

Com isso, é possível aplicar os conceitos da ferramenta *Scatter Plot* para analisar os problemas em domínio espacial. Dessa vez, não será analisada a dispersão entre duas variáveis distintas, tal como foi apresentado na figura 3.7. Agora deve-se investigar a relação entre uma variável específica, como por exemplo $P(\mathbf{s}_i)$, e ela mesma separada por uma distância $|\mathbf{h}|$. Na Figura 3.8 foi ilustrado o cenário em questão, mostrando a dispersão de $P(\mathbf{s}_i)$ diante de uma separação espacial $|\mathbf{h}|$. Um ponto de referência, cujas coordenadas são $P(\mathbf{s}_i + \mathbf{h}) \in P(\mathbf{s}_i)$, foi inserido no gráfico para exemplificar a interpretação geométrica do problema. Então, é feita a projeção ortogonal do ponto de referência na reta bissetriz, na qual a dispersão pode ser calculada por meio da distância d_q . Por geometria, d_q pode ser obtida por

$$d_q = |P(\boldsymbol{s}_i + \mathbf{h}) - P(\boldsymbol{s}_i)| \cos\left(\frac{\pi}{4}\right), \qquad (3.30)$$

e o momento de inércia relacionado ao ponto de referência da Figura 3.8 é dado pela distância quadrática em relação à reta bissetriz



 $d_q^2 = \frac{1}{2} |P(\mathbf{s}_i + \mathbf{h}) - P(\mathbf{s}_i)|^2.$ (3.31)

Figura 3.8 – Dispersão espacial da variável aleatória $P(s_i)$.

Suponha que existam N_a pontos de dispersão, cuja distância de separação é $|\mathbf{h}|$. Neste caso, pode-se obter a estimativa do semivariograma experimental calculando a média das distâncias quadráticas em relação à reta bissetriz. Por meio do Método dos Momentos de Matheron, obtém-se a equação do semivariograma experimental [78][79]

$$\hat{\gamma}(\boldsymbol{h}) = \frac{1}{2N_a} \sum_{|\boldsymbol{s}_i - \boldsymbol{s}_j| = \mathbf{h}}^{N_a} \left[P(\boldsymbol{s}_i) - P(\boldsymbol{s}_j) \right]^2, \forall \boldsymbol{s}_i, \boldsymbol{s}_j \in D, i, j = 1, 2..., N.$$
(3.32)

O semivariograma experimental, do ponto de vista físico, representa o momento de inércia da nuvem de pontos em relação à correlação perfeita. Nesse sentido, nota-se claramente que é uma medida de variabilidade entre pares de realizações distantes de $|\mathbf{h}|$ metros. Quanto maior for a dispersão em relação à reta bissetriz, maior será a dissimilitude e, portanto, menor será a correlação entre os pares de pontos e vice-versa. Também é possível aplicar os mesmos conceitos de *i* e *ii* e, a partir deles, obter a equação do covariograma experimental

$$\hat{C}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N_a} \sum_{|\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j| = h}^{N_a} \left[P(\mathbf{s}_i) - \hat{\mu}(\mathbf{s}_i) \right] \left[P(\mathbf{s}_j) - \hat{\mu}(\mathbf{s}_j) \right], \forall \mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j \in D, i, j = 1, 2..., N, \quad (3.33)$$

em que $\hat{\mu}(\mathbf{s}_i) \in \hat{\mu}(\mathbf{s}_j)$ são as estimativas das médias obtidas nas coordenadas $\mathbf{s}_i \in \mathbf{s}_j$. Nessas condições, é importante ressaltar que o cálculo do covariograma experimental pela equação (3.33) requer o conhecimento dos valores médios $\mu(\mathbf{s}_i) \in \mu(\mathbf{s}_j)$. Observa-se novamente que o covariograma apresenta a ideia oposta do semivariograma, transmitindo a ideia de similitude, conforme já mencionado. A observação das equações (3.32) e (3.33) permite as seguintes conclusões: (1) pode ser feita uma analogia entre as funções variância e covariância da estatística clássica com as funções semivariograma e covariograma experimentais da geoestatística e; (2) o número N de VAs que compõem o processo aleatório espacial $P(\mathbf{s})$, bem como a quantidade de pares de pontos separados espacialmente por $|\mathbf{h}|$, N_a , devem ser suficientemente elevados para que haja confiabilidade estatística nos valores das estimativas experimentais $\hat{\gamma}(\mathbf{h}) \in \hat{C}(\mathbf{h})$, o que é fundamental para minimizar o erro das predições representadas nos mapas REM.

Na prática, para gerar os mapas REM por meio de técnicas de interpolação, é necessário ajustar as funções estimadas de semivariograma e covariograva para suas respectivas curvas analíticas, isto é, modelos contínuos que permitem descrever a característica espacial do problema avaliado. Existem muitos modelos analíticos encontrados na literatura geoestatística. Dentre eles, os principais são o esférico, gaussiano, e o modelo exponencial. As equações referentes aos modelos analíticos de semivariograma são as seguintes [57]:

1. Modelo Esférico:

$$\gamma(|\mathbf{h}|) = \begin{cases} c_0 + (S - c_0)(\frac{3h}{2r} - \frac{1}{2}(\frac{|\mathbf{h}|}{r})^3), & para \ |\mathbf{h}| \ge r\\ c_0, & c.c \end{cases}$$
(3.34)

2. Modelo Gaussiano:

$$\gamma(|\mathbf{h}|) = c_0 + (S - c_0)(1 - e^{\frac{-|\mathbf{h}|^2}{r^2}})$$
(3.35)

3. Modelo Exponencial:

$$\gamma(|\mathbf{h}|) = c_0 + (S - c_0)(1 - e^{\frac{-|\mathbf{h}|}{r}})$$
(3.36)

4. Modelo Gaussiano com coeficientes ajustáveis ($\alpha - stable$):

$$\gamma(|\mathbf{h}|) = c_0 + (S - c_0)(1 - e^{\frac{-|\mathbf{h}|^{\alpha}}{r^{\alpha}}}), \quad 1.0 \le \alpha \le 2.0$$
(3.37)

As equações (3.34)-(3.37) descrevem alguns dos possíveis modelos analíticos utilizados na geoestatística, em função dos parâmetros c_0 (efeito pepita), S (variância Sill) e r (range). Com relação ao modelo 4, se observa que o parâmetro α irá determinar qual é o modelo que será utilizado: (*i*) se $\alpha = 1$, então o modelo é o exponencial; se (*ii*) $1.0 < \alpha < 2.0$, então se trata do modelo gaussiano com os coeficientes ajustáveis e; (*iii*) se $\alpha = 2.0$, se trata do modelo gaussiano. Na Figura 3.9 são mostrados exemplos de semivariogramas e covariogramas do modelo esférico, gaussiano e exponencial para os parâmetros da Tabela 3.3. Os semivariogramas foram obtidos por meio das equações (3.34), (3.35) e (3.36) e, a partir delas, utilizou-se a equação (3.29) para calcular os covariogramas correspondentes.

Tabela 3.3 – Valores dos parâmetros da Figura 3.9.

Parâmetro	Valor
c_0	0
r	4
S	20



Figura 3.9 – Modelos analíticos de semivariograma e covariograma.



Figura 3.10 – Variação do parâmetro α .

Nota-se que os três modelos apresentam comportamentos distintos para a captura da correlação espacial, mas, ao atingir a distância $|\mathbf{h}| = r$, todos atingem a convergência para a variância *Sill* no caso dos semivariogramas, ou para *zero* em termos de covariograma. Na Figura 3.10 é apresentada a comparação para os possíveis valores de α , fazendo $\gamma(|\mathbf{h}|) \in C(|\mathbf{h}|)$ irem desde o modelo exponencial até o gaussiano. O parâmetro α traz flexibilidade para a modelagem da correlação espacial, permitindo um melhor ajuste das funções em questão. Na prática, é observado o comportamento do semivariograma experimental, obtido a partir de um número finito de amostras espaciais, e é ajustado para o modelo paramétrico que o melhor representa analiticamente. Sendo assim, a captura da correlação espacial pode ser utilizada para a aplicação de técnicas de predição, tal como será descrito posteriormente.

3.4.3 Variável Regionalizada

A Variável Regionalizada (VaR) é um termo amplamente utilizado na geoestatística para fazer referência à realização de um processo aleatório espacial. Na Figura 3.11 é apresentado um exemplo no qual é exibido um número finito de pontos que compõe o processo aleatório espacial, em uma região de área $250 \times 250 \ m^2$.



Figura 3.11 – Variável Regionalizada.

Cada ponto destacado em preto consiste em um Valor Regionalizado (VR), com suas localizações geográficas selecionadas manualmente. As grades da área foram destacadas por linhas pretas e, no interior de cada uma delas, foram selecionadas quatro VRs. Utilizando o conceito de processos gaussianos espacialmente correlacionados, cada valor regionalizado foi gerado a partir de um processo gaussiano de média *nula* e variância 25 ($\sigma = 5$). O mesmo processo gaussiano pode ser visualizado em três dimensões por meio da Figura 3.12. Nota-se que a inserção da correlação espacial entre os VRs permite a detecção de agrupamentos (ou aglomerados) nos quais os valores são bastante similares, o que sugere a presença de correlação espacial entre os VRs que compõem o processo estocástico espacial. No ambiente rádio, que é assunto das próximas seções, o desvanecimento a longo prazo poderá apresentar forte correlação espacial, uma vez que é gerado pela obstrução por grandes objetos.



Figura 3.12 – Realização de um processo aleatório espacial.

Neste trabalho, que é focado em redes de sensores, o VR terá um papel fundamental na modelagem dos problemas que envolvem o ambiente rádio. Cada terminal de rede será associado a um VR em uma localização geográfica específica. A rede de sensores, composta por diversos terminais e uma ERB, será modelada como um processo aleatório espacial multivariado.

3.4.4 Krigagem Ordinária

A Krigagem Ordinária (KO) é uma técnica de interpolação (ou predição espacial) para estimar valores de uma grandeza em locais de uma região onde não foram feitas amostragens. Neste trabalho, a KO será utilizada para estimar a potência de recepção nas regiões de interesse para a instalação de nós sensores, estes utilizados em aplicações de IoT. Isso significa que os responsáveis pelo serviço deverão realizar medições em campo para coletar amostras de potência na região de interesse e, a partir delas, poderão estimar a potência por toda região. Dessa maneira, poderão gerar estimativas a respeito da qualidade do serviço prestado. Inicialmente, os conceitos por trás das técnicas de interpolação serão pontuados, uma vez que a interpolação é a base para a utilização da KO. Em seguida, detalhes a respeito da Krigagem Simples (KS) serão apresentados, pois a KO se trata de uma particularidade da KS e finalmente, serão mostrados os conceitos que envolvem a KO.

De maneira genérica, as técnicas de interpolação são utilizadas em diversas áreas da engenharia, com o objetivo de estimar realizações tomando como base as amostras conhecidas. A cada amostra é atribuído um "peso", que está relacionado ao grau de relevância da amostra sobre o ponto a ser estimado, levando em consideração algum critério matemático. Nesse sentido, existem diversos tipos de algoritmos de interpolação por média ponderada (Weighted Average Interpolation Algoritms, WAIA), visando identificar quais "pesos" deverão ser atribuídos a fim de produzir as melhores estimativas. Dentre os algoritmos, pode-se citar o método dos Polígonos, Inverso da Distância (ID), Spline, Krigagem Simples (KS), Krigagem Ordinária (KO), entre outros. Na Figura 3.13 é apresentado o conceito de interpolação. Os pontos $P(s_1), ..., P(s_n)$ representam realizações de um processo aleatório espacial nas coordenadas $s_1, ..., s_n \in \lambda_1, ..., \lambda_n$ são os pesos correspondentes. Deseja-se obter uma estimativa da realização que seria medida em $P(s_z)$ (um ponto qualquer do espaço, na coordenada s_z) considerando os pontos amostrados e seus respectivos pesos. Seja $P(s_i)$ a realização medida na coordenada s_z , pode ser calculada por

$$P(\mathbf{s}_z)^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i P(\mathbf{s}_i), i = 1, ..., n.$$
 (3.38)



Figura 3.13 – Interpolação.

A estimativa $P(\mathbf{s}_z)^*$ depende das realizações e pesos dos pontos amostrados por meio de uma combinação linear. Dessa maneira, os pesos deverão ser escolhidos utilizando algum critério matemático que represente a modelagem do problema a ser resolvido. Uma vez apresentados os conceitos de interpolação, serão introduzidas as formulações para as técnicas KS e KO.

Na geoestatística, as deduções das técnicas KS e KO são apresentadas em função do chamado valor residual de uma VA, que consiste na realização da VA subtraída de sua média. Nas aplicações que serão apresentadas posteriormente, nos Capítulos 4 e 5, o valor residual será representado pelo desvanecimento correlacionado, que se trata da parcela aleatória da potência de recepção. Nas deduções apresentadas a seguir, o valor residual será definido como Y(s), que irá representar a parcela aleatória da realização P(s). Seja ε a magnitude do erro entre o valores real e estimado em um determinado ponto onde deseja-se obter uma estimativa da grandeza avaliada. Sendo assim, a variância do erro de predição é definida por

$$\sigma_{\varepsilon}^{2} = \mathbb{E}\{[Y^{*}(\boldsymbol{s}) - Y(\boldsymbol{s})]^{2}\}$$
$$= \mathbb{E}\{[Y^{*}(\boldsymbol{s})]^{2}\} - 2\mathbb{E}\{Y^{*}(\boldsymbol{s})Y(\boldsymbol{s})\} + \mathbb{E}\{[Y(\boldsymbol{s})]^{2}\}$$
(3.39)

em que $Y^*(\mathbf{s})$ é a estimativa do valor residual relacionado à grandeza de interesse na coordenada $\mathbf{s} \in Y(\mathbf{s})$ é o valor residual real. Neste caso, o valor real não é conhecido e deseja-se obter a estimativa $Y^*(\mathbf{s})$ a partir de informações dos N VRs disponíveis para a realização das análises. Ao assumir estacionariedade de segunda ordem, a equação (3.39) pode ser reescrita como [77]

$$\sigma_{\varepsilon}^{2} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \lambda_{i} \lambda_{j} \mathbb{E}\{Y(\boldsymbol{s}_{i})Y(\boldsymbol{s}_{j})\} - 2\sum_{j=1}^{N} \lambda_{i} \mathbb{E}\{Y(\boldsymbol{s})Y(\boldsymbol{s}_{i})\} + C(0)$$
$$= \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \lambda_{i} \lambda_{j} C(\boldsymbol{s}_{i}, \boldsymbol{s}_{j}) - 2\sum_{j=1}^{N} \lambda_{i} C(\boldsymbol{s}, \boldsymbol{s}_{i}) + C(0)$$
(3.40)

Nota-se que a dependência da magnitude do valor real, $Y(\mathbf{s})$, foi eliminada da equação (3.40) e σ_{ε}^2 ficou em função dos pesos $\lambda_{i,j}$ e das covariâncias espaciais. Neste momento, como o objetivo do problema é encontrar os pesos $\lambda_{i,j}$ para que σ_{ε}^2 seja mínimo, utiliza-se o operador de diferenciação em relação aos pesos $\lambda_{i,j}$ e o resultado é igualado a zero. Aplicando o operador de diferenciação, temos

$$\frac{\partial \sigma_{\varepsilon}^2}{\partial \lambda_i} = 2 \sum_{j=1}^N \lambda_j C(\boldsymbol{s}_i, \boldsymbol{s}_j) - 2C(\boldsymbol{s}, \boldsymbol{s}_i), \qquad (3.41)$$

que igualado a zero resulta em

$$\sum_{j=1}^{N} \lambda_j C(\boldsymbol{s}_i, \boldsymbol{s}_j) = C(\boldsymbol{s}, \boldsymbol{s}_i).$$
(3.42)

O número de equações é igual à quantidade de VRs utilizados na modelagem do problema. Também é possível apresentar a equação (3.42) em sua forma matricial, dada por

$$\begin{bmatrix} C(\boldsymbol{s}_1, \boldsymbol{s}_1) & \dots & C(\boldsymbol{s}_1, \boldsymbol{s}_N) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C(\boldsymbol{s}_N, \boldsymbol{s}_1) & \dots & C(\boldsymbol{s}_N, \boldsymbol{s}_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(\boldsymbol{s}, \boldsymbol{s}_1) \\ \vdots \\ C(\boldsymbol{s}, \boldsymbol{s}_N) \end{bmatrix}$$
(3.43)

A matriz quadrada do sistema (3.43) é denominada \mathbf{C} e representa a matriz de covariâncias entre as amostras, cujos valores são obtidos a partir da aplicação dos modelos ajustados de semivariograma e covariograma. O vetor coluna $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, ..., \lambda_n]^T$ armazena os pesos λ_i . E por fim, o vetor coluna $\boldsymbol{c}_s = [C(\boldsymbol{s}, \boldsymbol{s}_i), ...C(\boldsymbol{s}, \boldsymbol{s}_N))]^T$ armazena as covariâncias espaciais entre as amostras realizadas nas coordenadas $\boldsymbol{s}_1, ..., \boldsymbol{s}_N$ e o ponto onde deseja-se conhecer a estimativa. A solução para o sistema matricial (3.43) se resume ao cálculo da matriz de covariograma inversa, dada por

$$\boldsymbol{\lambda}_{\boldsymbol{s}} = \boldsymbol{C}^{-1} \boldsymbol{c}_{\boldsymbol{s}},\tag{3.44}$$

em que \mathbb{C}^{-1} é a inversa da matriz de covariogramas expressando a correlação espacial entre os VRs. Entretanto, destaca-se uma particularidade da técnica KS: é necessário conhecer a média da realização aleatória e seu respectivo peso, uma vez que a soma dos pesos $\lambda_1, ...\lambda_n$ não resulta em 1 [77]. Após a obtenção dos pesos pela técnica KS, e considerando que $\overline{Y}(s)$ e λ_m são a média da realização aleatória e o peso associado, aplica-se o conceito de interpolação para o cálculo da estimativa

$$Y^{*}(\boldsymbol{s}) = \left[\sum_{i=1}^{N} \lambda_{i} Y(\boldsymbol{s}_{i})\right] + \lambda_{m} \overline{Y}(\boldsymbol{s}).$$
(3.45)

Nas aplicações práticas, em geral, é desejado que a estimativa no local de interesse seja baseada somente nas realizações das N variáveis que compõem o problema, isto é, a soma dos pesos deve ser forçada a 1, desconsiderando $\lambda_m \in \overline{Y}(s)$. Nesse sentido, recorre-se à técnica KO, que é uma extensão da KS. Na técnica KO utiliza-se uma variável artificial, o multiplicador de Lagrange (ν), para forçar o sistema a seguir a condição

$$\sum_{i=1}^{N} \lambda_i = 1. \tag{3.46}$$

Com a inserção do multiplicador de Lagrange para atender a condição imposta pela equação (3.46), é necessário reescrever o sistema matricial (3.43) como

$$\begin{bmatrix} C(\boldsymbol{s}_{1},\boldsymbol{s}_{1}) & \dots & C(\boldsymbol{s}_{1},\boldsymbol{s}_{N}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C(\boldsymbol{s}_{N},\boldsymbol{s}_{1}) & \dots & C(\boldsymbol{s}_{N},\boldsymbol{s}_{N}) & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{1} \\ \vdots \\ \lambda_{N} \\ \nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(\boldsymbol{s},\boldsymbol{s}_{1}) \\ \vdots \\ C(\boldsymbol{s},\boldsymbol{s}_{N}) \\ 1 \end{bmatrix}$$
(3.47)

Por meio de (3.47), a condição de que a soma dos pesos λ_i sempre será satisfeita, eliminando a atribuição de peso para a média das realizações.

Além de produzir os pesos que minimizam o erro das estimativas, as técnicas KS e KO fornecem uma métrica capaz de quantificar a dispersão das estimativas produzidas. Essa métrica é conhecida por Variância Kriging (VK) e fornece a variação do erro da dispersão entre os valores reais e estimados. De maneira resumida, a VK, denotada por σ_{KO}^2 , é expressada por

$$\sigma_{KO}^2(\boldsymbol{s}) = C(0) - \sum_{i=1}^N \lambda_i C(\boldsymbol{s}, \boldsymbol{s}_i) - \nu.$$
(3.48)

Pode-se observar que, se a correlação espacial entre as amostras e o local onde se deseja obter a estimativa é baixa, então $\sigma_{KO}^2(\mathbf{s})$ se aproxima da variância do fenômeno (C(0)). Em contrartida, se as amostras forem fortemente correlacionadas com o ponto de interesse, então $\sigma_{KO}^2(\mathbf{s})$ tende a ser cada vez menor.

Apresentamos a seguir um exemplo de utilização da técnica KO e, em seguida, serão levantadas algumas observações que permitem caracterizar este método de estimativa [77]. Na Figura 3.14 é apresentada uma situação em que existem sete amostras, nomeadas de 1 a 7, nos quais se conhece a magnitude de uma determinada grandeza e deseja-se estimar o valor da grandeza no ponto zero (destacado em vermelho).



Figura 3.14 – Exemplo de aplicação da técnica KO.

Na Tabela 3.4 são apresentadas as coordenadas de todos os pontos envolvidos, e suas respectivas distâncias em relação ao ponto zero. Para a aplicação da técnica KO, é necessário (*i*) conhecer as distâncias de todos os pontos entre si, e as distâncias de todos os pontos em relação ao ponto em que se deseja obter a estimativa e; (*ii*) analogamente, é preciso calcular as covariâncias espaciais por meio de um modelo analítico de covariograma. Neste exemplo, utilizou-se o modelo de covariância exponencial referente à equação (3.36), com S = 10 e r = 10m. Sendo assim, a expressão para determinar as covariâncias espaciais é dada por

$$\gamma(|\mathbf{h}|) = 10e^{\frac{-|\mathbf{h}|}{10}}.$$
(3.49)

Com as informações disponibilizadas na Tabela 3.4, pode-se aplicar o modelo exponencial com os parâmetros já mencionados para encontrar as correlações espaciais entre os pares de pontos.

Ponto	X	Y	Valor	h
0	66	137	?	0
1	61	139	477	5,38
2	63	140	696	4,24
3	64	129	227	8,24
4	68	128	646	9,21
5	71	140	606	5,83
6	73	141	791	8,06
7	75	128	783	12,72

Tabela 3.4 – Informações para a aplicação da técnica KO.

Este resultado consiste na matriz de covariâncias entre os valores regionalizados entre si, e no vetor de covariâncias do ponto i, sendo i = 1, 2, ..., 7, e o ponto 0. Sendo assim, o sistema matricial (3.47) é utilizado para encontrar os pesos $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_7$. Desse modo, o sistema matricial que representa este exemplo é dado por:

							_	-				
10,00	7,99	3, 52	2,71	3,66	2,96	1,68	1.0		λ_1		5,83	
7,99	10,00	3, 31	2,72	4, 49	3,66	1,83	1.0		λ_2		6, 54	(3.50)
3, 52	3, 31	10,00	6, 62	2,71	2,23	3, 31	1.0		λ_3		4,38	
2,71	2,72	6,62	10,00	2,90	2,48	4,96	1.0		λ_4	_	3,97	
3,66	4, 49	2,71	2,90	10,00	7,99	2,82	1.0		λ_5		5,58	
2,96	3,66	2,23	2,48	7,99	10,00	2,68	1.0		λ_6		4,46	
1,68	1,83	3, 31	4,96	2,82	2,68	10,00	1.0		λ_7		2,80	
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0		ν		1,00	

Resolvendo a equação matricial (3.50), chega-se aos valores ótimos de λ_i :

$$\begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \\ \lambda_6 \\ \lambda_7 \\ \nu \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0, 1142 \\ 0, 3609 \\ 0, 1379 \\ 0, 0786 \\ 0, 0786 \\ 0, 0278 \\ -0, 0178 \\ 0, 0283 \\ 0, 0236 \end{vmatrix}$$
 (3.51)

Substituindo os pesos $\lambda_1, ..., \lambda_7$ na equação (3.45) e fazendo $\lambda_m = 0$, é obtido o valor estimado de 576,33. Analogamente, pode-se encontrar a VK ao aplicar a equação (3.45), que foi de 4,36 unidades de grandeza ao quadrado.

As características dos resultados apresentados neste exemplo devem ser mencionadas no sentido de destacar as principais vantagens de se utilizar a técnica KO ao invés de qualquer outra técnica de interpolação. A primeira vantagem é que a KO leva em consideração a proximidade espacial entre as amostras, e isso pode ser verificado ao comparar a magnitude dos pesos λ_i com seus respectivos covariogramas $C(\mathbf{s}, \mathbf{s}_i)$. A segunda vantagem é que a redundância entre as amostras também é levada em consideração, isto é, a técnica KO promove um desagrupamento por meio da matriz **C**. Esse fato pode ser observado comparando os pesos λ_5 , $\lambda_6 \in \lambda_7$, por exemplo. Nota-se que, espacialmente, a amostra 6 está "eclipsada"pela amostra 5, sendo que $\lambda_5 > \lambda_6$. Neste caso, não foi dada tanta importância para amostra 6, pois a amostra 5 já recebeu um peso mais elevado que caracteriza aquela região. Por outro lado, a distância do ponto 6 em relação ao ponto 0 é menor do que a distância do ponto 7 em relação ao ponto 0. Entretanto, a amostra 6 já está representada pela amostra 5 (levando em consideração a proximidade entre elas), então $\lambda_6 < \lambda_7$. E por fim, destaca-se que a KO é caracterizada por ser o melhor estimador linear não enviesado (Best Linear Unbiased Estimator, B.L.U.E).

3.5 Modelagem do Ambiente Rádio

A modelagem do ambiente rádio apresentada neste trabalho possui ligação direta com a maioria das aplicações em redes de sensores. Nas tecnologias LPWAN de RSSF mais difundidas do mercado como, por exemplo, Zigbee, NB-IoT, LoRaWan e SigFox, as redes são desenvolvidas para operar em topologia ponto-multiponto. Essa topologia leva em consideração algumas ERBs e elevadas quantidades de dispositivos. Nessa linha de raciocínio, os dispositivos e as ERBs podem trocar não só informações da aplicação envolvida mas também a respeito das métricas que mensuram a qualidade do enlace de RF. O fato de os dispositivos poderem enviar as métricas de qualidade do enlace para as ERBs será essencial para a proposta do ambiente rádio, que depende dessa capacidade dos terminais. Na Figura 3.15 é apresentado o cenário considerado para esta modelagem, na qual é possível observar um número finito de dispositivos distribuídos espacialmente ao longo de uma região. Essencialmente, algumas premissas devem ser destacadas:

- Os dispositivos (ou terminais de rede) devem possuir a capacidade de medir a potência de *Downlink*, ou seja, a intensidade do sinal que foi enviado pela ERB. Em seguida, essas informações devem ser enviadas para a ERB, por meio de um pacote de *Uplink*.
- É necessário que a ERB tenha capacidade de processar as medidas coletadas pela rede, ou estar conectada a uma unidade de processamento para cumprir essa função. Os mapas de ambientes rádio são gerados a partir de rotinas que exigem elevado poder computacional, utilizando técnicas fundamentadas na geoestatística para estimar os níveis de potência de recepção ao longo da área considerada;
- Assume-se que a ERB e os terminais de rede estão estáticos nos locais em que foram instalados, e suas coordenadas geográficas são conhecidas e foram previamente inseridas na unidade de processamento. Além disso, não existem erros ou incertezas sobre suas coordenadas espaciais, dos terminais e da ERB.



Figura 3.15 – Ambiente rádio.

Neste trabalho, o ambiente rádio será interpretado como um conjunto de valores regionalizados que compõem um processo estocástico espacial, este denominado como $G(\mathbf{s})$. Cada dispositivo será associado a um valor regionalizado, $G(\mathbf{s}_i)$, que se trata de uma realização do processo com uma coordenada espacial $\mathbf{s}_i = (\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$ associada. Nessas condições, será disponibilizado um número finito de dispositivos, capazes de obter a potência de recepção e enviar as medidas para a ERB. O objetivo é produzir estimativas da potência de recepção ao longo de toda a região, permitindo que os prestadores de serviço em IoT possam visualizar e detectar regiões nas quais o serviço é bom ou ruim. Conforme foi mencionado na Seção 3.3, a potência recebida é composta por uma parcela determinística e parcela aleatória. Essa parcela aleatória representa os desvanecimentos a curto e longo prazo, que podem ocorrer devido a diversos fatores. Sendo assim, o ambiente rádio pode ser modelado por

$$G(\boldsymbol{s}) = \mu(\boldsymbol{s}) + \eta(\boldsymbol{s}), \tag{3.52}$$

em que $\mu(\mathbf{s})$ diz respeito à média e $\eta(\mathbf{s})$ é a parcela aleatória. Nesse trabalho consideramos que a parcela $\eta(\mathbf{s})$ modela apenas os efeitos causados pelo desvanecimento a longo prazo, como apresentado na Seção 3.2. Isso porque a modelagem do desvanecimento a curto prazo começa a apresentar variações significativas em distâncias relativamente baixas (pode chegar a centímetros, dependendo da frequência de operação), tornando inviável a utilização do REM [56].

A modelagem do sistema possui o objetivo final de obter os mapas REM, com as estimativas da potência de recepção e PSR, para auxiliar na instalação dos nós sensores. Na Figura 3.16 são apresentadas as etapas que deverão ser implementadas na unidade de processamento responsável pela geração dos mapas.



Figura 3.16 – Etapas para a geração dos mapas REM.

Inicialmente, serão obtidas as amostras espaciais de potência de recepção, que é o resultado da potência média somada aos efeitos de desvanecimento. Posteriormente, será feita uma tratativa da tendência espacial, cujos detalhes serão apresentados na próxima Seção; serão obtidas as estimativas de semivariograma e covariograma experimentais para a captura da correlação espacial; os modelos paramétricos de covariância serão ajustados por meio da utilização de algoritmos de otimização não-linear e; a técnica KO será aplicada para a geração do REM da potência de recepção e, a partir dele, será gerado o REM representa a taxa de sucesso de pacotes (PSR) ao longo da região considerada. Com base nos mapas REM, o operador responsável pela RSSF poderá:

- Avaliar os níveis de QoS na região de serviço de sua rede;
- Avaliar a necessidade da instalação de novas ERBs ou repetidores para melhorar a qualidade do serviço em áreas sombreadas;
- Trabalhar em como aumentar a qualidade do sinal de RF em determinadas regiões, visando a oferta de serviços "diferenciados" em tais regiões.

3.5.1 Modelagem da tendência espacial

A tendência espacial é um fenômeno que ocorre quando a esperança de $G(\mathbf{s})$, $\mathbb{E}{G(\mathbf{s})}$, pode assumir diferentes valores ao longo de suas realizações. Sendo assim, gerar os mapas REM com a presença da tendência espacial, ou seja, com a potência média, pode acarretar em estimativas enviesadas [71]. Por esse motivo, será utilizado um modelo de propagação para estimar a tendência espacial e, posteriormente, ela será removida dos valores regionalizados que compõem o processo estocástico. Dessa maneira, as estimativas de semivariograma e covariograma experimentais serão obtidas a partir dos valores residuais, que estarão em função somente dos efeitos do desvanecimento a longo prazo. No ambiente rádio, a tendência do processo estocástico espacial pode ser modelada pela perda de percurso determinística, ou seja, a potência média de recepção dada pela equação (3.16). Sendo assim, o modelo de $\mu(\mathbf{s})$ para duas dimensões é descrito como

$$\mu(\mathbf{s}_x, \mathbf{s}_y) = P_{rx}(d_0) - 10\beta \log\left(\frac{\sqrt{(\mathbf{s}_{xtx} - \mathbf{s}_x)^2 + (\mathbf{s}_{ytx} - \mathbf{s}_y)^2}}{d_0}\right),$$
(3.53)

em que \mathbf{s}_x e \mathbf{s}_y são as coordenadas espaciais da VA, e \mathbf{s}_{xtx} e \mathbf{s}_{ytx} são as coordenadas espaciais da ERB. Observa-se que o modelo log-distância foi transportado para domínio espacial, com dependência das coordenadas espaciais da ERB e do ponto onde deseja-se calcular a tendência. Nota-se que os ganhos das antenas, as eventuais perdas de cabos e conexões, e os efeitos da frequência de operação do sistema de comunicação estão embu-

tidos na potência de referência $P_{rx}(d_0)$. Para a remoção da tendência³, foi considerada a seguinte abordagem sequencial:

- Seja N um número finito de pontos amostrados a partir da realização do processo estocástico espacial, e $P_{rx}(s) = [P_{rx}(s_1) \ P_{rx}(s_2) \ \dots \ P_{rx}(s_N)]^T$ é o vetor da potência de recepção nas coordenadas s_1, s_2, \dots, s_N e $P_{rx}(s) = \mu(s) + \eta(s)$. Nas simulações que serão posteriormente apresentadas, o vetor $P_{rx}(s)$ foi obtido por meio da equação (3.16), mas levando em consideração um domínio espacial. Na prática, o mesmo vetor deve ser obtido experimentalmente, por meio de medições realizadas em campo;
- O tratamento da tendência requer a estimação do expoente de perda de percurso $\hat{\beta}$. A partir desse procedimento, é possível aplicar a equação (3.53) e obter a predição da tendência em cada coordenada s_i , para posteriormente removê-la das medidas amostradas. Para isso, foi considerado o vetor $F(s) = [-10 \log(d(s_{tx}, s_1)) - 10 \log(d(s_{tx}, s_2)) \dots -10 \log(d(s_{tx}, s_N))]^T$ que representa a modelagem da tendência, tal que $\mu(s) = F(s)\beta$;
- O coeficiente $\hat{\beta}$ deve ser estimado a partir do vetor de observações $P_{rx}(s)$ por meio de técnicas matemáticas como máxima verossimilhança, mínimos quadrados, entre outras [56]. Neste trabalho, utilizou-se a técnica dos mínimos quadrados, uma vez que requer baixo custo computacional para a modelagem linear do sistema proposto. Portanto, $\hat{\beta}$ pode ser obtido por

$$\hat{\beta} = (\boldsymbol{F}^T \boldsymbol{F})^{-1} \boldsymbol{F}^T \boldsymbol{P_{rx}}.$$
(3.54)

• Uma vez que o coeficiente $\hat{\beta}$ foi obtido, pode-se estimar a tendência em cada coordenada s por meio de

$$\hat{\mu}(\boldsymbol{s}) = P_{rx}(d_0) - 10\hat{\beta}\log(d(\boldsymbol{s}_{tx}, \boldsymbol{s})).$$
(3.55)

E importante ressaltar que a tendência espacial não é uma grandeza conhecida, principalmente quando as medidas são obtidas na prática. Nesse sentido, é utilizado o modelo log-distância para se obter $\hat{\beta}$ e, posteriormente, a tendência $\hat{\mu}$. Com isso, conhecendo os vetores $P_{rx}(s) \in \hat{\mu}(s)$, é possível obter as flutuações aleatórias referentes ao sombreamento do canal

$$\boldsymbol{K}(\boldsymbol{s}) = \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{r}\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{s}) - \boldsymbol{\hat{\mu}}(\boldsymbol{s}), \qquad (3.56)$$

³ A eliminação da tendência deve ser feita por dois motivos: 1-) a presença da tendência afeta a estacionariedade do processo e; 2-) as estimativas obtidas nos mapas REM podem estar enviesadas, caso a tendência esteja presente nos cálculos.

em que K(s) é o vetor com os valores regionalizados que representam somente o desvanecimento a longo prazo (sombreamento log-normal). É importante destacar que o semivariograma e covariograma experimentais serão aplicados sobre o vetor K(s), e não sobre $P_{rx}(s)$. Novamente, todo o procedimento de remoção da tendência sobre as observações foi realizado a fim de possibilitar a captura da correlação espacial.

Na próxima Subseção será apresentado o método para gerar desvanecimento correlacionado por meio de simulação, que é baseado na distância de descorrelação.

3.5.2 Geração de Desvanecimento correlacionado

Nessa Subseção é abordado o método gerador de desvanecimento correlacionado que foi utilizado nas simulações deste trabalho. Foram encontradas na literatura algumas maneiras de gerar um processo gaussiano espacialmente correlacionado. Neste trabalho, o desvanecimento será gerado por meio do MSFC. Este leva em consideração a chamada Distância de Descorrelação (d_{des}) , que é definida pela distância a partir da qual dois pontos não apresentam correlação entre suas realizações de desvanecimento. Na Figura 3.17 é apresentada uma grade quadrada, de lado d_{des} e vértices P_1 , P_2 , P_2 e P_4 . No interior da grade localiza-se o ponto P onde deseja-se encontrar o valor do desvanecimento. De acordo com [80], o desvanecimento em P é correlacionado aos valores de desvanecimento mensurados nos vértices da grade, ou seja, nos pontos $P_1, ..., P_4$. Já os vértices apresentam desvanecimento descorrelação.

Para o cálculo do desvanecimento em P, é necessário considerar os vértices da grade na qual o ponto P está inserido. Na Figura 3.18 é apresentada essa situação. Como mencionado anteriormente, os valores de desvanecimento $S_1, ..., S_4$ nos pontos $P_1, ..., P_4$ são considerados independentes entre si e, portanto, são descorrelacionados.



Figura 3.17 – Grade quadrada de lado d_{des} .



Figura 3.18 – Cálculo do desvanecimento em S_P .

Nesse sentido, o desvanecimento medido no ponto P, S_P , depende dos desvanecimentos $S_1, ..., S_4$ e pode ser obtido por [80]

$$S_P = \left[S_1 \left(\frac{d_{des} - x}{d_{des}} \right) + S_2 \left(\frac{x}{d_{des}} \right) \right] \left(\frac{d_{des} - y}{d_{des}} \right) + \left[S_3 \left(\frac{d_{des} - x}{d_{des}} \right) + S_4 \left(\frac{x}{d_{des}} \right) \right] \left(\frac{y}{d_{des}} \right),$$
(3.57)

em que x e y são as distâncias do ponto P até o ponto do canto superior direito (P_1) .

Nota-se que o desvanecimento calculado no ponto P depende dos valores de desvanecimento descorrelacionados dos vértices da grade, além de possuir relação linear com as distâncias x e y. Em seguida, é feita a normalização da equação (3.57) em relação às distâncias x e y para garantir que a variância do desvanecimento do ponto P seja igual àquela dos pontos P1, ..., P4. Dessa maneira, o desvanecimento normalizado é dado por [80]

$$S'_{P} = \frac{S_{P}}{\sqrt{\left[1 - 2x' + 2(x')^{2}\right]\left[1 - 2y' + 2(y')^{2}\right]}}$$
(3.58)

e as distâncias x' e y' são normalizadas em relação a d_{des} , portanto

$$x' = \frac{x}{d_{des}} \tag{3.59}$$

е

$$y' = \frac{y}{d_{des}}.$$
(3.60)

Nesse momento, será apresentado um exemplo de implementação do MSFC com os parâmetros da Tabela 3.5. A ERB está situada nas coordenadas $(s_x, x_y) =$ (125, 125)m. O resultado está apresentado na Figura 3.19, em que pode-se observar a presença de diversas ilhas ou aglomerados ao longo da região. A presença desses aglomerados indica que existe forte correlação espacial entre pontos separados por distâncias pequenas.

Parâmetro	Valor
Área considerada	$300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$
Frequência de operação	915 MHz
Pot. de transmissão	$P_{tx} = 10 \text{ dBm}$
Ganhos de antenas Tx e Rx	2,15 dBi
Expoente de perda de percurso	$\beta = 2.0$
D. padrão do desvanecimento	$\sigma = 5 \text{ dB}$
Distância de descorrelação	$d_{des} = 25 \text{ m}$

Tabela3.5 – Valores dos parâmetros para a geração do desvanecimento correlacionado.



Figura 3.19 – Desvanecimento correlacionado em 2D – Presença de aglomerados indicando correlação espacial.

A Figura 3.20 apresenta o mesmo resultado em três dimensões, representando o dinamismo do meio em termos das variações aleatórias. A Figura 3.21 mostra a potência de recepção total em três dimensões, ou seja, considerando a perda de percurso determinística
e o sombreamento log-normal. É possível observar a presença de correlação espacial entre as medições. Dessa vez, os pontos separados por distâncias menores do que a distância de descorrelação devem apresentar correlação espacial.



Figura 3.20 – Desvanecimento correlacionado em 3D – Presença de "ondulações"
indicam a influência que o meio físico causa na potência de recepção.



Figura 3.21 – Potência de recepção – Potência média + sombreamento correlacionado.

4 Trabalho de Simulação

Neste capítulo são apresentados os trabalhos de simulação, gerados com o objetivo de avaliar as estimativas fornecidas pelo REM, em função dos diversos parâmetros que compõem o modelo do sistema. O estudo da influência desses parâmetros se tornou necessário para que as implementações práticas pudessem produzir estimativas com erros razoavelmente pequenos. Um parâmetro importante no processo de geração do REM é o número de amostras coletadas. Intuitivamente, espera-se que erros pequenos de estimação requerem um número suficientemente grande de amostras. No entanto, na prática, um operador de RSSF não terá a disponibilidade de tempo e de recursos para coletar um número grande de amostras. Nesse sentido, as simulações permitem a realização de estudos e tomadas de decisão a respeito dos melhores parâmetros que devem ser utilizados na prática. Inicialmente, são apresentados os procedimentos necessários para a geração dos mapas REM da potência de recepção e da taxa de sucesso de pacotes (PSR). Em seguida, a qualidade das estimativas produzidas serão analisadas de acordo com (i) o número de amostras utilizado para a geração dos mapas e (ii) a distância de descorrelação do desvanecimento correlacionado. Também serão abordados detalhes a respeito da influência do parâmetro α , que está relacionado ao ajuste das funções semivariograma e covariograma analíticas, a fim de produzir erros pequenos nas predições espaciais. E por fim, possíveis aplicações dos mapas REM serão citadas, como é o caso da detecção da mudança de desvanecimento ao longo do tempo e a possibilidade da inserção de repetidores de sinal na região espacial considerada.

4.1 Geração dos Mapas de Ambiente Rádio

Nas simulações apresentadas neste trabalho, uma área de 300x300m foi considerada. A ERB está localizada nas coordenadas $(\mathbf{s}_x, \mathbf{s}_y) = (125, 125)$ m, com valores regionalizados gerados a partir de uma distribuição de probabilidade uniforme, e espacialmente alocados ao longo do ambiente de simulação. As primeiras simulações foram geradas com N = 100 valores regionalizados, ou seja, 100 pontos de coleta na região de interesse. Em simulações posteriores, outros valores de N serão considerados. Além disso, outros parâmetros também serão levantados, como é o caso de α e d_{des} .

A Tabela 4.1 mostra os parâmetros para a geração dos mapas REM da potência de recepção e da taxa de sucesso de pacotes, na frequência de 433 MHz. Por meio da equação (3.17) e considerando que X_{σ} é correlacionado, foram obtidas as potências de recepção simuladas em cada um dos VRs, estes gerados a partir de uma distribuição de probabilidade uniforme conforme foi apresentado na Figura 4.1. Alguns dos parâmetros da Tabela 4.1, como por exemplo o tamanho do pacote de dados, a largura do canal e a taxa de transmissão, estão diretamente ligados com o tipo de tecnologia de RF que pode ser selecionada para a realização dos procedimentos. Neste caso, os valores utilizados nas simulações deste trabalho condizem com a tecnologia escolhida para a realização dos experimentos práticos, apresentados no Capítulo 5.

Parâmetro	Valor
Área considerada	$300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$
Número de amostras de pot. Rx	N = 100
Pot. de transmissão	$P_{tx} = 0 \text{ dBm}$
Ganhos de antenas Tx e Rx	2,15 dBi
Desvio padrão desvanecimento	$\sigma = 5 \text{ dB}$
Expoente de perda de percurso	$\beta = 4$
Distância de descorrelação	$d_{des} = 50 \text{ m}$
Tamanho do pacote	L = 512 bits
Largura do canal	B = 162, 5 kHz
Modulação	2-FSK, não coerente
Taxa de transmissão	$R_b = 38, 4 \text{ kbps}$
Figura de ruído do receptor	F = 10 dB

Tabela 4.1 – Parâmetros de simulação.



Figura 4.1 – Distribuição espacial dos valores regionalizados.

Para a estimação da tendência espacial e posterior remoção das amostras, utilizou-se os procedimentos abordados na Seção 3.5. Dessa maneira, o vetor K(s) resi-

dual foi obtido contendo apenas a parcela aleatória da potência de recepção (sombreamento) e, a partir dele, as estimativas de semivariograma e covariograma experimentais foram geradas para a realização da captura de correlação espacial. Na Figura 4.2 são apresentados os semivariogramas e covariogramas experimentais e suas curvas analíticas ajustadas. O comportamento das estimativas experimentais foi observado para que fossem feitos os ajustes das funções analíticas, se resumindo a estimar os parâmetros $S \ e \ r$. Tais ajustes são feitos por meio da aplicação de algoritmos de otimização não linear, de busca exaustiva. Neste trabalho, utilizou-se o algoritmo iterativo Nelder – Mead Simplex. Os melhores ajustes foram obtidos por meio da curva $\alpha - stable$, com parâmetro $\alpha = 1,75$; a variância Sill foi de S = 23,45 e o range estimado foi de r = 38,46m.



Figura 4.2 – Semivariograma e covariograma.



Figura 4.3 – Mapas de ambiente Rádio.

Com a curva paramétrica ajustada a partir do covariograma experimental, foi

aplicada técnica KO para a geração REM da potência de recepção e, a partir dele, utilizouse a equação (3.18) para a geração do mapa da taxa de sucesso de pacotes. Os resultados estão apresentados na Figura 4.3. Em relação ao REM da potência de recepção, observouse que a técnica KO indica a existência sa correlação espacial produzida no método gerador de desvanecimento a longo prazo. Com relação ao REM da taxa de sucesso de pacotes, as regiões destacadas em cor vermelha representam os setores do mapa nos quais é possível fornecer serviço de transmissão de pacotes.

Em contrapartida, as regiões nas quais não é possível oferecer serviço também podem ser identificadas, como é o caso dos locais destacados em cor azul escura (PSR próxima de 0%). Também é possível observar que as regiões de transição entre os locais que possuem serviço (destacadas em vermelho) e as regiões que não possuem (destacadas em azul), são bastante estreitas. Essa característica pode ser observada por meio das equações apresentadas na Seção 3.3, relacionadas à obtenção da PSR a partir da potência.

Conhecendo as regiões nas quais não é possível oferecer serviço, o operador da RSSF saberá quais as limitações do seu sistema, ou ainda poderá trabalhar em novas soluções. Por exemplo, a partir da avaliação das condições de serviço, como exemplificado na Figura 4.3, os mapas REM podem auxiliar nas seguintes ações:

- Alteração da localização da ERB;
- Aumento da potência de transmissão dos dispositivos;
- Detecção de mudança do comportamento do desvanecimento em diferentes horários do dia e;
- Inserção de estações repetidoras de sinal.

Detalhes a respeito de cada um dos itens acima são abordados na Seção 4.5. A seguir, será apresentado o método de validação a fim de mensurar a qualidade das estimativas produzidas pelos mapas REM.

4.2 Validação

A validação das predições produzidas pelos mapas REM da potência de recepção foi feita por meio da Raíz do Erro Quadrático Médio (Root Mean Square Error, RMSE) entre o valor estimado pelo REM e o valor real. A equação do RMSE é dada por

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \left[P_{rx}(\boldsymbol{s}_i) - P_{rx}^*(\boldsymbol{s}_i) \right]^2},$$
(4.1)

em que $P_{rx}(\mathbf{s}_i)$ é o valor real potência de recepção na coordenada \mathbf{s}_i , calculada em todos os pontos do mapa por meio da equação (3.17); $P_{rx}^*(\mathbf{s}_i)$ é o valor estimado da potência em \mathbf{s}_i e apresentado no REM; N_s representa o número total de pontos do mapa.

Em relação à PSR, a validação foi feita por meio do valor médio do módulo da diferença entre os valores reais e os valores estimados. A métrica de validação da PSR é dada, portanto, por

$$V_{PSR} = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} |PSR(s_i) - PSR^*(s_i)|, \qquad (4.2)$$

em que $PSR(\mathbf{s}_i)$ é o valor real da PSR na coordenada $\mathbf{s}_i \in PSR^*(\mathbf{s}_i)$ é a PSR estimada em \mathbf{s}_i . Na Figura 4.4 são apresentados os modelos reais (que foram gerados por meio de simulação neste capítulo) para a geração da potência de recepção em três dimensões, o que permite ter maior percepção sobre a variação da potência ao longo da região considerada.



Figura 4.4 – Mapas reais em três dimensões.

Na Figura 4.5 são apresentados os modelos em duas dimensões para posteriores comparações entre os mapas reais e o REM. A partir da potência de recepção, foi obtida a PSR real com base nos parâmetros de simulação da Tabela 4.1. Na Figura 4.6 são apresentados quatro mapas, sendo dois deles relativos à potência de recepção e os outros dois representam a PSR (dois REM's e dois mapas reais para cada grandeza). Com relação ao REM da potência de recepção, pode-se observar que as estimativas ficaram bastante próximas comparadas aos valores apresentados no mapa real. As diferenças mais evidentes ocorreram nas regiões caracterizadas pela ausência de VRs, e isso pode ser observado na distribuição espacial da Figura 4.1. Em relação à PSR, algumas diferenças também podem ser identificadas, principalmente nas regiões em que tiveram as maiores diferenças na potência de recepção. Mesmo assim, com N = 100 amostras, os resultados estimados ficaram próximos dos valores reais.



Figura 4.5 – Mapas reais em duas dimensões.

Na Figura 4.7 são apresentados os erros quadráticos obtidos em todos os pontos do mapa para a potência de recepção. Analogamente, também foram obtidos os módulos da diferença entre valor real e estimado para a PSR. As observações são: (*i*) Os maiores erros estão relacionados aos locais caracterizados pela ausência de VRs; (*ii*) O erro da PSR é pequeno nas regiões em que a potência de recepção estimada é elevada, mesmo esta apresentando erros um pouco maiores (basta observar as regiões próximas da ERB). A partir das informações da Figura 4.7, foram obtidas as métricas RMSE para a potência e V_{PSR} para a PSR, exibidas na Tabela 4.2. Esses valores são bastante satisfatórios se comparados com as análises que ainda serão apresentadas, pois N = 100 representa uma quantidade suficiente para uma região de 300x300 metros, levando em consideração a distribuição espacial utilizada. Na próxima seção será avaliada a influência de N e d_{des} qualidade das estimativas dos mapas REM.



Figura 4.6 – Comparação entre os mapas reais e os mapas REM.



Figura 4.7 – Magnitude da diferença entre valores reais e estimados.

Tabela 4.2 – RMSE e V_{PSR} para a realização espacial da Figura 4.5.

Parâmetro	Valor	
RMSE	$1,92 \ dB$	
V_{PSR}	0,050	

4.3 A influência do número de valores regionalizados e da distância de descorrelação espacial

Nessa seção é avaliada a influência do número de VRs e da distância de descorrelação na qualidade das estimativas dos mapas REM. Na primeira análise, o desvanecimento é mantido constante de acordo com o que foi apresentado na Figura 4.5, com $d_{des} =$ 50m. Nesse cenário, o número de VRs é variado de acordo com N = 5, 25, 50, 75, 100, 200 e o erro entre valores reais e estimados será obtido para todas as situações. Posteriormente, serão avaliados diversos tipos de N para $d_{des} = 25, 50, 75, 100, 150m$.

4.3.1 A influência de N na qualidade das estimativas

O cenário apresentado nessa subseção leva em consideração o desvanecimento da Figura 4.5 para valores de N = 5, 25, 50, 75, 100, 200. Na Figura 4.8 são apresentados os semivariogramas e covariogramas para cada N e é possível notar que quanto maior N, maior é a capacidade do modelo analítico em capturar a correlação espacial entre as amostras. Isso fica claro ao observar, por exemplo, os gráficos de N = 200, em que



Figura 4.8 – Comparação dos semivariogramas e covariogramas.

os modelos analíticos de semivariograma e covariograma praticamente coincidem com as estimativas experimentais. Analisando a Figura 4.8 para N = 50, nota-se que os valores experimentais ficam mais dispersos dos modelos analíticos, e essa dispersão aumenta à medida que N decresce. Na situação em que N = 5, fica praticamente impossível a captura de correlação espacial, uma vez que existirão poucos pares de pontos separados de h metros. Na Figuras 4.9 e 4.10 são apresentadas as devidas comparações do REM com os valores de N mencionados.



Figura 4.9 – Comparação entre REMs da potência de recepção.



Figura 4.10 – Comparação entre REMs da PSR.



Figura 4.11 – Erro quadrático do REM da potência de recepção .



Figura 4.12 – Módulo do erro do REM da PSR.

Tanto para a potência quanto para a PSR, as estimativas produzidas pelos mapas REM se afastam dos valores reais (Figura 4.5) ao passo que N diminui. É notável

que a ausência de VRs afeta a detecção de desvanecimento e, neste caso, o REM se aproxima do mapa da potência média de recepção (na ausência de pontos, a melhor estimativa é a média). As diferenças entre valores reais e estimados, apresentadas Figuras 4.11 e 4.12, permitem observar a influência do número de VRs para gerar os mapas: a magnitude das diferenças tende a aumentar conforme a diminuição de N. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores de RMSE e V_{PSR} em função de N. Como já era esperado,

V. Regionalizados	RMSE P_{Rx}	V_{PSR}
N = 200	$0,9 \ dB$	0,02
N = 100	$1,9 \ dB$	0,050
N = 75	$2,3 \ dB$	0,074
N = 50	$2,6 \ dB$	0,093
N = 25	$4,4 \ dB$	0,108
N = 5	$5,4 \ dB$	0,173

Tabela 4.3 – RMSE e V_{PSR} em função de N.

para o cenário apresentado na Figura 4.5, as métricas RMSE e V_{PSR} aumentam à medida que N diminui, pois é necessário um número de amostras suficientemente elevado para que as técnicas da geoestatística possam capturar a correlação espacial.

Sabe-se que a aleatoriedade do desvanecimento correlacionado e da distribuição espacial dos pontos influenciam nas estimativas produzidas pelos mapas REM. Os resultados apresentados acima são válidos considerando as seguintes suposições: (i) a mesma realização do desvanecimento foi usada em todos os experimentos (diferentes valores de N) e (*ii*) esses resultados são válidos para as coordenadas espaciais dos VRs desse conjunto de simulações. Deve-se ressaltar o fato de que dependendo da distribuição espacial e do desvanecimento aleatório, é possível que, por exemplo, os resultados de N = 75sejam melhores do que N = 100. Por isso, um novo conjunto de simulações foi realizado, levando em consideração mil observações para N = 5, 25, 50, 75, 100, 200 com desvanecimento e distribuição espacial aleatórios, permitindo a obtenção de histogramas para avaliar o comportamento do erro das estimativas. Nas simulações que serão apresentadas a seguir, apenas o RMSE (erro da potência) será exibido, pois foi observado que o erro da PSR segue o mesmo padrão do RMSE. Isso porque o mapa REM da PSR foi obtido a partir do mapa REM da potência de recepção. Sendo assim, foi possível obter conclusões a respeito do comportamento estatístico do RMSE e transportá-lo para o cenário da PSR. Nessa análise, utilizou-se $d_{des} = 50$ m.

Na Figura 4.13 são apresentados os histogramas do RMSE para a potência. Conforme o esperado, em geral, o RMSE aumenta à medida que N diminui, mesmo quando são considerados diferentes desvanecimentos e distribuições espaciais. A comparação entre



Figura 4.13 – Histograma do RMSE para a potência de recepção.

os histogramas pode ser observada na Figura 4.14, em que é possível notar o deslocamento dos histogramas conforme N aumenta, indicando o crescimento do RMSE. Além disso,



RMSE da potência de recepção

Figura 4.14 – Comparação entre os histogramas do RMSE – Potência de recepção.

destaca-se que (i) existem intersecções entre os histogramas significando que, em algumas situações, o RMSE pode diminuir à medida que o N aumentar (isso vai depender do desvanecimento e da distribuição espacial) e (ii) nota-se que a dispersão dos histogramas aumenta conforme N diminui. Isso significa que a variabilidade do RMSE aumenta para valores de N pequenos, evidenciando ainda mais a importância da quantidade de VRs na qualidade das estimativas dos mapas REM. Na Tabela 4.4 são apresentadas as médias e desvios-padrões do RMSE em função de N, para a potência. Conforme o esperado, o número de VRs afeta a qualidade das estimativas, mesmo levando em consideração o desvanecimento e a distribuição espacial dos VRs.

V. Regionalizados	RMSE	σ_{RMSE}
N = 200	$0,75 \ dB$	$0,16 \ dB$
N = 100	$1,47 \ dB$	$0,30 \ dB$
N = 75	$1,92 \ dB$	$0,37 \ dB$
N = 50	$2,64 \ dB$	$0,49 \ dB$
N = 25	$3,86 \ dB$	$0,68 \ dB$
N = 5	$5,63 \ dB$	$1,10 \ dB$

Tabela 4.4 – Análise do RMSE para a potência de recepção – Variando N.

4.3.2 Avaliando a distância de descorrelação

Assim como a quantidade de VRs, a distância de descorrelação também causa modificações nas estimativas dos mapas REM. Visando comprovar esta afirmação, foram geradas simulações para verificar o comportamento do RMSE para diferentes valores de d_{des} . Para tanto, utilizou-se os parâmetros da Tabela 4.1, com desvanecimento e distribuição espacial aleatórios para N = 10, 20, ...280, 290, 300 e $d_{des} = 25, 50, 75, 100, 150$. Os primeiros resultados estão apresentados na Figura 4.15, referentes ao RMSE da potência de recepção. O gráfico apresenta cinco curvas em função de N VRs, supondo as seguintes condições: (*i*) cada curva foi avaliada supondo o mesmo desvanecimento e; (*ii*) as distribuições espaciais para N's iguais também foram as mesmas. Observa-se que, na maioria das vezes, fixando um valor de N qualquer, o RMSE aumenta na medida que a d_{des} diminui, em especial para o caso em que $d_{des} = 25m$.

Distâncias de descorrelação pequenas implicam em ambientes sujeitos maiores quantidades de regras de desvanecimento, como é o caso ilustrado na Figura 3.20. Nessas situações, as variações de potência ao longo da região farão com que as técnicas da geoestatística apresentem maior dificuldade em capturar a correlação espacial entre as medidas e, consequentemente, os erros tenderão a ser maiores. Nesse sentido, os resultados mostram que a d_{des} também apresenta influência no RMSE, porém tal influência tende a ficar cada vez menor com o aumento de d_{des} . Além disso, irregularidades provenientes da aleatoriedade dos processos geradores do desvanecimento e da distribuição espacial também podem ser observadas. Por exemplo, uma opção seria comparar as curvas $d_{des} = 50$ m (de cor verde) e $d_{des} = 100$ m (de cor azul clara) para N = 55, tal como foi destacado na Figura 4.15. Neste caso, a magnitude do RMSE observado na curva $d_{des}=50\mathrm{m}$ foi menor do que o respectivo valor na curva $d_{des}=100\mathrm{m}.$ E por fim, deve-se destacar o fato de que as variações vão ficando mais suaves conforme o parâmetro N aumenta.



Figura 4.15 – RMSE em função de N e d_{des} – Potência de recepção.



Figura 4.16 – Histograma do RMSE em função da d_{des} – Potência de recepção.

Devido à aleatoriedade apresentada na Figura 4.15, optou-se pela realização de um estudo por meio de histogramas. Ao todo, foram obtidas mil observações do RMSE para $d_{des} = 25, 50, 75, 100, 150$ m com N = 50 e os histogramas produzidos foram apresentados na Figura 4.16. Nota-se que houve um aumento do RMSE médio com a diminuição da d_{des} . Isso ocorre porque distâncias de descorrelação pequenas implicam em ambientes com mais regras de desvanecimento (mais dinâmicos), o que dificulta a captura efetiva da correlação espacial pelas técnicas da geoestatística. Na Tabela 4.5 são apresentadas as médias e desvios-padrões do RMSE, o que permite visualizar seus comportamentos em função de d_{des} . Observa-se que a partir de $d_{des} = 75$ m, a diferença entre os RMSE's adjacentes começa a ficar mais significativa e fica clara a influência da d_{des} nas estimativas dos mapas REM.

d_{des}	\overline{RMSE}	σ_{RMSE}
$d_{des} = 150$	$0,67 \ dB$	$0,26 \ dB$
$d_{des} = 100$	$0,99 \ dB$	$0,35 \ dB$
$d_{des} = 75$	$1,49 \ dB$	$0,39 \ dB$
$d_{des} = 50$	$2,64 \ dB$	$0,49 \ dB$
$d_{des} = 25$	$4,49 \ dB$	$0,44 \ dB$

Tabela 4.5 – Análise do RMSE para a potência de recepção – Variando d_{des} .

4.4 Análise do parâmetro $\alpha - stable$

O parâmetro α é relativo ao modelo gaussiano de coeficientes ajustáveis ($\alpha - Stable$) representado pela equação (3.37). O objetivo dessa Subseção é apresentar as justificativas para se utilizar $\alpha = 1,75$ e, nesse sentido, foi realizada uma série de simulações para computar o RMSE.

Inicialmente, foi observado que a curva característica que modela o semivariograma experimental das simulações se aproximava mais do modelo gaussiano do que do modelo exponencial, para o cenário proposto neste trabalho. O comportamento do RMSE foi registrado ao variar N considerando a realização do desvanecimento da Figura 4.4, utilizando as mesmas amostragens espaciais. O resultado mostrado na Figura 4.17 é referente às curvas para $\alpha = 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0$ em função de N . A curva de $\alpha = 2.0$ apresentou algumas instabilidades que registram a dificuldade da captura de correlação espacial em certas situações, tal como pode ser observado N = 30, 40, 75. Essas instabilidades podem ter ocorrido principalmente devido à amostragem espacial, contribuindo para que o modelo produzisse estimativas com maiores erros. Para todos os valores de N simulados, as curvas de $\alpha = 1.0, ..., 1.75$ apresentaram erros relativamente próximos. Mesmo que pequenas, as maiores diferenças apareceram para N > 50, destacando as vantagens de $\alpha = 1.75$. Diante desse fato, optou-se por utilizar $\alpha = 1.75$ nas simulações deste trabalho.



Figura 4.17 – RMSE da potência recebida – Variando N para diversos valores de α .

4.5 Aplicações

Nesta seção são destacadas algumas das aplicações para os mapas REM, mostrando que eles poderão ser úteis aos operadores de RSSF durante a prestação de serviço aos clientes.

4.5.1 Alteração da localização da ERB

Essa estratégia consiste em alterar a localização da ERB a fim de atender as regiões nas quais existe maior concentração de usuários. Neste sentido, suponha que existem muitos usuários localizados na região nordeste de uma área, e que a ERB foi inicialmente instalada nas coordenadas $(s_x, s_y) = (125, 125)$ m. Portanto, os mapas REM serão os mesmos da Figura 4.3, em que a região nordeste do mapa está praticamente sem serviço. Tendo em vista esse problema, o operador da RSSF poderia alocar a ERB nas coordenadas $(s_x, s_y) = (185, 200)$ m, apenas por meio de uma inspeção visual no REM da PSR.

Na Figura 4.18 são apresentadas as comparações de potência e PSR antes e depois da alteração de localização da ERB, em que se observa claramente que a nova loca-

lização da ERB tornou possível o fornecimento de serviço na região nordeste do mapa. A potência de recepção aumentou na região nordeste, influenciando diretamente no aumento da PSR. Ressalta-se que a estratégia de mudança da localização da ERB é algo possível, mas nem sempre é viável. Isso porque em grande parte dos sistemas de telecomunicações, a ERB é inserida em uma localização fixa, dotada da infraestrutura necessária para o seu funcionamento. Nesse sentido, as estratégias que envolvem a mudança de localização da ERB pode ser uma tarefa impossível. Assim, deve-se recorrer a estratégias como o aumento de potência de transmissão, ou a instalação de dispositivos capazes de replicar o sinal de RF.



Figura 4.18 – Alteração da localização da ERB.

4.5.2 Alteração da potência de transmissão dos dispositivos

Se o nível de potência de recepção de um dispositivo de uma RSSF for menor do que a sensibilidade de recepção, a comunicação entre o dispositivo e a ERB não se estabiliza. Neste caso, o operador da RSSF pode solicitar o aumento de potência no transmissor da ERB, sempre respeitando as regulamentações da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Um exemplo do impacto do aumento de potência dos transmissores é apresentado na Figura 4.19, em que a potência foi aumentada de 0 dBm para 5 dBm. Fica clara a influência da potência de transmissão principalmente no REM da PSR, em que observa-se o aumento da área em que é possível oferecer serviço.

Essa estratégia de aumentar a potência dos transmissores pode ser útil nas situações em que não é possível mudar a localização dos dispositivos da rede, especialmente quando se trata da ERB. Em contrapartida, é importante ressaltar que existem regras estabelecidas pela ANATEL a respeito dos limites de potência permitidos.



Figura 4.19 – Aumento de potência nos transmissores.

4.5.3 Detecção de Desvanecimento

Os mapas REM podem ser utilizados para a detecção da mudança de desvanecimento em diferentes horários ao longo do dia. Sabe-se que o canal de RF é dinâmico e, portanto, está sujeito a oscilações devido a diversos fatores. Nesse sentido, dependendo da localização de determinados dispositivos da rede, estes poderão deixar de funcionar por algumas horas devido ao impacto do desvanecimento no sinal de RF. Por meio dos mapas REM, é possível detectar mudança da potência de recepção ao longo da região considerada. Dessa maneira, o operador da RSSF poderá detectar graficamente as variações do ambiente e tomar as devidas providências.

4.5.4 Estações Repetidoras de Sinal

Os mapas REM podem servir de auxílio para a instalação de repetidores de sinal, o que é uma estratégia importante a ser utilizada por um operador de RSSF no sentido de ampliar a região de cobertura do sistema. A seguir, serão apresentados os resultados de uma simulação envolvendo uma ERB e quatro estações de repetição, o que permitirá visualizar a ampliação da região de cobertura por meio dos mapas REM. Na Tabela 4.6 são apresentadas as coordenadas da ERB e das estações de repetição e os parâmetros utilizados foram os mesmos da Tabela 4.1, exceto que o número de VRs foi de 50 (N = 50).

Elemento de rede	(X,Y)
ERB	(125, 125)
Repetidor 1	(68,75)
Repetidor 2	(200,100)
Repetidor 3	(100,200)
Repetidor 4	(200,200)

Tabela 4.6 – Localização dos elementos de rede.

Nas Figuras 4.20 e 4.21 são apresentados os mapas REM individuais da potência e da PSR, com os elementos de rede supostamente situados nas localizações exibidas na Tabela 4.6. Observa-se que, individualmente, cada elemento é responsável pela cobertura de um setor da região considerada, e isso fica mais destacado nos mapas REM da PSR. Ao englobar a ERB e as estações repetidoras em uma mesma simulação, são gerados os mapas REM para o cenário de repetição conforme apresentado na Figura 4.22. Nota-se que a potência de recepção estimada aumenta com a presença das estações de repetição, e isso influencia diretamente nas dimensões da região em que é possível oferecer serviço.



Figura 4.20 – REM da potência de recepção - ERB e repetidores.



Figura 4.21 – REM da PSR - ERB e repetidores.



Figura 4.22 – REM com repetição.

4.6 Simulação do GEM

O GEM é o método escolhido não só para contabilizar a PSR como também para detectar oscilações que podem ocorrer no enlace de RF. Nessa Seção é apresentada uma simulação envolvendo três enlaces de 50 transmissões e PSRs próximas ou iguais 50%, porém com características oscilatórias distintas. Os enlaces 1, 2 e 3, apresentados na Figura 4.23, foram gerados a partir da simulação da cadeia de Markov com diferentes probabilidades de transição. Além disso, foi utilizada uma VA uniformemente distribuída entre 0 e 1, para controlar as transições dos estados "Bom"e "Ruim". Na Tabela 4.7 são apresentados os parâmetros de simulação, em que $p \in r$ são parâmetros de entrada.

0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1	00100001001 Enla	ace 1
0 0 1 0 0 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 1 0) 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 Enla	ace 2
0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0	101010101101 Enla	ace 3

Figura 4.23 – Enlaces com PSRs próximas de 50%.

Enlace	p = r	π_B	PSR_{sim}	μ
1	0,4	50%	52%	0,2
2	0,6	50%	52%	-0,2
3	0,8	50%	50%	-0,8

Tabela 4.7 – Valores dos parâmetros de simulação do GEM.

Ao observar a Tabela 4.7, nota-se que não é possível distinguir os três enlaces somente em função da PSR simulada, uma vez que os valores são bastante próximos ou até mesmo iguais. Por outro lado, esses enlaces apresentam características oscilatórias que podem ser mensuradas em função da métrica μ , e isso pode ser visto na Figura 4.23. Quanto menor for o μ , maior a quantidade de transições do estado "Bom"para o estado "Ruim"da cadeia de Markov, e vice-versa. Assim, os problemas que estão contribuindo para que a PSR fique próxima de 50% podem ser de naturezas diferentes. Com relação ao enlace 1, cujo μ é de 0,2, é possível que os problemas apresentem características determinísticas, como por exemplo a atenuação do sinal em função da presença de água em conectores de RF e defeitos de funcionamento nos componentes eletrônicos dos dispositivos de rede, tais como reguladores de tensão, transistores e até baterias descarregadas. Por outro lado, os enlaces 2 e 3 apresentam características oscilatórias mais intensas ($\mu = -0, 2 e \mu = -0, 8$), sendo possível que os problemas apresentem características de aletória, como por exemplo a influência do desvanecimento.

Com essa habilidade de diferenciar enlaces com PSRs próximas entre si, um operador de rede poderá ter mais informações a respeito da natureza dos problemas que podem ocorrer nos dispositivos e, portanto, ser mais eficiente na procura de soluções. No próximo Capítulo deste trabalho será apresentada a integração do GEM no processamento do IPM, que irá contribuir no fornecimento de informações ao operador, em especial com a métrica μ .

5 Trabalho Experimental e Ferramenta de Gerenciamento

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais, obtidos por meio de testes práticos utilizando tecnologias de RF. Além disso, é apresentada uma ferramenta de gerenciamento para redes de sensores tomando como base os mapas REM e o GEM.

A metodologia proposta é dividida em duas fases. Na Fase I, são realizadas medidas de potência de recepção e da PSR nos pontos de coleta, com o objetivo de verificar a cobertura de RF por meio de mapas REM, como descrito nos capítulos anteriores. A potência de recepção é obtida por meio do RSSI e a PSR é calculada pela razão entre o número de pacotes recebidos corretamente pelo dispositivo de rede e o número de pacotes transmitidos pela ERB. Em seguida, é realizada a etapa de validação cruzada, em que algumas medidas de campo são comparadas às respectivas predições espaciais do REM, a fim de avaliar seu desempenho.

A Fase II consiste na monitoração contínua das métricas de desempenho da rede, visando avaliar a qualidade do serviço prestado aos clientes. Nesta fase, supõe-se que os dispositivos dos clientes são instalados, gerando informações de rede para o sistema de gerência. Essas informações são utilizadas para a atualização do REM, permitindo uma avaliação em tempo real da rede. Entretanto, ressalta-se que a qualidade das estimativas produzidas depende do número de dispositivos da rede e da distribuição espacial em que esses dispositivos são alocados. Portanto, haverá uma fase de transição em que o número de dispositivos não será suficiente para produzir boas estimativas. Na medida em que outros dispositivos vão sendo instalados, o que é o esperado em uma RSSF, maior será a quantidade de informação disponível para a geração de mapas REM atualizados e, dessa maneira, haverá uma melhora no desempenho das estimativas.

5.1 Cenário de testes

Nessa Seção são abordadas as condições de execução dos testes práticos. É feita uma caracterização do ambiente físico no qual os trabalhos experimentais foram executados, bem como as tecnologias utilizadas e suas especificações. É apresentada a distribuição espacial das amostras para a geração do REM durante a Fase I, pois isso é relevante em termos de desempenho dos resultados obtidos. Na sequência, são destacados os Kits de desenvolvimento utilizados e os métodos de execução dos testes práticos.

5.1.1 Características Físicas do Ambiente

Os testes práticos realizados neste trabalho foram executados na Universidade Estadual de Campinas, na "praça da paz". Este ambiente possui características que podem influenciar na potência de recepção. São elas:

- É um local com uma grande quantidade de árvores, arbustos e vegetação rasteira; há também objetos que podem degradar a potência de recepção como, por exemplo, postes, transformadores, latas de lixo, etc.
- Muitas pessoas circulam por essa região ao longo do dia e, além disso, é um local onde acontecem atividades extracurriculares;
- Uma elevada quantidade de veículos trafega pelos arredores da praça.

Na Figura 5.1 é apresentado o ambiente de testes com os pontos nos quais foram realizadas as medições. A ERB foi destacada em amarelo na Figura 5.1 e os VR's são os ícones verdes. Ao todo, foram realizadas as coletas da potência de recepção e PSR em 50 posições distintas, e a distribuição espacial foi feita de modo a ocupar toda a região de interesse. Mais detalhes a respeito do teste prático serão apresentados nas próximas seções.



Figura 5.1 – Praça da paz - Unicamp.

5.1.2 Tecnologia utilizada nos testes

As tecnologias utilizadas nos testes práticos foram desenvolvidas para a criação de redes de sensores com operação em topologia ponto-multiponto. O transceptor de RF escolhido foi o CC1101, da *Texas Instruments*. Os principais recursos desse transceptor, disponíveis em [53], são apresentados a seguir:

- Operação nas bandas de 315/433/868/915 MHz;
- Sensibilidade de -116 dBm, operando com uma taxa de transmissão de 0,6 kBaud, 433 MHz e 1 % de PER; -112 dBm a uma taxa de transmissão de 1,2 kBaud, 868 MHz e 1 % de PER;
- Baixo consumo de corrente (14,7 mA em estado de recepção, em 868 MHz), que é ideal para aplicações *Low-Power*;
- Máxima potência de transmissão: 10 dBm;
- Suporte para as modulações 2-FSK, 4-FSK, GFSK, MSK, OOK e AKS;
- Sensor de temperatura analógico integrado;
- Interface Serial e Periférica (Serial Peripheral Interface, SPI) para a comunicação com microcontroladores externos; ;
- Métricas disponíveis: RSSI e LQI;
- Suporte para técnicas de transmissão como o Branqueamento de dados (Data Whitening, DW), Código Corretor de Erros (Forward Error Correction, FEC) e Código Manchester;
- Configuração manual do espaçamento entre canais, largura de banda do filtro de recepção e taxas de transmissão e;
- Suporte para o modo de redução do consumo de energia ("Sleep-Mode").



Figura 5.2 – Módulo de RF CC1101.

Mais detalhes a respeito do CC1101 podem ser encontrados em [53]. Na Figura 5.2 é apresentado o módulo de RF utilizado, já integrado a todos os componentes necessários para o funcionamento do CC1101. A interface de comunicação com o módulo de RF é a SPI e as conexões foram feitas a um Arduino Pro mini.

Para realizar a integração entre o Arduino Pro mini e o módulo de RF, foi utilizado o kit de desenvolvimento de IoT da empresa IoTools [81], conforme apresentado na Figura 5.3. Este kit foi desenvolvido para acoplar três interfaces de comunicação de RF e, dentre elas, apenas o módulo do CC1101 era capaz de fornecer a métrica RSSI. Nesse sentido, optou-se por utilizar o CC1101 para o obtenção do REM da potência de recepção e outras estratégias de gerência. Para enviar as informações a unidade de processamento, utilizou-se o barramento Serial UART presente no kit e a comunicação foi estabelecida por meio do chip conversor USB-Serial FTDI FT232TTL.



Figura 5.3 – Kit de desenvolvimento de IoT – IoTools.

5.1.3 Procedimentos experimentais

Inicialmente, foram desenvolvidos dois equipamentos de medição com base no kit anteriormente apresentado. O primeiro é a ERB e o segundo, o Nó Sensor (NS). Ambos foram inseridos em caixas para facilitar a execução dos testes práticos, de acordo com a Figura 5.4. Na ERB, foi conectado um cabo USB para a comunicação com uma unidade de processamento. Ao NS foi conectado um Display de Cristal Líquido 16x2 (Liquid Crystal Display, LCD) para a visualização dos dados. As informações configuradas para serem exibidas no LCD 16x2, conforme apresentado na Figura 5.5, foram as seguintes:

 RSSI – É um número de 1 byte, obtido a partir dos registradores do transceptor CC1101. A potência de recepção dos pacotes recebidos durante o teste será calculada por meio do RSSI;

- 2. Tensão da bateria Essa informação foi importante para conhecer o estado das baterias utilizadas durante os testes, pois foram muitas medições em locais distintos;
- 3. Erros São contabilizados os erros ou perdas de pacote ao decorrer das transmissões.



Figura 5.4 – Equipamentos de medição – ERB e Nó Sensor.



Figura 5.5 – Nó Sensor com display.

Para calcular a potência de recepção, em dBm, utilizou-se o manual do transceptor CC1101, em que foi encontrada a relação entre a potência e o indicador RSSI [53]:

$$P_{Rx} = \begin{cases} \frac{RSSI-256}{2} - 74, & \mathbf{RSSI} \ge 128\\ \frac{RSSI}{2} - 74, & c.c \end{cases}$$
(5.1)

Com o objetivo de obter medições confiáveis da potência e da PSR, optou-se por transmitir a quantidade de pacotes suficientemente elevada tal que fossem contabilizados 100 erros. Dessa maneira, a PSR e a média das potências ao longo das realizações em cada ponto de coleta foram armazenadas para a geração do REM.

A seguir serão apresentados os detalhes que compõem as Fases I e II da metodologia proposta.

Fase I - Teste de Cobertura de RF 5.2

A Fase I contempla um teste de cobertura de sinal de RF com o tipo de tecnologia na qual será baseada a construção dos dispositivos, e o objetivo é a geração dos mapas REM da potência e da PSR. Neste momento, o responsável técnico pelo sistema deverá realizar uma visita ao local no qual deseja-se instalar dispositivos. Na Figura 5.6 são apresentadas as etapas que compõem a Fase I, que é referente ao que deve ser feito nos momentos anteriores à instalação da rede de sensores.



Fase I – Teste de cobertura de RF (pré-instalação)

Figura 5.6 – Etapas da Fase I.

Inicialmente, é definido o número de pontos de coleta e suas respectivas localizações geográficas, pois as medidas obtidas nesses pontos serão essenciais para a captura de correlação espacial e, posteriormente, para a aplicação da técnica KO. Conforme apresentado no Capítulo 4, ressalta-se que a quantidade e a distribuição espacial dos VRs são fatores que afetam a qualidade das estimativas produzidas via mapas REM e, portanto, devem ser escolhidos com bastante cautela. Nessa linha de raciocínio, os pontos devem ser distribuídos de tal maneira que (i) ocupe toda a região considerada evitando, portanto, deixar regiões com poucos pontos e; (ii) as pequenas regiões com maior interesse na instalação de dispositivos devem ser populadas com mais pontos amostrais. Logicamente, o número N de VRs deve ser suficientemente elevado para cumprir as condições $(i) \in (i)$.

Após a definição dos pontos de coleta, inicia-se a transmissão por parte da ERB de um número suficientemente elevado de pacotes de dados, que são recebidos pelo dispositivo de testes em cada um dos pontos de coleta. A partir desse procedimento, são contabilizadas as métricas RSSI e PSR. O RSSI é obtido para cada pacote de dados, e a PSR é contabilizada pela razão entre o número de pacotes recebidos corretamente pelo dispositivo de testes e o número de pacotes transmitidos pela ERB. Em seguida, utiliza-se a estratégia abordada na Subseção 3.5.1 para a estimação e remoção da tendência, e então são obtidos os semivariograma e covariograma experimentais. A partir deles, o modelo de covariograma analítico que melhor representa a estimativa experimental é utilizado para a aplicação das técnicas de predição via KO. E por fim, após a obtenção dos mapas REM da potência de recepção e da PSR, é realizada uma etapa de validação prática: dez pontos são selecionados ao longo da região avaliada (esses pontos são diferentes dos que foram utilizados para a geração do REM) e as métricas RSSI e PSR são coletadas em campo para posterior comparação com suas respectivas magnitudes produzidas via KO.

5.2.1 Apresentação dos Resultados Experimentais

Para a geração dos mapas REM da potência e da PSR, foram utilizados os parâmetros da Tabela 5.1. Foram utilizados N = 50 pontos de coleta pelos seguintes motivos: (*i*) este valor foi suficiente para englobar todos os setores da região avaliada e, portanto, obter estimativas mais próximas da realidade e; (*ii*) os resultados das simulações apresentadas no Capítulo 4 mostraram que N = 50 não produziu as melhores estimativas, porém os valores ficaram próximos dos obtidos por simulações com N maiores.

Parâmetro	Valor
Área considerada	$240~\mathrm{m}\times240~\mathrm{m}$
Número de V. Regionalizados	N = 50
Frequência de operação	433 MHz
Pot. de transmissão	$P_{tx} = 10 \text{ dBm}$
Ganhos de antenas Tx e Rx	2,15 dBi
Exp. de perda de percurso estimado	$\hat{\beta} = 4,37$
Tamanho do pacote	L = 512 bits
Largura do canal	B = 162, 5 kHz
Modulação	2-FSK, não coerente
Taxa de transmissão	$R_b = 38, 4 \text{ kbps}$

Tabela 5.1 – Valores dos parâmetros do teste prático.

E também ressalta-se o fato de que, nas simulações, a região era de 300×300 m, ou seja, maior do que a região apresentada no teste prático. Além disso, deve-se considerar a escalabilidade de um teste prático realizado por possíveis empresas prestadoras de serviço de IoT e, logicamente, valores muito elevados de N, até mesmo N = 50, poderiam ser inviáveis. Mesmo assim, buscando uma relação entre um valor satisfatório de N para produzir estimativas razoáveis e a duração dos testes, optou-se por utilizar N = 50 pontos de coleta. O parâmetro $\hat{\beta}$ foi estimado em 4,37 por meio da equação (3.54) e o valor de $P_{rx}(d_0)$ foi medido a uma distância de $d_0 = 1$ m da ERB, resultando em -34,5 dBm.

Nos pontos destacados na Figura 5.1 foram medidos os valores de potência de recepção e da PSR, e na Figura 5.7 são apresentados seus semivariogramas e covariogramas experimentais e os modelos ajustados. Observa-se que existe a captura efetiva de correlação espacial ao observar a proximidade das estimativas experimentais em relação aos seus respectivos modelos analíticos. Neste caso, assim como nas simulações, o modelo $\alpha - Stable \operatorname{com} \alpha = 1,75$ foi utilizado para produzir os modelos analíticos tomando como base as estimativas experimentais. A variância Sill no semivariograma da potência foi atingida em $S_{Prx} = 22,46$ e o range foi de $r_{Prx} = 33,51$ m; já para a PSR, a variância Sill foi de $S_{PSR} = 2.040$ e range foi estimado em $r_{PSR} = 65,18$ m.



Figura 5.7 – Semivariogramas e covariogramas.

Na Figura 5.8 são apresentados os mapas REM da potência e da PSR na região ilustrada na Figura 5.1. Com relação ao REM da potência, nota-se que houve a captura da correlação espacial entre amostras separadas por distâncias pequenas e que a potência tende a diminuir com o aumento da distância em relação à ERB, como esperado. Além disso, a variação de potência observada nessa região é bastante distinta dos mapas da potência média, o que caracteriza a presença do desvanecimento. Já em relação ao mapa da PSR, observou-se a existência de aglomerados (ilhas) nos quais é possível oferecer serviço (regiões nas quais a PSR é elevada). Isso quer dizer que as regiões onde se pode garantir serviço não estão relacionadas somente ao fator distância da ERB, pois devese incluir as características e peculiaridades de cada região. Um exemplo disso pode ser observado ao comparar os resultados obtidos nos pontos 11 e 14. O ponto 11 está mais distante da ERB e, mesmo assim, é possível garantir serviço com PSR elevada. Já o ponto 14, que está mais próximo da ERB, apresentou uma PSR inferior ao que foi medido no ponto 11. Neste caso, detectou-se aos arredores do ponto 14 uma região afetada pelos efeitos de desvanecimento, contribuindo para a redução da PSR. Por outro lado, no ponto 11, as condições físicas contribuíram para a obtenção de uma PSR elevada.



Figura 5.8 – REM da potência e da PSR.

Nas Figuras 5.9 e 5.10 são apresentados os mapas REM da potência e da PSR em três dimensões. No mapa da potência, nota-se a presença de um "vale", indicando a existência de uma região sombreada. Analogamente, no REM da PSR, a presença de dois aglomerados, separados por um vale central, indica a influência do desvanecimento na taxa de serviço.

Após a obtenção das estimativas via KO apresentadas no REM prático, é necessário cumprir uma etapa de validação. Uma primeira análise pode ser feita por meio da Variância Kriging (VK), que se trata se uma medida de dispersão das estimativas. Na Figura 5.11 é apresentada a VK dos mapas REM práticos apresentados anteriormente. Tanto para a potência quanto para a PSR, a VK aponta que as maiores incertezas ocorreram nos locais caracterizados pela ausência de VRs, se concentrando principalmente nas



margens dos mapas.

Figura 5.9 – REM da potência de recepção em três dimensões.



Figura 5.10 – REM da PSR em três dimensões.

Neste caso, a distribuição espacial escolhida no trabalho prático contribuiu para que as dispersões fossem de baixa magnitude, principalmente nos locais próximos dos pontos de coleta. Além da VK, a maneira ideal para validar o REM seria por meio do RMSE aplicado em toda a região, porém isso é inviável experimentalmente. Na próxima Seção será apresentada a etapa de validação cruzada, que é uma alternativa para avaliar o desempenho do REM.



Figura 5.11 – Variância Kriging.

5.2.2 Validação Cruzada

Para a etapa de validação cruzada, foram realizadas medições em campo da potência e da PSR em dez pontos extras. O objetivo desta etapa é comparar os valores reais com as estimativas, permitindo a avaliação de desempenho.



Figura 5.12 – REM da potência de recepção com os pontos de validação cruzada.

Nas Figuras 5.12 e 5.13 são mostrados os mapas REM com os dez pontos de

validação, nomeados de v_1 a v_{10} . As Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam os valores medidos (reais) e os estimados pelo REM nos pontos de validação, para a potência de recepção e PSR, respectivamente.

O RMSE da potência, levando em consideração os dez pontos de validação, foi de 6,08 dB. Já para a PSR, o V_{PSR} foi de 0,32. Observa-se que em alguns dos pontos de validação, os valores estimados ficaram distantes dos valores reais, como é o caso do ponto v_1 (variação próxima de 15 dB para a potência). Ao analisar a Figura 5.1, nota-se que o ponto de validação v_1 está cercado principalmente pelos pontos 7, 8, 15 e 17 e, por esse motivo, a estimativa produzida em v_1 foi próxima aos valores mensurados nesses quatro pontos.



Figura 5.13 – REM da PSR com os pontos de validação cruzada.

As potências medidas nos pontos 7, 8, 15 e 17 foram de -97,5; -96,5; -92,1 e -92,81 dBm respectivamente, e a estimativa produzida em v_1 foi de -96,40 dBm, que é um resultado coerente. Por outro lado, a diferença entre valores reais e estimados pode ser explicada pela condição privilegiada no qual v_1 se encontrava: poucas árvores e postes obstruindo o sinal de RF e uma visada privilegiada se comparada com os demais pontos. Da mesma maneira, a PSR estimada ficou bem diferente do valor real medido em v_1 , pois deve-se aplicar o mesmo raciocínio da análise da potência.

Ponto	Distância	$P_{rx,i}$ (dBm)	$\hat{P}_{rx,i}$ (dBm)	$ P_{rx,i} - P_{rx,i}^* $
i	até a base (m)	Real	REM	(dB)
1	112,42	$-81,\!05$	-96,4	$15,\!35$
2	125,41	-90,35	$-92,\!95$	2,60
3	105,30	-86,41	$-85,\!51$	0,90
4	161,57	-96,5	-92,96	3,54
5	63,17	-77,76	$-76,\!14$	1,62
6	211,88	-91,41	$-94,\!65$	3,24
7	137,78	-94,5	-97,5	3,00
8	174,83	-98,34	$^{-100,4}$	2,06
9	20,35	-63,96	$-61,\!16$	2,80
10	60,33	-89,36	-80,46	8,90

Tabela 5.2 – Validação cruzada do mapa da potência de recepção.

Tabela 5.3 – Validação cruzada do mapa da PSR.

Ponto	Distância	PSR_i (%)	$P\hat{S}R_i$ (%)	$ PSR_i - PSR_i^* $
i	até a base (m)	Real	REM	(%)
1	112,42	99,67	45,35	54,32
2	125,41	85,67	68,62	17,05
3	105,30	97,54	99,64	2,10
4	161,57	37,00	33,87	3,13
5	63,17	99,65	100	0,35
6	211,88	48,45	54,34	$5,\!89$
7	137,78	35,20	27,24	7,96
8	174,83	28,10	22,38	5,72
9	20,35	98,00	99,20	1,20
10	60,33	47,64	51,97	4,33

Além de v_1 , o outro ponto de destaque foi o v_{10} , que apresentou uma diferença de aproximadamente 9 dB em termos de potência. As explicações para tal diferença são: $(i) v_{10}$ é caracterizado por ser uma região de forte tráfego de pessoas e, principalmente, de veículos; (ii) existiam placas metálicas, postes e coqueiros próximos a este ponto, contribuindo para a atenuação do sinal. É importante ressaltar que as técnicas da geoestatística utilizadas na modelagem do ambiente rádio, em especial a KO, levam em consideração fatores como proximidade das amostras, continuidade espacial e redundância entre dados amostrais, mas é impossível conhecer as características físicas e peculiaridades de cada ponto. Nesse sentido, a estimativa produzida no ponto v_{10} apresentou uma diferença significativa em relação do valor real.

Na prática da Fase I, pontos como v_1 e v_{10} podem trazer problemas para o operador da RSSF durante prestação de serviços, devido ao baixo desempenho das estimativas produzidas nos mapas REM. Neste caso, algumas soluções podem ser empregadas, tais como aumentar a quantidade de amostras para a geração de novos mapas REM com estimativas mais confiáveis ou; reorganizar a distribuição espacial das amostras.

Deve ser destacado que a execução da Fase I apresentada nesse trabalho foi realizada considerando todas as etapas dessa fase em condições não automatizadas. Isso quer dizer que os executores dessas etapas devem ter algum conhecimento nas áreas envolvidas, como medição de sinal de RF e processamento de sinais. Em uma implementação comercial da metodologia proposta, a Fase I deverá ser executada supondo que o operador tenha pouco conhecimento sobre os processos envolvidos. Assim, por exemplo, a coleta das medidas de RF (potência e PSR) e da localização poderia ser feita de forma automatizada através de um dispositivo operado por uma pessoa percorrendo a região de serviço. Esse dispositivo seria usado também para o envio dessas informações para um servidor na Internet. Neste servidor, as informações sobre as coordenadas das amostras e as métricas de rede são computadas para a geração do REM, que poderia ser visualizado em uma aplicativo web.

5.3 Fase II - Monitoramento em Tempo Real

A Fase II da metodologia se inicia após a instalação dos dispositivos de rede que irão atender as necessidades do cliente. Considera-se que a infraestrutura da rede de sensores está em operação coletando as informações dos clientes. Mesmo coletando tais informações, a rede de sensores também pode adquirir as métricas de rede para verificar a qualidade do serviço prestado, e isso pode ser realizado por meio de duas estratégias: (i) coletar as métricas de rede e as métricas da aplicação no mesmo pacote de dados ou; (*ii*) utilizar um pacote específico para a coleta das métricas de rede. Vale ressaltar que, neste último caso, é preciso criar uma temporização entre os diferentes tipos de pacote (de dados da aplicação e de métricas de rede), e isso irá depender da aplicação e das limitações tecnológicas do sistema. Em resumo, a escolha da estratégia deverá depender da aplicação solicitada pelo cliente, envolvendo, por exemplo, a frequência de coleta de dados ao longo de um dia. Neste trabalho, optou-se por utilizar a estratégia (i) pois a aplicação que será considerada é de pouca complexidade, com uma quantidade de bytes pequena. Na Figura 5.14 são apresentadas as etapas da Fase II, referentes ao monitoramento em tempo real de uma RSSF. A métrica escolhida para a aplicação será a tensão da bateria que fornece energia ao dispositivo de rede, e as métricas de rede são o RSSI (para monitorar a potência de recepção) e a PSR. Por meio das métricas de rede, é possível atualizar os mapas REM no sentido de detectar possíveis oscilações que possam afetar a QoS. Por outro lado, as métricas e estatísticas promovidas pelo método GEM foram implementadas no IoT Proxy Manager (IPM) com o objetivo de gerar informações úteis ao operador da RSSF, além
dos mapas REM. Com esse conjunto, o operador poderá detectar possíveis problemas no sistema antes mesmo que o cliente fique ciente do ocorrido. Dessa maneira, os problemas poderão ser corrigidos com eficiência e, de preferência, sem gerar insatisfação por parte dos clientes. Nas seções seguintes serão apresentados os detalhes a respeito da Fase II.



Fase II – Monitoramento do sistema em tempo real (pós-instalação)

Figura 5.14 – Etapas da fase II.

Para tanto, utilizou-se o conceito do IPM avaliado em [28], integrado ao sistema de gerenciamento de redes de computadores Zabbix [29], ambos em um contexto diretamente focado para aplicações de IoT. O desenvolvimento do software de gerência foi feito utilizando a linguagem de programação Python e utilizou-se o servidor Grafana para a apresentação das informações tanto para os operadores da rede quanto para os usuários da aplicação. A seguir serão apresentados os detalhes a respeito do monitoramento em tempo real.

5.3.1 Obtenção das Métricas de Rede e da Aplicação

As métricas de rede são obtidas ao mesmo tempo que informações da aplicação, ou seja, no mesmo pacote de dados. A medida da potência foi calculada pela expressão (5.1), em função do indicador RSSI. Já a tensão da bateria é obtida por meio de um circuito divisor resistivo, que está disponível na placa de aplicação ilustrada na Figura 5.3.

Ressalta-se que a ERB foi configurada para solicitar os pacotes de dados aos nós sensores. Nesse cenário, foram coletadas as potências de recepção: de (i) Downlink, relativo ao pacote enviado pela ERB e recebido no nó sensor e; de (ii) Uplink, referente ao pacote que sai do nó sensor em direção à ERB. Além da potência, também foi obtida a PSR a cada ciclo de mil transmissões, calculada pela razão entre o número de pacotes recebidos corretamente e o número total de pacotes transmitidos. Ao final de cada ciclo, as métricas de rede foram obtidas para o processamento do GEM e também para a geração de estatísticas de primeira ordem das potências de Downlink e de Uplink.

5.3.2 Apresentação do sistema de Gerência

A metodologia proposta foi implementada em um sistema de gerência destinado à apresentação das métricas de rede e ao auxílio na tomada de decisões, que é uma tarefa de responsabilidade dos operadores da RSSF. Na Figura 5.15 é apresentada a arquitetura do sistema, que é composto pelo IPM, a ERB e os nós sensores. O IPM solicita as informações à rede de sensores por meio de protocolos pré-definidos; os pacotes de dados são coletados e as informações (de rede e da aplicação) são obtidas; as métricas de rede são processadas no IPM para a geração das métricas do GEM. Posteriormente, todas as informações são enviadas para o servidor *Zabbix* e exibidas no servidor *Grafana*.

Além disso, enquanto os clientes observam as telas de apresentação das métricas da aplicação (nesse exemplo, a tensão da bateria), o operador se encarrega de gerenciar a RSSF por meio das métricas de rede. E ainda, é possível que o operador colete as métricas de rede e dê entrada com as novas informações para a atualização dos mapas REM. Dessa maneira, com as estimativas atualizadas, pode-se prever possíveis mudanças na propagação de RF e outros fenômenos que obriguem o operador a tomar decisões (*i.e.*, interferências eletromagnéticas, aumento no tráfego de pessoas, eventuais obstruções, entre outros.).



Figura 5.15 – Arquitetura da rede de sensores.

Na Figura 5.16 é apresentada a informação da aplicação no servidor *Grafana*, que será exibida para o cliente da rede. Neste caso, considerando que se trata da tensão da bateria de um equipamento que precisa funcionar por um período de 24 horas, as informações da Figura 5.16 permitem acompanhar a queda na tensão ao longo do tempo auxiliando, portanto, na substituição preventiva da bateria.

Na Figura 5.17 são apresentadas as informações de gerência de rede, medidas para um único enlace e considerando uma janela de mil transmissões de pacotes. Quando uma janela é finalizada, o IPM processa os dados coletados e atualiza a tela da Figura 5.17. Na sequência, uma nova janela de mil transmissões é iniciada e o processo se repete.



Figura 5.16 – Informações da aplicação.

As informações disponíveis são:

- Estatísticas de primeira ordem Média, máximo, mínimo e desvio padrão das potências de Downlink e de Uplink. Essas métricas são utilizadas para fazer uma avaliação da variação da potência;
- PSR É a taxa de sucesso de pacotes, obtida pela razão entre o número de pacotes recebidos corretamente e o número total de pacotes transmitidos;
- **PER** É a taxa de perda de pacotes, igual à 1-PSR;
- Métricas do GEM São as probabilidades de transição $p \in r$, as probabilidades estacionárias $\pi_B \in \pi_R$ e a métrica μ , calculadas como indicado na Seção 3.1.

O operador também poderá acompanhar individualmente o estado de cada nó sensor, levando em consideração as métricas de rede aqui destacadas. E por fim, é apresentada na Figura 5.18 a visão geral da Fase II da metodologia proposta, em que são exibidas as informações da aplicação e da gerência de rede.

Máx - Downlink	Máx - Uplink	Média - Downlink	Média - Uplink		Mín - Downlink		Mín - Uplink	
-76.00	-74.50	-78.17	-77.36		-81.00		-80.50	
dBm	dBm	dBm	dBm		dBm		dBm	
PER	PSR	D. Padrão	D. Padrão - Downlink			D. Padrão - Uplink		
2.00%	98.00%	1.38	1.38 dB			1.56 dB		
р	r	πв		πr		μ		
0.02	1.00	0.98		0.4		-0.02		

Figura 5.17 – Informações fornecidas pela ferramenta de gerência.



Figura 5.18 – Divisão em duas instâncias: do cliente e do operador.

No mesmo sistema, foram construídas duas instâncias distintas referentes ao cliente e ao operador. Dessa maneira, evita-se a mistura de dados de aplicação e de gerência, o que auxilia na organização das estruturas na hierarquia proposta na ferramenta.

5.3.3 Detecção de Falhas e Oscilações

A detecção de falhas e oscilações consiste em um conjunto de rotinas desenvolvidas com base nas métricas de rede, obtidas a partir da rede de sensores. Além das informações produzidas pelos mapas REM, pode-se detectar as oscilações do canal de RF em tempo real. Para visualizar as oscilações das potências de recepção de Downlink e de Uplink, a ferramenta de gerência possui um mecanismo para apresentar essas métricas em tempo real. A Figura 5.19 mostra um exemplo com medições reais. Neste caso, tais variações podem ter sido causadas devido a mobilidade, interferências eletromagnéticas e outros fatores que influenciam no desvanecimento. Com o auxílio da ferramenta de gerência, é possível detectar essas oscilações automaticamente e, por exemplo, enviar um e-mail aos responsáveis pelo sistema para notificar o ocorrido.



Figura 5.19 – Detecção de oscilações de potência.

Outro problema que pode ser identificado pelo sistema de gerência consiste na assimetria entre as potências de Downlink e de Uplink. Pelo fato dos dispositivos de rede estarem estáticos a uma distância fixa e, teoricamente, transmitindo suas informações com as mesmas potências, é esperado que as potências de recepção sejam próximas. O que ocorre em algumas situações é que, por motivos de mal funcionamento, alguns dispositivos de rede podem transmitir com potências menores. Geralmente, esses problemas ocorrem nos nós sensores, principalmente nas aplicações em ambientes *outdoor* em que os nós sensores estão sujeitos às condições externas. Tendo em vista este problema, foi desenvolvida a seguinte estratégia para detectar tal situação: uma variável indicadora de assimetria foi configurada na ferramenta de gerência para acompanhar a diferença entre as potências de Downlink e de Uplink; se a diferença entre elas era maior do que 10 dB, então o sistema acusava assimetria de potência (indicador em nível alto), tal como é mostrado na Figura 5.20 (nos instantes iniciais). Note-se que, em um dado momento, o problema de assimetria foi corrigido tal como está destacado na própria Figura 5.20. Observa-se que houve uma mudança no nível do indicador no momento em que as potências voltaram a ser próximas, indicando que a ferramenta de gerência é capaz de detectar assimetria de potência e gerar alertas ao operador.



Figura 5.20 – Detecção de assimetria entre as potências de Downlink e de Uplink.

5.3.4 Atualização do REM

Oscilações de potência podem aparecer em sistemas de transmissão de RF, uma vez que o canal sem fio é dinâmico e está sujeito ao desvanecimento. No exemplo mostrado na 5.19, a variação de potência de recepção destacada pode ser o início de um problema que pode futuramente degradar a qualidade do serviço prestado (isso envolve problemas físicos de conexão de RF ou até mesmo novas condições de desvanecimento). Ao detectar esse tipo de variação, um operador pode desejar conhecer mais informações não só no local em que foram feitas as medidas como também nas regiões vizinhas. Neste caso, pode-se solicitar a atualização do REM para visualizar as novas estimativas na região em que os terminais de rede foram instalados. Sendo assim, suponha que os cinquenta pontos da Figura 5.1 são terminais de rede já instalados e que o terminal 33 sofreu uma atenuação de 25 dB, o que levou a uma nova PSR de 1,2 %¹. Com os novos valores do ponto 33 são gerados os mapas da Figura 5.21.



Figura 5.21 – Atualização do REM.

É evidente o impacto causado pelas mudanças no ponto 33 nos mapas REM. Ao observar especificamente essas variações, o operador da RSSF poderá tirar algumas

¹ A potência atenuou de -73,42 para -98,9 dBm. Já a PSR, que era de 98,67%, baixou para 1,2%.

conclusões: (i) pode ser um fenômeno físico e individual do terminal instalado no ponto 33 como, por exemplo, problemas em cabos e conexões físicas e falhas na potência de transmissão e; (ii) uma detecção de desvanecimento de longo prazo que afetou principalmente o ponto 33.

5.3.5 Visão Geral da Fase II

Após a realização das etapas que compõem a Fase I da metodologia proposta, que é referente aos testes de cobertura para a geração do REM, iniciam-se os procedimentos da Fase II. Nela, destacam-se as etapas de gerência da rede de sensores por meio das métricas apresentadas neste trabalho. Na Figura 5.22 é apresentado um fluxograma que descreve sequencialmente o conjunto de ações que podem ser executadas na Fase II. As métricas de rede devem ser coletadas e submetidas a três estruturas condicionais para o tratamento de: (*i*) oscilações da potência de recepção; (*ii*) assimetria de potência nos enlaces downlink e de uplink, e (*iii*) oscilações na taxa de pacotes recebidos corretamente, pela observação da métrica μ . Cada uma das condições deverá acionar o operador da RSSF, que irá atualizar os mapas REM e observar graficamente o novo estado da RSSF. A partir dos novos resultados, o operador poderá tomar decisões como substituir os módulos de RF dos terminais de rede.



Figura 5.22 – Fluxograma da Fase II.

Conclusão

Este trabalho apresenta o estudo e a implementação de uma metodologia capaz de avaliar a QoS de redes de sensores sem fio, voltada para prestadores de serviço de IoT. A metodologia de gerenciamento apresentada é dividida em duas fases. A Fase I consiste em um teste de cobertura de RF para a geração de mapas de ambiente rádio em função das métricas potência de recepção e PSR, visando a caracterização dos enlaces de RF ao longo da área de serviço. Por meio desses mapas, os operadores poderão avaliar o comportamento geral da rede, identificando regiões que requerem a instalação de terminais repetidores de sinal ou de outras ERBs. Além disso, esses mapas podem fornecer informações para basear a definição de parâmetros de contrato de serviço entre o operador e os clientes.

A Fase II ocorre após a instalação dos nós sensores dos clientes que compõem a RSSF. Para a Fase II, foi desenvolvida uma ferramenta básica de gerência utilizando o conceito do IoT Proxy Manager (IPM), que serviu como prova de conceito da ferramenta para gerenciar uma RSSF e monitorar o desempenho de seus enlaces. Uma aplicação de medição da bateria foi configurada e, no mesmo pacote de dados, as métricas de rede foram enviadas. As informações coletadas foram disponibilizadas em dois grupos: de aplicação e de rede. Os exemplos de detecção de assimetria e de oscilações foram mostrados no interior da ferramenta de gerência. Quando são detectadas oscilações por meio das métricas de rede, os operadores podem atualizar os mapas REM e avaliar o estado geral da rede. Dessa maneira, foi destacado que é possível detectar mudanças no ambiente rádio ao longo do tempo.

De maneira geral, a metodologia permite que o Operador da RSSF identifique os problemas que ocorrem em termos da propagação de sinais de RF, e tome as devidas medidas para corrigi-los. A ferramenta de gerência apresentada neste trabalho define a estrutura básica de uma ferramenta comercial, na qual as Fases I e II da metodologia seriam automatizadas. Futuramente, técnicas de *Machine Learning* poderão ser implementadas a fim de automatizar os processos, reduzindo a necessidade de ações humanas no processo de gerência da rede.

Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros são sugeridos os seguintes temas:

• Aprimoramento das técnicas e modelos matemáticos utilizados no ambiente rádio a fim aperfeiçoar as estimativas produzidas via KO;

- Investigação de uma modelagem de ambiente rádio mais sofisticada para aprimorar o REM da PSR;
- Desenvolvimento e investigação de novas técnicas de interpolação para comparar com os resultados da KO;
- Desenvolvimento do sistema de gerência fundamentado no conceito do IoT Proxy Manager no sentido de incorporar a produção dos mapas REM em tempo real;
- Introduzir um detector de desvanecimento na prática com base nos mapas REM, e aplicá-lo em sistemas de RSSF;
- Explorar a utilização de outras métricas de RSSF e gerar mapas REM com base nelas;
- Implementação do REM em sistemas com repetidores e levando em consideração a presença de duas ou mais ERBs;
- Utilização dos mapas REM para acesso dinâmico ao espectro, permitindo verificar quais as melhores frequências para realizar a transmissão de dados;
- Integração da metodologia proposta com outros tipos de tecnologia de radiofrequência, como por exemplo LoRaWAN, Nb-IoT e Sigfox;
- Implementação de técnicas de *Machine Learning* nos dados coletados via rede de sensores para criar etapas de aprendizagem de parâmetros e tomada de decisões automatizadas.
- Automatização dos processos que envolvem os testes de cobertura por meio da utilização de Drones, capazes de coletar as métricas de rede e enviá-las para a unidade de processamento.

Referências

- M. A. Feki, F. Kawsar, M. Boussard, and L. Trappeniers, "The internet of things: The next technological revolution," *Computer*, vol. 46, no. 2, pp. 24–25, Feb 2013. Citado na página 19.
- [2] J. R. TI Inside. (2018, jun) Iot vai crescer 140% e atingir 50 bilhões de dispositivos até 2022. [Online]. Available: https://www.conversadeti.com.br/ iot-vai-crescer-140-e-atingir-50-bilhoes-de-dispositivos-ate-2022/ Citado na página 19.
- [3] J. Ren, Y. Pan, A. Goscinski, and R. A. Beyah, "Edge computing for the internet of things," *IEEE Network*, vol. 32, no. 1, pp. 6–7, Jan 2018. Citado na página 19.
- [4] S. Kulkarni, S. Durg, and N. Iyer, "Internet of things (iot) security," in 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDI-ACom), March 2016, pp. 821–824. Citado na página 19.
- [5] L. Kaul and R. H. Goudar, "Internet of things and big data challenges," in 2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET), Nov 2016, pp. 1–5. Citado na página 19.
- [6] U. Ahsan and A. Bais, "A review on big data analysis and internet of things," in 2016 IEEE 13th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS), Oct 2016, pp. 325–330. Citado na página 19.
- [7] M. R. Bashir and A. Q. Gill, "Towards an iot big data analytics framework: Smart buildings systems," in 2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 14th International Conference on Smart City; IEEE 2nd International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS), Dec 2016, pp. 1325–1332. Citado na página 19.
- [8] P. S. Pandey, "Machine learning and iot for prediction and detection of stress," in 2017 17th International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA), July 2017, pp. 1–5. Citado na página 19.
- [9] A. A. Osuwa, E. B. Ekhoragbon, and L. T. Fat, "Application of artificial intelligence in internet of things," in 2017 9th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), Sep. 2017, pp. 169–173. Citado na página 19.

- [10] E. TagoIO. Plataforma de internet das coisas tagoio. [Online]. Available: https://tago.io/ Citado na página 19.
- [11] E. MathWorks. Plataforma de internet das coisas thingspeak. [Online]. Available: https://thingspeak.com/ Citado na página 19.
- [12] E. IBM. Plataforma de internet das coisas ibm watson. [Online]. Available: https://www.ibm.com/watson/br-pt/ Citado na página 19.
- [13] I. CPqD. Plataforma de internet das coisas dojot. [Online]. Available: http: //www.dojot.com.br/ Citado na página 19.
- [14] B.-C. devices and solutions. Kits de sensores e atuadores desenvolvido pela bosch, para treinamento em internet das coisas. [Online]. Available: https://www.bosch-connectivity.com/ Citado na página 19.
- [15] V. Moreno-Cano, F. Terroso-Saenz, and A. F. Skarmeta-Gómez, "Big data for iot services in smart cities," in 2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Dec 2015, pp. 418–423. Citado na página 19.
- [16] M. C. V. I. F Akyilds, Wireless Sensor Networks, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 19, 29, 30, 36 e 48.
- [17] Y. Song, J. Lin, M. Tang, and S. Dong, "An internet of energy things based on wireless lpwan," *Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 460–466, 2017. [Online]. Available: http: //www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917306057 Citado 2 vezes nas páginas 20 e 29.
- [18] J. Bardyn, T. Melly, O. Seller, and N. Sornin, "Iot: The era of lpwan is starting now," in ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference, Sep. 2016, pp. 25–30. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 29.
- [19] L. Alliance. (2015) Ecossistema mundial lora alliance, formada por mais de 500 países membros. [Online]. Available: https://lora-alliance.org/lorawan-for-developers Citado 3 vezes nas páginas 20, 28 e 36.
- [20] D. Cooking-Hacks. (2015)Testes de enlaces de longo alcance realicom tecnologia lora, arduino, libelium, intel-galileo e raspberry zados pi. [Online]. Available: https://www.cooking-hacks.com/documentation/tutorials/ extreme-range-lora-sx1272-module-shield-arduino-raspberry-pi-intel-galileo Citado na página 20.
- [21] G. Gaillard, D. Barthel, F. Theoleyre, and F. Valois, "Service level agreements for wireless sensor networks: A wsn operator's point of view," in 2014 IEEE Network

Operations and Management Symposium (NOMS), May 2014, pp. 1–8. Citado 4 vezes nas páginas 20, 22, 23 e 27.

- [22] M. D. Yacoub, Foundations of Mobile Radio Engineering, 1st ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 1993. Citado 5 vezes nas páginas 20, 21, 36, 46 e 47.
- [23] A. Fanimokun and J. Frolik, "Effects of natural propagation environments on wireless sensor network coverage area," in *Proceedings of the 35th Southeastern Symposium* on System Theory, 2003., March 2003, pp. 16–20. Citado na página 21.
- [24] P. Mestre, J. Ribeiro, C. Serôdio, and J. Monteiro, "Propagation of ieee802.15.4 in vegetation," 2011. Citado na página 21.
- [25] M. D. Yacoub, "The α-μ distribution: A physical fading model for the stacy distribution," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 27–34, Jan 2007. Citado na página 21.
- [26] M. D. Yacoub, "The κ-μ distribution and the η-μ distribution," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 49, no. 1, pp. 68–81, Feb 2007. Citado na página 21.
- [27] N. Baccour, A. Koubâa, L. Mottola, M. A. Zúñiga, H. Youssef, C. A. Boano, and M. Alves, "Radio link quality estimation in wireless sensor networks: A survey," *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 8, no. 4, pp. 34:1–34:33, Sep. 2012. [Online]. Available: http://doi.acm.org/10.1145/2240116.2240123 Citado na página 21.
- [28] R. F. Oliveira, "Proposta de um proxy manager para internet das coisas," Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2016. Citado 9 vezes nas páginas 23, 27, 29, 30, 32, 33, 34, 35 e 109.
- [29] A. B. Déo, "Proposta de um modelo de referência open source para iot foco em pme," Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 23, 34, 35 e 109.
- [30] R. N. de Freitas, "Impacto no desempenho de rssf com diferentes técnicas de cifragem," Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2018. Citado na página 27.
- [31] O. C. Tomasini, "Avaliação de estratégia de sleepmode para rssf aplicada à monitoração de meio ambiente," Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 34.
- [32] A. F. B. Christiano, "Avaliação de mppt com conversor buck para nó sensor sem fio," Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2018. Citado na página 28.

- [33] P. Bhagwat, "Bluetooth: technology for short-range wireless apps," *IEEE Internet Computing*, vol. 5, no. 3, pp. 96–103, May 2001. Citado na página 28.
- [34] K. J. Hole, E. Dyrnes, and P. Thorsheim, "Securing wi-fi networks," *Computer*, vol. 38, no. 7, pp. 28–34, July 2005. Citado na página 28.
- [35] C. M. Ramya, M. Shanmugaraj, and R. Prabakaran, "Study on zigbee technology," in 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, vol. 6, April 2011, pp. 297–301. Citado na página 28.
- [36] A. Lavric, A. I. Petrariu, and V. Popa, "Long range sigfox communication protocol scalability analysis under large-scale, high-density conditions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35816–35825, 2019. Citado na página 28.
- [37] S. Popli, R. K. Jha, and S. Jain, "A survey on energy efficient narrowband internet of things (nbiot): Architecture, application and challenges," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 16739–16776, 2019. Citado na página 28.
- [38] B. Vejlgaard, M. Lauridsen, H. Nguyen, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, and M. Sorensen, "Coverage and capacity analysis of sigfox, lora, gprs, and nb-iot," in 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), June 2017, pp. 1–5. Citado na página 29.
- [39] A. R. B. T. E. J. C. C. A. I. C. Arce, A. C. S. Silva, "Sistema telemétrico de monitoração de temperatura para bovinos," Sept 2007. Citado na página 29.
- [40] M. E. Brak and M. Essaaidi, "Wireless sensor network in home automation network and smart grid," in 2012 IEEE International Conference on Complex Systems (ICCS), Nov 2012, pp. 1–6. Citado na página 29.
- [41] P. R. Chaves, "Redes centralizadas de sensores sem fio para pequenas e médias indústrias - um estudo preparatório para a indústria 4.0," Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 34.
- [42] R. D. G. e Marcelo S. Alencar e Iguatemi E. Fonseca e Abel C. Lima Filho, "Desafios de redes de sensores sem fio industriais," *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, vol. 4, no. 1, pp. 16–27, 2014. [Online]. Available: http://rtic.com.br/index.php/rtic/article/view/44 Citado na página 30.
- [43] K. Mikhaylov, J. Tervonen, J. Heikkilä, and J. Känsäkoski, "Wireless sensor networks in industrial environment: Real-life evaluation results," in 2012 2nd Baltic Congress on Future Internet Communications, April 2012, pp. 1–7. Citado na página 30.

- [44] F. C. Delicato, "Middleware baseado em serviços para redes de sensores sem fio," Ph.D. dissertation, Universade Federal do Rio de Janeiro, 2005. Citado na página 30.
- [45] R. M. Assumpção, "Avaliação do impacto em rede de sensores sem fim com utilização de sistema de rádio sobre fibra," Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2011. Citado na página 30.
- [46] L. C. B. C. Ferreira, "Proposta de protocolo de roteamento geográfico utilizando algoritmo de localização baseado em medidas de intensidade de sinal," Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, 2014. Citado na página 32.
- [47] S. Lindsey, C. Raghavendra, and K. M. Sivalingam, "Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics," *IEEE Transactions on Parallel and Distribu*ted Systems, vol. 13, no. 9, pp. 924–935, Sep. 2002. Citado na página 32.
- [48] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Jan 2000, pp. 10 pp. vol.2–. Citado na página 32.
- [49] B. K. Maharrey, A. S. Lim, and S. Gao, "Interconnection between ip networks and wireless sensor networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 8, no. 12, p. 567687, 2012. [Online]. Available: https: //doi.org/10.1155/2012/567687 Citado na página 33.
- [50] E. Alessio, A. Bragagnini, G. Perbellini, and D. Quaglia, "Gateway and middleware design: trusted wsn-tlc network communication and enhanced wsn management," in 2007 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, Dec 2007, pp. 637–640. Citado na página 34.
- [51] E. A. N. Matthiesen, "Proposta de escopo de engenharia de iot," Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2018. Citado na página 34.
- [52] J. Zyren and A. Petrick, "Tutorial on basic link budget analysis," in Empresa Americana de Semicondutores - Intersil, Jun 1998. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 48.
- [53] T. Instruments, Low-Power Sub-1GHz RF Transceiver CC1101, Chipcon Product Data Sheet. Citado 4 vezes nas páginas 36, 97, 98 e 99.
- [54] A. Bildea, "Link quality in wireless sensor networks," 2013. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 43.

- [55] R. Augusto and C. Panazio, "On geostatistical methods for radio environment maps generation under location uncertainty," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 33, no. 1, May 2018. [Online]. Available: https: //jcis.sbrt.org.br/jcis/article/view/477 Citado na página 37.
- [56] R. A. S. Júnior, "Geração de mapas de ambiente de rádio em sistemas de comunicações sem fio com incerteza de localização," Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo, 2018. Citado 7 vezes nas páginas 37, 48, 50, 51, 53, 67 e 69.
- [57] J. A. V. Poblete, "Wireless sensor network and kriging," Master's thesis, University of Valencia, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 56.
- [58] R. Augusto and C. Panazio, "Sobre a geração de mapas de ambiente de rádio com kriging ordinário," in SBrT 2016 - XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Sept 2016, pp. 883–887. Citado na página 37.
- [59] S. Chou, H. Yen, and A. Pang, "A rem-enabled diagnostic framework in cellularbased iot networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 5273–5284, June 2019. Citado na página 37.
- [60] G. Hernández-Peñaloza and B. Beferull-Lozano, "Field estimation in wireless sensor networks using distributed kriging," in 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 2012, pp. 724–729. Citado na página 37.
- [61] G. Boccolini, G. Hernández-Peñaloza, and B. Beferull-Lozano, "Wireless sensor network for spectrum cartography based on kriging interpolation," in 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - (PIMRC), Sep. 2012, pp. 1565–1570. Citado na página 37.
- [62] S. M. Kay, Intuitive Probability and Random Processes Using MATLAB. University ofRhode Island: Springer Link, 2006. Citado na página 40.
- [63] M. J. K. Srinivasan, M. A. Kazandjieva and P. Levis, "Prr is not enough." Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- [64] E. N. Gilbert, "Capacity of a burst-noise channel," The Bell System Technical Journal, vol. 39, no. 5, pp. 1253–1265, Sep. 1960. Citado na página 43.
- [65] G. Hasslinger and O. Hohlfeld, "The gilbert-elliott model for packet loss in real time services on the internet," in 14th GI/ITG Conference - Measurement, Modelling and Evalutation of Computer and Communication Systems, March 2008, pp. 1–15. Citado na página 43.

- [66] R. R. G. Alexandre de Assis Mota, Lia Toledo Moreira Mota, "Determinação da atenuação de sinais em ambientes indoor via lógica nebulosa," in *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, vol. 32, no. 2, 2011. Citado na página 47.
- [67] C. E. Rasmussen and C. K. I. Williams, Gaussian Processes for Machine Learning. MIT Press, 2006. Citado na página 50.
- [68] D. A. Guimarães, Digital Transmission, A Simulation-aided introduction with Vis-Sim/Comm. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2009. Citado na página 50.
- [69] S. Haykin and M. Moher, Modern Wireless Communication. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 2004. Citado na página 50.
- [70] G. G. A. e. J. M. Montero, Spatial and spatio-temporal geostatistical modeling and Kriging. United Kingdom UK: John Wiley and Sons, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 51.
- [71] N. Cressie and P. Delfine, Geostatistics modeling spatial uncertainty, second edition ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 68.
- [72] A. S. da Silva, "Modelos gaussianos geoestatísticos espaços-temporais e aplicações," Master's thesis, Universidade de São Paulo, 2006. Citado na página 51.
- [73] J. K. Y. e P. M. B. Landim, Geoestatística conceitos e aplicações. Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil, 2013. Citado na página 51.
- [74] Isaaks and Srivastava, An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, 1989. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.
- [75] D. Stoyan, "Hans wackernagel: Multivariate geostatistics. an introduction with applications. with 75 figures and 5 tables. springer-verlag, berlin, heidelberg, new york, 235 pp., 1995, dm 68.-isbn 3-540-60127-9," *Biometrical Journal*, vol. 38, no. 4, pp. 454–454, 1996. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10. 1002/binj.4710380409 Citado na página 52.
- [76] E. H. I. e R.M. Srivastava, An introduction to applied geostatistics. Madison Avenue. New York: Oxford University Press, 1989. Citado na página 52.
- [77] J. F. C. L. Costa, "Introdução à geoestatística," YouTube, 8 2017, curso de geoestatística aplicada, focado nas técnicas de estimação de variáveis. Citado 4 vezes nas páginas 53, 61, 62 e 63.

- [78] N. Cressie, Statistics for spatial data, revised edition ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons, 1993. Citado na página 55.
- [79] M. A. O. e R. Webster, Basic steps in geostatistics: The variogram and Kriging. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London: SpringerBriefs in Agriculture, 2015. Citado na página 55.
- [80] J. C. . Chuang, "Autonomous adaptive frequency assignment for tdma portable radio systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 3, pp. 627–635, Aug 1991. Citado 2 vezes nas páginas 70 e 71.
- [81] IoTools, "Site oficial da empresa iotools," 2018, desenvolvimento de Kits para aplicação em Internet das Coisas. Citado na página 98.