



ANÁLISE DE REDES SEM-FIO PARA APLICAÇÕES DE ASSISTÊNCIA AO VISITANTE DE PARQUES FLORESTAIS

Ana Elisa Leitão Alonso Ferreira

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmalski
Costa

Rio de Janeiro
Março de 2020

ANÁLISE DE REDES SEM-FIO PARA APLICAÇÕES DE ASSISTÊNCIA AO
VISITANTE DE PARQUES FLORESTAIS

Ana Elisa Leitão Alonso Ferreira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

Prof. Célio Vinícius Neves de Albuquerque, Ph.D.

Prof. Felipe da Rocha Henriques, Dr.

Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein, D.Sc.

Prof. Miguel Elias Mitre Campista, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2020

Ferreira, Ana Elisa Leitão Alonso

Análise de Redes Sem-fio para Aplicações de Assistência
ao Visitante de Parques Florestais/Ana Elisa Leitão Alonso
Ferreira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XII, 124 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia
Elétrica, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 112 – 124.

1. Redes sem-fio. 2. IoT. 3. DTN. I. Costa, Luís Henrique
Maciel Kosmalski. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,
COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

A Deus e à minha família.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à minha família, ao meu orientador Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, aos amigos e colegas do GTA e a todos que de alguma forma colaboraram para a execução deste trabalho.

A todos os servidores da secretaria do PEE, em especial à Dani, que sempre ajudaram a resolver os problemas que surgiram ao longo dos anos de curso.

Aos colegas e amigos do CEFET pela liberação absolutamente necessária para que eu conseguisse concluir este trabalho e pelas várias dicas e sugestões que fizeram enorme diferença.

Às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPERJ, que financiaram esta pesquisa e representam um papel essencial no desenvolvimento da Ciência brasileira.

Muito especialmente, gostaria de agradecer aos meus pais, Cecília e Fernando, pelo amor e carinho, sem os quais seria impossível eu seguir minha jornada.

Ao meu companheiro, Bruno, pelo amor e paciência, com que suportou as minhas ausências dedicadas a este trabalho, e pelo incentivo sempre presente.

Aos amigos Molano e Thales, que colaboraram intensivamente para que esta tese se materializasse, tanto nos trabalhos de campo, como no tratamento dos dados e nas simulações. Não tenho palavras para agradecer a vocês! Vocês são maravilhosos!

E, acima de tudo, a Deus, nosso senhor que faz com que tudo seja possível e valha à pena! Hare Krishna!

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ANÁLISE DE REDES SEM-FIO PARA APLICAÇÕES DE ASSISTÊNCIA AO VISITANTE DE PARQUES FLORESTAIS

Ana Elisa Leitão Alonso Ferreira

Março/2020

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Programa: Engenharia Elétrica

As atividades de ecoturismo estão atraindo cada vez mais participantes e assim aumentam também os casos de visitantes de parques naturais em situações de risco. Entre os riscos mais graves estão o de se perder e a ocorrência de desastres naturais. Apresenta-se, nesta tese, um sistema para a assistência aos visitantes de parques florestais. São propostas duas formas de assistência, uma aplicação básica de segurança física, transparente ao usuário, que provê a monitoração da sua localização; e outra interativa, para fornecer dados de uso do parque para a administração e informações turísticas para o visitante. O foco deste trabalho é a aplicação de segurança, que visa auxiliar no resgate do visitante quando necessário.

Para isto é proposto um sistema de comunicação, que compreende a especificação de terminais móveis, de pontos de acesso da rede e o projeto de um protocolo para troca dos dados de localização. A infraestrutura consiste de pontos de acesso de rede de comunicação sem-fio distribuída nas trilhas, os totens, e de nós móveis, os terminais dos usuários, que atuam colaborativamente formando uma rede tolerante a atrasos e interrupções (DTN). É investigada a comunicação sem-fio dentro da floresta, através da avaliação de várias tecnologias e do estudo da propagação eletromagnética neste ambiente.

Esta tese traz desafios tecnológicos e temas de pesquisa atualmente em discussão, especialmente em Internet das Coisas e DTN. Além das melhorias e ganhos para a minimização de riscos e a interação do visitante, a proposta também traz contribuições para a preservação do meio ambiente, para a conscientização da influência da presença humana no ambiente natural e para o desenvolvimento de ações de educação ambiental. Este trabalho é realizado em parceria com o Parque Nacional da Serra dos Órgãos, unidade de conservação que abrange áreas nos municípios de Teresópolis, Petrópolis, Magé e Guapimirim.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ANALYSIS OF WIRELESS NETWORKS FOR VISITOR ASSISTANCE
APPLICATIONS INSIDE FOREST PARKS

Ana Elisa Leitão Alonso Ferreira

March/2020

Advisor: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Department: Electrical Engineering

Ecotourism activities are attracting more and more participants and so are the cases of visitors to natural parks at risk. Among the most serious risks are that of getting lost and the occurrence of natural disasters. In this thesis, a system for assisting visitors to forest parks is presented. Two forms of assistance are proposed, a basic physical security application, transparent to the user, which provides monitoring of its location; and an interactive one, to provide data on park use for administration and tourist information for the visitor. The focus of this work is the application of security, which aims to assist in the rescue of the visitor when necessary.

For this, a communication system is proposed, which includes the specification of mobile terminals, the design of a protocol for exchanging location. The infrastructure consists of wireless communication network access points distributed on the trails, the totems, and mobile nodes, the users' terminals, which work collaboratively to form a delay and disruption tolerant network (DTN). Wireless communication within the forest is investigated, through the evaluation of various technologies and the study of electromagnetic propagation in this environment.

This thesis brings technological challenges and research topics currently under discussion, especially in the Internet of Things and DTN. In addition to improvements and gains for minimizing risks and visitor interaction, the proposal also brings contributions to the preservation of the environment, raising awareness of the influence of human presence in the natural environment and to the development of environmental education actions. This work is carried out in partnership with the Serra dos Órgãos National Park, a conservation unit that covers areas in the cities of Teresópolis, Petrópolis, Magé, and Guapimirim.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Tema	4
1.2 Delimitação	5
1.3 Justificativa	7
1.4 Objetivos	7
1.5 Estrutura do Texto	8
2 Trabalhos Relacionados	9
2.1 Monitoração de Localização	9
2.2 Problemas de Cobertura	11
2.3 Projetos em Parques Naturais	12
2.4 Propagação em Meio à Vegetação	14
2.5 Considerações	16
3 Tecnologias de Comunicação Sem-Fio	17
3.1 Terminais Móveis	17
3.1.1 Terminal interativo	18
3.1.2 Terminal transparente	19
3.2 Terminais Fixos	21
3.3 Arquitetura de Redes	22
3.3.1 Redes DTN	22
3.3.2 IoT – <i>Internet of Things</i>	24
3.4 Comunicação Sem-Fio	26
3.4.1 LoRa – <i>Long Range</i>	26
3.4.2 IEEE 802.11	28
3.4.3 ZigBee	28
3.4.4 Bluetooth	30

3.5	Considerações	31
4	Avaliação de Redes Sem-Fio no Ambiente de Floresta	32
4.1	Propagação na Floresta	33
4.2	Experimentos no PARNASO	35
4.2.1	Metodologia	36
4.2.2	Cenários de testes	36
4.3	Análise do Comportamento do Sinal	40
4.3.1	Cenário estático de curta duração	40
4.3.2	Cenário estático de longa duração	43
4.3.3	Cenário com um nó móvel	46
4.3.4	Cenário com dois nós móveis	49
4.4	Modelo de Propagação	52
4.4.1	Tratamento dos dados	53
4.5	Simulação no MATLAB	58
4.6	Considerações	58
5	Projeto do Sistema de Assistência ao Visitante	60
5.1	Aplicações Propostas	61
5.1.1	Análise de requisitos	64
5.1.2	Monitoração da localização do visitante	66
5.1.3	Integração interativa com a Unidade de Conservação	68
5.2	Arquitetura da Rede Proposta	72
5.2.1	Infraestrutura fixa	72
5.2.2	LPWAN	77
5.2.3	DTN	77
5.3	Protocolo de Comunicação	80
5.3.1	Máquinas de Estados Finitos	89
5.4	Considerações	91
6	Estudo de Caso	92
6.1	Roteiro da Travessia	93
6.2	Simulação no NS-3	99
6.3	Considerações	105
7	Conclusão	107
7.1	Principais Contribuições	108
7.2	Trabalhos Futuros	110
7.3	Considerações Finais	111
	Referências Bibliográficas	112

Lista de Figuras

1.1	Sistema de assistência ao visitante.	6
4.1	Mapas da trilha.	36
4.2	(a, b) Cenário dos experimentos. (c) Protótipos dos nós.	37
4.3	Cenário estático de curta duração.	41
4.4	Pontos de medição do cenário estático de curta duração.	41
4.5	RSSI e SNR medidas em função da distância entre transmissor e receptor.	42
4.6	PDR medida em função da distância entre transmissor e receptor.	43
4.7	Módulos instalados nas árvores para as medições de longa duração	44
4.8	Teste de longa duração com SF12 à distância de 250 m entre transmissor e receptor.	44
4.9	<i>Packet inter-reception time</i> (PIR) à distância de 250 m entre transmissor e receptor.	45
4.10	<i>Packet Delivery Ratio</i> (PDR) à distância de 250 m entre transmissor e receptor.	45
4.11	Cenário com um nó móvel.	46
4.12	RSSI e SNR a 50 m/min.	48
4.13	RSSI e SNR a 100 m/min.	48
4.14	PDR no Cenário com um nó móvel.	49
4.15	Cenário com dois nós móveis.	50
4.16	RSSI e SNR a 50 m/min.	51
4.17	RSSI e SNR a 100 m/min.	51
4.18	PDR no Cenário com dois nós móveis.	52
4.19	PDF das medições de potência (W) para LoRa SF12 a uma distância de 250 m no cenário estático de longa duração.	54
4.20	PDF das medições de potência (W) para LoRa SF12 a uma distância de 250 m no cenário fixo.	56
4.21	PDF composta Nakagami e Gama das medições de potência (pW) para LoRa SF12 com $m = 3, 26$ e $m_s = 21, 045$	59

5.1	Visão geral das aplicações projetadas para o sistema de assistência ao visitante do parque florestal.	64
5.2	Visão geral da arquitetura proposta para o sistema de assistência ao visitante.	73
5.3	Mapeamento em cubos de um percurso dentro de uma região.	74
5.4	Eliminação de cubos impossíveis.	75
5.5	LPWAN – Comunicação com terminais transparentes.	78
5.6	DTN.	79
5.7	Formato das mensagens, indicando nome do campo e seu comprimento em bits, entre parênteses.	84
5.8	Comunicação entre terminais em operação normal.	85
5.9	Comunicação entre totem e terminal.	88
5.10	Comunicação em situação de emergência.	89
5.11	Máquina de estados da comunicação entre totem e terminal.	90
5.12	Máquina de estados da comunicação entre terminais.	91
6.1	Percurso da travessia Petrópolis-Teresópolis.	93
6.2	Paisagem do segundo dia.	94
6.3	Locais para a instalação de totens.	94
6.4	RSSI em função da distância e da velocidade – cenário com um nó móvel – simulado x prático.	101
6.5	RSSI em função da distância entre transmissor móvel e receptores fixos para o primeiro dia de trilha – simulado.	102
6.6	RSSI em função da distância entre transmissor móvel e receptores fixos para a trilha completa – simulado.	102
6.7	PDR em função da distância e da velocidade – cenário com um nó móvel – simulado x prático.	103
6.8	Carga acumulada oferecida à rede em função da distância e da velocidade com um nó móvel percorrendo toda a trilha.	104

Lista de Tabelas

3.1	Comparação entre tecnologias de redes sem-fio para o <i>smartphone</i>	20
3.2	Comparação entre tecnologias de redes sem-fio para o terminal vestível.	20
3.3	Valores teóricos da taxa de transmissão.	27
4.1	Componentes de hardware dos protótipos.	40
4.2	Parâmetros de configuração.	40
4.3	PIR - Estatísticas descritivas.	45
4.4	Quantidade de amostras para o deslocamento a 50m/min.	47
4.5	Quantidade de amostras para o deslocamento a 100m/min.	47
4.6	Tempo de contato no cenário com um nó móvel.	49
4.7	Quantidade de amostras para o deslocamento dos dois terminais a 50 m/min.	50
4.8	Quantidade de amostras para o deslocamento dos dois terminais a 100 m/min.	50
4.9	Tempo de contato no cenário com dois nós móveis.	52
4.10	Log-likelihood dos modelos avaliados para variações em pequena escala.	54
4.11	Log-likelihood dos modelos avaliados para variações em larga escala.	56
5.1	Características principais dos dois tipos de terminal.	63
5.2	Notações utilizadas no problema.	77
6.1	Parâmetros de simulação no NS-3.	100

Capítulo 1

Introdução

O ecoturismo, segundo o Fórum Econômico Mundial em seu relatório *The Travel & Tourism Competitiveness Report 2017: Paving the Way for a More Sustainable and Inclusive Future* [1], é uma atividade econômica que contribui fortemente para a geração e distribuição de renda, especialmente em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento. Além de ajudar a reduzir a miséria, o ecoturismo auxilia a preservação de ecossistemas ameaçados. Em seu relatório global *Global Report on Adventure Tourism* [2] de 2014, a Organização Mundial do Turismo já indicava que o ecoturismo é a modalidade de turismo que mais cresce e esta tendência se mantém desde então [3].

As Unidades de Conservação (UC) ambiental, como parques e reservas florestais, cumprem um papel relevante dentro do ecoturismo. Estas entidades desenvolvem funções extremamente importantes na preservação do meio ambiente, na promoção da educação ambiental e integração da sociedade com o ambiente natural. Entretanto, o ambiente natural apresenta riscos inerentes e o aumento do interesse da população em geral pelo ecoturismo, assim como a falta de tecnologias e sistemas de apoio, fazem com que os casos de visitantes em situações de risco também aumentem. Entre os riscos mais graves para os visitantes presentes nas UCs estão o de se perder ou se acidentar em um ambiente desconhecido e a ocorrência de desastres naturais, como cabeças d'água e incêndios florestais.

A cabeça d'água, ou tromba d'água, é um fenômeno que ocorre principalmente durante o período chuvoso, consistindo de um aumento repentino do volume dos rios. Isto ocorre em função das nuvens baixas, carregadas de chuva, que se chocam com os cumes das serras e se precipitam. Em locais em que há um acentuado desnível das encostas, a água desce em grande velocidade, atingindo o pé da serra, provocando acidentes e mortes, algumas vezes [4]. A gravidade e a rapidez com que este tipo de desastre ocorre colocam em sério risco o visitante desavisado. Hoje em dia, nos parques brasileiros, a monitoração normalmente é feita pela observação visual dos cumes e os guarda-parques alertam diretamente as pessoas que se encontram nos rios e nas cachoeiras. Somar a essas medidas de proteção um sistema de alerta automatizado poderia auxiliar e agilizar a divulgação do alerta, reduzindo bastante o perigo.

Os incêndios florestais também são um grande risco, tanto para a unidade de conservação como para visitantes e as populações do entorno. A prevenção e a identificação precoce dos focos de incêndio são muito importantes para evitar danos potencialmente graves à fauna, flora e visitantes. Para combater e prevenir incêndios florestais nas áreas fluminenses de conservação, o Corpo de Bombeiros, a Defesa Civil, o INEA (Instituto Estadual do Ambiente), o IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), o ICMBio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade) e outros órgãos responsáveis fazem um acompanhamento meteorológico, hidrológico e geológico, em caráter permanente [5]. Este esforço é incrementado durante a estiagem com o emprego de brigadistas e prontidão das equipes de guarda-parques [6]. Sensores de temperatura, pressão atmosférica, fumaça, monóxido de carbono, dióxido de carbono, umidade do solo e som, entre outros, podem ser usados para a detecção de focos de incêndio. Redes de sensores sem-fio podem ser usadas para o escoamento destes dados com vantagens em relação aos sistemas tradicionais de visualização em torres de fogo ou monitoração via satélite [7]. Adicionalmente, o uso de soluções complementares, em que o visitante da unidade de conservação comunica a visualização de focos de incêndio podem auxiliar no combate ao fogo. Esta ação colaborativa também permite aumentar a conscientização, principal fator na prevenção de incêndios florestais.

Já o atendimento às ocorrências de visitantes perdidos ou acidentados em ambientes naturais demandam a sua geolocalização, além dos meios de comunicação. Para isso é necessário determinar a posição do usuário e comunicá-la a um sistema de rastreo. O uso de sistemas de navegação por satélite, como o GPS (*Global Positioning System*), torna a determinação da posição do visitante uma tarefa simples. Entretanto, nem sempre é possível contar com este recurso no interior das UCs. Quando o visitante se localiza próximo a paredões de pedra, em regiões de mata muito fechada ou mesmo em dias de tempo muito chuvoso, pode ser difícil conseguir comunicação com a quantidade mínima de satélites para realizar a correta geolocalização. Nestas situações é necessário explorar o uso de tecnologias alternativas. Em ambientes *indoor*, têm sido usados Wi-Fi (IEEE 802.11), ZigBee e Bluetooth, entre outras tecnologias, para a tarefa de determinar a localização [8, 9]. Nos ambientes *outdoor*, as tecnologias de redes de baixo consumo e longo alcance (LPWAN – *Low Power Wide Area Network*) têm sido estudadas como alternativas para a geolocalização e rastreamento (*tracking*). Duas das principais tecnologias de LPWAN comercialmente disponíveis são o LoRa (*Long Range*) [10] e o Sigfox [11]. Outra alternativa de rastreamento são os sistemas de localização baseados em assinaturas digitais (*fingerprint*), em que são usadas pistas, que podem ser imagens, nível de sinal de APs (*Access Points*) ou BSs (*Base Stations*), previamente coletados em cada local de referência, ou dados de sensores de *smartphones* para determinar a posição do usuário [12]. Uma vez determinada, a posição do visitante precisa ser comunicada a um sistema de rastreo ou de alarme, que permita a mobilização de equipes de salvamento, caso necessário.

Estes importantes riscos a que os visitantes estão expostos em ambientes florestais podem ser reduzidos pelo acompanhamento da localização e das atividades do visitante na unidade de conservação, bem como pela monitoração dos ambientes visitados em si. Para que isso possa ser realizado é necessária a utilização de alguma forma de comunicação de dados para disponibilizar o serviço ao visitante e à própria administração do parque. Entretanto, garantir a conectividade em ambientes florestais é um desafio uma vez que a propagação das ondas eletromagnéticas é extremamente dificultada. Apesar disso, a alternativa investigada neste trabalho é a implantação de uma rede sem-fio nas trilhas das unidades de conservação, que possa ser usadas para prover informações e alertas para os visitantes. A dificuldade de propagação da onda eletromagnética, a limitação de alimentação elétrica e de capacidade de processamento dos equipamentos utilizados são alguns dos principais desafios para os quais são propostas abordagens que tornam possível a comunicação.

A propagação da onda eletromagnética é fortemente afetada no ambiente florestal pelos fenômenos de absorção e espalhamento, entre outros, conforme descrito em [13] e [14]. Ambos os fenômenos contribuem de forma decisiva para a degradação do sinal, reduzindo a sua potência e, conseqüentemente, o alcance dos transceptores usados nas redes sem-fio. Alguns parâmetros que favorecem a atenuação do sinal são a formação e a densidade da floresta, a frequência e a polarização da onda, a distância entre os rádios transmissor e receptor, a altura das antenas em relação ao solo, propriedades elétricas do meio (solo, floresta, ar), condições atmosféricas e pluviométricas, heterogeneidade da vegetação no percurso de transmissão, movimento das árvores devido ao vento e diferentes propriedades do terreno (umidade e irregularidade da superfície) [14]. A intensa variabilidade da maioria destes fatores faz com que este ambiente possa apresentar lapsos de conectividade e flutuações na capacidade da rede.

A limitação de alimentação elétrica e de capacidade de processamento dos equipamentos ocorrem frequentemente em nós de redes de sensores sem-fio (WSN – *Wireless Sensor Networks*) [15], com mais ou menos intensidade, dependendo do cenário de implantação. No caso em estudo, é possível prever a alimentação via sistemas alternativos, como painéis solares por exemplo, que permitam a alimentação tanto da infraestrutura de comunicação como de sensores, por exemplo para detecção de fogo, que venham a ser instalados em conjunto. Entretanto o visitante deverá portar um terminal móvel para que possa ter a sua localização identificada. Este terminal, tipicamente operado a bateria, possui mais limitações. No presente trabalho, são consideradas as possibilidades de um terminal dedicado à monitoração da localização e de uma aplicação executada no *smartphone* do visitante. No caso de um *hardware* dedicado é desejável que este seja pequeno, leve e de baixo custo, o que influencia diretamente a capacidade de processamento e o tipo de bateria a ser usado. Quando se considera o *smartphone* do visitante, deve-se lembrar que este pode apresentar diferenças de modelo, configuração, nível de utilização de memória

e bateria. Embora seja possível exigir parâmetros mínimos a respeito de capacidade de processamento e memória, não é possível nenhuma atuação sobre a carga de bateria disponível. Seria muito difícil prover a capacidade de recarga destes equipamentos nas trilhas nas florestas. Assim, a escolha das tecnologias a serem empregadas na comunicação deve contemplar o baixo consumo como um parâmetro adicional.

Outro desafio que não pode ser minimizado dentro da realidade brasileira é a limitação de recursos financeiros vivenciada cotidianamente pelas unidades de conservação. Portanto, busca-se também manter o projeto simples e barato de forma a facilitar a sua implementação em diferentes localidades. Assim, para possibilitar o amplo uso de aplicações de assistência ao visitante de sistemas florestais, é necessário implementar redes sem-fio para prover conectividade, porém reduzindo o custo de sua infraestrutura. Neste trabalho de tese, procura-se viabilizar a solução através do uso de novas tecnologias. Entretanto não há estudos de impactos ambientais que possam ser causados à fauna e à flora por estas tecnologias. Apenas foram feitas ressalvas de que a faixa de frequência utilizada para a comunicação está abaixo da faixa ionizante, que é mais ofensiva para as diversas formas de vida.

1.1 Tema

Esta tese trata do desenvolvimento necessário para a elaboração de um sistema para tornar possível a assistência de visitantes de unidades de conservação, mesmo em situações de conectividade intermitente. No presente trabalho a assistência compreende aplicações que permitam aumentar a segurança física e a interatividade da experiência do visitante na UC. Como tal, se insere tanto na área de conhecimento de Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*), ao trazer para o mundo virtual o ambiente natural, como de redes tolerantes a atrasos e desconexões, as DTNs (*Delay/Disruption Tolerant Networks*), ao lidar com os desafios da falta de conectividade intrínseca a este tipo de ambiente.

Existe a perspectiva de que IoT e DTN, em conjunto com outras tecnologias, compoñam a infraestrutura de novos conceitos como cidades inteligentes (*smart cities*) [16], redes elétricas inteligentes (*smart grid*) [17], agricultura inteligente (*smart agriculture*) [18] e automação residencial e industrial [19]. Estas são áreas em franco desenvolvimento, com inúmeros projetos de pesquisa. Os desafios enfrentados no presente trabalho: “Análise de Redes Sem-fio para Aplicações de Assistência ao Visitante de Parques Florestais” envolvem a própria definição da infraestrutura de comunicação, bem como a sua otimização, e das tecnologias e protocolos empregados.

Assim, este trabalho de tese compreende o estudo e a definição de uma infraestrutura e de um protocolo de comunicação capaz de permitir a monitoração de visitantes em sistemas naturais, podendo ser feito de forma transparente ou de forma interativa. Esta infraestrutura consiste de uma rede de comunicação sem-fio mínima, distribuída nas trilhas, e dos

terminais dos usuários, os visitantes da unidade de conservação, que possam atuar colaborativamente formando uma DTN. No modo interativo, o terminal é o próprio *smartphone* do visitante com o uso de um aplicativo específico, a ser desenvolvido e povoado com dados da unidade de conservação. No modo transparente, o terminal é um dispositivo vestível que permite um monitoramento não invasivo, praticamente imperceptível para o visitante, podendo ser no formato de uma pulseira ou de um chaveiro.

Além da interação, o uso do aplicativo via *smartphone* permite a coleta de informações importantes que podem ser usadas pela gestão da unidade de conservação no monitoramento participativo do uso de recursos e na caracterização e avaliação de impactos amplos e sistêmicos das atividades humanas sobre a biodiversidade. Especificamente, pretende-se recolher dados sobre a atividade de visitação e exploração turística da unidade de conservação. Os dados do parque fornecidos ao visitante, por outro lado, ampliam e trazem novas possibilidades de interação, contribuindo para a promoção da educação ambiental e divulgação da unidade de conservação como forma de turismo e integração com a natureza. O uso de *smartphones* como equipamento para acesso e intercâmbio de dados também permite contextualizar o trabalho como uma PSN (*Pocket Switched Network*), uma arquitetura que usa a mobilidade humana e os *smartphones* para criar oportunidades de comunicação [20].

O modo transparente, apesar de não prover as mesmas informações do modo interativo, respeita a opção de alguns visitantes de se manter desconectado durante a estadia na unidade de conservação. Mesmo assim, permite ainda um monitoramento mínimo de localização para questões de segurança física e o envio ativo de pedido de socorro. Este pedido torna mais ágil o resgate dos visitantes em caso de problemas. A monitoração da localização permite o atendimento ao visitante, mesmo que este se encontre desacordado, porém neste caso é necessário um maior intervalo para perceber que o visitante precisa de ajuda. O modo transparente é a opção que demanda menos recursos, podendo ser implementada exclusivamente, para prover melhoria na segurança física, ou como uma etapa inicial do projeto completo. O uso de terminais que atuam como sensores que se reconhecem mutuamente, permite contextualizar o projeto de assistência no modo transparente como uma WSN. A figura 1.1 ilustra a arquitetura de comunicação proposta nesta tese.

1.2 Delimitação

Este trabalho de tese foi realizado em parceria com o PARNASO (Parque Nacional da Serra dos Órgãos), unidade de conservação composta por uma área de 20 mil hectares que abrange os municípios de Teresópolis, Petrópolis, Magé e Guapimirim. De acordo com o ICMBio, que administra a Unidade de Conservação, em 2015 foram contabilizados mais de 217.000 visitantes na área do parque. Esta parceria permitiu o estudo prático das tecnologias envolvidas dentro da floresta.

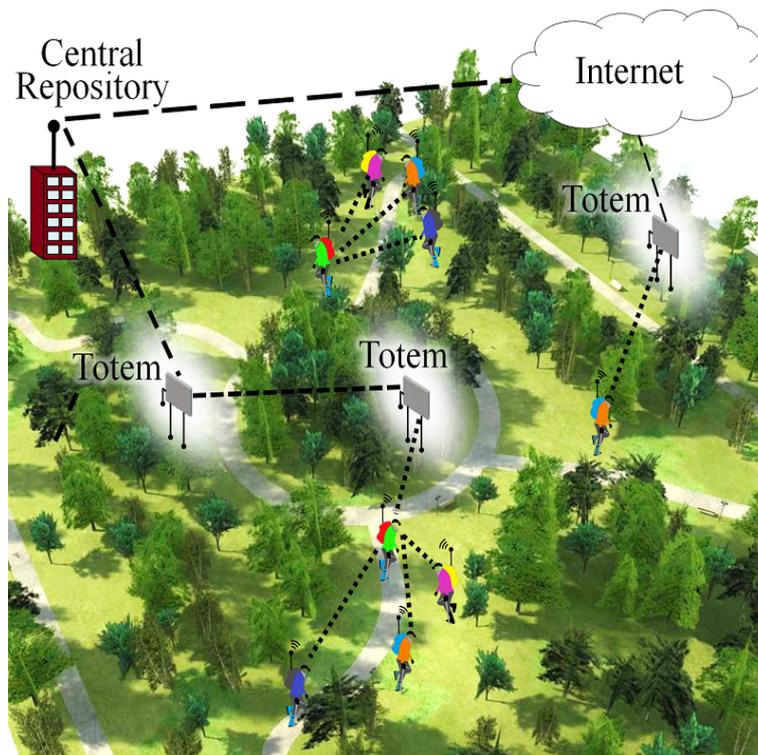


Figura 1.1: Sistema de assistência ao visitante.

Este trabalho de tese envolve a escolha da tecnologia de rede e a sua caracterização, a escolha de *hardware* para terminais e infraestrutura e o projeto de um protocolo de aplicação, trazendo benefícios importantes para o próprio PARNASO e para os visitantes.

Foi abordada, como estudo de caso, a travessia Petrópolis x Teresópolis, que exemplifica alguns dos problemas vividos pelo parque e pelos visitantes. O parque sofre com a falta de controle e conhecimento da visitação e das atividades executadas pelos visitantes. Estes por sua vez não possuem informações nem de segurança da trilha nem sobre o atrativo em si, como dados da fauna e da flora, nível de dificuldade das trilhas, etc. Entre outros riscos, na parte alta do Parque é comum a ocorrência de montanhistas perdidos e na parte baixa as cabeças-d'água são uma grande ameaça aos banhistas.

É um objetivo do trabalho, havendo recursos financeiros, posteriormente implementar fisicamente a cobertura para as trilhas do PARNASO. É uma meta também, numa etapa futura, expandir o trabalho aqui desenvolvido para outras unidades de conservação, de forma a implementar uma solução semelhante porém adaptada às suas necessidades e restrições específicas. Esta intenção guia a escolha de opções de baixo custo e fácil implementação em todas as etapas, para que seu emprego possa ser feito com o mínimo de recursos, seja de equipamentos ou de técnicos especializados. Assim, investiga-se uma solução barata e simples, de fácil implementação mesmo por pessoas não capacitadas tecnicamente.

1.3 Justificativa

Este trabalho traz importantes desafios tecnológicos e temas de pesquisa atualmente em discussão, especialmente em IoT, DTN e propagação. A implementação de uma infraestrutura de comunicação sem-fio em meio à Mata Atlântica, mantendo a proposta de baixo custo e mínimo impacto no ambiente florestal, é um dos tópicos a serem desenvolvidos. A grave atenuação do sinal, bem como as restrições de energia e processamento dos terminais, contribuem de forma substancial com este desafio.

As melhorias e ganhos para a administração do parque e para o visitante, com a minimização de riscos e a interação com a floresta, trazem também contribuições indiretas para a preservação do meio ambiente, para a conscientização da influência da presença humana no ambiente natural e para o desenvolvimento de ações de educação ambiental.

Assim, estes desafios e melhorias são motivações que justificam o desenvolvimento deste trabalho.

1.4 Objetivos

O objetivo principal deste projeto é desenvolver uma solução que permita a assistência ao visitante da unidade de conservação. Foram definidos uma arquitetura e um protocolo, bem como são identificadas as tecnologias mais adequadas para as restrições, peculiaridades e desafios a serem enfrentados, desde a transmissão até a aplicação. Uma vez definidas as possíveis soluções, foram feitos testes de campo para a escolha das melhores opções tecnológicas. As simulações serviram de subsídio para a avaliação da infraestrutura de rede e do seu desempenho. O resultado final permite a fácil replicação do estudo para outras trilhas e outras unidades de conservação.

São contribuições originais deste trabalho:

- O estudo da propagação em ambientes de floresta tropical úmida, apresentado no Capítulo 4;
- A investigação de características específicas da comunicação com o emprego de diferentes tecnologias para a implementação do sistema de rastreamento de visitantes, descrita no Capítulo 4;
- A análise do posicionamento dos totens e a sua formulação através de um problema de ILP (*Integer Linear Programming*), bem como a a modelagem geométrica para diminuir o tamanho do problema, abordada no Capítulo 5;
- A proposta de uma variação do CSMA para uma rede de sensores LoRa, os terminais dos visitantes. Um protocolo leve para controle de acesso ao meio, que utiliza os diferentes fatores de espalhamento da tecnologia LoRa, descrito no Capítulo 5;

- A melhoria do protocolo para localização colaborativa apresentado por [21], para permitir o pedido ativo de resgate por parte do visitante e a formação de grupos, igualmente descrita no Capítulo 5.

1.5 Estrutura do Texto

O restante deste trabalho de tese se organiza da seguinte forma: O Capítulo 2 apresenta os trabalhos relacionados existentes na literatura. No Capítulo 3 é feita uma revisão teórica que contempla as tecnologias candidatas a uso no projeto, apresentando suas principais características e a análise da sua aplicabilidade neste trabalho. As dificuldades da comunicação sem-fio na floresta são discutidas no Capítulo 4, que apresenta um estudo da propagação eletromagnética. O Capítulo 5 detalha o modelo proposto compreendendo arquitetura, protocolo e aplicações. O Capítulo 6 apresenta um estudo de caso, considerando a trilha da travessia entre Petrópolis e Teresópolis. Por fim o Capítulo 7 aborda as conclusões e trabalhos futuros.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

Neste capítulo, é apresentado um estudo dos trabalhos relacionados identificados durante a revisão bibliográfica. Os trabalhos podem ser relacionados em diferentes aspectos.

Parte dos trabalhos estudados discorrem sobre a monitoração de localização sem o uso de sistemas de navegação por satélite (GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*). Essa é a principal aplicação desenvolvida nesta tese. Outra aplicação importante é a interatividade em áreas naturais com orientações sobre a visitação e dados turísticos. Alguns projetos relacionados têm esta abordagem.

Trabalhos sobre cobertura e posicionamento de pontos de acesso subsidiam a escolha da posição ótima da infraestrutura. A comunicação é fortemente afetada pelo ambiente, assim trabalhos sobre a propagação em meio à vegetação também foram estudados e serviram de base para a escolha dos modelos a serem utilizados.

2.1 Monitoração de Localização

O emprego de sistemas de posicionamento alternativos aos sistemas de navegação por satélite (GNSS) vem aumentando devido à crescente demanda por serviços baseados em localização (LBS – *Location-Based Services*), mesmo em locais onde a comunicação via satélite tem limitações. Em [22], Tahat *et al.* revisam vários algoritmos de última geração empregados na estimativa de posição usando receptores móveis. A fim de encontrar a localização de um dispositivo através de medidas da própria rede sem-fio, diferentes grandezas físicas podem ser utilizadas: a potência do sinal, indicada pelo RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), o tempo de chegada do sinal (TOA – *Time Of Arrival*), a diferença de tempo de chegada do sinal em diferentes antenas (TDOA – *Time Difference Of Arrival*), a diferença de frequência de chegada (FDOA – *Frequency Difference Of Arrival*) e o ângulo de chegada (AOA – *Angle Of Arrival*), entre outras.

Vários outros trabalhos investigam sistemas de geolocalização alternativos ao uso de satélites, em diferentes tipos de redes. Um sistema capaz de transmitir dados de posi-

onamento usando LPWAN em ambientes *outdoor* é desenvolvido em [23] por Carbonés, demonstrando ser factível a localização de um terminal estático com uma precisão de 100 metros. O nó remoto envia dados usando o protocolo LoRaWAN. Os *gateways* próximos recebem estes dados e encaminham os pacotes via UDP/IP para o servidor juntamente com informações do sinal recebido, como a hora exata em que o pacote foi recebido, o RSSI, a frequência, etc. Posteriormente, o servidor processa os dados de diferentes *gateways* e roteia as mensagens para o aplicativo usando um cliente MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) [24]. Finalmente, um algoritmo executado no servidor de aplicação estima a posição usando TDOA.

Já em [11], Baharudin *et al.* apresentam uma WSN de longo alcance para rastreamento de objetos móveis. No sistema proposto, as informações de localização geográfica de objetos em movimento são coletadas com um GPS e enviadas através de módulos LoRa (*Long Range*). Os resultados demonstraram a usabilidade da tecnologia GPS para coletar vários dados adicionais, como velocidade e direção de deslocamento, relacionados ao rastreamento de objetos móveis. Este trabalho também reflete o alto potencial da tecnologia LoRa como uma interface de comunicação sem-fio confiável para essa transmissão de dados de sensores de longo alcance.

Lima *et al.* [25] buscam resolver o problema de geolocalização em redes de sensores usando o nível de recepção do sinal (RSSI) para estimar as posições dos nós. Os autores desenvolveram um algoritmo de roteamento geográfico, chamado ARESTA (Agregação de Dados com Desvio de Buracos para Redes de Sensores sem Fio com Sinks de Alto Alcance), que utiliza um *sink* com alto alcance de comunicação para enviar um pacote de anúncio a toda a rede em um único salto. O RSSI dos nós é usado para estimar a sua posição e assim detectar e desviar de buracos de roteamento. Os buracos são normalmente associados a regiões onde os nós estão impossibilitados de encaminhar adiante informações recebidas. Sua ocorrência pode ser causada por obstáculos físicos, esgotamento energético, falhas na comunicação entre vizinhos eleitos, implantação incorreta etc.

Outra área relacionada consiste nos sistemas de navegação cega (*dead-reckoning*). Jimenez *et al.* [26] comparam algoritmos de *dead-reckoning* para pedestres. O estudo é restrito a sensores de medidas inerciais microeletromecânicos (MEM IMU – *Microelectromechanical Inertial Measuring Units*) de baixo custo e baixo peso, colocados numa bota. Os resultados mostraram soluções adequadas para estimar trajetórias com um desvio abaixo de 5% da distância percorrida. Entretanto, este tipo de sistema de navegação cega exige um equipamento adicional além do MEM IMU, que seja capaz de fazer o processamento dos dados para gerar a localização. Este pode ser um *Raspberry Pi* ou um *tablet*, o que dificulta seu uso turístico/esportivo no ambiente de floresta, além de exigir uma calibragem inicial.

Os artigos apresentados nesta seção ilustram o problema de obter dados de localização sem o uso de sistemas via satélite. O estudo de cada um deles mostrou que as suas aborda-

gens não se aplicam este ao trabalho desta tese. O uso de RSSI para inferir a localização não é adequado pois na floresta pode haver uma grande variação deste parâmetro. O uso de técnicas que precisam de várias antenas também não se aplica, uma vez que a rede que propomos é esparsa e há pouquíssima chance de mais de dois elementos da infraestrutura se comunicarem entre si. Sistemas de *dead-reckoning* para pedestres também não se aplicam devido à necessidade de equipamentos adicionais e calibragem da IMU e ainda requererem algum tipo de comunicação para informar a localização. Assim o trabalho proposto nesta tese traz uma abordagem diferente, em que uma estimativa da localização do visitante se faz através do histórico dos encontros com outros visitantes, acompanhando assim o seu deslocamento.

2.2 Problemas de Cobertura

Também são trabalhos relacionados a esta tese artigos que propõem algoritmos para solucionar problemas de cobertura, alguns deles, na área de redes de sensores. Em [27], Zhu *et al.* apresentam um levantamento que classifica o problema de cobertura de diferentes pontos de vista, analisando inclusive a relação entre cobertura e conectividade. São analisadas questões relativas ao consumo de energia, especialmente na estratégia de implantação da cobertura, mecanismo de agendamento de desativação e raio de cobertura ajustável. Cobertura estática e cobertura dinâmica também são descritas, bem como a solução para otimizar a implantação da cobertura.

Huang *et al.* [28] formulam o problema de cobertura como um problema de decisão, cujo objetivo é determinar se cada ponto na área de serviço da rede de sensores é coberto por pelo menos k sensores, onde k é um dado parâmetro. Em vez de determinar a cobertura de cada local, a abordagem descrita procura ver como o perímetro do alcance de detecção de cada sensor está coberto, levando a um algoritmo de tempo polinomial eficiente. Enquanto os perímetros dos sensores estiverem suficientemente cobertos, toda a área está suficientemente coberta.

Van Le *et al.* [29] apresentam uma formulação de Programação Linear Inteira (ILP – *Integer Linear Programming*) para o posicionamento de nós em uma rede de sensores móveis, que podem alterar suas posições para maximizar a cobertura num problema com restrições de conectividade. São propostas três heurísticas para a solução do problema. Os resultados das simulações mostram que o algoritmo obtém bons resultados para eficiência de cobertura e uso de energia. Entretanto o algoritmo proposto por Van Le *et al.* não pôde ser aproveitado neste trabalho, uma vez que há a necessidade de uma abordagem tridimensional para considerar a variação de altitude prevista para as trilhas.

Cruz *et al.* [30] descrevem um sistema de sensoriamento baseado em ônibus urbanos, o *SensingBus*. A arquitetura adotada possui três camadas: uma faz a coleta de dados ambientais; outra pré-processa dados antes do envio pela Internet; e uma terceira armazena,

processa e entrega dados a usuários finais. Em [31] os autores desenvolvem um algoritmo de posicionamento de pontos de coleta para o *SensingBus*. O posicionamento é avaliado utilizando informações reais de ônibus da cidade do Rio de Janeiro, analisando o compromisso entre a latência na entrega dos dados dos sensores e o número de pontos de coleta utilizados.

O problema de cobertura e a sua otimização são críticos neste trabalho de tese, uma vez que a área a ser coberta é muito grande e a rede sem-fio para prover a assistência aos visitantes é esparsa devido a limitações financeiras, logísticas e operacionais. O mapeamento tridimensional proposto traz uma perspectiva diferente ao considerar também as diferenças de altitude e alturas das antenas para otimizar o posicionamento de pontos de acesso. Essa abordagem é muito relevante para casos como o aqui estudado, em que há uma grande variabilidade de altitude e uma grande quantidade de obstáculos naturais nos enlaces de comunicação.

2.3 Projetos em Parques Naturais

Em relação ao provimento de assistência ao visitante de parques naturais, alguns projetos relacionados com os objetivos investigados nesta tese são apresentados a seguir.

Nos trabalhos descritos em [21] e [32] os autores introduzem o conceito de registro de avistamento como forma de subsidiar a localização de um sensor numa rede com conexão intermitente e seu uso conjunto com o GPS. O registro de avistamento consiste no armazenamento dos dados de localização do próprio sensor ao entrar em contato outro sensor, juntamente com a identificação do sensor remoto. O CenWits [21] é um sistema de busca e salvamento em áreas selvagens, que utiliza transceptores de RF transportados pelos visitantes, operando na faixa de 900 MHz. Cada um dos sensores recebe suas coordenadas de pontos de localização, ou de um GPS, se disponível, e as repassa para outros nós durante encontros subsequentes. Esta informação é descarregada nos pontos de acesso distribuídos em vários locais. Esses dados, que consistem no histórico de localizações, podem ser usados para estimar a localização de um visitante perdido. O sistema é projetado para uma rede que fornece apenas conectividade ocasional.

O projeto SenSearch [32] é uma solução de rastreamento assistida por GPS baseado no CenWits [21]. Funciona praticamente da mesma forma, porém com uso exclusivo do GPS para a determinação da localização, aumentando a precisão do sistema. Também é feito um estudo do *duty cycle*, reduzindo os períodos de ativação do GPS e dos transceptores para melhorar o uso da bateria.

Em [33] Huang *et al.* apresentam o projeto YushanNet, um sistema para o rastreamento de caminhantes no Parque Nacional de Yushan, Taiwan. Também baseado em [21] e [32], este trabalho aplica técnicas de DTN e faz uso de comunicações sem-fio oportunistas, ad hoc e de curto alcance para disseminar dados em uma rede.

Também voltado para ambientes naturais, o WebPark [34, 35] foi um projeto de pesquisa e desenvolvimento financiado pela Comunidade Europeia, através do *IST (Information Societies Technology) programme*, entre outubro de 2001 e setembro de 2004. Ao final, foi integrado em um serviço comercial pela empresa Camineo¹. O objetivo é desenvolver uma série de serviços baseados em localização (LBS) para visitantes de áreas naturais e protegidas. O WebPark usa a técnica de cache numa arquitetura cliente-servidor para lidar com a falta de uma conexão contínua com a Internet, amenizando o problema da conexão via rede de dados móveis GPRS (*General Packet Radio Service*) [36] intermitente.

Uma outra abordagem para prover informações e, assim uma assistência ao visitante, é feita através de aplicativos voltados para o mapeamento de trilhas e geolocalização por GPS. Entretanto, quando não é possível uma boa recepção do sinal de satélite estes aplicativos podem se tornar inúteis. Devido à intermitência da conectividade, estes aplicativos não podem assegurar a interatividade de conteúdo e de segurança que busca-se oferecer no projeto investigado nesta tese. Entre os aplicativos disponíveis, para Android e/ou para IOS, alguns muito usados são:

- Orux Maps: compartilha mapas gratuitamente, permite a criação de rotas nos mapas, acompanha via GPS o deslocamento do usuário na rota criada e envia mensagens via SMS caso o usuário não se mova por um intervalo de tempo pré-configurado pelo próprio usuário. Disponível em <http://www.oruxmaps.com/cs/en/>.
- GPS Essentials: é uma ferramenta GPS integrada ao Android para possibilitar que o usuário navegue, gere pontos de passagem, trilhas e rotas. Disponível em <http://www.gpsessentials.com/>.
- Wikiloc: permite que o usuário crie suas próprias trilhas de GPS com o seu smartphone, incluindo recursos para navegação *outdoor*, mapas off-line gratuitos, monitoramento ao vivo e pesquisa por área de passagem. Possui uma comunidade de usuários em que é possível a troca de experiências e até mesmo prestação de serviços. Disponível em <https://pt.wikiloc.com/>.
- Trails: também permite o compartilhamento de mapas e dados sobre atividades *outdoor*. Sugere trilhas, dá dicas e possui uma comunidade similar ao wikiloc. Disponível em <https://www.trails.com/>.

Existem também aplicativos para levantamento de dados topográficos e bases de dados de trilhas. Entre estes, pode-se citar o Trilhas Cariocas² e diversos “Guias de Trilhas”³, lançados por órgãos como o Inea.

¹<http://camineo.com/index.php?lang=en>

²<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.com.etrilhas>

³<http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/EstudosePublicacoes/Publicacoes/index.htm>

Sob o ponto de vista de prover dados sobre a movimentação dos visitantes para a administração das unidades de conservação, em [37] é apresentada uma aplicação de modelagem de simulação por computador para monitoramento pró-ativo e gerenciamento adaptativo da capacidade da unidade de conservação para lidar com a visitação sem prejuízos ao meio ambiente, no Parque Nacional *Arches*, no estado de Utah nos EUA. Entretanto, toda a avaliação é feita baseada em simulações. Foi desenvolvido um modelo de simulação de viagens do uso diário de visitantes em toda a rede de trilhas e estradas do Parque e em locais de atração selecionados, como o *Delicate Arch*, uma de suas atrações principais.

Son *et al.* [7] propõem um trabalho bastante relacionado com esta tese, por considerar o ambiente de floresta e por fazer uma abordagem tecnológica de detecção de focos de incêndios florestais. Neste artigo é desenvolvido um sistema de vigilância de incêndios florestais nas montanhas da Coreia do Sul, que consiste numa *WSN*, um *middleware* e um aplicativo web. Os sensores medem temperatura e umidade e detectam fumaça. O programa de *middleware* e o aplicativo web analisam os dados e informações coletados, gerando um alarme em tempo real quando ocorre o incêndio.

Em [38, 39], Santos *et al.* tratam aspectos relativos a uma DTN na Amazônia. É proposta como alternativa de comunicação de dados nessa região o uso de redes veiculares (VANETs – *Veicular Ad Hoc Networks*) combinadas com DTN. Entre as contribuições dadas por Santos *et al.* está a estimativa da capacidade de redes DTN que podem ser implantadas nos rios do estado do Amazonas, usando barcos para transportar dados. A comunicação acontece durante o cruzamento dos barcos ao longo da navegação, e entre barcos e um ponto localizado na margem. Embora seja extremamente relacionado devido ao ambiente de floresta, este trabalho faz medições dentro e próximas às calhas dos rios amazônicos, o que traz grande influência na propagação.

O projeto CenWits [21] é extremamente relevante para este trabalho de tese pois serviu de base para a elaboração do sistema aqui proposto. Entretanto a aplicação de localização proposta nesta tese, usada para prover o serviço de monitoramento e segurança de visitantes, acrescenta novos tipos de mensagem e de campos nos seus cabeçalhos para permitir melhorias e novas funcionalidades. Conforme será visto no Capítulo 5, estas adequações permitem um atendimento mais rápido ao visitante em situação de risco, melhor controle de acesso ao meio, uso eficiente da tecnologia de comunicação sem-fio e dos recursos dos terminais móveis.

2.4 Propagação em Meio à Vegetação

A propagação da onda eletromagnética dentro da floresta apresenta muitos desafios, devido às características do ambiente que tornam o canal extremamente ruidosos e com forte atenuação.

Diversos trabalhos na literatura apresentam medições de propagação com tecnologias de redes sem-fio para a modelagem de canais de comunicação. Campos *et al.* [40] apresentam um sistema de baixo custo para medições e caracterização do canal de rádio. É feita uma modelagem de canal na faixa de 700 a 900 MHz, que aborda perda de percurso, sombreamento e desvanecimento de pequena escala. Estas frequências são importantes para a implantação dos sistemas 5G mMTC (*massive Machine Type Communications*) definidos pelo ITU (International Telecommunication Union) e para sistemas de outras tecnologias de suporte à IoT. Esse artigo é importante por ser semelhante ao problema tratado e indicar uma metodologia de medição que pode ser adaptada para o caso tratado nesta tese.

Rama Rao *et al.* [41] realizam medições em plantações de manga e goiaba, nas faixas de 868/915/2400 MHz. A atenuação é calculada a partir dos valores de RSSI medidos e comparada com os modelos propostos pelo ITU-R (*ITU Radiocommunication Sector*) [42–45], Weissberger [46] e COST 235 [47] usando simulações no MATLAB. Os autores observam que o modelo COST 235 foi o que mais se aproximou dos valores obtidos experimentalmente. Mestre *et al.* [48] também realizam estudos de propagação para aplicações na agricultura. É avaliado o modelo Weissberger MED (*Modified Exponential Decay*) [49], que expressa a atenuação como uma função da frequência e da parcela do enlace obstruída pela folhagem, e o modelo *Single Vegetative Obstruction Model* [50] que não considera a frequência, mas apenas a distância e a atenuação específica (dB/m) para a vegetação. Ambos os modelos foram considerados pelos autores adequados para utilização após a multiplicação por uma constante, definida pelo tipo e pela distribuição da vegetação ao longo do enlace.

Azevedo e Santos [51] avaliam o uso do modelo *log-normal* para obter a atenuação em ambientes florestais com diferentes densidades de vegetação, relacionando e alterando seus parâmetros com as características do ambiente. O modelo apresentado é baseado em decaimento log-normal e cujos parâmetros correspondentes foram determinados usando dados de uma campanha de medição. Em contraste com a maioria dos modelos empíricos, as expressões deduzidas incluem um parâmetro de densidade da vegetação que permite estimar a perda de caminho para diferentes ambientes florestais. É válido para distâncias até 400 m e frequências de 300 MHz a 30 GHz. Entretanto, as medições foram feitas em florestas temperadas ao nível dos troncos de árvores como pinheiros e eucaliptos. Stoyanova *et al.* [52] estudam um modelo prático para ambientes abertos, consistente com restrições como baixa potência, faixa de comunicação estreita, posicionamento dos nós próximos ao solo e antenas omnidirecionais, com foco em WSN. Propõem um modelo chamado *Free-space Outdoor Model*, em que calculam a potência recebida incluindo a reflexão no solo e uma variável Gaussiana randômica que descreve a incerteza do RSSI. O ambiente proposto considera que as árvores da área de aplicação estão localizadas em qualquer ordem (aleatória, linha ou grade).

Documentos do ITU-R (*ITU Radiocommunication Sector*) também tratam da

propagação na faixa de interesse, como as recomendações P.1546-5 – *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz* [42], P.1812-4 – *A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands* [43], P.1406-2 – *Propagation Effects Relating to Terrestrial Land Mobile and Broadcasting services in the VHF and UHF Bands* [44] e P.1411-9 – *Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz* [45] que apresentam modelos para serviços terrestres.

Mais especificamente, a recomendação P.833-9 – *Attenuation in vegetation* [53] descreve os efeitos no sinal da propagação em que uma das estações rádio se encontra dentro de vegetação. Além da atenuação, também pode ocorrer perda de polarização, variação da atenuação com o vento e espalhamento temporal. Entretanto, nenhuma destas recomendações se aplica especificamente ao caso estudado pois são modelos empíricos desenvolvidos para ambientes diferentes do presente.

Este trabalho se distingue dos trabalhos relacionados nesta seção por estudar a propagação em floresta tropical úmida, considerando a atenuação causada pelo desvanecimento em pequena escala, resultante do fenômeno multi-percurso. Os dados coletados nos experimentos práticos são analisados estatisticamente utilizando os modelos adequados para este tipo de desvanecimento. Florestas tropicais cobrem grande parte do Brasil, incluindo a Amazônia e a Mata Atlântica, além de outras regiões pelo mundo. Melhorar a comunicação neste tipo de ambiente pode contribuir para a sua preservação e para o desenvolvimento econômico da sua população. O estudo do modelo de propagação mais adequado ao ambiente de floresta tropical úmida, na faixa de frequência de 915 MHz, avaliado neste trabalho para suportar uma WSN, será apresentado no Capítulo 4.

2.5 Considerações

O presente trabalho, ao definir a aplicação para assistência ao visitante, projeta uma arquitetura que viabiliza a sua execução dentro da floresta. É utilizada a tecnologia LoRa (*LongRange*) para a troca de dados com múltiplos saltos, utilizando técnicas de DTN, que permite a geolocalização colaborativa dentro do ambiente natural, empregando terminais *wearables* e uma infraestrutura esparsa composta de pontos de acesso localizados de forma otimizada, os totens de comunicação.

Seu posicionamento em relação ao estado da arte é de investigação da solução de problemas não tratados na literatura para o ambiente de floresta e a situação de contorno de uso de uma LPWAN para prover serviços de assistência baseados em localização.

Capítulo 3

Tecnologias de Comunicação Sem-Fio

Neste capítulo, são apresentados os estudos preliminares desenvolvidos para a elaboração deste trabalho. Foram avaliadas tecnologias de comunicação sem-fio, para emprego na comunicação entre pontos fixos, entre terminais de usuários, e entre pontos fixos e terminais de usuários.

A seguir são descritas brevemente as tecnologias consideradas para o projeto do sistema de assistência ao visitante de parques florestais. Não foram consideradas tecnologias que exigem o uso de cabos para conexão da infraestrutura devido às enormes dimensões da área a ser coberta, em conjunto com o pequeno número de usuários. Financeiramente seria impraticável, além do gigantesco impacto ambiental das obras necessárias para a instalação do cabeamento. Outras tecnologias sem-fio, diversas da rádio frequência, como por exemplo luz ou ondas acústicas, também não foram consideradas devido às características do ambiente. A luz seria totalmente obstruída pela vegetação assim que não houvesse mais linha de visada, mesmo na faixa de infravermelho (100 GHz) e as ondas acústicas sofreriam com a interferência dos sons ambientes, além de causar possíveis impactos ambientais por se tratarem de ondas mecânicas de pressão.

3.1 Terminais Móveis

A escolha das tecnologias para uso nos terminais móveis baseia-se nas restrições do ambiente e nas características dos tipos de terminais portado pelos visitantes, além de atender aos requisitos das aplicações. Dentre as restrições do ambiente, existem a forte atenuação do sinal de rádio causada pela vegetação, a dificuldade de fornecimento de energia e a exposição dos equipamentos às intempéries.

Conforme detalhado no Capítulo 5, são previstas duas aplicações diferentes para prover assistência ao visitante de sistemas florestais, o que leva o projeto à definição de dois tipos de terminal: um dispositivo vestível, dedicado para a monitoração da localização feita no modo transparente, e outro, o próprio *smartphone* do visitante, para a integração com a

Unidade de Conservação (UC) no modo interativo, que permite receber dados sobre flora, fauna e atrativos do parque, além de contribuir com dados sobre estatísticas de utilização e impacto ambiental na Unidade de Conservação.

A escolha pelo uso de dois tipos de terminais diferentes vem da demanda inicial de comunicação informada pela administração e pela comunidade de usuários, levantada na Seção 5.1.1. Há uma necessidade básica de assistência ao visitante atendida pelo simples monitoramento da sua posição dentro da floresta. Esse monitoramento permite ações de resgate, caso o visitante se perca ou se machuque dentro da área da UC. Outra necessidade é a de receber informações sobre a UC, as trilhas e a área em que o visitante se encontra, bem como interagir com redes sociais e aplicativos de pesquisa. Para além dessas necessidades, foram considerados também os perfis dos visitantes, havendo uma parcela relevante que busca uma imersão no ambiente natural, recusando o uso de aparelhos eletrônicos de forma ostensiva. Assim, o uso de apenas um terminal vestível, pequeno e de baixo custo, permite acompanhar a sua localização sem causar transtornos a qualquer dos tipos de visitantes. Este é o único tipo de terminal a ser usado obrigatoriamente. Já aquele visitante que desejar ter acesso a mais informações e interagir com os dados da Unidade de Conservação, irá instalar um aplicativo em seu próprio *smartphone* e sincronizá-lo com o terminal vestível que estiver em seu poder. Esta abordagem também permite uma implementação dos serviços de assistência em etapas, sem que haja impactos na necessidade básica de localização. Outra vantagem de usar um terminal simples é a redução do custo e da complexidade para a UC, facilitando a adoção dos serviços de forma mais ampla.

Os dispositivos “vestíveis” estão presentes em diversas áreas, principalmente saúde e entretenimento, trazendo a tecnologia para o dia-a-dia das pessoas de modo pouco invasivo, algumas vezes praticamente imperceptível. É exatamente essa característica de discrição que será explorada e torna a opção atrativa para a abordagem pretendida. Para cumprir esta função é necessário que o terminal seja pequeno, leve, alimentado por bateria cuja carga dure por um longo intervalo de tempo.

3.1.1 Terminal interativo

O uso de *smartphones* como terminal por parte dos visitantes também traz restrições ligadas à duração da bateria e, portanto, gera a necessidade de baixo consumo de energia. Além disso, há a possibilidade de pouca disponibilidade de recursos do aparelho, como memória, processamento e armazenamento, sendo necessário definir limites mínimos de desempenho e configuração dos *smartphones*. É exigida apenas uma configuração mínima que permita a instalação do aplicativo que habilita o aparelho do visitante a enviar e receber dados tanto com a infraestrutura com com outros terminais de usuários. É necessário também que o *smartphone* possa armazenar os dados recebidos de outros usuários, atu-

ando como um nó de rede DTN para reenviar estes dados assim que houver conexão disponível. Mesmo durante a sua operação como nó da rede, caso haja uma redução do nível da bateria ou da capacidade de armazenamento abaixo de limiares pré-definidos, o aparelho passará a enviar apenas as mensagens que gerar, sem armazenar ou encaminhar as demais mensagens na DTN.

Outra limitação importante é a restrição das tecnologias de comunicação que poderiam ser adotadas àquelas implementadas comercialmente nos *smartphones* para comunicação de dados. Assim, consideraram-se amplamente disponíveis apenas as tecnologias Bluetooth e Wi-Fi. Foi feita então uma pesquisa sobre qual das tecnologias consumiria menos energia, maximizando o tempo de duração da bateria. Em [54–61] são feitos diversos estudos sobre o consumo e a aplicação do *Bluetooth Low Energy* (BLE), demonstrando-o como uma opção energeticamente eficiente para a camada física.

O Bluetooth, atualmente em sua versão 5.0, oferece a opção de baixo consumo desde a versão 4.0 com uma grande base instalada. O Bluetooth 5.0 traz uma série de melhorias, entre as quais está a possibilidade de operar em redes com topologia em malha, que pode incluir tanto aparelhos na versão 4.0 como na 5.0. Também é relevante o aumento da taxa de transmissão para 2 Mbps e do alcance para mais de 200 m em boas condições de propagação [62, 63]. Ambas as versões apresentam taxa de transmissão bem mais baixa do que o Wi-Fi.

Mais recentemente, foi lançado o Wi-Fi HaLow, padrão IEEE 802.11ah, que apresenta uma versão do Wi-Fi de baixo consumo, com o início da certificação de produtos em 2018 [64]. Como opera numa faixa de frequência diferente, não há compatibilidade entre o IEEE 802.11ah e os padrões anteriores. Agora em 2020, ele já está disponível em *smartphones* de topo de linha, porém ainda não possui uma grande base instalada. Entretanto outros padrões, como IEEE 802.11g/n/ac, são disponibilizados em grande parte dos *smartphones* embora apresentem consumo mais alto. A escolha da tecnologia a ser usada para comunicação com o terminal interativo é baseada a sua avaliação de desempenho no ambiente da floresta, descrita na Seção 4.3.

3.1.2 Terminal transparente

Já a escolha da tecnologia para comunicação no modo transparente independe de uma base instalada de terminais. Uma vez definida a tecnologia podem ser feitas especificações para a fabricação do terminal que seja mais adequado para o caso específico da geolocalização em ambiente de floresta. Este terminal será distribuído aos visitantes do Parque e seu valor incluso no custo operacional da Unidade de Conservação. O ideal é que seja de baixo custo e resistente, para que possa ser reutilizado várias vezes por diferentes visitantes. A sugestão é o uso de um terminal vestível, seja uma pulseira ou um chaveiro.

Este tipo de terminal traz restrições de tamanho, peso e consumo. Como a taxa de

transmissão necessária para a troca de informações no modo transparente é baixa, pois se refere apenas à informação de localização e sua transmissão é esporádica, tecnologias utilizadas em redes de sensores, tais como ZigBee, Bluetooth e LoRa, podem ser adequadas. O LoRa, em especial, merece atenção devido ao seu longo alcance, baixo consumo e frequência de operação mais baixa [65]. Assim, foi avaliado o uso de comunicação via LoRa e ZigBee, que possuem baixo consumo de energia, com terminais pequenos e de baixo custo. Embora existam outras tecnologias LPWAN, como o Sigfox que é uma opção semelhante ao LoRa, este documento foca na tecnologia LoRa, por ser uma das mais difundidas atualmente [66]. Não foi possível a realização de testes com o Bluetooth pois os módulos para teste apresentaram erros na comunicação com o microcontrolador Arduino. A metodologia, os equipamentos, a configuração e os resultados das medições experimentais realizadas estão descritas na Seção 4.2.

As Tabelas 3.1 e 3.2 fazem uma comparação dos principais parâmetros considerados relevantes para o estudo das tecnologias possíveis para comunicação com os *smartphones* e os terminais vestíveis, respectivamente. São consideradas, frequência, alcance *outdoor*, taxa de transmissão e consumo como as métricas mais relevantes para este trabalho. A frequência é diretamente relacionada com a propagação da onda eletromagnética e a atenuação sofrida. Quanto maior a frequência, maiores as dificuldades para a propagação do sinal dentro da floresta. O alcance *outdoor* teórico é um parâmetro de comparação para a área de cobertura de cada tecnologia em situações ideais. Da mesma forma a taxa de transmissão teórica permite avaliar a capacidade de vazão da tecnologia e avaliar sua aplicabilidade para cada tipo de tráfego. A taxa de transmissão real no ambiente de floresta é avaliada no Capítulo 4. Por fim, o perfil de consumo das tecnologias, embora possa variar de aparelho para aparelho, permite estimar a sua possibilidade de uso com longos períodos entre recargas.

Tabela 3.1: Comparação entre tecnologias de redes sem-fio para o *smartphone*.

Métrica	Bluetooth 5.0	IEEE 802.11g	IEEE 802.11ah
Frequência	2,4 GHz	2,4 e 5 GHz	900 MHz
Alcance <i>outdoor</i>	200 m	250 m	1 km
Taxa de transmissão	2 Mbps	300 Mbps	100 kbps
Consumo	baixo	alto	baixo

Tabela 3.2: Comparação entre tecnologias de redes sem-fio para o terminal vestível.

Métrica	Bluetooth 5.0	LoRa	ZigBee
Frequência	2,4 GHz	915 MHz	2,4 GHz
Alcance <i>outdoor</i>	200 m	15 km	250 m
Taxa de transmissão	2 Mbps	0,3-50 kbps	250 kbps
Consumo	baixo	baixo	baixo

A escolha das tecnologias de comunicação influencia também, de forma decisiva, na

área de cobertura dos totens, os pontos fixos da infraestrutura. Neste contexto, é preciso avaliar a propagação na floresta e encontrar estratégias para lidar com eventuais interrupções no sinal.

Conforme mostra a Tabela 3.2, as tecnologias de comunicação disponíveis operam em diferentes faixas de frequências. O LoRa opera nas faixas de frequência de 915 MHz e 433 MHz, já o Bluetooth e o ZigBee usam a faixa de 2,4 GHz. Quanto mais alta a frequência, a propagação sofre mais intensamente o efeito da atenuação no ambiente de floresta devido à relação entre o comprimento da onda e as dimensões de partes vegetais como folhas e troncos.

Assim, deve-se considerar que a conexão entre os elementos da rede tem grandes chances de apresentar interrupções. Portanto, a arquitetura proposta neste trabalho considera o cenário de uma rede tolerante a atrasos e interrupções (DTN – *Delay and Disruption Tolerant Network*), composta por pontos fixos e móveis. Os pontos móveis são os terminais dos visitantes que, operando colaborativamente, fazem o encaminhamento dos pacotes entre si e os pontos fixos, os totens. Os totens funcionam como quiosques de dados, concentrando as informações e interconectando com o servidor central da Unidade de Conservação e/ou com a Internet.

3.2 Terminais Fixos

Os terminais fixos ou seja os totens, formam a infraestrutura da rede, que irá escoar os dados dos usuários para o servidor específico de cada aplicação. Os totens precisam ser multitecnológicos, para atender às várias demandas. Além da comunicação com os terminais móveis, tanto transparentes como interativos, os totens devem ser capazes de se comunicar entre si, sempre que necessário, e com o servidor. O servidor pode ser implementado na sede da UC, remotamente em outra localidade ou via computação em nuvem. Em qualquer destes casos é necessária uma forma de comunicação de longa distância. Como esta forma de comunicação é muito dependente da forma de implementação do servidor e da disponibilidade no local de instalação de cada totem, não será alvo de estudo neste trabalho de tese. Entretanto, como forma de recomendação geral, pode ser sugerido o uso de comunicação de dados móveis via rede de telefonia celular (2G/3G/4G/5G) sempre que estiver disponível, ou de sistemas de RF de longa distância com antenas acima da copa das árvores ou mesmo sistemas de VSAT (*Very-Small-Aperture Terminal*); este último provavelmente apenas nos abrigos devido a uma maior necessidade de recursos para a sua implantação.

A comunicação entre totens apresentam as mesmas dificuldades que a comunicação com terminais. Entretanto, como os totens não possuem limitações de recursos tão severas é possível o uso de outras abordagens. É esperada que essa comunicação aconteça raramente, uma vez que a rede é pensada para ser esparsa, ou seja, os totens estarão muito

distantes entre si. Porém, em algumas situações em que seja necessário a localização de um totem numa parte da trilha em que não haja forma de comunicação com o servidor, o escoamento dos dados pode ocorrer através de outro totem. Este tipo de situação reflete tipicamente a localização de totens para a difusão de alertas de cabeça d'água, em que é absolutamente necessário estar próximo à área aonde o desastre pode ocorrer.

Caso seja implementado apenas o serviço de monitoração de localização usando os terminais transparentes, é possível manter a tecnologia LoRa também na comunicação entre totens uma vez que a vazão requerida é baixa, reduzindo a complexidade do projeto. Para a aplicação interativa o LoRa deixa de ser uma possibilidade viável e é necessário usar sistemas de mais alta capacidade. Novamente a sugestão é o uso de sistemas de RF de longa distância com antenas acima da copa das árvores.

A propagação acima da copa das árvores também apresenta dificuldades, sendo a onda lateral o principal fenômeno envolvido [67]. Na comunicação entre totens também ocorrem variações na intensidade do sinal recebido assim como eventuais interrupções, similares às que ocorrem na comunicação com os terminais móveis. Embora os totens sejam terminais fixos, essas variações podem ser tratadas como se refletissem movimentos no transmissor da onda e alterassem o comprimento do enlace. Assim, a abordagem sugerida é considerar os totens que venham a se comunicar como de nós de uma rede em malha, com elementos móveis que podem estar momentaneamente indisponíveis.

Essa característica de grande distância entre os totens com a existência de grandes lapsos de cobertura ao longo da trilha é a motivação para a proposta de uma arquitetura de rede que junta características de DTN e IoT.

3.3 Arquitetura de Redes

Nessa seção são apresentadas as arquiteturas de redes cujos conceitos são úteis para endereçar os problemas enfrentados para prover comunicação dentro do escopo deste trabalho.

3.3.1 Redes DTN

Desenvolvida para operar em ambientes desafiadores, a tecnologia de redes DTN é capaz de lidar com atrasos e interrupções de conexão. Este tipo de rede permite encaminhar mensagens mesmo que a conexão fim a fim entre origem e destino seja intermitente ou mesmo nunca venha a existir. Para suportar essas características, a DTN utiliza o padrão “*store-carry-forward*” no qual uma mensagem pode ser armazenada por um longo período, até mesmo por horas ou dias, até que haja contato com um dispositivo próximo que possa servir de transporte de dados. Este modelo se opõe à disciplina de transmissão de pacotes do IP, de armazenar por períodos de tempo muito curtos, suficientes apenas para

o seu processamento, e logo em seguida encaminhar os pacotes (*store and forward*). Contatos em redes DTN referem-se aos períodos de tempo durante os quais dois nós mantêm um enlace de comunicação entre si. Os contatos entre os nós podem ser persistentes, sob demanda, programados/agendados, previsíveis ou oportunistas [68].

A arquitetura genérica da DTN, definida na RFC 4838 [69], prevê o uso do *Bundle Protocol* em conjunto com protocolos das camadas de convergência e de transporte, como LTP (*Licklider Transmission Protocol*) [70], TCP e UDP. O LTP é um protocolo ponto-a-ponto, projetado para ser uma camada de convergência para suportar o *Bundle Protocol*. No LTP é abordada a tolerância ao atraso e à desconexão na comunicação ponto-a-ponto com ênfase na operação em um único enlace, geralmente com atrasos muito longos. Seu uso permite separar o funcionamento do protocolo, com funções como solicitação automática para retransmissão, de problemas relacionados a quando e a quanto transmitir ou receber [71].

O *Bundle Protocol* possui a função de agrupar unidades de dados de aplicação junto com qualquer informação de controle necessária em um agregado ou *bundle*. Os nós, em seguida, encaminham este agregado ao longo de uma rota que consiste em várias máquinas intermediárias que podem armazená-lo por períodos significativos. O *Bundle Protocol* permite que seja criada uma rede sobreposta, capaz de tratar os atrasos e desconexões ao mesmo tempo em que possibilita a interoperabilidade entre redes com características diferentes [71]. A comunicação entre redes heterogêneas é feita através de *gateways*, que assim como os demais nós deve possuir armazenamento persistente. O armazenamento e a transferência de custódia são elementos essenciais para aumentar as chances de que as mensagens consigam chegar ao destino. A custódia de um agregado torna o nó responsável por manter aquela informação persistente em sua memória e encaminhá-la através da rede.

O conceito de DTN é uma das soluções empregadas para atender à demanda de comunicação do sistema de assistência ao visitante, uma vez que o ambiente florestal introduz grande variabilidade ao sinal e provoca interrupções de conectividade. Entretanto, não é usada a pilha de protocolos descrita na RFC 4838 [69]. Com o intuito de manter a simplicidade e a leveza da solução, apenas o conceito de “*store-carry-forward*” e da transferência de custódia são implementados. A floresta compartilha com os diferentes ambientes para os quais esta tecnologia é aplicável algumas características essenciais, incluindo os desafios de comunicação introduzidos por longos retardos, conectividade intermitente, taxa de transmissão de dados assimétrica entre *uplink* e *downlink*, perdas de pacotes e erros. Entretanto os terminais usados na comunicação são extremamente limitados, assim como a possibilidade de recarga das baterias destes terminais, assim a abordagem deste trabalho é simplificada. Não são feitas propostas para o uso de prioridade, roteamento, fragmentação, agregação, controle de fluxo, tratamento de congestionamento, sincronismo e comunicação *anycast* e *multicast*. Apenas a comutação de mensagens usando operações de *store-cary-forward* e a confiabilidade de encaminhamento usando

transferência de custódia são incluídas no protocolo desenvolvido para a monitoração de visitantes no ambiente florestal.

3.3.2 IoT – *Internet of Things*

A Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) é uma realidade, com novas aplicações e tecnologias surgindo a cada dia. Entre as aplicações que podem ser providas ou aperfeiçoadas através da IoT, estão as que permitem monitorar pessoas e oferecer serviços baseados em sua localização (LBS – *Location-Based Services*). Emergências, cuidados com a saúde, bem estar de pessoas em situação de vulnerabilidade, notícias e publicidade são exemplos de aplicações LBS que se beneficiam da IoT.

A IoT torna a Internet mais imersiva e penetrante ao permitir um fácil acesso e interação com uma grande variedade de dispositivos. Diversas aplicações utilizam uma quantidade potencialmente enorme de objetos, capazes de gerar uma grande variedade de dados para fornecer novos serviços aos cidadãos, empresas e administrações públicas [72]. Seguindo esta mesma linha, este trabalho visa prover assistência ao visitante de sistemas florestais.

Os benefícios da IoT incluem a conectividade avançada de dispositivos, sistemas e serviços que vão além dos cenários M2M (*machine-to-machine*) [73]. A ideia básica de IoT é que tudo, desde artefatos fabricados pelo homem até objetos naturais, pode ser conectado [74]. Especificamente, a integração de sensores, atuadores, etiquetas (*tags*) RFID e tecnologias de comunicação servem como base da IoT, permitindo que esses objetos e dispositivos cooperem e se comuniquem um com o outro para alcançar objetivos comuns [75].

Numerosos protocolos compõem o ecossistema da Internet das Coisas. Na camada de rede, um padrão *de facto* é o 6LoWPAN (*IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Network*). O 6LoWPAN foi desenvolvido para comunicação de pacotes IPv6 usando o padrão IEEE 802.15.4. Uma camada de adaptação comprime, fragmenta e remonta os pacotes IPv6. Recentemente, o grupo de trabalho do IETF 6lo (*IPv6 over Networks of Resource-constrained Nodes*) foi criado para permitir o uso do IPv6 de forma semelhante em outras redes com restrição de recursos, como *Bluetooth Low Energy* (BLE) e *Near-Field Communications* (NFC) [76–78]. A RFC 7668 [79], que especifica o IPv6 via Bluetooth LE, reutiliza a maioria das técnicas de compressão usadas no 6LoWPAN. No entanto, como a subcamada L2CAP (*Logical Link Control and Adaptation Layer Protocol*) do Bluetooth já fornece fragmentação e remontagem, os recursos de fragmentação dos padrões 6LoWPAN não são usados [80].

Na camada de aplicação, destaca-se o protocolo CoAP (*Constrained Application Protocol*) que foi projetado pelo grupo de trabalho IETF RESTful Environment para fornecer uma interface RESTful (HTTP) leve. *Representational State Transfer* (REST) é a inter-

face padrão entre o cliente HTTP e os servidores. O CoAP é projetado para permitir que sensores de baixa potência usem serviços RESTful enquanto atendem às restrições de energia [80]. Seu foco está na interoperabilidade com a web. Essa interoperabilidade é fundamental para a aplicação para *smartphones* a ser desenvolvida para implementação de DTN e para permitir o modo interativo dos serviços de assistência ao visitante.

Há diversas tecnologias de comunicação sem-fio utilizadas na IoT, cujas características técnicas variam de acordo com o tipo de serviço que oferecem. Em geral, este tipo de comunicação possui como características baixo consumo de energia, baixo custo, banda estreita e dimensões reduzidas dos dispositivos. A banda estreita, que normalmente seria uma restrição da rede, neste trabalho se torna um requisito. Devido ao fenômeno de multipercurso o uso de um canal de banda estreita permite reduzir problemas com espalhamento temporal e efeito doppler.

Os tipos de redes usados na IoT incluem as LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), WLAN (*Wireless Local Area Network*) e WPAN (*Wireless Personal Area Network*), NFC (*Near-Field Communication*) e comunicação celular, esta última padronizada pelo 3GPP (*Third Generation Partnership Project*). As tecnologias LPWAN vêm se consolidando como alternativa para atender a uma grande quantidade de terminais, porém com baixas taxas de transmissão. O LoRa, desenvolvido pela Semtech, é uma das principais tecnologias usadas em redes de baixo consumo e longa distância sendo indicada, principalmente, para aplicações de IoT que requeiram cobertura de grandes áreas. Este documento foca na tecnologia LoRa, por seu uso amplamente difundido em relação às demais tecnologias de LPWAN [66], tanto na área acadêmica como empresarial, e pelo requisito de alcance dadas as dimensões de um parque florestal.

Entre as tecnologias WPAN/WLAN, o ZigBee é amplamente usado na comunicação com sensores e atuadores, dispositivos típicos da IoT. Embora seja uma tecnologia de rede de área pessoal e, portanto, de curto alcance, o ZigBee apresenta características que trazem flexibilidade à comunicação, podendo operar desde topologias em malha até ponto-a-ponto, bem como a possibilidade de operar em múltiplos saltos. Já o IEEE 802.11, a tecnologia de rede WLAN mais difundida, é muito usado também para automação em ambientes *indoor* sendo uma opção a ser avaliada. O Wi-Fi é quase onipresente em terminais móveis, como *smartphones*, *tablets* e *notebooks*. Com alcance maior que o ZigBee, o IEEE 802.11 é empregado em redes ad-hoc, redes em malha, redes veiculares e projetos de cidades inteligentes.

Extensões das tecnologias de comunicação celular foram padronizadas pelo 3GPP para IoT. Entre as principais, estão as extensões do LTE (*Long Term Evolution*), o NB-IoT (*Narrowband IoT*) e o LTE-MTC (*LTE - Machine Type Communication*). Apesar de projetadas para atender à demanda de IoT, exigem o uso de um *SIMCard - Subscriber Identity Module Card* individual por equipamento que se conecte à rede. Devido a esta restrição que traz complexidades operacionais, assim como à falta de garantia de cobertura de rede celular

na região a ser monitorada (o interior de uma Unidade de Conservação ambiental), estas tecnologias não estão contempladas neste estudo. O protocolo NFC também não está incluído por operar apenas em distâncias extremamente curtas, da ordem de centímetros.

3.4 Comunicação Sem-Fio

As tecnologias avaliadas neste trabalho estão entre as mais utilizadas em soluções de IoT, seja em ambientes *indoor* ou *outdoor*, atendendo também aos requisitos específicos dos tipos de terminais considerados, conforme abordado na Seção 3.1. Nesta seção, fazemos uma breve descrição das principais características das três redes sem-fio escolhidas para avaliação: LoRa, IEEE 802.11 e ZigBee.

3.4.1 LoRa – *Long Range*

O LoRa, desenvolvido pela Semtech [65], é uma das principais tecnologias usadas em redes de baixo consumo e longa distância (LPWAN – *Low Power Wide Area Network*). É uma tecnologia de comunicação sem-fio complementar às redes de dados móveis das operadoras de telefonia celular e às tecnologias sem-fio de curto alcance, desenvolvida para aplicações de IoT com grandes áreas de cobertura [66, 81].

O LoRa define uma camada física (PHY) que procura atender aos requisitos de baixo consumo de energia dos objetos inteligentes e dá suporte ao protocolo LoRaWAN. A camada de enlace da pilha LoRa é especificada pelo LoRaWAN. Se caracteriza pela simplicidade do *hardware*, a diminuição do tamanho dos cabeçalhos e da complexidade da rede em termos de saltos e endereçamento, proporcionando uma comunicação bidirecional simples, com o uso de uma infraestrutura mínima e com baixo consumo de energia [82]. Por outro lado a taxa de transmissão é baixa e é considerada apenas a topologia em estrela, com o uso do LoRaWAN na camada de enlace.

A camada física (PHY) usa correção antecipada de erros (*Forward Error Correction – FEC*) e modulação por espalhamento espectral de *chirps* (*Chirp Spreading Spectrum – CSS*) [65], que varia a frequência sem mudar a fase entre símbolos adjacentes [83, 84]. O fator de espalhamento (*Spread Factor - SF*) define a razão entre a taxa de bits e a taxa de *chirps*. A especificação LoRa define seis valores diferentes para o parâmetro fator de espalhamento: SF7, SF8, SF9, SF10, SF11 e SF12 [81]. Os diferentes SFs permitem formar canais ortogonais, fazendo com que enlaces com fatores de espalhamento diferentes não tenham colisões entre si. O SF define a duração do símbolo e, juntamente com a banda e a taxa de código (*Code Rate – CR*) define a taxa de transmissão de dados. A CR define quantos bits são utilizados para redundância na mensagem, a fim de realizar a recuperação de erros. Um maior SF aumenta a sensibilidade do limiar de recepção em termos de potência, permitindo receber sinais com potências mais baixas, porém também

aumenta o tempo de duração de símbolos e diminui a taxa de transmissão do enlace [66]. A tabela 3.3 apresenta os valores teóricos da taxa de transmissão em função do SF.

Tabela 3.3: Valores teóricos da taxa de transmissão.

Fator de espalhamento	Taxa de transmissão teórica (bits/s)
SF7	21875
SF8	12500
SF9	7031
SF10	3906
SF11	2148
SF12	1172

O LoRa opera em sub-bandas da faixa de frequências não licenciadas ISM de 433, 868, e 915 MHz, com taxas de dados variando de 0,3 a 50 kbps e alcance entre 2 e 5 km (área urbana) e 15 km (área suburbana). A definição da faixa de frequência a ser usada varia de acordo com a região. No Brasil, a ANATEL permite o uso na faixa de 915 MHz e 433 MHz, sendo que esta última coincide com a faixa de rádio amador, havendo por isso restrições na potência máxima irradiada e na quantidade de nós na rede. A largura de banda pode ser definida como 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz.

O LoRaWAN é uma especificação aberta padronizada pela *LoRa Alliance*, que compreende um protocolo de comunicação [10] e uma arquitetura de rede que usa a LoRaPHY como camada física [85]. Para o controle de acesso ao meio o LoRaWAN usa uma variação do protocolo ALOHA, proporcionando a oportunidade de comunicação a vários dispositivos remotos. A arquitetura de rede LoRaWAN é tipicamente apresentada em uma topologia de estrela de estrelas em que *gateways* comutam transparentemente mensagens entre dispositivos remotos e um servidor de rede central. Cada *gateway* é o nó central de uma estrela. O servidor de rede encaminha as mensagens para o servidor de aplicação, seu destino final. Os *gateways* são conectados ao servidor de rede através de conexões de IP padrão. Os dispositivos remotos usam a comunicação sem fio LoRa em um único salto para um ou vários *gateways*.

Além do LoRaWAN, SymphonyLink™ e LoRaBlink também usam a LoRaPHY como camada física. O LoRaBlink [86, 87] adiciona suporte à operação em múltiplos saltos, não definida no padrão LoRaWAN. O uso do LoRa em topologias com múltiplos saltos é apresentado também por Van de Velde [88] através de um nó encaminhador e por Liao [89], usando transmissão concorrente. A transmissão concorrente é um protocolo de inundação usado no projeto das redes com múltiplos saltos baseadas no IEEE 802.15.4. Em vez de tentar evitar colisões de pacotes, a transmissão concorrente permite que vários nós transmita pacotes que carregam o mesmo conteúdo simultaneamente e tira proveito da existência de várias cópias do mesmo pacote para melhorar o desempenho da rede.

Neste trabalho, a camada física do Lora é uma das opções a ser avaliada para atender à

aplicação de monitoração da localização do visitante de forma transparente, entre terminal vestível e totem e entre terminais. O LoRaWAN, entretanto, não é utilizado devido à necessidade de comunicação *peer-to-peer* entre os terminais móveis. Embora pudesse ser utilizado na comunicação entre terminal móvel e totem, o LoRaWAN também não é empregado para este fim como forma de manter a simplicidade do terminal móvel vestível.

3.4.2 IEEE 802.11

O IEEE 802.11 é uma das tecnologia de comunicação mais usada atualmente, tanto para WLANs como para conexão de uma miríade de dispositivos, incluindo aqueles usados para automação e IoT. Essa grande utilização traz tanto familiaridade para usuários e técnicos, como baixo preço dos equipamentos.

A família de padrões IEEE 802.11 evoluiu através de técnicas de transmissão e codificação para comunicações sem-fio, sendo as mais comuns: FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) e OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). A transmissão usando MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*) OFDM é a mais recente e mais usada atualmente. Podendo operar a 2,4 GHz ou 5 GHz, com canais de 20 MHz a 160 MHz, os equipamentos IEEE 802.11 conseguem alcançar taxas de transmissão superiores a 1 Gbps no padrão IEEE 802.11ac operando com quatro antenas.

O IEEE 802.11 pode ser usado em redes estruturadas (*Extended Service Set - ESS*) ou ad-hoc (*Independent Basic Service Set - IBSS*). Esta última permite uma topologia muito flexível, comunicação em múltiplos saltos e a entrada e saída simplificada dos nós que a constituem [90]. A camada MAC define dois tipos de funções de acesso ao meio, a função de coordenação distribuída (DCF – *Distributed Coordination Function*) e a função de coordenação em um ponto (PCF – *Point Coordination Function*), utilizando *polling*. O DCF é o mecanismo básico de controle de acesso ao meio do IEEE 802.11, sendo um protocolo de acesso aleatório do tipo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*).

Os módulos usados para teste são do padrão IEEE 802.11g por operar na faixa de 2,4 GHz e haver módulos compatíveis com o Arduino disponíveis. Este padrão surgiu como uma evolução do IEEE 802.11b. Seu principal atrativo é a taxa de transmissão de até 54 Mb/s, com frequências na faixa de 2,4 GHz (canais de 20 MHz). A técnica de transmissão utilizada nesta versão é o OFDM; todavia, quando é feita comunicação com um dispositivo 802.11b, passa a ser o DSSS.

3.4.3 ZigBee

O ZigBee designa um conjunto de especificações para a comunicação sem-fio entre dispositivos eletrônicos. É uma tecnologia de rede sem-fio de área pessoal (WPAN –

Wireless Personal Area Network). As camadas física e de acesso ao meio estão definidas no padrão IEEE 802.15.4. Suas características principais são baixo custo, baixo consumo de energia e reduzida taxa de transferência de dados. Por conta disto, é comum sua aplicação em monitoramento e controle industrial, automação residencial e de sistemas de energia. O ZigBee possui alcance de até 250 m com taxa de dados até 250 kbps. Pode operar nas faixas de 868 MHz na Europa, 915 MHz nos EUA e Austrália, e de 2,4 GHz na maioria dos países. No Brasil, é usada a canalização na faixa 2,4 GHz, com 16 canais com 2 MHz de largura e modulação QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) e espalhamento espectral por sequência direta (DSSS) [91].

A ZigBee Alliance define duas camadas, uma que provê serviços de rede e de segurança, e outra de aplicação, para a estrutura básica, subsequente àquelas estabelecidas pelo padrão IEEE 802.15.4 segundo modelo OSI. Oferece serviços de encriptação, com o uso de chaves de aplicação e de rede que implementam criptografia AES-128 (*Advanced Encryption Standard* com 128 bits), roteamento e serviços de associação e autenticação. Trata-se de um protocolo adaptável a cenários com mobilidade, que tende a evitar desperdício de banda e minimizar o processamento nos nós que atuam na rede. O ZigBee também aplica o conceito de *cluster*, em que cada nó pertence a um *cluster* predefinido e pode tomar um número predefinido de ações.

A camada de rede do ZigBee suporta nativamente as topologias em estrela, árvore e malha. Cada rede deve ter um dispositivo coordenador, encarregado de sua criação, controle de seus parâmetros e manutenção básica. Dentro de redes em estrela, o coordenador deve ser o nó central. Em todas as topologias é possível o uso de roteadores ZigBee para estender a comunicação ao nível da rede.

Existem três tipos diferentes de dispositivos ZigBee: o coordenador ZigBee (ZC – *ZigBee Coordinator*), o roteador ZigBee (ZR – *ZigBee Router*) e o dispositivo final ZigBee (ZED – *ZigBee End Device*). O ZC, ou dispositivo de função completa (FFD – *Full Function Device*) [91], realiza o papel de raiz da árvore. Ele é capaz de armazenar informações sobre a rede, inclusive atuando como repositório de chaves de segurança. O ZR pode funcionar como um roteador intermediário, transmitindo dados de outros dispositivos, e como um executor de funções da aplicação. O ZED é um dispositivo com funções reduzidas (RFD – *Reduced Function Device*), que contém funcionalidade apenas para se comunicar com o nó pai (coordenador ou roteador) e não pode retransmitir dados de outros dispositivos.

Os dispositivos Zigbee possuem dois modos de operação: o modo beaconing e o non-beaconing, que contribuem para o baixo consumo de energia do protocolo. Nós ZigBee podem ir do sono ao modo ativo em 30 ms ou menos, bastante ágeis, particularmente em comparação com os atrasos do Bluetooth *wake-up*, que é tipicamente em torno de três segundos. Como os nós ZigBee podem dormir a maior parte do tempo, o consumo de potência média pode ser reduzida, resultando em longa duração da bateria.

A flexibilidade apresentada pelo ZigBee é desejável para o projeto, assim como a comunicação em múltiplos saltos. Entretanto, para caracterizar o desempenho de um enlace na floresta, foi usada apenas a comunicação ponto-a-ponto. O ZigBee é outra tecnologia candidata para a comunicação entre visitantes na trilha usando o terminal móvel vestível.

3.4.4 Bluetooth

O Bluetooth também é uma tecnologia WPAN, porém desde a versão 4.0, seu foco é cada vez maior em IoT. A nova versão traz melhorias importantes neste sentido, para a versão de baixo consumo (BLE – *Bluetooth Low Energy*). No Bluetooth 5.0 existem três tipos de conexões Bluetooth: BLE 4.x, Bluetooth 5 a 2 Mbps e Bluetooth 5 Coded. O Bluetooth 5 Coded é um novo tipo de conexão voltada para fornecer conexões de longa distância, mas com uma menor taxa de bits [63].

A primeira alteração está relacionada a um aumento significativo no alcance para 200 m *outdoor* e cerca de 40 m *indoor*. A melhoria na velocidade de transferência de dados também é uma característica significativa: o Bluetooth 5 pode suportar até 2 Mbps. No Bluetooth 4 o alcance é de 100 m *outdoor* e 20 m *indoor*. A taxa de transmissão nominal do Bluetooth 4 é de 1 Mbps.

LE 1M, a camada física usada no Bluetooth 4, usa modulação *Gaussian Frequency Shift Keying* (GFSK) e tem uma taxa de símbolos de 1 Ms/s (mega símbolos por segundo). Além da camada física LE 1M, o Bluetooth 5 também suporta as opções LE 2M PHY e LE Coded PHY. A LE 2M permite à camada física operar a 2 Ms/s e, portanto, maiores taxas transmissão de dados. A modulação GFSK continua sendo usada, porém com desvio de frequência de 370 KHz, o dobro do desvio de 185 MHz usado na LE 1M, para diminuir a probabilidade de interferência intersimbólica, aumentada pela maior taxa de símbolos [92].

Para aumentar o alcance o Bluetooth 5 Coded usa métodos de detecção e correção de erro, permitindo que os dados possam ser extraídos corretamente do sinal recebido, mesmo com uma relação de sinal/ruído (SNR – *Signal to Noise Ratio*) baixa, e reduzir a taxa de erro de bit (BER – *Bit Error Rate*). Isso é feito na LE Coded PHY em dois estágios. Primeiro é feita a codificação para detecção de erros usando CRC (*Cyclic Redundancy Check*), em seguida um codificador convolucional faz a codificação para correção de erros (FEC – *Forward Error Correction*). Podem ser usados dois esquemas de codificação, que permitem duplicar ou aproximadamente quadruplicar o alcance [92, 93].

O Bluetooth 5 Coded também traz a capacidade de enviar pacotes de dados especiais, chamados “*advertising packets*”, que permite a troca de pacotes e informações entre dispositivos Bluetooth mesmo que não estejam sincronizados entre si. Esses pacotes são maiores no Bluetooth 5, 255 octetos em comparação com 37 octetos no Bluetooth 4, per-

mitindo o anúncio de mais dados. Adicionalmente, o Bluetooth 5 usa menos recursos de energia, consumindo cerca de duas vezes menos potência [62, 92].

3.5 Considerações

As tecnologias de comunicação sem-fio apresentadas neste capítulo são candidatas para uso no projeto por suas características e possibilidade de uso em cada tipo de terminal ou como parte da arquitetura da rede proposta no Capítulo 5. Entretanto, a sua real aplicabilidade no ambiente de floresta precisa ser investigada, com a realização de testes de campo, experimentos práticos no ambiente real. Estes testes visam a sua avaliação do seu comportamento dentro da floresta, conforme descritos no Capítulo 4.

Capítulo 4

Avaliação de Redes Sem-Fio no Ambiente de Floresta

As novas tecnologias de rádio para comunicação para a Internet das Coisas (IoT) e para redes de sensores sem-fio (WSN) simultaneamente instigam e atendem a demanda por novos serviços e aplicações. Estes novos usos trouxeram a necessidade de comunicação em diferentes ambientes. Um desses ambientes em que a propagação da onda eletromagnética é extremamente desafiadora são as florestas tropicais, ambientes onde a umidade é muito alta e há grande quantidade e diversidade de vegetação.

Os estudos, experimentos e o tratamento dos dados descritos neste capítulo da tese foram realizados em conjunto com o doutorando Fernando Molano Ortiz e em parceria com o Parque Nacional Serra dos Órgãos (PARNASO) na cidade de Teresópolis. O PARNASO é um enorme parque natural, com grande parte de sua área coberta por florestas tropicais, entre outros biomas. Nesse ambiente, os visitantes estão sujeitos a vários riscos, principalmente se perderem ou se machucarem na floresta. Uma maneira de reduzir os riscos dos visitantes é rastrear sua localização e atividades. Isso pode ser conseguido através da criação de redes sem-fio [94]. Nessas redes também podem trafegar informações e alertas aos visitantes, além dos dados de localização.

Nos estudos realizados, diferentes tecnologias foram avaliadas no ambiente florestal [95, 96]. A potência recebida, mensurada através do RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), a relação sinal-ruído (SNR – *Signal-to-Noise Ratio*), a taxa de entrega de pacotes (PDR – *Packet Delivery Ratio*) e o tempo entre a chegada de pacotes subsequentes (PIR – *Packet Inter-Reception time*) são métricas usadas para avaliar o comportamento e o alcance dos links de comunicação. Além do alcance reduzido devido à forte atenuação, os enlaces têm um comportamento intermitente, levando à comunicação com características oportunistas, nas quais não é possível garantir a conexão entre os nós. Esse comportamento é uma consequência da atenuação em pequena escala, um dos principais fenômenos de propagação na floresta. O principal desafio para a implantação de redes sem-fio em trilhas de parques florestais, como o PARNASO, é a dificuldade de propagação.

Este capítulo relata a parte do trabalho em que são tratadas questões relacionadas à radiocomunicação: a escolha da tecnologia, a caracterização do comportamento do sinal e a escolha do modelo de propagação mais adequado ao ambiente florestal. Este trabalho é baseado em um conjunto de experimentos de campo. Uma campanha de medição foi realizada com experimentos distribuídos num período de 18 meses em diferentes momentos, considerando variações na estação do ano e nas condições atmosféricas e pluviométricas, com o objetivo de identificar o comportamento dos enlaces de rádio dentro da floresta, usando as frequências de 915 MHz e 2,4 GHz.

As amostras coletadas foram trabalhadas em ferramentas computacionais. Tanto os dados coletados em campo quanto as simulações realizadas são fundamentais para a compreensão dos mecanismos de propagação envolvidos. Distribuições de probabilidade tradicionais são usadas para analisar o conjunto de dados, revelando a necessidade de um modelo de propagação mais adequado ao ambiente da floresta. Os resultados dos experimentos e simulações são usados para apoiar a definição de um modelo e a escolha da tecnologia para troca de mensagens. Essa tecnologia para a comunicação com o terminal transparente, é a LoRa que apresenta maior alcance. Embora a taxa de dados do LoRa seja reduzida, ainda atende à aplicação de monitoração da localização.

A floresta é um ambiente hostil à propagação de sinais de radiofrequência. As árvores causam forte atenuação, intensa variabilidade de sinal e até interrupções. Fenômenos como difração, reflexão, refração e espalhamento afetam a propagação das ondas eletromagnéticas. A intensidade e recorrência desses fenômenos dependem da frequência da onda e, principalmente, das características do ambiente.

Assim, neste capítulo, apresentamos as principais características da propagação de sinais de radiofrequência na floresta. Em seguida, apresentamos a campanha de experimentos realizada para avaliar as três tecnologias de redes sem-fio consideradas para a implementação do sistema de assistência ao visitante. Finalmente, investigamos um modelo de propagação para a tecnologia LoRa, a fim de implementar um modelo de simulação que permita testar a rede com uma escala maior, antes de sua implementação no ambiente real.

O estudo da propagação em ambientes de floresta tropical úmida e a investigação de características específicas da comunicação neste ambiente são a principal contribuição científica deste trabalho.

4.1 Propagação na Floresta

A propagação de ondas eletromagnéticas é fortemente afetada no ambiente florestal pelos fenômenos de absorção, atenuação e espalhamento, conforme descrito em [13]. A representação da floresta como uma “camada dielétrica dissipativa” se torna ruim para frequências acima de 200 MHz, onde a vegetação não pode ser considerada como um

meio homogêneo, uma vez que as dimensões da vegetação estão na magnitude de uma ordem do comprimento da onda. Portanto, a propagação de campos elétricos passa a ser expressa em termos de ondas diretas, múltiplas ondas refletidas e ondas laterais [97].

Como a floresta é um meio com características aleatórias devido aos muitos dispersores discretos, como folhas, galhos e troncos de árvores distribuídos aleatoriamente, as ondas de rádio experimentam naturalmente dispersão, difração, espalhamento, múltiplas reflexões e absorção. Esses diferentes mecanismos de propagação, quando combinados, podem resultar em atenuação severa do sinal recebido [41]. Além disso, observou-se que quando um enlace passa pela vegetação, a amplitude do sinal recebido varia rapidamente quando a vegetação se move. A principal causa do movimento é o vento. Verificou-se que, à medida que a folhagem das árvores se move, o nível do sinal varia dinamicamente em uma ampla faixa [53].

A interação da onda eletromagnética com a vegetação também varia dependendo da frequência do sinal e do tipo de vegetação, sua densidade e condições fisiológicas. Parte da energia é refletida no contato com a superfície da folha, parte é absorvida, parte é espalhada nas estruturas internas da folha e, finalmente, a porção não retida pela folha é transmitida para outras camadas do dossel de folhas. O dossel pode ser entendido como o resultado da sobreposição de folhas [98]. A absorção parcial ou total dos componentes espectrais do sinal pode causar o fenômeno de ressonância. Um regime oscilatório inerente às múltiplas ressonâncias que ocorrem nas bandas VHF/UHF afeta o sinal recebido com picos de ondas e vales não uniformes [99].

O desvanecimento em larga e pequena escala está relacionado às variações lentas e repentinas no envelope do sinal, respectivamente. A atenuação em larga escala, ou sombreamento, é causada pela perda de caminho e variações lentas e previsíveis em torno da média que ocorrem em grandes escalas de tempo e espaço. A atenuação em pequena escala refere-se a atenuações repentinas e que ocorrem com pequenos deslocamentos, ou seja, em uma pequena escala de tempo e espaço. A principal causa de variações em pequena escala é a ocorrência do fenômeno de multipercurso, que consiste em sobrepor diferentes versões do sinal no receptor, com diferentes amplitudes, fases e atrasos. A composição desses sinais pode amplificar, atenuar, modificar o envelope ou até aniquilar o sinal recebido. O fenômeno de multipercurso afeta o sinal de duas maneiras: espalhamento temporal e comportamento variável no tempo. O espalhamento temporal causa um aumento e uma variação na duração do símbolo, que é equivalente à filtragem e limitação da largura de banda, ou seja, seletividade de frequência. O comportamento da amplitude variável no tempo é a atenuação em pequena escala.

Todos estes fenômenos contribuem para a degradação do sinal, reduzindo sua potência recebida e a relação sinal/ruído e, assim, reduzindo também o alcance do enlace e a taxa de entrega de pacotes. Estes fenômenos são mais severos de acordo com o aumento da frequência, assim entre as redes analisadas as que mais sofrem são as que operam na faixa

de 2,4 GHz, ou seja, ZigBee e IEEE 802.11g.

4.2 Experimentos no PARNASO

Nesta seção, é descrita a campanha de medições realizada na sede de Teresópolis do Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO), ao longo de 18 meses. Os objetivos dos experimentos são:

- identificar a tecnologia de comunicação de redes sem-fio mais adequada para uso no projeto,
- avaliar o desempenho da tecnologia escolhida,
- caracterizar o comportamento do sinal,
- modelar a propagação na floresta para as bandas de frequência escolhidas.

As tecnologias ZigBee, IEEE 802.11g e LoRa, discutidas na Seção 3.4, foram analisadas considerando como métricas o alcance, RSSI, SNR, PDR e o atraso. Para a tecnologia LoRa também foi avaliada a variação do fator de espalhamento (SF), parâmetro configurável que afeta muito o seu desempenho. Os resultados dessas experiências foram utilizados para apoiar a escolha da tecnologia de comunicação necessária para a aplicação da localização.

Infelizmente, não foi possível a realização de testes com Bluetooth e IEEE 802.11ah. Não foi possível a aquisição de módulos IEEE 802.11ah devido ao alto custo. Os módulos de teste do Bluetooth disponíveis apresentaram dificuldades para a leitura dos dados enviados a partir do microcontrolador Arduíno Uno R3 utilizado nos protótipos desenvolvidos para este trabalho, conforme detalhado na Seção 4.2.1.

A atenuação causada pelo desvanecimento em larga escala e as variações causadas pelo desvanecimento em pequena escala também são estudadas. Os dados coletados nas experiências práticas são analisados separadamente, usando os modelos apropriados para cada tipo de desvanecimento e depois combinados. A diferença encontrada entre os dados e os modelos utilizados se dá pelas simplificações do modelo de simulação, que não consegue reproduzir completamente o efeito da realidade.

Após os testes considerando a atenuação em larga escala e o alcance, a tecnologia LoRa foi a escolhida para ser usada no projeto. Estes testes estão descritos na Seção 4.3.1.

Em seguida, foram realizadas experiências para modelagem do desvanecimento em pequena escala, em que foram coletados dados para identificar a variação temporal do sinal dentro da floresta. O espalhamento temporal não é considerado devido ao uso de canais de faixa estreita e da modulação baseada em CSS – *Chirp Spread Spectrum* pela tecnologia LoRa. Os parâmetros observados são RSSI, SNR, PDR e PIR em experimentos

com 12 h de duração em enlaces de 250 m de comprimento. Esta distância corresponde ao alcance máximo alcançado usando LoRa com SF12 dentro da floresta. Os testes sobre desvanecimento em pequena escala são descritos na Seção 4.3.2.

4.2.1 Metodologia

O local escolhido para os experimentos práticos foi a sede de Teresópolis do Parque Nacional Serra dos Órgãos (PARNASO). Mais especificamente, os testes foram realizados na chamada “trilha suspensa” do Parque. Essa trilha foi escolhida pela facilidade de acesso e de instalação dos protótipos. Dois protótipos dos nós são usados para criar os cenários de medição, responsáveis pelo envio e recebimento de pacotes nos testes. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram o ambiente de medições e os protótipos utilizados. Na Figura 4.1 é mostrada a vista aérea, obtida com o uso da ferramenta Google Earth, da trilha onde foram feitas as medições e um mapa simplificado do PARNASO que retrata esta mesma trilha. Na Figura 4.2 são mostrados os protótipos utilizados nas medições e vistas ao longo da trilha.

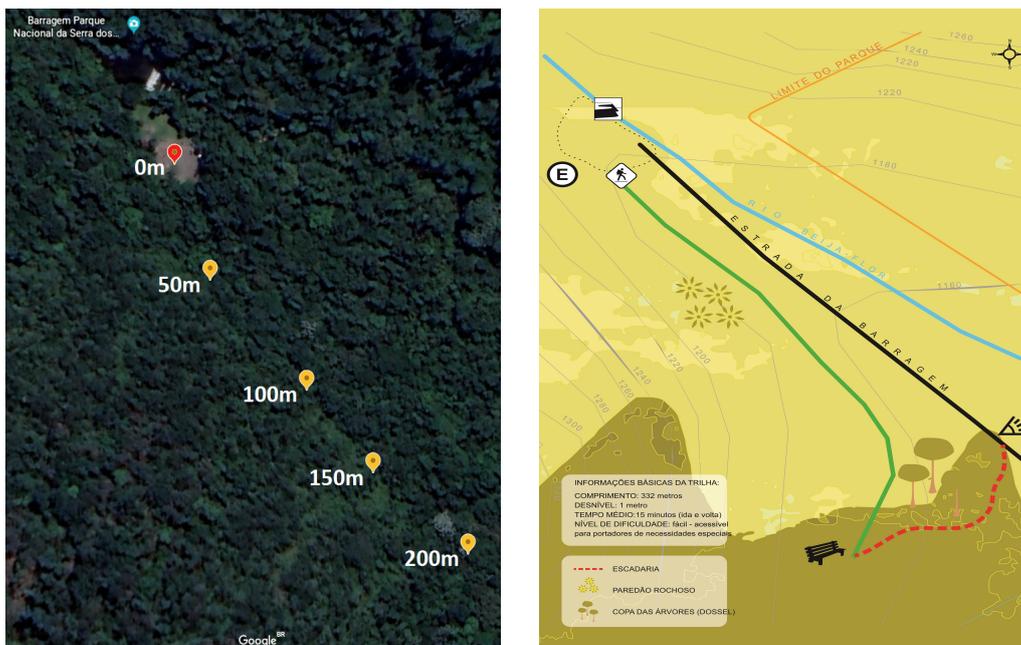


Figura 4.1: Mapas da trilha.

4.2.2 Cenários de testes

Quatro cenários são criados para experimentos práticos:

- **Cenário estático de curta duração:** procura descobrir o alcance máximo na floresta e delinear o comportamento do sinal analisando seus principais parâmetros de desempenho, relacionando-os à distância. Estuda o efeito do desvanecimento em larga escala.



Figura 4.2: (a, b) Cenário dos experimentos. (c) Protótipos dos nós.

- **Cenário estático de longa duração:** através da medição contínua em um intervalo de tempo muito maior que o cenário anterior, o comportamento do sinal é avaliado ao longo do tempo a uma distância pré-estabelecida para identificar as variações em pequena escala.
- **Cenário com um nó móvel:** estuda o efeito da mobilidade no enlace de comunicação. O impacto do deslocamento de um transmissor em diferentes velocidades e um receptor fixo é verificado.
- **Cenário com dois nós móveis:** semelhante ao anterior, mas neste cenário o transmissor e o receptor são móveis. Busca-se identificar alterações no sinal causadas pela mobilidade e cruzamento de dois nós.

No cenário estático de curta duração, foram selecionados pontos para a localização das unidades transmissoras e receptoras para obter enlaces com comprimento variando em passos de 50 m para o LoRa e 10 m para o IEEE 802.11g e para o ZigBee até que não fosse mais possível receber pacotes. A diferença nos passos usados entre as tecnologias se deve à diferença de alcance teórico de cada uma. Como IEEE 802.11g e ZigBee possuem um alcance menor, espera-se que este comportamento se repita dentro da floresta. Assim, o uso de passos mais curtos permite gerar dados com maior granularidade e identificar com maior precisão a distância a partir da qual não é mais possível receber pacotes. Como o LoRa possui um alcance teórico muito maior, o uso de passos pequenos gera uma enorme quantidade de medições com resultados muito similares. Para que haja

variações significativas nas medidas descrevendo o comportamento do enlace, são usados passos maiores. A linha de visada estava parcialmente obstruída, coberta de vegetação até 50 m. Após essa distância, não havia mais linha de visada. O teste é feito com o envio de 10 conjuntos de pacotes, numerados de 1 a 200, para cada ponto. Nesse cenário, são analisadas as seguintes métricas:

- alcance máximo;
- potência recebida (RSSI) de cada pacote;
- relação sinal ruído (SNR) de cada pacote;
- taxa de entrega de pacotes (PDR) para cada sequência de 200 pacotes enviados.

O cenário estático de longa duração analisa o comportamento do sinal durante um intervalo de medição mais longo. O objetivo é identificar variações e interrupções recorrentes. As medições de longo prazo foram feitas utilizando o fator de espalhamento SF12 a uma distância de 250 m, durante 12 h. Esse tempo foi definido de acordo com a duração das baterias que fornecem alimentação para o equipamento. A linha de visada foi obstruída pela vegetação. A distância de 250 m foi escolhida porque foi identificada como alcance máximo real do LoRa operando com SF12 no ambiente florestal durante as medições no cenário fixo. Essa distância é extremamente pequena se comparada ao alcance teórico descrito na literatura, de até 15 km, que se refere a ambientes abertos com linha de visada desobstruída. Esse fato mostra a importância da atenuação da vegetação. No cenário estático de longa duração, os parâmetros RSSI, SNR, PDR e PIR também são avaliados.

Além de estudar o comportamento do sinal na floresta, os cenários fixos permitem reproduzir a comunicação entre dois nós fixos da infraestrutura de comunicação necessária para o projeto de assistência aos visitantes. Medições de longa duração indicam que a conectividade da infraestrutura no ambiente da floresta pode se comportar de maneira inconstante, levando a uma conexão intermitente.

Os cenários móveis permitem avaliar a comunicação dos caminhantes, os visitantes do Parque. No sistema de assistência ao visitante proposto, os terminais podem se comunicar entre si e/ou com um ponto de acesso fixo, o totem.

Os testes realizados nos dois cenários móveis usam o SF12, distância 250 m como limite de alcance e velocidades de 3 km/h (50 m/min) e 6 km/h (100 m/min). Essas velocidades são definidas com base no comportamento esperado do visitante. De acordo com a Federação de Esportes de Montanha do Rio de Janeiro (FEMERJ), uma trilha moderada, com até 12 km de comprimento e até 600 m de subida ou 800 m de descida, pode ser percorrida a uma velocidade média de 6 km/h (100 m/min) por um praticante bem treinado [100]. Esse tipo de visitante é o caso com o menor tempo médio de contato entre os

terminais. Também foi considerado o caso do visitante mediano, que se move mais lentamente, a 3 km/h (50 m/min). Visitantes lentos, que se deslocam a 1,5 km/h (25 m/min) não foram reproduzidos por serem um caso muito mais simples do que os demais.

Para fazer as medições, a caminhada se inicia no ponto de alcance máximo (250 m), enquanto são transmitidos pacotes constantemente. No cenário com um nó móvel, apenas o transmissor se move, enquanto o receptor está parado. Este cenário ilustra um visitante se comunicando com um ponto de acesso. No cenário com dois nós móveis, os dois terminais são movidos simultaneamente e na mesma velocidade. Um inicia o movimento do ponto de alcance máximo (250 m) e o outro começa a partir do ponto de origem (0 m), cruzando-se no meio do caminho e reproduzindo a comunicação ponto a ponto entre dois terminais de visitantes. Nos dois cenários móveis, os mesmos parâmetros são avaliados e relacionados à velocidade. São eles: RSSI, SNR, PDR e tempo de contato.

Equipamentos e parâmetros de configuração

Neste estudo são utilizados dois protótipos de nós. Esses protótipos experimentais, cujos componentes de hardware estão descritos na Tabela 4.1, são compostos por unidades controladoras Arduino UNO, receptor GPS e rádios programáveis comumente disponíveis no mercado para cada tecnologia: LoRa, ZigBee e IEEE 802.11g. A precisão da localização do GPS é de 2,5 m [101].

O controlador processa dados de sensoriamento, localização e comunicação. O sensoriamento é realizado pelo sensor de temperatura e umidade DHT22, a localização é fornecida pelo receptor GPS e a comunicação é realizada via interface sem-fio. Os pacotes enviados transportam os dados gerados pelos sensores DHT22. A intenção inicial era avaliar a relação entre umidade e temperatura e os fenômenos de propagação observados. Entretanto a pouca granularidade das medições realizadas pelo sensor tornou muito imprecisa essa avaliação. Assim, os dados gerados foram usados apenas como preenchimento para o *payload*.

A comunicação consiste na transmissão de tuplas de dados que incluem um número de sequência, coordenadas geográficas (obtidas pelo receptor GPS, quando possível), registro de data e hora, temperatura e umidade. O preâmbulo tem tamanho de 8 bytes e o tamanho total do pacote é de 47 bytes, considerando a tupla de dados e o cabeçalho LoRa. O recebimento de cada pacote é contabilizado, armazenando junto com seus dados os registros de data e hora da recepção, RSSI e SNR.

Os pacotes são gerados e armazenados por programas escritos em *python*, que são executados em notebooks com sistema operacional Ubuntu Linux v.18.04, 16 GB de RAM, armazenamento de 2 TB e processador Intel core i7. No cenário estático de longa duração, os notebooks foram substituídos por dois Raspberry Pi 3 modelo B versão 1.2 com sistema operacional Raspbian Strength 2019-04-08, 1 GB de RAM, processador Quadcom Core Broadcom BCM2837B0 ARM Cortex-A53 de 64 bits e um Scandisk Ultra 32 GB como

armazenamento.

Tabela 4.1: Componentes de hardware dos protótipos.

	LoRa	ZigBee	IEEE 802.11g
Controlador	Arduino Uno R3		NodeMCU 1.0 ESP12E
Interface sem-fio	Dragino RF96	Series 1	ESP8266MOD Ai-Thinker
Antena	Monopolo 7dBi D-Link	Fio 1,5 dBi	Impressa 2 dBi
Receptor GNSS	U-blox NEO-6M		
Sensor	Sensor de umidade e temperatura DHT22		
Consumo na recepção	10.8 mA	42 mA	15 mA
Consumo na transmissão	120 mA	45 mA	140 mA

A tabela 4.1 também apresenta o consumo dos módulos de transmissão de cada tecnologia fornecido pelos fabricantes. Os valores mostram a corrente consumida tanto na recepção como na transmissão. Este valores devem ser confirmados em laboratório, especialmente para o LoRa, uma vez que o consumo pode variar para os vários SF, devido à diferença de tempo ao ar, ou seja, o tempo gasto para sinalizar o quadro na interface.

Os parâmetros de configuração dos módulos são apresentados na Tabela 4.2. No caso da tecnologia LoRa, também são feitos experimentos para diferentes valores de SF (7, 9, 12). Esses fatores de espalhamento foram selecionados porque descrevem o comportamento da tecnologia de forma breve, sem a necessidade de testar todos os SF, pois são os limites superior e inferior mais um SF intermediário. Para cada transmissão, 10 conjuntos de 200 pacotes, numerados de 1 a 200, são enviados.

Tabela 4.2: Parâmetros de configuração.

	LoRa	ZigBee	IEEE 802.11g
Frequência	915 MHz	2,4 GHz	2,4 GHz
Potência de Transmissão	14 dBm	14 dBm	14 dBm
Fator de Espalhamento	SF (7, 9, 12)	—	—
Largura de Banda	500 kHz	5 MHz	20 MHz
Protocolo de Transporte	—	—	UDP

4.3 Análise do Comportamento do Sinal

Esta seção apresenta os resultados obtidos no envio de pacotes entre o transmissor e o receptor a partir das configurações descritas na Seção 4.2.1, implementadas nas experiências práticas de cada cenário.

4.3.1 Cenário estático de curta duração

Os testes neste cenário visam avaliar o desempenho das tecnologias de comunicação sem-fio consideradas viáveis para uso no trabalho em termos do alcance obtido. Para

tanto, as métricas PDR, RSSI e SNR são avaliadas à medida que a distância aumenta com a execução de 10 rodadas por ponto, cada uma consistindo no envio de 200 pacotes. A Figura 4.3 ilustra o terminal fixo e o terminal móvel que se desloca para os pontos pré-definidos de medição, mostrados na Figura 4.4. Os resultados são apresentados com um intervalo de confiança de 95%, representado por barras de erro verticais nos gráficos. Conforme descrito na Seção 4.2.1, as distâncias variam em passos de 50 m para LoRa e 10 m para IEEE802.11g e ZigBee. Os resultados obtidos subsidiam a escolha da tecnologia mais adequada e servem de referência para os demais cenários.

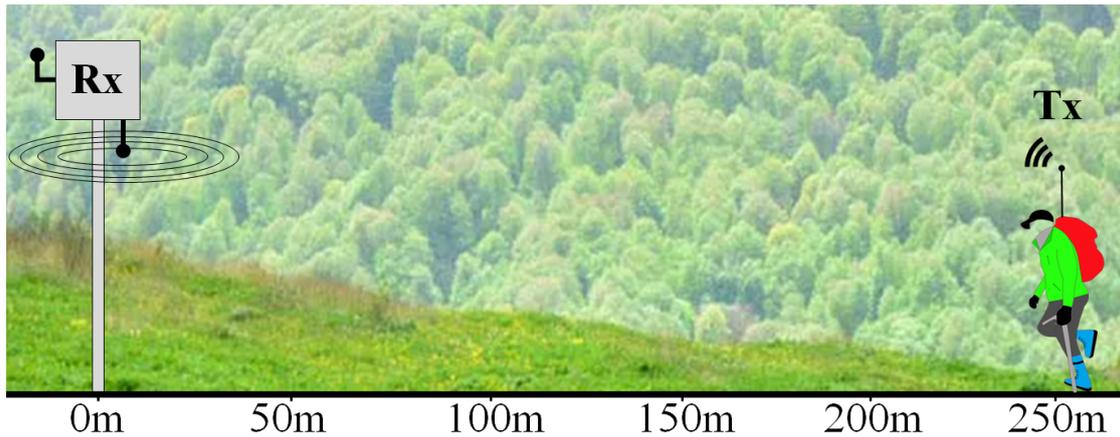


Figura 4.3: Cenário estático de curta duração.

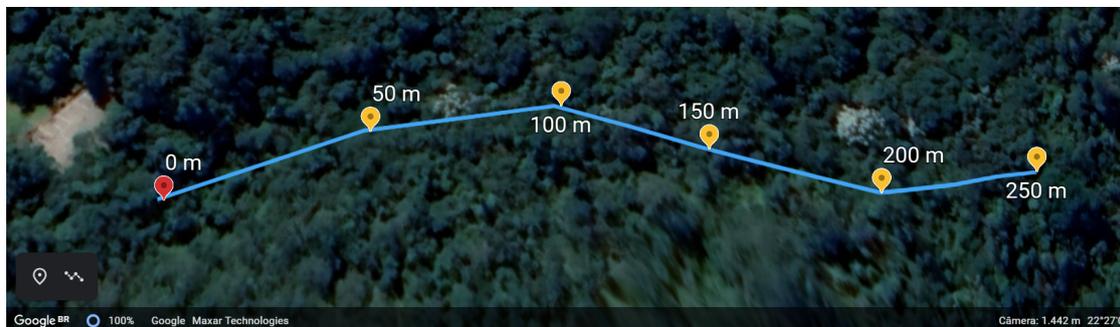


Figura 4.4: Pontos de medição do cenário estático de curta duração.

A medição de potência foi obtida a partir das informações de RSSI e SNR fornecidas pelas bibliotecas implementadas nos módulos de rádio. A Figura 4.5 mostra o comportamento da potência no enlace, através do RSSI e da SNR. Observa-se o sinal fortemente atenuado, confirmando a degradação esperada causada pela vegetação: há uma queda abrupta nos primeiros 100 m que atinge todas as três tecnologias. Entretanto, o LoRa apresenta um decaimento mais suave a partir deste ponto, ainda havendo recepção do sinal com uma potência inferior a -120 dBm. Esse comportamento é mais perceptível para o SF12, uma vez que este fator de espalhamento tem um alcance maior, e é consistente com o fato de o LoRa ser uma tecnologia projetada para operar em baixa potência. Seu alcance é significativamente maior, chegando a 250 m com RSSI de -124 dBm. O IEEE 802.11g atinge

60 m com RSSI de -94.99 dBm e o ZigBee 30 m com RSSI de -80.56 dBm. Assim, o alcance máximo do LoRa é aproximadamente 4 vezes maior que o do IEEE 802.11g e 7 vezes maior que o do ZigBee, mesmo operando com intensidade de sinal recebido menor do que as duas tecnologias, em média 23,39% e 35,03% menor, respectivamente. A justificativa para esses resultados é a modulação baseada em CSS implementada pelo LoRa. A operação em maiores distâncias com potências mais baixas é possível devido ao espalhamento do sinal pelo espectro, sua maior resistência à dispersão temporal e à utilização de uma faixa de frequências mais baixa, que sofre menos com a atenuação do ambiente.

A SNR também apresenta um decaimento, conforme esperado, semelhante ao RSSI. Entretanto para os SF12 e SF9 do LoRa podemos observar a manutenção de um platô, antes de iniciar uma queda consistente da SNR. Esse comportamento é atribuído à maior resistência a ruídos da modulação CSS, uma vez que na recepção a recuperação do sinal original leva à restauração do sinal em faixa estreita, concentrando a sua potência na faixa de interesse, e ao espalhamento espectral do ruído, reduzindo a sua influência. No ponto de 200 m observamos um valor de SNR de -18,73 dB, abaixo do verificado no ponto seguinte de 250 m apesar deste receber menos potência, ou seja seu RSSI ser mais baixo. Isso indica que o nível de ruído neste ponto é maior do que nos demais. Este fato se deve à presença de um paredão de pedra ao lado do ponto de medição em que ocorre a reflexão difusa do sinal, gerando muitas ondas espúrias. Estas cópias espalhadas e distorcidas do sinal se comportam como um ruído que escapa à resistência da modulação CSS.

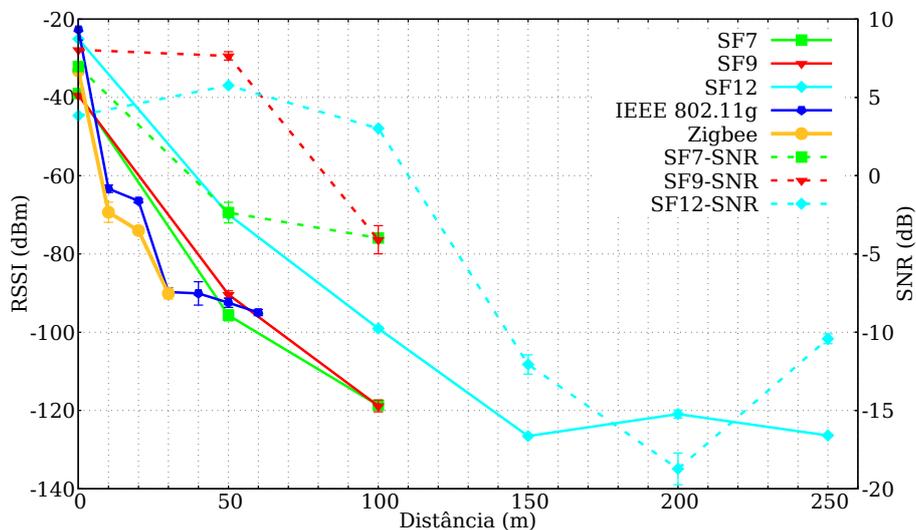


Figura 4.5: RSSI e SNR medidas em função da distância entre transmissor e receptor.

A Figura 4.6 apresenta a taxa de entrega no enlace que exibe um comportamento de acordo com o esperado, reduzindo seu valor com a distância. Como pode-se observar na comparação com o gráfico anterior, enquanto houve potência útil, ou seja o RSSI esteve acima de seu valor mínimo de recepção, a PDR se manteve acima de 80%. Entretanto o SF12 teve uma redução anômala no PDR, caindo para quase 45% a 200 m, o que é ex-

plicado pela presença de obstáculos próximos ao ponto. Os experimentos neste ponto foram repetidos três vezes em diferentes condições atmosféricas, para tentar identificar variações nesse comportamento. No entanto, o padrão de perda severa em 200 m permaneceu indicando a influência de outros fatores além das variações devido ao fenômeno de multipercurso. A degradação do SNR também foi observada neste ponto, como mostra a Figura 4.5. O baixo SNR de -18,73 dB explica a aparente incongruência entre RSSI e PDR neste ponto. A PDR se reduz devido ao descarte de pacotes ou à recepção de uma menor quantidade de pacotes. São descartados pacotes recebidos com muitos erros, que podem ser gerados por ruído. O nível excessivo de ruído é confirmado avaliando o valor da SNR. Já uma potência recebida muito baixa, em torno do limiar de operação, pode impedir a correta recepção dos pacotes. Assim, potência baixa e ruído alto são ofensores da PDR.

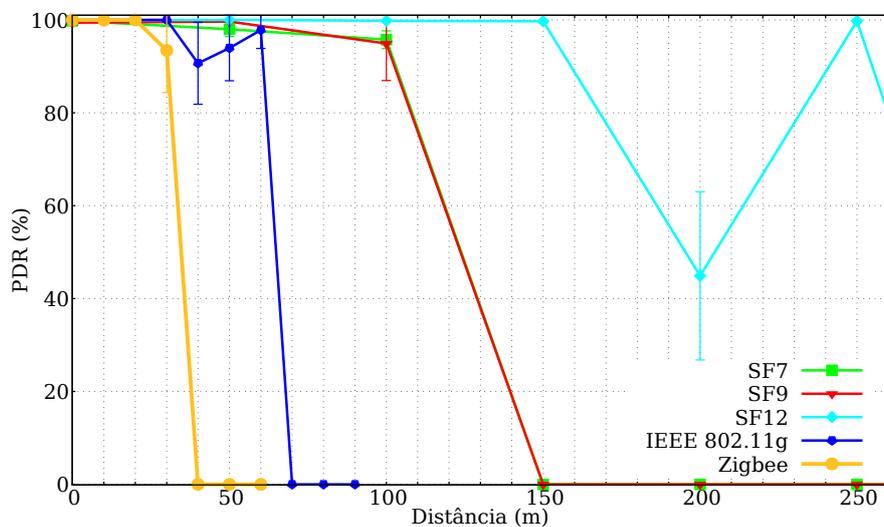


Figura 4.6: PDR medida em função da distância entre transmissor e receptor.

4.3.2 Cenário estático de longa duração

Nesse cenário, são realizadas experiências para coletar dados para estudar a variação do sinal ao longo do tempo. Para a caracterização da atenuação em pequena escala, observa-se a variação do RSSI, SNR, PDR e PIR. O PIR (*Packet Inter-Reception Time*) é o tempo entre a recepção de pacotes subsequentes, podendo ser influenciado pela taxa de geração de pacotes, pelo tempo ao ar e por problemas de propagação. As medições são feitas com duração de 12 h, a uma distância de 250 m. Essa distância foi escolhida porque foi identificada no cenário de distância variável como o alcance máximo real da LoRa operando com SF12 no ambiente florestal. Na Figura 4.7 vemos os módulos de testes usados para as medições de longa duração instalados nas árvores.

A Figura 4.8 mostra parte de uma das 3 medições feitas com SF12. Como esperado, o sinal mostra variações muito fortes, mesmo neste gráfico geral. Esse comportamento deve-



Figura 4.7: Módulos instalados nas árvores para as medições de longa duração

se aos fenômenos combinados de multipercurso e ressonância. A ressonância é induzida pela absorção de diferentes componentes espectrais pela vegetação, causando picos e vales de ondulação não uniforme [99]. O multipercurso é devido às múltiplas reflexões causadas pela vegetação e outros obstáculos e fortemente agravado pelo vento, conforme discutido na Seção 4.1.

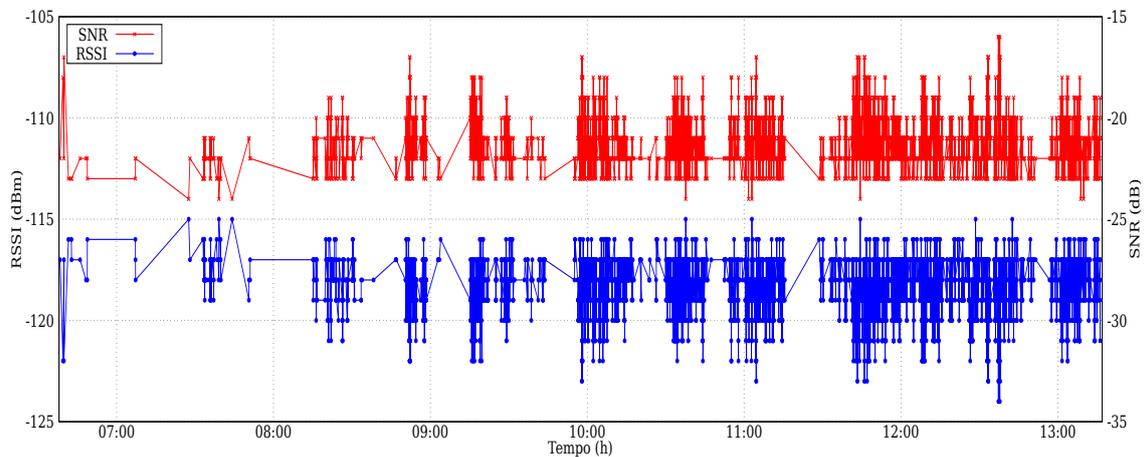


Figura 4.8: Teste de longa duração com SF12 à distância de 250 m entre transmissor e receptor.

As medidas de PIR e PDR ajudam a avaliar os fenômenos que ocorreram. Nesta medição, as interrupções são claramente identificadas. A PDR esperada em operação normal é superior a 80%, como mostra a Figura 4.6. No entanto, em muitos momentos, os valores medidos são muito mais baixos. Nesses momentos, observamos um aumento acentuado no PIR. A intensa variação do PIR a essa distância também pode ser obser-

vada através de sua variância muito grande, como mostra a Tabela 4.3. Esses pontos de exceção à normalidade, levando à interrupção do comunicação, são disrupções, causadas pela variação aleatória das condições de propagação.

Tabela 4.3: PIR - Estatísticas descritivas.

Ponto de medição	250 m
Média	3,9205 s
Mediana	0,6870 s
Desvio Padrão	35,7536
Variância	1278,3192

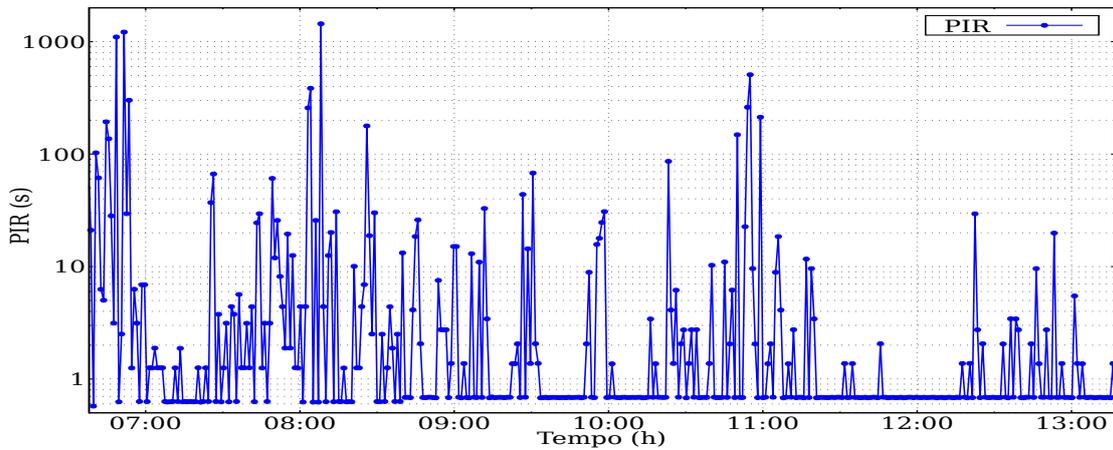


Figura 4.9: *Packet inter-reception time* (PIR) à distância de 250 m entre transmissor e receptor.

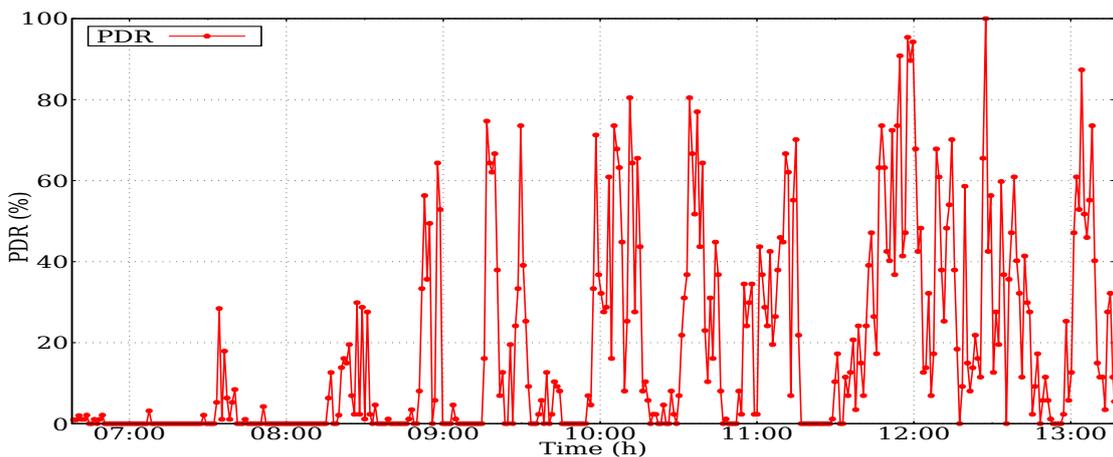


Figura 4.10: *Packet Delivery Ratio* (PDR) à distância de 250 m entre transmissor e receptor.

O cenário estático de longa duração, juntamente com o cenário estático de curta duração para análise do alcance apresentado na Seção 4.3.1, permitem estudar a comunicação entre nós fixos da infraestrutura de comunicação, os pontos de acesso, inseridos na vegetação. A intermitência de conectividade percebida nos testes de longa

duração resulta de vários fenômenos de propagação, especialmente o multipercurso e a ressonância. Ambos são causados por elementos com forte aleatoriedade, que são a grande quantidade e variedade de vegetação e seu movimento com o vento, além da presença de rochas e obstáculos ao longo do enlace.

Assim, para estabelecer a comunicação entre os elementos da rede, será necessário o uso de técnicas capazes de lidar com essa característica. Um ponto específico, mesmo que não mude de posição, pode não estar disponível no momento do envio dos dados. Embora a infraestrutura seja composta por nós fixos, o uso de tecnologias de rede móvel, que consideram que os nós podem se retirar momentaneamente da rede, pode ser uma alternativa que permita a comunicação. Adicionalmente, a comunicação entre os nós móveis, os terminais dos visitantes, utiliza técnicas de DTN. As mensagens são armazenadas mesmo que já tenham sido encaminhadas até que seja possível garantir sua chegada à infraestrutura fixa, em um mecanismo semelhante à transferência de custódia.

4.3.3 Cenário com um nó móvel

Nesse cenário, são realizadas experiências para avaliar a comunicação entre caminhantes, visitantes do Parque, com um ponto de acesso fixo, o totem, como ilustrado na Figura 4.3.3. Os visitantes se deslocam carregando um terminal *wearable* alimentado por bateria e com ganho de transmissão, processamento e memória limitados. Os testes usam SF12, SF9 e SF7 com uma distância de 250 m como o limite de alcance. O movimento foi feito a pé, andando a velocidades de 6 km/h (100 m/min) e 3 km/h (50 m/min). Essas velocidades são definidas com base no comportamento esperado do visitante, considerando dois perfis: um atleta bem treinado e um visitante médio, que se movimenta mais lentamente.

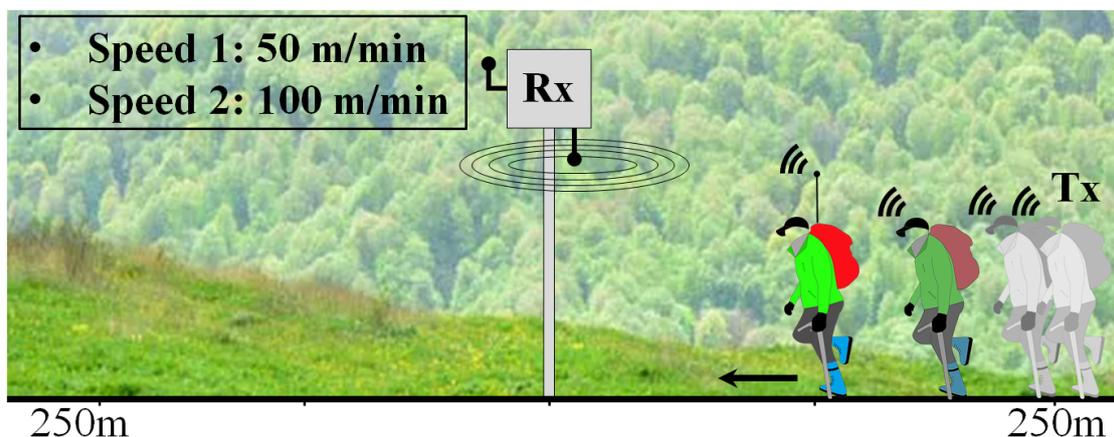


Figura 4.11: Cenário com um nó móvel.

As medições são feitas movendo o transmissor ao longo de um caminho que começa no ponto de alcance máximo (250 m) transmitindo pacotes continuamente até atingir o

receptor, localizado em 0 m e depois retornando ao início. RSSI, SNR, PDR e tempo de contato são avaliados para cada velocidade de deslocamento. Como 250 m é o alcance máximo do SF12, a comunicação para esse fator de espalhamento deve cobrir todo o caminho. Os fatores de espalhamento SF7 e o SF9 também foram avaliados, mas seu alcance é mais limitado. Portanto, a expectativa é que sua cobertura na trilha seja menor.

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram o deslocamento completo continuamente, começando em 250 m passando pelo rádio fixo em 0 m e retornando a 250 m. Essa representação como uma sequência contínua pretende facilitar a visualização do comportamento do sinal. O movimento é representado no eixo Y, na escala à esquerda, como uma caminhada numa única direção, indicada pela seta. A escala à direita mostra o tempo decorrido. Para o experimento a 50 m/min, mostrado na Figura 4.12, esse tempo é de 10 minutos e para o experimento a 100 m/min, mostrado na Figura 4.13, são gastos 5 minutos.

A variação do RSSI e SNR é representada pela variação de cores das várias amostras plotadas nos gráficos. As Tabelas 4.4 e 4.5 descrevem as quantidades de amostras recebidas para cada velocidade e SF. Nas duas figuras, os intervalos para RSSI e SNR são idênticos, indicando os mesmos valores máximos e mínimos. No entanto, o aumento da velocidade provocou uma pequena redução no nível de RSSI e SNR, o que pode ser visto pelas cores ligeiramente mais claras da Figura 4.13.

Tabela 4.4: Quantidade de amostras para o deslocamento a 50m/min.

Velocidade 50 m/min	Amostras Tx	Amostras Rx
SF7	15736	8883
SF9	15840	10624
SF12	10384	5522

Tabela 4.5: Quantidade de amostras para o deslocamento a 100m/min.

Velocidade 100 m/min	Amostras Tx	Amostras Rx
SF7	8561	4856
SF9	9146	5228
SF12	4968	3030

Durante o deslocamento lento, os terminais enviam e recebem pacotes por um intervalo maior. Existe, portanto, um número maior de amostras com baixo RSSI e baixo SNR quando os terminais estão no ponto extremo e, da mesma forma, um número maior de amostras com valores altos quando o terminal está atingindo a estação base. Isso pode ser observado pelas cores mais escuras da Figura 4.12. Velocidades mais altas também tornam a comunicação mais suscetível ao efeito Doppler, no entanto, a modulação usada pelo LoRa, baseada no CSS, reduz essa influência. Os valores de potência permaneceram consistentes com os medidos no cenário de pontos fixos, variando de -120 dBm no espaçamento máximo a -40 dBm no ponto 0 m para RSSI e -20 dB a 5 dB, para SNR. Há

uma pequena variação com o SF, permitindo a recepção de sinais mais fracos usando o SF12 e cobrindo assim toda a distância percorrida.

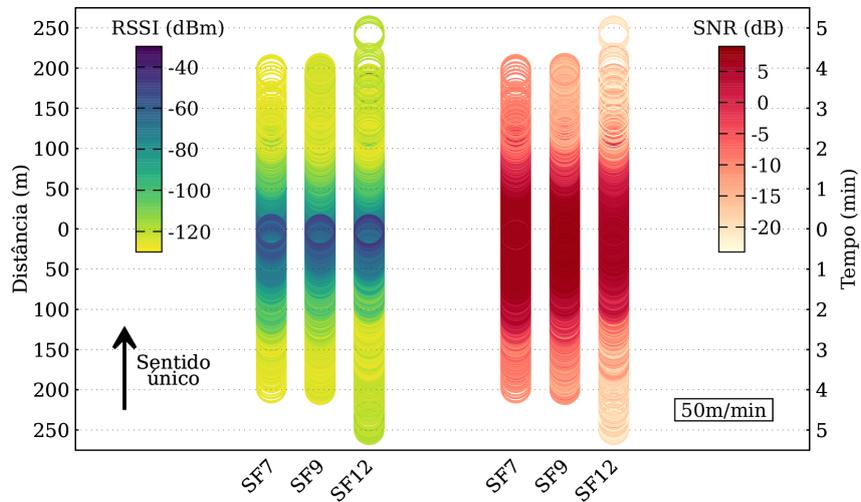


Figura 4.12: RSSI e SNR a 50 m/min.

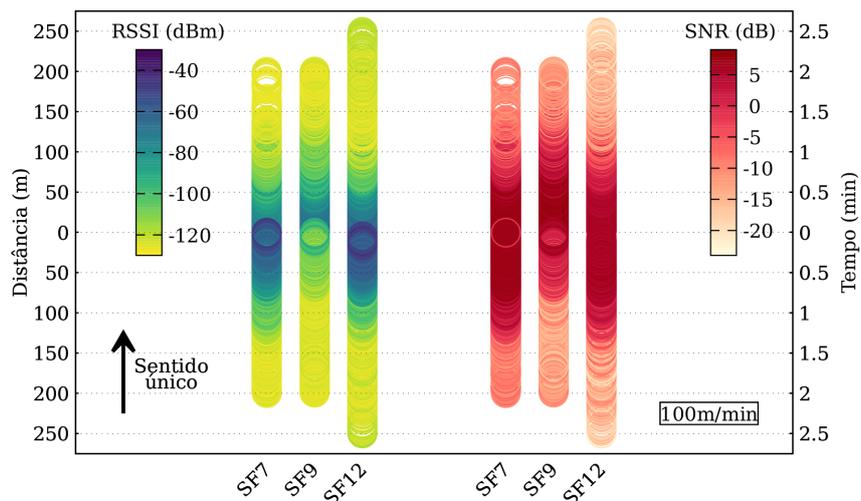


Figura 4.13: RSSI e SNR a 100 m/min.

A Figura 4.14 mostra a variação da PDR com as velocidades de 50 m/min e 100 m/min. A incongruência de forte redução na PDR com RSSI ainda acima do limiar de recepção encontrada no ponto 200 m do cenário fixo descrito na Seção 4.3.1 não é repetida aqui. Isso confirma que se trata de uma alteração devida a uma questão pontual de localização. Com o deslocamento, poucas mensagens são enviadas do ponto exato em que ocorre o problema e a redução da PDR não aparece nas curvas. No entanto, os valores de PDR sofrem redução devido à mobilidade. Nas extremidades das curvas, a velocidade mais alta parece mostrar uma PDR maior, mas depois do ponto de 200 m a inclinação da curva para 50 m/min é maior, indicando um crescimento mais rápido da PDR nesta velocidade. Os gráficos são assimétricos, mostrando diferenças na PDR durante a aproximação e o

afastamento da estação base fixa. Lembrando que os tempos de execução dos experimentos são diferentes para cada velocidade, as medições feitas para a velocidade de 50 m/min levaram 10 minutos e as medições para 100 m/min levaram 5 minutos. Isso é representado no eixo X, na escala superior. A escala inferior mostra a distância percorrida como um caminho contínuo da mesma maneira que nas Figuras 4.12 e 4.13.

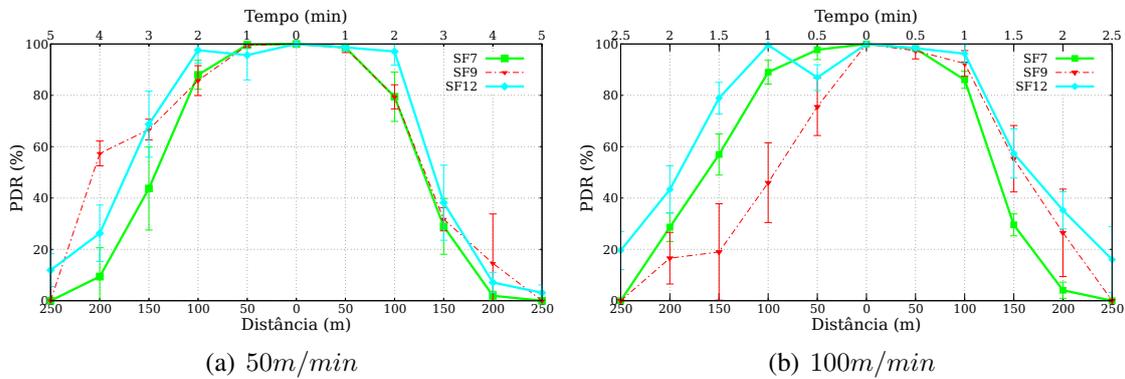


Figura 4.14: PDR no Cenário com um nó móvel.

Nas Figuras 4.14(a) e 4.14(b), é possível inferir o tempo de contato para cada uma das velocidades de deslocamento. O tempo de contato é o intervalo de tempo em que os terminais estão mutuamente nas suas áreas de cobertura. A Tabela 4.6 mostram os valores médios de tempo de contato para cada velocidade e fator de espalhamento.

Tabela 4.6: Tempo de contato no cenário com um nó móvel.

SF	50 m/min	100 m/min
7	7.92±0.37	4.02±0.02
9	8.00±0.16	4.76±0.18
12	9.26±0.84	4.91±0.02

4.3.4 Cenário com dois nós móveis

Esse cenário simula a comunicação entre os terminais de dois visitantes percorrendo as trilhas e caminhos do Parque. A Figura 4.3.4 ilustra esse cenário, com visitantes caminhando em sentidos opostos e eventualmente se cruzando em meio à trilha. Esse enlace de comunicação é oportunista, ocorrendo durante os momentos de contato entre os terminais móveis dos visitantes. O desempenho da comunicação é instável e pode mudar com as variações de velocidade e distância entre os visitantes. Semelhante à Seção 4.3.3, RSSI, SNR, PDR e tempo de contato são avaliados para cada velocidade de deslocamento. A distância de 250 m é usada, pois é o alcance máximo da tecnologia LoRa no ambiente florestal. Para o SF12, espera-se que haja comunicação por toda a trilha. Para SF7 e SF9, que também foram avaliados, os pacotes começam a ser recebidos após o início do movimento. Essa comunicação do tipo *peer-to-peer*, não é padrão para a tecnologia LoRa,

entretanto é usada aqui com o objetivo de modelar o tipo de enlace que é estabelecido entre dois vistantes.

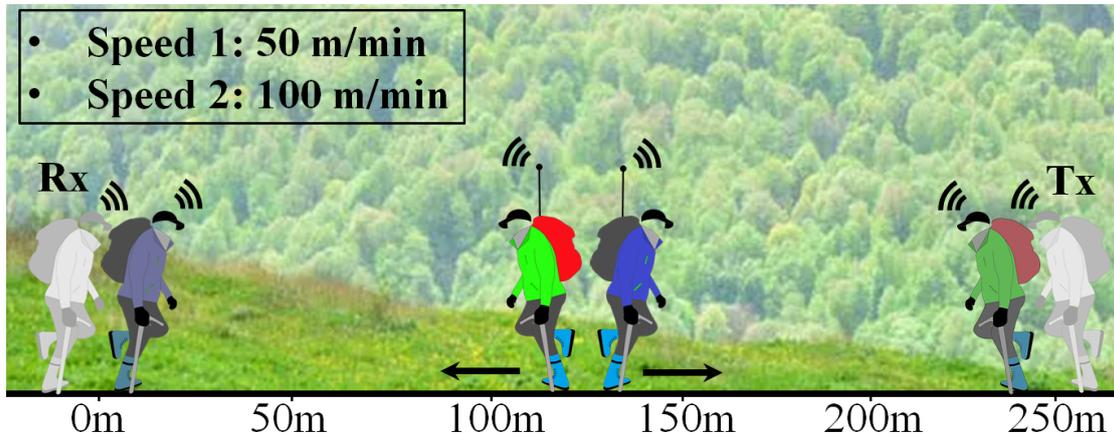


Figura 4.15: Cenário com dois nós móveis.

As Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 mostram o comportamento do sinal em relação à velocidade e distância, considerando RSSI e SNR a 50 m/min e 100 m/min. O aumento na velocidade trouxe uma redução no número de amostras recebidas, como pode ser visto nas Tabelas 4.7 e 4.8. No entanto esse mesmo aumento não trouxe variações significativas no nível de RSSI ou SNR em relação a cada velocidade. As Figuras 4.16 e 4.17 têm os mesmos limites extremos para RSSI e SNR, no entanto, a variação dinâmica neste intervalo difere. Há uma redução geral na qualidade do sinal recebido com o aumento da velocidade.

Tabela 4.7: Quantidade de amostras para o deslocamento dos dois terminais a 50 m/min.

Velocidade 50m/min	Amostras Tx	Amostras Rx
SF7	9994	2419
SF9	10515	3817
SF12	4940	2310

Tabela 4.8: Quantidade de amostras para o deslocamento dos dois terminais a 100 m/min.

Velocidade 100m/min	Amostras Tx	Amostras Rx
SF7	5292	1006
SF9	5391	1609
SF12	2345	1136

Nas duas Figuras, 4.16 e 4.17, o eixo Y, na escala à esquerda, informa a distância do terminal receptor à origem, ou seja, sua posição, e não distância relativa entre os dois terminais. Assim, o ponto de cruzamento, onde a potência é mais alta, ocorre no meio da barra. O eixo Y, na escala à direita, também informa o tempo decorrido durante a medição. Na Figura 4.16, o tempo total é de 5 minutos e na Figura 4.17 é de 2,5 minutos.

De forma semelhante aos experimentos da Seção 4.3.3, ao se deslocar a 50 m/min, os terminais enviam e recebem mais pacotes pois o tempo de contato é maior, então as medições mostram melhor a variação nos valores amostrados. Para o cenário atual, isso pode ser observado pela variação gradual de cores na Figura 4.16, concentrando os tons mais escuros no centro da barra e os mais claros nas pontas. Na Figura 4.17 podemos ver que as cores são menos homogêneas, indicando que os valores das amostras variam mais rapidamente. Os intervalos para RSSI e SNR são os mesmos que no cenário com um nó móvel.

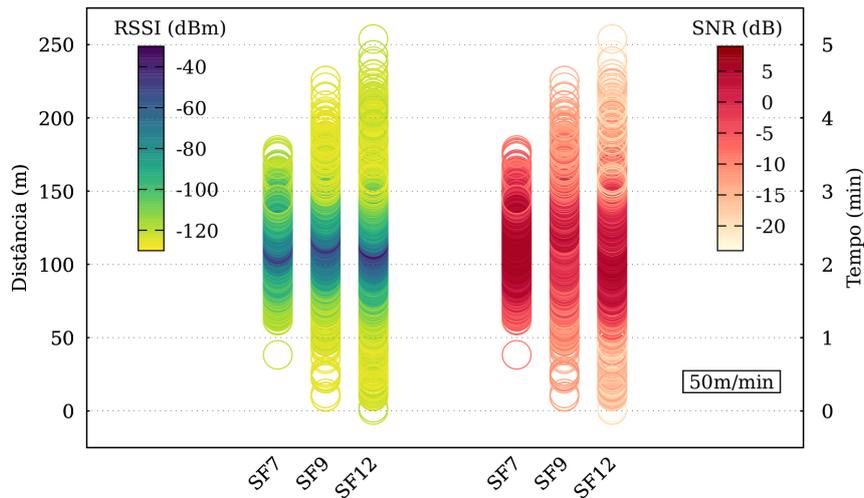


Figura 4.16: RSSI e SNR a 50 m/min.

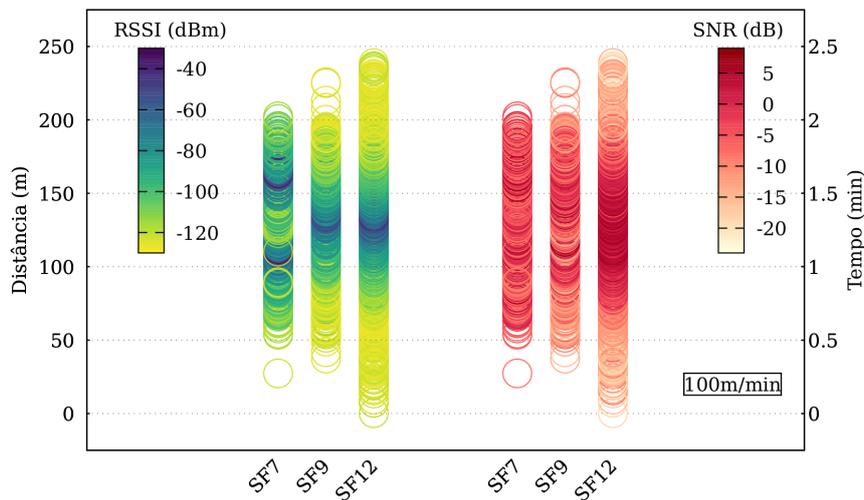


Figura 4.17: RSSI e SNR a 100 m/min.

A variação da PDR com a velocidade é mostrada na Figura 4.18. O aumento da velocidade causa uma redução na PDR e sua taxa de crescimento. Esse comportamento é mais perceptível nos fatores de espalhamento SF7 e SF9. Exceto no SF7, a PDR para aproximação e afastamento dos terminais é semelhante nas duas velocidades. Eventuais

perdas causadas pelo efeito Doppler também são reduzidas pela modulação LoRa baseada em CSS. Nesta figura, assim como as anteriores, deve-se observar que o tempo necessário para obter as medições não é o mesmo. As medições feitas para a velocidade de 50 m/min levaram 5 minutos e as medidas para 100 m/min levaram 2,5 minutos. É possível observar o intervalo em que há a recepção dos pacotes, ou seja, o tempo de contato e a qualidade da comunicação durante esse período. A Tabela 4.9 mostram os valores médios de tempo de contato.

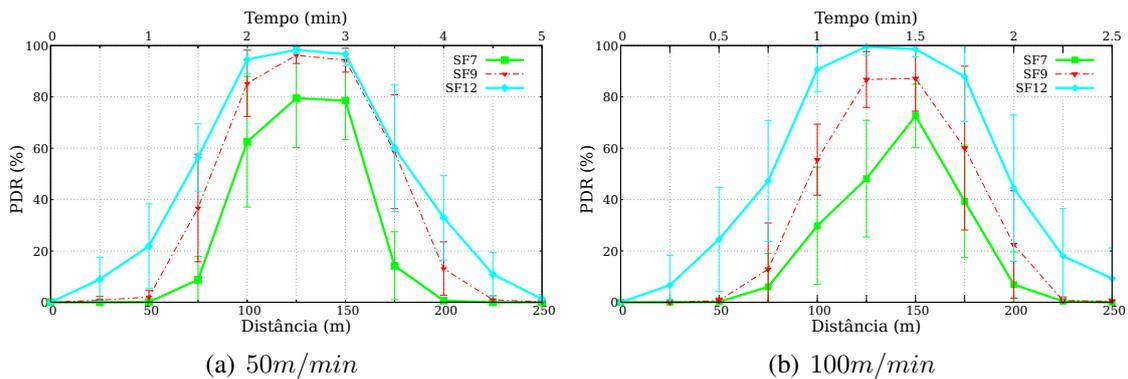


Figura 4.18: PDR no Cenário com dois nós móveis.

Tabela 4.9: Tempo de contato no cenário com dois nós móveis.

SF	50 m/min	100 m/min
7	1.81±0.25	0.87±0.11
9	2.97±0.50	1.27±0.25
12	3.94±0.25	2.07±0.40

4.4 Modelo de Propagação

Nesta seção é feito o estudo do modelo de propagação uma vez que este modelo é necessário para realizar testes em maior escala, por simulação, e por não termos encontrado na literatura um modelo específico para o ambiente de floresta tropical úmida.

Os valores médios do RSSI não são informações suficientemente precisas para caracterizar o desempenho de sistemas móveis sem-fio. Existem variações de tempo, espaço e frequência que também devem ser consideradas. É essencial conhecer a distribuição de probabilidade e a taxa de flutuações do sinal para especificar parâmetros como tipo de modulação, potência de transmissão, taxa de proteção contra interferência, medidas de diversidade, método de codificação, etc.

A partir dos fenômenos de propagação, pode ser possível modelar aproximadamente o canal de rádio móvel em um determinado ambiente. Essa modelagem permite entender os

efeitos no sinal, fornecendo dados para o desenho, dimensionamento e simulação de sistemas de comunicação. A Recomendação ITU-R P.1057-5 descreve as várias distribuições de probabilidade relevantes para a modelagem de propagação de ondas de rádio e métodos de previsão aplicáveis a diferentes ambientes [102].

Neste trabalho, buscamos modelar a propagação de sinais dentro da floresta tropical, um ambiente fortemente sujeito ao fenômeno de multipercurso e, portanto, à atenuação em pequena escala. Após uma busca exaustiva na literatura não encontramos modelo específico para este ambiente. As recomendações encontradas se aplicam a tipos de vegetação ou configuração de enlaces diferentes, com um ou os dois transceptores fora da floresta, sendo esta apenas atravessada pelo sinal.

As distribuições estatísticas de Weibull, Rayleigh, Rice e Nakagami são as principais estatísticas que se ajustam às distribuições experimentais de atenuação em pequena escala, dependendo do grau de obstrução. Por serem distribuições lineares, é necessário converter os resultados experimentais armazenados em termos de nível de potência em unidade logarítmica (dBm) para Watts (W).

Segundo a literatura, quando existe uma grande parcela desobstruída na linha de visão, a distribuição de Rice se ajusta melhor aos resultados experimentais. Em ambientes reflexivos com densidade significativa de clusters distribuídos aleatoriamente, ambientes com clusters de obstáculos com características morfológicas semelhantes, a distribuição de Weibull é a mais apropriada. A distribuição de Rayleigh se aplica para obstáculos de tamanho médio com predominância do efeito do fenômeno de multipercurso em relação ao sombreamento. Em ambientes fortemente obstruídos, o melhor ajuste é a distribuição de Nakagami [103].

Embora usadas para modelar variações em pequena escala, essas distribuições não descrevem perfeitamente o comportamento do sinal devido à forte atenuação, ressonância e à enorme quantidade de componentes de multipercurso que ocorrem na floresta, demonstrando assim a necessidade de um modelo de propagação específico.

4.4.1 Tratamento dos dados

O tratamento dos dados coletados durante as experiências práticas foi realizado usando a biblioteca do MATLAB *fitdist*. A biblioteca *fitdist* faz o ajuste das principais distribuições de probabilidade a um conjunto de dados, usando estimativa de máxima verossimilhança logarítmica (*log-likelihood*). É possível também o uso de uma função de densidade de probabilidade customizada pelo usuário.

A Figura 4.19 mostra o histograma RSSI e a Função de Densidade de Probabilidade (PDF) das distribuições Weibull, Rayleigh e Nakagami aplicadas ao conjunto dos dados do Cenário estático de longa duração para a distância de 250 m. O parâmetro *log-likelihood*, que estima a adequação das funções, é apresentado na Tabela 4.10; quanto melhor a

adequação da PDF aos dados, maior será o seu valor. O *log-likelihood* é logaritmo natural da máxima verossimilhança que, por sua vez, dada uma amostra e uma família paramétrica de distribuições (isto é, um conjunto de distribuições indexadas por um parâmetro) que poderiam ter gerado a amostra, associa a cada parâmetro a probabilidade (ou densidade de probabilidade) de a amostra fornecida ser observada.

Tabela 4.10: Log-likelihood dos modelos avaliados para variações em pequena escala.

Weibull	Nakagami	Rayleigh
-1048,08	-872,252	-2594,73

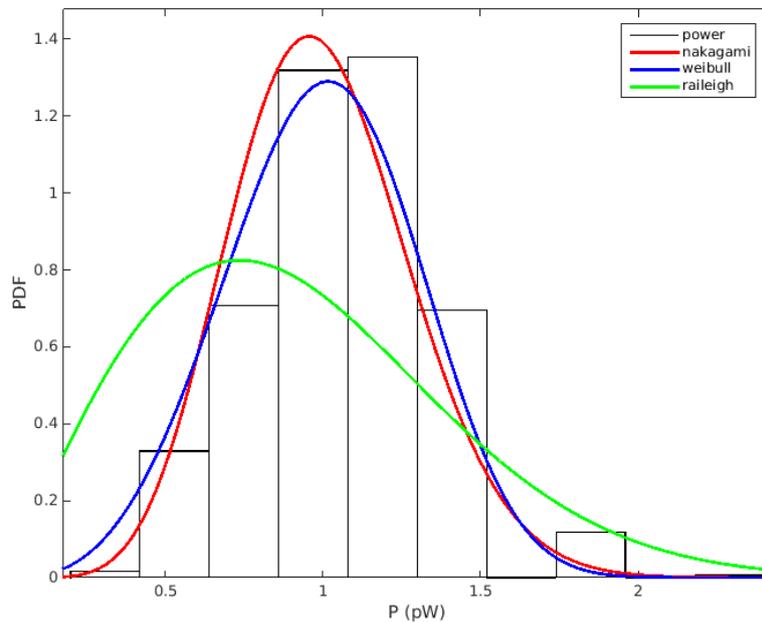


Figura 4.19: PDF das medições de potência (W) para LoRa SF12 a uma distância de 250 m no cenário estático de longa duração.

Observa-se que a distribuição de Nakagami é a que melhor se aplica à propagação florestal com foco na atenuação em pequena escala.

Para a atenuação em larga escala, existem na literatura vários estudos que visam caracterizar e modelar experimentalmente os efeitos da vegetação. No entanto, a maioria desses estudos não se aplica ao caso descrito aqui, por operarem em diferentes faixas de frequência ou por serem aplicados a ambientes de florestas temperadas e plantações. Alguns destes são o modelo Weissberger MED (*Modified Exponential Decay*) [46], e os modelos apresentados nas Recomendações do ITU-R REP236-6 (*Influence of Terrain Irregularities and Vegetation on Tropospheric Propagation*) [104], REP239-6 (*Propagation Statistics Required for Broadcasting Services Using the Frequency Range 30 to 1000 MHz*) [105], e REP567-3 (*Methods and Statistics for Estimating Field-strength Values in the Land Mobile Services Using the Frequency Range 30 MHz to 1 GHz*) [106].

O modelo de Weissberger MED [46] é aplicável quando a linha de visada é densamente bloqueada por árvores, com ou sem folhas, encontradas em climas temperados. As Recomendações do ITU-R nos Relatórios 236-6 [104], 239-6 [105] e 567-3 [106] foram desenvolvidas a partir de medições realizadas principalmente na faixa de UHF. A Recomendação 236-6 [104] modela a vegetação de florestas densas e selvas sobre o solo plano como uma camada dielétrica com perdas. A geometria do modelo prevê que as antenas transmissora e receptora estão próximas o suficiente de um pequeno bosque (limitado a 400 m de comprimento), de modo que a maioria do sinal se propague através das árvores. Em nosso estudo, a frequência utilizada não permite que essa aproximação da floresta como uma camada dielétrica seja precisa. Além disso, o ambiente é uma floresta tropical e não um bosque de árvores decíduas. Na Recomendação 239-6 [105], medições foram feitas através de árvores decíduas no verão e no inverno, a distâncias entre 10 e 200 km, com o transmissor e o receptor localizados acima da floresta. Novamente, temos diferenças no ambiente de vegetação, comprimento dos enlaces e localização de dispositivos. A Recomendação 567-3 [106] também trata da influência da vegetação no enlace, mas considera o caso em que ambas as antenas estão fora de um bosque de árvores e o caminho pode ser tratado como um caminho de difração.

Outros trabalhos, apresentados em [107] e [108] conduziram uma série de medições experimentais em VHF e UHF e modelaram a perda de propagação em florestas através da expressão geral:

$$PL_{forest}(d) = K + A \times \log(d) + B \times d \quad (dB), \quad (4.1)$$

onde PL_{forest} é a contribuição para a perda de propagação devido ao ambiente florestal em dB. K , A e B são os parâmetros baseados em dados medidos com técnicas de regressão. A representa a severidade da atenuação, B é o coeficiente de perda intrínseco ao tipo de vegetação, dado em dB/metro, K é uma constante que permite que sejam feitas correções, dada em dB, e d é o comprimento da área de floresta atravessada pelo sinal, dada em metros [97]. Esse modelo é muito semelhante ao modelo log-normal.

O modelo de decaimento exponencial também pode ser usado para o ambiente de floresta e tem a vantagem de sua simplicidade. Entretanto, possui a desvantagem de não levar em consideração a geometria da medição, conforme indicado por [97]. Os parâmetros do modelo são obtidos a partir de dados de experimentos com técnicas de regressão. Diferentes valores de parâmetros foram propostos, dependendo da frequência, tipo de folhagem, mecanismos de propagação, etc.

Para o nosso conjunto de dados, coletados nos experimentos realizados no PARNASO, o comportamento do sinal dentro da floresta, quando observado em larga escala e considerando seus valores médios, é melhor descrito usando uma distribuição log-normal. Esse comportamento pode ser visto na Figura 4.20, que mostra o histograma RSSI e a PDF

para os dados medidos. O parâmetro *log-likelihood*, que estima a adequação das funções é apresentado na Tabela 4.11. O tratamento destes dados também foi realizado usando a biblioteca do MATLAB *fitdist*.

Tabela 4.11: Log-likelihood dos modelos avaliados para variações em larga escala.

Exponencial	Log-Normal	Gamma	Gaussiana Inversa
-1995	265,793	265,186	240.269

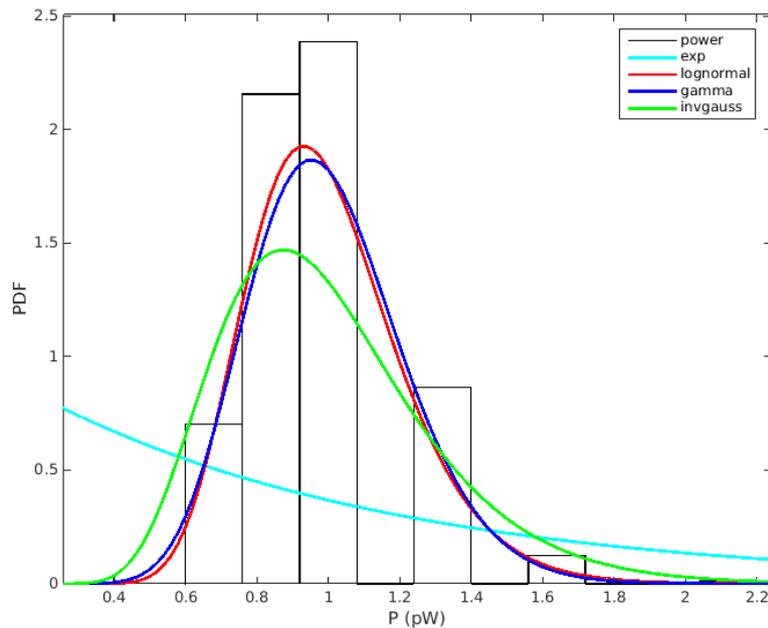


Figura 4.20: PDF das medições de potência (W) para LoRa SF12 a uma distância de 250 m no cenário fixo.

Modelos de desvanecimento de curto prazo normalmente pressupõem um sinal com potência média constante em determinados ambientes de propagação. Porém, em alguns cenários, devido à presença de desvanecimento de larga escala, a potência média recebida pode variar. Esse tipo de fenômeno ocorre nas análises de propagação de ondas de rádio quando as heterogeneidades do meio de propagação apresentam variações de longo prazo não desprezíveis [102]. Exemplos de situações onde esse fenômeno ocorre são a dispersão troposférica e áreas urbanas congestionadas com pedestres e veículos em movimento, ou seja, ambientes sujeitos ao multipercurso. Uma vez que o ambiente de floresta também é fortemente afetado pelo fenômeno de multipercurso, a mesma abordagem pode ser empregada. Como resultado, a atenuação do ambiente é composta pelo desvanecimento de pequena escala sobreposto ao de larga escala [109].

Nestes casos, a PDF da envoltória pode ser considerada como a composição de duas distribuições de probabilidade. Segundo Noga [110], se uma variável X é uma soma de duas variáveis aleatórias $Z1$ e $Z2$, a PDF de X pode ser obtida analiticamente pela

convolução das PDFs de Z1 e Z2. Em um canal composto, a função de densidade de probabilidade da envoltória de X é calculada por ([111]):

$$f_X(x) = \int_0^{\infty} f_{X/Y}(x/Y = y) \times f_Y(y) dy, \quad (4.2)$$

onde $f_{X/Y}(x/Y = y)$ descreve o comportamento do sinal em pequena escala e f_Y em larga escala.

A partir da análise dos dados coletados em pequena e larga escala, podemos identificar as distribuições de Nakagami e Log-Normal como as mais adequadas para compor a descrição conjunta do sinal.

A distribuição de Nakagami descreve o desvanecimento em pequena escala como:

$$p_X(x) = \frac{2}{\Gamma[m]} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m x^{2m-1} \exp\left[-\frac{m}{\Omega} x^2\right], \quad r \geq 0$$

$$m = \frac{E^2[x^2]}{V[x^2]}, \quad m \geq \frac{1}{2}, \quad \Omega = E[x^2], \quad (4.3)$$

em que $\Gamma[\cdot]$ é a função Gama.

A distribuição de Nakagami é indicada quando o ambiente apresenta algumas componentes de multipercurso mais fortes do que todas as outras. Quanto mais componentes fortes existirem, maior será o parâmetro m . O parâmetro m , calculado através da expressão apresentada na Equação 4.3, relaciona-se inversamente à severidade da atenuação [112].

A distribuição Log-Normal descreve o desvanecimento em grande escala como:

$$p_{\Omega}(y) = \left(\frac{1}{y\sqrt{2\pi\sigma^2}}\right) \exp\left(-\frac{\ln^2\left(\frac{y}{P_A}\right)}{2\sigma^2}\right), \quad y > 0. \quad (4.4)$$

Apesar da distribuição Log-Normal ser amplamente aceita para descrever o desvanecimento de larga escala, combiná-la com as distribuições que modelam o multipercurso resulta em fórmulas abertas difíceis de se usar em cálculos como taxa de erro de bit, esquemas de diversidade, probabilidade de *outage*, previsão de cobertura, etc., segundo [113]. A distribuição Gamma foi então proposta como uma aproximação à distribuição Log-Normal. A distribuição Gamma é descrita da seguinte forma:

$$p_{\Omega}(y) = \frac{1}{\Gamma[m_s]} \left(\frac{m_s}{\Omega_s}\right)^{m_s} y^{m_s-1} \exp\left(-y\frac{m_s}{\Omega_s}\right), \quad (4.5)$$

em que $\Gamma[\cdot]$ é a função Gama. O parâmetro m_s descreve inversamente a severidade do sombreamento e o parâmetro Ω_s descreve a potência média de área do sombreamento gamma. Vale observar que o parâmetro m_s é descrito desta forma para fazer alusão ao m da distribuição de atenuação de multipercurso de Nakagami, visto que o parâmetro desta distribuição também compartilha o mesmo significado [109].

Assim, considerando $y = \sqrt{E[x^2]}$ e substituindo 4.3 e 4.5 em 4.2, o canal de propagação pode ser descrito para o ambiente dos experimentos e os conjuntos de dados obtidos como:

$$p_R(r_c) = \frac{4}{\Gamma[m_s]\Gamma[m]} \left(\frac{mm_s}{\Omega_s}\right)^{\frac{m+m_s}{2}} r_c^{-1+m+m_s} K_{m_s-m}[2r_c\sqrt{\frac{mm_s}{\Omega_s}}]. \quad [109] \quad (4.6)$$

Esse processo de composição é possível, pois y representa, nos dois desvanecimentos, a potência média atenuada do sinal, ou seja, a mesma entidade física.

4.5 Simulação no MATLAB

O desenvolvimento de um modelo baseado em uma distribuição empírica consiste na coleta de dados, análise estatística, construção do modelo e sua validação. Na fase de coleta de dados, são feitas medições para diferentes cenários. Os resultados obtidos são modelados na análise estatística e na fase de construção do modelo. O modelo é construído combinando as distribuições de probabilidade conhecidas aos dados. Na fase de validação o modelo é simulado e analisado com dados reais. Assim, a Figura 4.21 apresenta a função densidade de probabilidade composta descrita na Equação 4.6, com os parâmetros $m = 3,26$ e $m_s = 21,045$, otimizados para os dados obtidos em campo. Foram usados os dados de potência, normalizada pela média local em cada ponto de medição, compreendendo um total de 10.893 amostras.

4.6 Considerações

O modelo de propagação apresentado neste capítulo, embora não descreva perfeitamente o canal de rádio dentro da floresta, pode ser usado para obter valores aproximados de atenuação e potência recebida a partir de parâmetros que podem ser adaptados ao ambiente. Esses valores são usados na simulação da arquitetura de rede proposta, feita com o *software* NS-3 na Seção 6.2. Adicionalmente, os resultados do estudo desenvolvido neste Capítulo acerca do comportamento das tecnologias candidatas à comunicação com os terminais móveis, apresentadas na Seção 3.1, foram usados na definição da arquitetura da rede e na otimização do posicionamento da sua infraestrutura. O Capítulo 5 apresenta o projeto completo proposto para a assistência ao visitante.

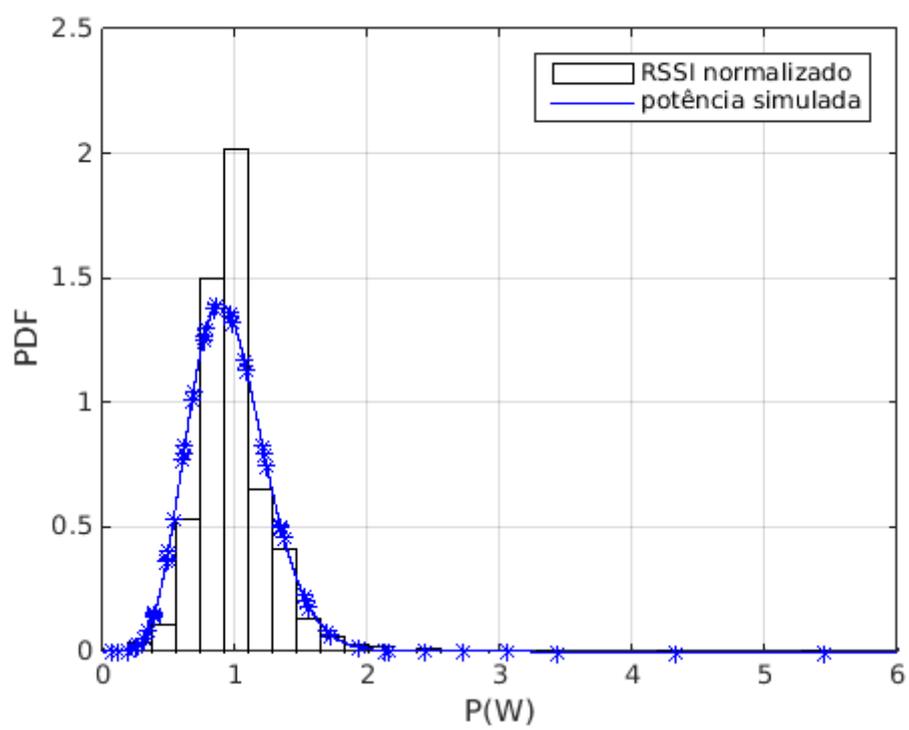


Figura 4.21: PDF composta Nakagami e Gama das medições de potência (pW) para LoRa SF12 com $m = 3,26$ e $m_s = 21,045$.

Capítulo 5

Projeto do Sistema de Assistência ao Visitante

As atividades de ecoturismo estão atraindo cada vez mais participantes. Infelizmente, aumentam também os casos de visitantes de parques naturais que vivenciam situações de risco. Entre os riscos mais graves, e mais comuns, está o de se perder ou se acidentar em um ambiente desconhecido. O monitoramento da localização do visitante permite uma ação mais rápida e eficaz de equipes de resgate. Porém, para tanto, é necessária alguma forma de comunicação dentro da floresta.

Esta tese visa apresentar os estudos e desenvolvimentos feitos para viabilizar a elaboração de um sistema, com aplicações que permitem a assistência ao visitante de unidades de conservação, compreendendo serviços de física e de integração. Estes serviços podem ser prestados de forma interativa ou de forma transparente, através de uma infraestrutura que combina diferentes tecnologias para atender ao uso das duas aplicações. Como cada aplicação tem requisitos específicos, cada uma necessita de recursos diversos da infraestrutura e níveis de qualidade de serviço distintos, bem como oferece uma experiência diferente ao visitante. Este trabalho descreve as aplicações e os dois tipos de terminais, interativo ou transparente. Entretanto, o foco principal está na aplicação voltada para a segurança física do visitante, que permite a monitoração da sua localização. Por ser a aplicação mais básica e que fornece o serviço de assistência mais importante, o estudo apresentado aqui foi feito considerando a monitoração da localização e pedido de socorro da aplicação de segurança do visitante.

O sistema de monitoramento proposto é composto de uma infraestrutura de pontos de acesso sem-fio, chamados de totens, e terminais móveis vestíveis, portados pelos visitantes. Além disso, o sistema de monitoramento inclui uma aplicação de localização e um protocolo que define a troca de mensagens entre os dispositivos. Os totens são capazes de anunciar suas coordenadas e prover comunicação de dados aos terminais, encaminhando seus dados para a nuvem. A comunicação entre totem e nuvem será feita por qualquer meio disponível: 2G, 3G, etc.. Esta infraestrutura deve ser reduzida, uma vez que de-

vido aos custos não é factível dentro do parque uma cobertura completa. Os totens devem ser posicionados em locais que permitam otimizar a cobertura, considerando o sinal nas trilhas, a atenuação causada pela diferença de altura entre as antenas e os riscos de cada trecho. Os terminais móveis trocam dados de localização periodicamente com os totens e entre si, permitindo acompanhar a movimentação do visitante.

5.1 Aplicações Propostas

A aplicação principal e básica é a monitoração da localização do visitante, que permite a ação mais rápida e eficaz de equipes de resgate. Essa monitoração é feita de forma transparente, sem perturbar a experiência no ambiente natural. Um terminal do tipo vestível, no formato de uma pulseira ou de um chaveiro, envia dados de localização da pessoa, periodicamente. A localização pode ser obtida através de um GPS ou da troca de dados de localização em colaboração com os demais visitantes.

Alguns trabalhos estimam a localização a partir dos valores de RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) do sinal recebido dos elementos da infraestrutura. Em [114] o RSSI é usado num sistema para localização de pequenas tartarugas no campus do *Wildlife Institute of India*. São usados quatro pontos fixos cobrindo uma área quadrada, chamada pelos autores de *environmental matrix*. Com base na leitura do RSSI tomada anteriormente ao longo dos lados do quadrado são identificados pontos de grade adjacentes que limitam o valor medido. Em seguida, os valores de RSSI de sinais enviados por transmissores instalados nos animais são comparados pelos pontos fixos, localizando-os dentro das células em que ocorre a interseção.

Entretanto essa abordagem é ineficiente no ambiente de floresta, uma vez que o RSSI apresenta intensa variabilidade, como visto no Capítulo 4. O ambiente florestal é muito desafiador devido às dificuldades de propagação da onda eletromagnética. Essa dificuldade se torna ainda mais pronunciada em florestas tropicais úmidas, como a Mata Atlântica, trazendo como consequência a impossibilidade de garantir conectividade contínua e a existência de caminhos fim-a-fim. Como forma de lidar com este desafio é proposta uma aplicação que utiliza técnicas de DTN, com comutação de mensagens contendo dados de localização e seu armazenamento persistente.

A aplicação de localização, usada para prover o serviço de monitoramento e segurança de visitantes, é baseada em [21] e [32]. Estes trabalhos propõem estimar a localização do visitante através da troca de mensagens entre sensores de RF. Os autores apresentam o conceito de sensor testemunha, que faz um registro de avistamento para armazenar e transmitir informações de localização, que retratam o movimento dos outros sensores. Quando se encontram ao longo do caminho, os sensores se tornam testemunhas entre si e trocam seus dados de localização, que serão enviados para um repositório central através de um ponto de acesso. Esses dados, que compõem o histórico de localizações anteriores

de diversos sensores, podem ser usados para estimar as suas localizações atuais e prever suas localizações futuras.

Esta aplicação precisa tipicamente de uma ampla cobertura da rede, a maior porcentagem possível da área de visitação. Como apenas dados de localização são enviados, a taxa de transmissão necessária é razoavelmente baixa. Assim, tecnologias de LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) atendem adequadamente aos seus requisitos. A possibilidade de usar terminais pequenos, operados a bateria e de baixo custo, também são características desejadas.

Já os serviços de integração, prestados de forma interativa, exigem o uso de um terminal com maior capacidade de processamento e comunicação por parte do usuário. Assim, a proposta é utilizar o próprio *smartphone* do visitante, através de um aplicativo desenvolvido para este fim. O aplicativo irá prover dados sobre o parque para o visitante e também capacidade de comutação DTN, tornando cada *smartphone* um nó da rede. A interação via aplicativo permite adicionalmente a coleta de informações importantes que podem ser usadas pela gestão do Parque, como o perfil do visitante, trilhas e atrativos mais frequentados, tempo de permanência, presença do visitante em locais proibidos ou perigosos, etc.. Por outro lado, os dados do Parque fornecidos ao visitante ampliam e trazem novas possibilidades de interação, facilitando o planejamento da visita e trazendo maior segurança. Dados sobre fauna, flora e atrativos, alertas de desastres naturais, entre outros, podem ser disponibilizados.

O recebimento de mensagens com dados sobre o Parque ou o envio de dados gerados pelo visitante, como textos e fotos, são feitos usando o *smartphone* e, portanto, deseja-se utilizar tecnologias de comunicação disponíveis neste tipo de aparelho. Assim, uma escolha possível para a comunicação seria o Bluetooth, devido ao seu baixo consumo e à grande base instalada. Porém, não foi possível a avaliação do Bluetooth, devido a problemas nos módulos de teste disponíveis de integração com o microcontrolador Arduino.

A opção avaliada é o Wi-Fi que está presente na quase totalidade dos aparelhos, tendo como ponto positivo a familiaridade do visitante e um alcance maior. O IEEE 802.11g foi testado, conforme descrito na Seção 4.3.1, chegando a um alcance máximo de 60 m dentro da floresta. Entretanto, o IEEE 802.11g apresenta um consumo mais alto que as outras tecnologias avaliadas. Podemos estimar o consumo no terminal dos visitantes a partir do consumo de energia nominal de cada um dos módulos utilizados para a realização dos testes. No modo de transmissão, tem-se: LoRa, 120 mA [115]; IEEE 802.11g, 140 mA [116]; e ZigBee, 45 mA [117].

As dificuldades de propagação das ondas eletromagnéticas e o conseqüente alcance reduzido trazem desafios para a comunicação necessária para suportar as aplicações desenhadas. Assim, a solução proposta considera o uso de técnicas de DTN, para que os visitantes colaborativamente contribuam para o encaminhamento das mensagens, tanto no modo interativo como no modo transparente. Entretanto não é assegurada baixa latência

ao usar este tipo de encaminhamento, uma vez que as mensagens podem esperar um tempo aleatório armazenadas dentro dos nós até a chegada a um ponto em que possam ser escoadas através da infraestrutura.

A baixa latência, porém, é crucial para o envio de mensagens de alerta, como por exemplo no caso de ocorrência de uma cabeça d'água. Para conseguir cumprir esse requisito é necessário planejar a localização dos elementos da infraestrutura de modo a evitar a necessidade de replicação da mensagem de alerta através dos nós DTN. Para isso é recomendável a sua instalação em locais que permitam visada direta para a área de abrangência do alerta. Ou seja, fazer com que haja apenas um único salto entre os elementos da infraestrutura da rede e o visitante para o envio de mensagens de alerta, evitando assim a necessidade de armazenamento em nós intermediários.

Outra função muito importante para atender situações de emergência, é o envio de mensagens com pedido de socorro. Estas mensagens podem ser enviadas tanto no modo interativo como no modo transparente, através de um botão específico. No modo transparente esse botão é físico e o envio da mensagem não é automatizado. No modo interativo a mensagem pode ser enviada automaticamente ou não. Para o envio automático podem ser usadas as leituras de sensores do *smartphone*, como acelerômetro, giroscópio e magnetômetro, que venham a indicar caso o visitante esteja caído. Este tipo de detecção, usado também para monitoração de idosos [118], pode ser feita ainda que o visitante esteja inconsciente. Semelhante à abordagem feita em [119], uma vez detectada a emergência, é iniciada uma contagem regressiva para o envio automático do pedido de socorro que pode ser cancelado pelo visitante caso não haja necessidade de resgate. Esta mensagem pode ser enviada através da comunicação com outros terminais ou diretamente com um totem.

Adicionalmente, para atender a uma necessidade recorrente e colaborar na diminuição do impacto para uma grave ameaça, a mesma rede também poderá ser usada para transmitir alertas de incêndio, sejam os focos detectados automaticamente por sensores ou comunicados colaborativamente pelos visitantes. Mensagens com comunicado de detecção de foco de incêndio também devem ser tratadas de forma diferenciada. A Tabela 5.1 resume as aplicações disponíveis para cada tipo de terminal.

Tabela 5.1: Características principais dos dois tipos de terminal.

Tipo de terminal	Transparente	Interativo
Hardware	<i>Wearable</i>	<i>Smartphone</i>
Rede de comunicação	LoRa	Bluetooth/IEEE 802.11g
Aplicações	Monitoração da localização Pedido de socorro	Aplicação interativa Pedido de socorro Recepção de alertas Envio de identificação de foco de incêndio

Como forma de lidar com demandas tão diversas, o projeto compreende uma rede composta de elementos de diferentes tecnologias, funcionando de modo complementar para

prover a assistência ao visitante, reduzindo custos e minimizando os possíveis impactos ambientais. Os totens são compostos por um módulo de tecnologia LPWAN, um módulo para conexão com *smartphone*, um módulo para comunicação com outros totens e/ou com a internet e um módulo controlador. O controlador é um elemento com capacidade de processamento, que implementa um nó na rede DTN, correlaciona as identificações do visitante em cada tecnologia, encaminha as mensagens para seus destinos entre outras tarefas. Quando possível a interligação, os totens formam uma rede *mesh*. O conjunto de totens permite que parte do processamento dos dados seja feito na borda da rede, seguindo a abordagem de *fog computing* e reduzindo o impacto no caso de períodos de desconexão do próprio totem. A Figura 5.1 fornece uma visão geral das aplicações e suas tecnologias.

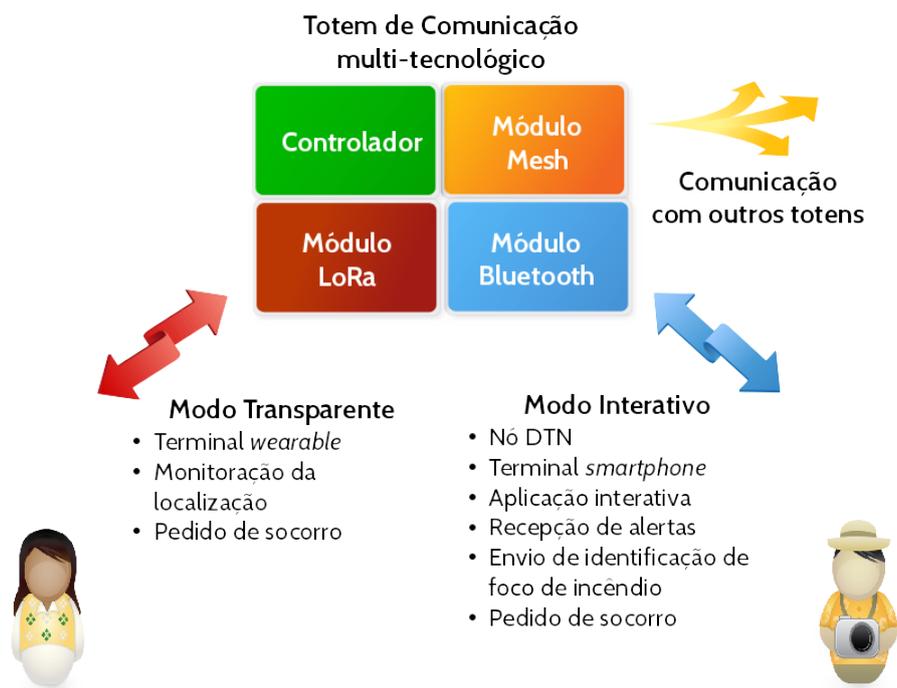


Figura 5.1: Visão geral das aplicações projetadas para o sistema de assistência ao visitante do parque florestal.

5.1.1 Análise de requisitos

Visando o levantamento de informações usadas na análise de requisitos, foram feitas reuniões com a equipe do PARNASO (Parque Nacional da Serra dos Órgãos) e entrevistas com potenciais usuários, como guias turísticos e pesquisadores que desenvolvem atividades dentro do Parque. A equipe do Parque trouxe uma visão de administração e preservação da UC, além do incremento do uso público, especialmente na questão de segurança física do visitante e de ações de educação ambiental. Os usuários sugeriram funcionalidades semelhantes às existentes em diversos aplicativos, como os listados na Seção 2.3, voltados para o mapeamento de trilhas e geolocalização por GPS, que

também permitem o compartilhamento de informações em redes sociais. Entre as principais informações estão a rota percorrida, o tempo gasto, fotos e relatos com dicas e sugestões sobre a atividade de ecoturismo desenvolvida na Unidade de Conservação.

Assim, foi feito um levantamento inicial de necessidades de comunicação a serem atendidas tanto para o visitante como para os administradores do Parque, que compreende:

1. Segurança: este conjunto de demandas visa colaborar com a segurança física do visitante dentro da área do Parque, bem como informar ao administrador dados de localização que podem ser necessários em caso de resgate ou socorro. As demandas de segurança incluem:
 - Monitoramento da localização do visitante;
 - Controle de entrada e saída de visitantes;
 - Informação para o visitante sobre áreas proibidas ou perigosas;
 - Informação para o visitante sobre eventos de emergência, como as cabeças d'água;
 - Integração com sistemas existentes de monitoração de chuvas.
2. Informações a serem fornecidas ao usuário gestor do Parque: informações solicitadas pela gestão do Parque visam compreender melhor a utilização da UC, traçar um perfil do visitante e sua dinâmica dentro da área protegida. Estas incluem:
 - Perfil do usuário: identificação, idade, sexo, nível de condicionamento físico, trilha pretendida, tempo de permanência pretendido, telefone para contato em caso de emergência e endereço, incluindo cidade de origem.
 - Estatísticas de uso: avaliação da visita e dos atrativos do parque, tempo de permanência no parque, tempo médio para as caminhadas/travessias, padrão de uso das trilhas através de estatísticas dos vários visitantes.
 - Integração com outras ações de divulgação e educação ambiental da UC, como por exemplo o projeto “Caminhos da Serra do Mar” [120]. Entre muitas ações de proteção, preservação e integração, o projeto “Caminhos da Serra do Mar” incentiva o visitante a tirar uma foto em pontos pré-determinados e publicá-la, ganhando então um brinde do PARNASO como forma de divulgação do ecoturismo consciente. Essas fotos podem ser usadas como *fingerprints*, colaborando para a localização do visitante durante o uso da aplicação interativa.
3. Informações a serem fornecidas ao usuário visitante: atendem a demandas coletadas nas entrevistas com potenciais usuários e replicam funções dos aplicativos populares de mapeamento de trilhas e geolocalização. Estas compreendem:

- Estatísticas da caminhada, tais como nível da trilha, duração para diferentes perfis de visitantes, quantidade de visitantes que fazem esse percurso e etc. ;
- Informações baseadas na sua localização: distâncias, perigos, pontos de água, atrativos próximos e mapas;
- Informações sobre os principais atrativos, ainda que não estejam próximos;
- Integração com redes sociais, sejam específicas para aventureiros e ecoturistas, e/ou redes populares com Facebook, YouTube, Tiktok, Instagram, etc..

4. Outros requisitos de caráter geral:

- Auxiliar na educação ambiental;
- Não interferir visualmente de forma ostensiva no ambiente, evitando a poluição visual das trilhas, que poderia vir a causar transtornos para a fauna local, e respeitando a escolha de alguns visitantes de imersão no ambiente natural;
- Integrar o sistema proposto com o site atual do PARNASO;
- Integrar o sistema proposto com outros sistemas já em uso pelos pesquisadores, principalmente o SISS-GEO (Sistema de Informação em Saúde Silvestre) [121].

O SISS-GEO, desenvolvido em conjunto pela Fiocruz (Fundação Oswaldo Cruz) e pelo LNCC (Laboratório Nacional de Computação Científica), permite gerar a partir de observações georreferenciadas de animais, modelos de alerta de doenças na fauna silvestre, especialmente aquelas com potencial de acometimento humano, possibilitando ações de vigilância e prevenção à saúde [122].

Essas solicitações, divididas em níveis de prioridade, levaram ao desenho inicial das aplicações, bem como à definição de seus requisitos e à inferência das suas necessidades de Qualidade de Serviço.

5.1.2 Monitoração da localização do visitante

Esta aplicação será implementada no modo transparente e permitirá o envio de mensagem de pedido de socorro. O terminal usado nesta aplicação será um *hardware* específico contendo um módulo de comunicação LPWAN, um módulo de GPS e um microcontrolador.

Assim, para a aplicação de monitoração da localização do visitante considera-se os seguintes requisitos qualitativos:

- Alcance: longo. Permitindo uma grande área de cobertura, longo alcance é extremamente importante para acompanhar a localização dos visitantes. A relevância desse requisito aumenta conforme a trilha aumenta, pois isso torna mais difícil localizar

os visitantes com problemas. Porém as várias tecnologias testadas no ambiente de floresta sofreram uma grande redução no seu alcance em relação ao valor teórico, conforme mostrado na Seção 4.3.1 que estuda o cenário fixo.

- Vazão: baixa. Apenas dados de localização serão enviados, ou seja, mensagens pequenas contendo apenas texto. A taxa de entrega de pacotes é estudada na Seção 4.3 para os diferentes cenários, que refletem a comunicação entre visitantes e entre estes e os totens.
- Latência: tolerante a atrasos. Como a velocidade de deslocamento na trilha é baixa, alterações significativas de localização demoram a acontecer, em relação ao tempo de transmissão e ao período do *beacon*. Entre os requisitos temporais o mais relevante é o tempo entre a recepção dos pacotes (PIR – *Packet Inter Reception Time*), uma vez que é necessário enviar o máximo de pacotes possível durante o intervalo em que a conexão existe, ou seja, durante o tempo de contato entre os terminais. Esse intervalo no pior caso, ou seja, quando os visitantes são rápidos, é de 2,5 minutos como levantado durante os experimentos com mobilidade descritos nas Seções 4.3.3 e 4.3.4.
- Perda de pacotes: tolerante. De forma semelhante à latência, perdas de pacotes têm pouco impacto uma vez que a informação de localização pode variar pouco ou nada em pacotes subsequentes. Assim a aplicação é tolerante a perdas relativamente altas. Contribui para essa tolerância também a replicação dos dados de localização entre os visitantes, quando trocam seus registros de avistamento.
- Variação do atraso (*jitter*): tolerante. Mesmo com altos valores de *jitter* a localização ainda pode ser monitorada de forma satisfatória. O *jitter* refletirá apenas numa variação do intervalo para atualização da posição do visitante.

O envio de mensagens de pedido de socorro no modo transparente será feito através de uma opção pré-programada do microcontrolador, acionada por um botão no terminal *wearable*. Para evitar envios acidentais, o botão deverá ser pressionado com uma sequência específica (SOS Morse). O pedido de socorro também pode ser gerado pelo servidor da aplicação, caso não sejam recebidos dados de localização do terminal após o tempo estimado para sua passagem pelos totens próximos. Essa estimativa é feita considerando a velocidade de deslocamento do visitante, calculada a partir do seu histórico, e uma margem de folga, uma vez que o visitante poderia simplesmente ter parado para descansar ou observar a natureza. Esta margem pode variar de acordo com o nível de perigo de cada trilha. O limite máximo para o pedido de socorro é o intervalo de monitoração, definido como 24h.

A mensagem de pedido de socorro deverá conter a localização do visitante e um *flag* adicional. Este *flag* indica a necessidade de envio de socorro. No modo interativo esse

flag pode indicar também qual é o tipo de emergência em que o visitante se encontra. Para agilizar o processamento no servidor as mensagens de pedido de socorro são iguais nos dois modos de operação.

O envio de mensagens de pedido de socorro possui basicamente os mesmos requisitos que a monitoração, exceto para a latência e perda de pacotes. Para minimizar o efeito de possíveis perdas de pacotes, a mensagem de pedido de socorro será enviada periodicamente até que o terminal receba uma mensagem de notificação em resposta, confirmando o envio da equipe de resgate. Para reduzir a latência, o período de envio do pedido de socorro também é reduzido em relação ao *beacon* enviado durante a operação normal. A Seção 5.3 detalha as mensagens e máquinas de estados do protocolo proposto.

5.1.3 Integração interativa com a Unidade de Conservação

A integração entre o visitante e a Unidade de Conservação é conseguida através do modo interativo, que permite a troca de informações por ambos os lados. Em relação aos requisitos de rede, isso se traduz como uma maior exigência e uma maior sensibilidade em todos os parâmetros. Porém, como não há a intenção de prover um serviço com interação em tempo real, é possível relaxar um pouco os parâmetros relacionados ao tempo. Mesmo assim, este serviço traz importantes benefícios, uma vez que a situação atual é de ausência de meios de comunicação praticamente em todas as trilhas do PARNASO. O terminal utilizado neste caso é o próprio *smartphone* do usuário, o que abre várias possibilidades por um lado, mas traz algumas limitações por outro. Traz a possibilidade de interfaces gráficas, de leitura de sensores internos do aparelho, maior capacidade de processamento e armazenamento, etc.. A principal limitação é a restrição das tecnologias de comunicação disponíveis. O maior consumo energético e a dificuldade/impossibilidade de recarga da bateria do equipamento ao longo da trilha também são restrições importantes.

Conforme o levantamento das necessidades de comunicação, são funcionalidades necessárias do terminal no modo interativo :

- Receber informações gerais sobre a UC: fauna, flora, principais atrativos, etc.;
- Receber informações sobre trilhas, travessias e circuitos: nível de dificuldade, duração, extensão, altitude, desnível, insolação, exposição a riscos, etc.;
- Receber informações sobre a UC, baseadas na localização: pontos de água, pontos de apoio, atrativos próximos, etc.;
- Fazer postagens em redes sociais.

Para estas funcionalidades, os requisitos de rede são semelhantes:

- Vazão: idealmente a vazão deve ser alta, para permitir a troca de mensagens multimídia. Entretanto, a intermitência na conectividade da rede faz com que a vazão

seja inconstante. A vazão média varia com a vazão instantânea e o tempo de transmissão da mensagem. Este tempo é composto pelo intervalo de transferência e o tempo que a mensagem passa armazenada no *buffer* do nó intermediário, que faz o papel de DTN. O intervalo de transferência é composto pelo tempo no ar (ToA) e pela razão entre o tamanho da mensagem e a taxa de transmissão da tecnologia usada. O tempo de armazenamento é em grande parte determinado pelo tempo gasto no deslocamento do visitante através da área de sombra, não coberta entre totems subsequentes e/ou o tempo gasto até o encontro de outro visitante que envie a mensagem colaborativamente ao se comportar como um nó DTN.

A vazão instantânea depende do tipo de tecnologia usada para a comunicação com o totem. Essa escolha é limitada às tecnologias disponíveis para comunicação nos *smartphones*. O Bluetooth e o IEEE 802.11g são padronizados e possuem sua vazão máxima descrita nas suas especificações. Entretanto esse valor máximo dificilmente será atingido devido às condições de propagação na floresta, como mostra o perfil da taxa de entrega apresentada na Seção 4.3.

- Latência: tolerante a atrasos, por não ser um serviço em tempo real. A latência esperada é ainda maior do que para a comunicação via LPWAN, uma vez que o Bluetooth e o IEEE 802.11g possuem raio de cobertura menor e operam em frequência mais alta, o que dificulta ainda mais a propagação. É esperado que haja interrupções e a conectividade seja intermitente ou mesmo eventual. Esse comportamento é estudado na Seção 4.3.2.
- Perda de pacotes: sensível. As informações enviadas não têm caráter periódico e cumulativo como na monitoração da localização. Caso haja perda de pacotes, um pedido de retransmissão pode não ser factível. Para minimizar esta sensibilidade pode-se realizar a replicação das mensagens de modo semelhante à disseminação dos dados de localização na aplicação de monitoração. Entretanto, a replicação pode ser ruim para a rede, causando impacto na vazão útil, uma vez que os dados da aplicação interativa são bem maiores. Para evitar excesso de mensagens replicadas, uma cópia deve ser enviada apenas para os nós móveis que tiverem chance de chegar a um totem antes do visitante originador da mensagem. Esta probabilidade pode ser inferida dos dados obtidos através da aplicação de monitoração de localização. Deve ser mantida outra cópia com o próprio visitante que a gerou até que este chegue a um totem como forma de garantir o envio. O mecanismo de transferência de custódia, previsto no *Bundle Protocol* [123], só deve ser usado no encaminhamento de mensagens para o totem.
- Variação de atraso (*jitter*): tolerante. Antes da execução de cada mídia as mensagens podem ser armazenadas até que o arquivo a ser executado esteja completo.

Algumas funcionalidades adicionais trazem outro perfil de requisitos, especialmente mensagens de alerta e pedido de socorro, e irão exigir um tratamento diferenciado por parte da rede. É o caso das três funcionalidades descritas abaixo, parte da aplicação interativa, e importantes para a segurança física do visitante:

- Envio automático de mensagem de pedido de socorro;
- Envio voluntário de mensagem de pedido de socorro;
- Envio voluntário de mensagem de identificação de foco de incêndio.

Mensagens de pedido de socorro são enviadas voluntariamente pelo visitante ou automaticamente pelo aplicativo em caso de acidente. Para o envio automático são usadas a monitoração da localização do visitante e as leituras de sensores do *smartphone*, como acelerômetro, giroscópio e magnetômetro, que venham a indicar caso o visitante esteja caído. As mensagens automáticas podem ter seu envio cancelado pelo visitante até que um temporizador se expire. Após o envio da primeira mensagem de emergência, novas mensagens serão reenviadas até que haja uma mensagem de notificação em resposta ou um cancelamento por parte do visitante.

Para mensagens de pedido de socorro é importante reduzir a latência. Numa tentativa de agilizar o seu envio, devem ser repassadas cópias para todos os nós móveis, outros usuários, que passem pelo visitante com problemas até que este seja socorrido ou receba uma notificação. Os nós DTN que receberem a mensagem, por sua vez, também irão replicá-la até que cheguem ao totem mais próximo ou recebam uma notificação. Apenas os nós que já possuírem uma cópia descartarão uma mensagem de pedido de socorro. Espera-se que estas mensagens não causem grande impacto na vazão útil da rede, pois são pequenas, contendo apenas a localização do visitante e um *flag* adicional, que indica a emergência. As mensagens de pedido de socorro são exatamente iguais às enviadas no modo transparente, exceto pela identificação do usuário que segue o padrão de endereçamento da tecnologia usada e pela possibilidade do campo *help flag* conter informações sobre o tipo de emergência.

A resposta à mensagem de pedido de socorro é feita através de outra mensagem, a mensagem de notificação, enviada para informar ao visitante que o socorro está a caminho e para encerrar o envio das mensagens de pedido de socorro. Contém uma estimativa do tempo até a chegada do socorro, informado pelo socorrista. As mensagens de notificação devem ser enviadas pelos dois totens nos extremos do segmento em que o visitante com problemas se encontra através do nó móvel com localização mais próxima do evento, e replicadas para outros terminais que tenham uma chance maior de chegar ao visitante com problemas antes.

Mensagens de aviso de identificação de foco de incêndio são enviadas pelo visitante caso aviste algum foco, para auxiliar a atividade das brigadas de combate a incêndio e

a preservação da floresta. Assim como para as mensagens de emergência, é importante reduzir a latência e a perda de pacotes. A estratégia de replicação da mensagem também será usada. Entretanto, como esta mensagem de identificação de foco de incêndio não recebe uma notificação em resposta que cessa a replicação, esta deve ser controlada. Para isso as cópias devem ser feitas apenas uma vez e enviadas para todos os nós móveis, outros usuários, alcançáveis pelo visitante originador. Porém, após este primeiro envio nenhuma outra mensagem é gerada. Da mesma forma, os terminais que a receberem irão encaminhá-la apenas mais uma vez e assim por diante até chegar ao totem mais próximo.

Todas essas mensagens, originadas ou replicadas por visitantes, são entregues aos totens. Uma vez que chegue a um totem, a mensagem pode ser apagada do terminal do visitante. Portanto, ainda que uma emergência gere uma grande quantidade de mensagens, estas ficam contidas no segmento entre dois totens, evitando impactos no restante da rede. Também para controlar o excesso de mensagens, cada visitante que esteja funcionando como nó DTN para encaminhar qualquer mensagem, seja de emergência ou não, guardará apenas uma cópia. Caso já a possua, qualquer outra réplica que porventura o alcance será descartada.

Além destas funcionalidades que buscam aumentar a taxa de entrega e reduzir a latência com mecanismos de replicação de mensagens, existem outras, também ligadas à segurança física do visitante, que envolvem o recebimento de mensagens. Nestes casos, a mensagem é enviada pelo totem. São elas:

- Notificação de envio de socorro, já tratada nos parágrafos acima. É gerada pelo socorrista em resposta a uma mensagem de pedido de socorro;
- Alerta de desastres naturais, mais especificamente alertas de cabeça d'água. Esta mensagem deve ser recebida pelo visitante que estiver em área de risco quando houver alerta de cabeça d'água. Entretanto, este fenômeno é muito rápido e o alerta não pode aguardar reenvios e atrasos. É o único tipo de tráfego que exige tratamento em tempo real e por isso possui requisitos temporais muito estritos. Estes requisitos são alcançados fazendo o seu envio em apenas um salto entre o totem e o visitante.

Os requisitos para o envio de mensagens de alerta são:

- Vazão: baixa, a mensagem carrega apenas o alerta. Não há necessidade de a mensagem conter nem mesmo a localização, uma vez que não será replicada. Apenas a identificação do totem é suficiente pois esta mensagem se destina apenas aos visitantes que estiverem na sua área de cobertura, que corresponde à área de risco do evento alarmado.
- Latência: extremamente sensível. O evento relatado pelo alerta é muito grave e repentino.

- Perda de pacotes: extremamente sensível. O pacote existe apenas em um único salto, caso seja degradado ou descartado o alerta não será entregue. É preciso usar redundância para garantir que erros não causem seu descarte, além do *flooding* contínuo de mensagens na área do evento.
- Variação de atraso (*jitter*): Não se aplica.

A mensagem de alerta de cabeça d'água pode ser gerada pela equipe do Parque, caso perceba as condições meteorológicas que causam o desastre, ou automaticamente por sistemas de sensoriamento de nível de chuva existentes. Estas mensagens são encaminhadas aos visitantes pelo totem mais próximo da área de risco. Para isso é importante durante o planejamento da rede percorrer a trilha, fazer um levantamento dos principais riscos e um *site survey* na região afetada.

A solução proposta neste trabalho busca ser uma arquitetura flexível para lidar com todos estes requisitos, atendendo às demandas de comunicação das aplicações de assistência ao visitante.

5.2 Arquitetura da Rede Proposta

A arquitetura proposta como solução de rede para este trabalho combina diferentes tecnologias, funcionando de forma complementar, para atender às demandas descritas na seção anterior.

A rede compreende pontos de acesso fixo, totens multi-tecnológicos, com módulos LoRa e Bluetooth e/ou IEEE 802.11g, e nós DTN móveis, implementados nos terminais dos visitantes. Para melhorar o escoamento de dados do modo interativo, será usado o posicionamento do visitante obtido pelo LoRa como previsão de oportunidade de contato para roteamento e encaminhamento colaborativo. Todo o processamento de previsão deve ser feito pelo totem usando a abordagem de *fog computing* para não sobrecarregar o *smartphone* do visitante. O totem informa via Bluetooth ou IEEE 802.11g para qual nó DTN colaborativo a mensagem deve ser encaminhada. A Figura 5.2 ilustra a arquitetura proposta.

5.2.1 Infraestrutura fixa

A infraestrutura fixa é composta por nós de acesso multi-tecnológicos, os totens, que se comunicam com os visitantes tanto no modo transparente como no modo interativo e sempre que possível entre si. Os totens devem ser interligados à Internet permitindo assim que o tráfego seja escoado para servidores externos na nuvem. Essa interligação pode ser feita através de conexões de dados móveis utilizando a rede 2G/3G/4G/5G, quando viável, ou qualquer outra tecnologia de rede de longa distância que esteja disponível, como rádio

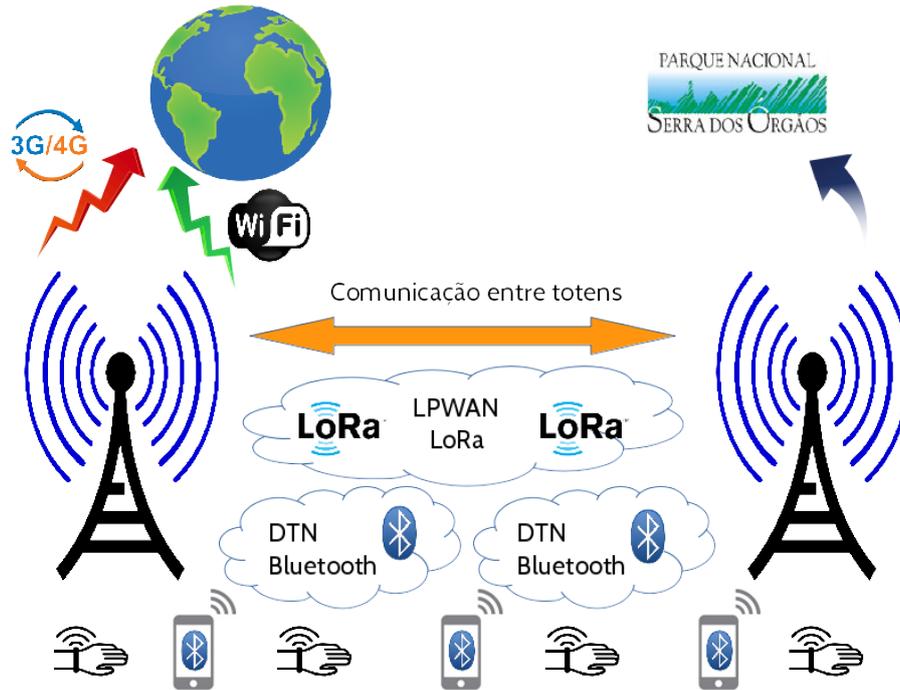


Figura 5.2: Visão geral da arquitetura proposta para o sistema de assistência ao visitante.

na faixa de microondas acima da copa das árvores ou comunicação via satélite de órbita baixa, por exemplo. Está fora do escopo deste trabalho a definição desta conexão. Entretanto a recomendação é que seja observada a disponibilidade de sinais de dados móveis das operadoras que porventura atuem na área durante a *site survey* para escolha dos pontos de localização dos totens nas trilhas a serem monitoradas. Um totem que não seja conectado à Internet precisa obrigatoriamente ser alcançável através de outro totem.

A comunicação entre os totens, sempre que existir, será utilizada para encaminhar as mensagens geradas tanto no modo transparente como no modo interativo até que possam ser escoadas para a Internet. Assim os totens formam a infraestrutura desta rede. Esta comunicação pode ocorrer acima das copas das árvores, com o uso de antenas de maior ganho, aumentando assim a distância coberta pelo enlace entre totens. Mesmo acima das copas a conectividade entre os totens pode variar muito em função das mudanças nas condições propagação. A propagação acima das copas apresenta a formação de ondas laterais, conforme descrito em [67] e [124]. Este é considerado o mecanismo predominante para obter a intensidade de campo elétrico recebido utilizando antenas próximas da interface floresta-ar.

Uma possível abordagem é modelar os totens como nós móveis, mesmo eles sendo fixos, em uma rede em malha sem-fio. Dessa forma, as interrupções causadas pela variação na propagação podem ser entendidas como a movimentação de nós que entram e saem da área de cobertura um do outro. De qualquer maneira essa é uma rede que deve ser esparsa devido ao custo de implantação e por este motivo o posicionamento dos totens é muito

sensível, influenciando diretamente no desempenho das aplicações e na experiência do usuário.

Posicionamento dos totens

O problema para posicionamento dos totens foi formulado como um problema de Programação Linear Inteira (ILP – *Integer Linear Programming*) em conjunto com o doutorando Gabriel Queiroz em [95]. A solução desenvolvida, apresentada na figura 5.3, foi uma modelagem matricial de cubos para mapear a localização tridimensional do totem, considerando a cobertura do sinal nas trilhas e a atenuação causada pela diferença de altura entre as antenas dos totens.

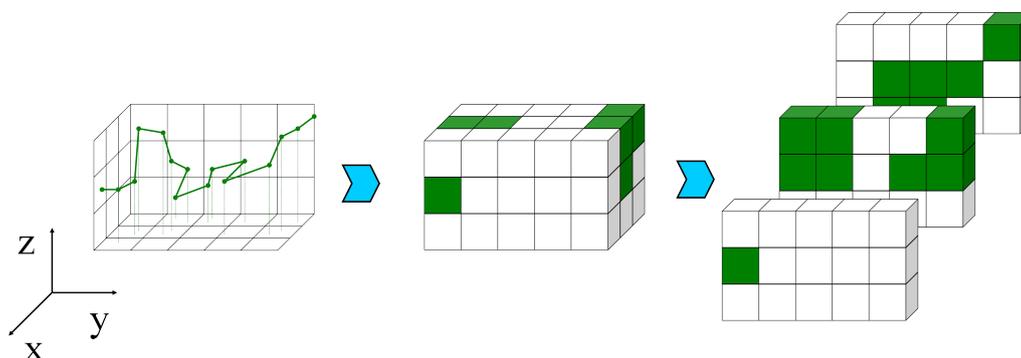


Figura 5.3: Mapeamento em cubos de um percurso dentro de uma região.

Os totens proveem conectividade dentro de sua região de cobertura tridimensional. A variação de altitude ao longo da trilha impacta a transmissão e a recepção do sinal pois a irradiação das antenas no plano de azimute pode ser muito diferente da irradiação no plano de elevação [125]. Isso justifica levar em consideração a altura dos totens e do terreno em um mapeamento tridimensional da região descrita pela trilha. A região de cobertura dos totens de comunicação foi abordada com base na noção de cubos, mapeados em uma matriz tridimensional. Para lidar com a grande quantidade de cubos gerados no mapeamento, um método para eliminação de cubos “impossíveis” foi desenvolvido. Esses cubos são pontos dentro da matriz que se situam abaixo do nível do chão e em pleno ar. Tais cubos em que o posicionamento de um totem de comunicação é claramente impossível ou inviável, como mostra a Figura 5.4, em nada contribuem para o problema de otimização, tornando-o computacionalmente mais difícil de forma desnecessária.

O mapeamento em cubos foi realizado tomando os valores máximos e mínimos de latitude, longitude e altitude da travessia entre Petrópolis e Teresópolis que descrevem as dimensões de um paralelepípedo que contém a linha da trilha, nosso caso de estudo. Em seguida, a região foi dividida em cubos, que são mapeados em coordenadas através da definição do valor de lado do cubo. Assim, os pontos de latitude, longitude e altitude resultam em índices x , y e z da matriz tridimensional, respectivamente. A medida do lado

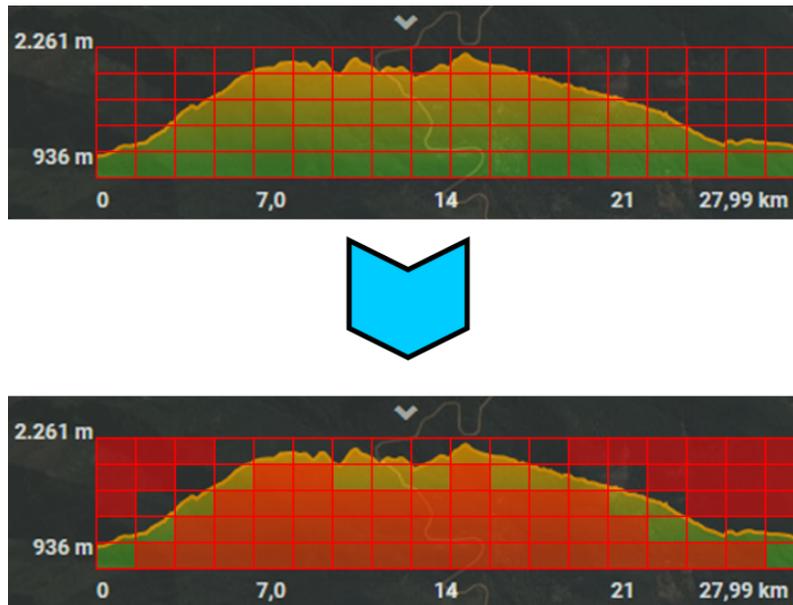


Figura 5.4: Eliminação de cubos impossíveis.

do cubo é ajustada levando-se em consideração o alcance de transmissão do totem.

Com a matriz tridimensional definida, é possível mapear pontos de interesse em seu interior. Os pontos de interesse são definidos como locais nos quais se deseja ter conectividade e capacidade de comunicação, como pontos comuns de visitação ou o próprio percurso da trilha. Também pode influenciar no interesse e, portanto, na quantidade e na localiza o dos totens as seguintes características:

- potencial de riscos para o visitante;
- presença de sinal de dados 2G/3G/4G/5G;
- necessidade de iluminar algum ponto específico para garantir a entrega imediata de informa o de emergência numa dada região, como cachoeiras sujeitas a cabeças d' gua.

Estes parâmetros, juntamente com a qualidade de serviço esperada poderão ser utilizados na otimiza o do problema, determinando assim a posi o final de cada totem. Num primeiro momento a otimiza o foi feita considerando apenas manter a conexão entre totens com cobertura de 100% da trilha da travessia, com o mínimo de totens possível, e com interesse máximo nos pontos de maior risco de desaparecimento de visitantes.

Para resolver o problema de otimiza o, foi formulado um problema de ILP cujo objetivo   maximizar o interesse obtido ao iluminar os cubos de uma matriz tridimensional. Cada cubo   considerado iluminado se sua região estiver dentro da cobertura do sinal emitido por um totem nas redondezas. Já o interesse   um parâmetro associado a cada cubo nas coordenadas x , y e z .

A Equação 5.1 mostra a função objetivo. A descrição dos conjuntos, parâmetros e variáveis usados na modelagem do problema é apresentada na Tabela 5.2.

$$\text{maximizar } \sum_{x \in \mathcal{X}} \sum_{y \in \mathcal{Y}} \sum_{z \in \mathcal{Z}} \mathcal{I}_{x,y,z} \cdot c_{x,y,z} \quad (5.1)$$

As Inequações 5.3 a 5.5 representam as restrições do problema. A Inequação 5.3 define que o número total de totens posicionados não pode exceder o número \mathcal{N} de totens disponíveis para o posicionamento. A Inequação 5.4 indica que, se um determinado cubo está dentro da região de cobertura de algum totem, isto é, tem conectividade, então há pelo menos um totem em algum dos cubos vizinhos capaz de alcançá-lo. O parâmetro $\mathcal{A}_{x,y,z}$ representa o número de cubos alcançáveis por um totem. O número máximo de cubos que um totem pode iluminar é dado pela Equação 5.2. No entanto, o número de cubos dentro da região de cobertura de um totem não é sempre \mathcal{A}_{max} . Por exemplo, se um totem estiver em um vértice da matriz tridimensional, $\mathcal{A}_{x,y,z} < \mathcal{A}_{max}$, pois parte da região de cobertura nesse caso se estende para fora da matriz tridimensional, então a região de cobertura fica limitada aos cubos que estão no interior da matriz. Para que um totem seja alcançável por outro é necessário que haja alguma sobreposição das suas áreas de cobertura. Ou seja, dois totens iluminam ao menos um mesmo cubo. Já a Inequação 5.5 fornece conectividade de múltiplos saltos entre os totens, fazendo com que haja pelo menos \mathcal{R} totens vizinhos dentro da região de cobertura de cada totem.

$$\mathcal{A}_{max} = (2l_x + 1) \cdot (2l_y + 1) \cdot (2l_z + 1). \quad (5.2)$$

$$\text{sujeito a } \sum_{x \in \mathcal{X}} \sum_{y \in \mathcal{Y}} \sum_{z \in \mathcal{Z}} t_{x,y,z} \leq \mathcal{N} \quad (5.3)$$

$$0 \leq \mathcal{A}_{x,y,z} \cdot c_{x,y,z} - \sum_{\substack{u=x-l_x \\ u \in \mathcal{X}}}^{x+l_x} \sum_{\substack{v=y-l_y \\ v \in \mathcal{Y}}}^{y+l_y} \sum_{\substack{w=z-l_z \\ w \in \mathcal{Z}}}^{z+l_z} t_{u,v,w} \leq \mathcal{A}_{x,y,z} - 1 \quad \forall x \in \mathcal{X}, y \in \mathcal{Y}, z \in \mathcal{Z} \quad (5.4)$$

$$\mathcal{R} \cdot t_{x,y,z} \leq \sum_{\substack{u=x-l_x \\ u \in \mathcal{X}}}^{x+l_x} \sum_{\substack{v=y-l_y \\ v \in \mathcal{Y}}}^{y+l_y} \sum_{\substack{w=z-l_z \\ w \in \mathcal{Z}}}^{z+l_z} t_{u,v,w} - t_{x,y,z} \quad \forall x \in \mathcal{X}, y \in \mathcal{Y}, z \in \mathcal{Z} \quad (5.5)$$

O problema de otimização formulado foi executado através do *solver* CPLEX, a partir dos dados de entrada, com as informações da trilha e o alcance medido para os módulos LoRa, descrito na Seção 4.3.1. Os resultados apresentados possuem uma margem de 5% do valor da solução ótima. Essa tolerância é usada para obter soluções satisfatórias em me-

Tabela 5.2: Notações utilizadas no problema.

Notação	Descrição	Tipo
\mathcal{X}	Níveis de latitude dos cubos	Conjunto
\mathcal{Y}	Níveis de longitude dos cubos	Conjunto
\mathcal{Z}	Níveis de altitude dos cubos	Conjunto
$\mathcal{I}_{x,y,z}$	Interesse do cubo de coordenadas x, y, z para o posicionamento de um totem	Parâmetro
\mathcal{N}	Número máximo de totens disponíveis	Parâmetro
$\mathcal{A}_{x,y,z}$	Total de cubos dentro do alcance da região de cobertura de um totem nas coordenadas x, y, z	Parâmetro
l_x, l_y, l_z	Alcance em número de cubos do raio de transmissão de um totem nos eixos x, y e z , respectivamente	Parâmetro
\mathcal{R}	Número mínimo de totens vizinhos que devem estar dentro da região de cobertura de um totem	Parâmetro
$c_{x,y,z}$	Variável binária indicando se o cubo de coordenadas x, y, z pertence à região coberta por algum totem	Variável
$t_{x,y,z}$	Variável binária indicando se há um totem posicionado no cubo de coordenadas x, y, z	Variável

nos tempo, sem exaurir os recursos computacionais da máquina. A solução do problema de ILP formulado nos dá que a partir de 200 totens, o uso do LoRa já permite cobrir todos os cubos da travessia e alcançar cobertura de 100% para o modo transparente. Permite também a conexão entre todos os totens, usando também o LoRa para a comunicação entre eles.

5.2.2 LPWAN

Os totens possuem módulos para a conexão com o visitante, para os dois modos de comunicação. A escolha para a comunicação no modo transparente é o LoRa, uma tecnologia de LPWAN desenvolvida pela Semtech. Como descrito na Seção 3.4, as redes LPWAN são projetadas para conectar equipamentos a longas distâncias, com baixa taxa de transmissão e baixo consumo. São adequadas portanto para o uso de terminais operados a bateria, pequenos, leves e de baixo custo, como desejado para a comunicação no modo transparente. A Figura 5.5 apresenta esta comunicação.

Será utilizada a especificação da camada física do LoRa, operando na frequência de 915 MHz, mais baixa do que a maioria das tecnologias de redes locais sem-fio, o que permite um desempenho melhor no difícil ambiente da floresta, embora a propagação ainda sofra uma atenuação severa. Os experimentos práticos realizados no PARNASO com os módulos LoRa, IEEE 802.11g e ZigBee, bem como os detalhes de configuração de *hardware* e *software* estão descritos na Seção 4.2.

Caso seja ofertado apenas o serviço de monitoração da localização dos visitantes, é possível usar também o LoRa na interconexão dos totens. Isso simplifica o projeto e reduz bastante o seu custo, atendendo à necessidade mais básica.

5.2.3 DTN

O curto alcance das tecnologias de comunicação sem-fio dentro da floresta faz com que seja necessário lidar com muitos lapsos de conexão. Para a comunicação no modo

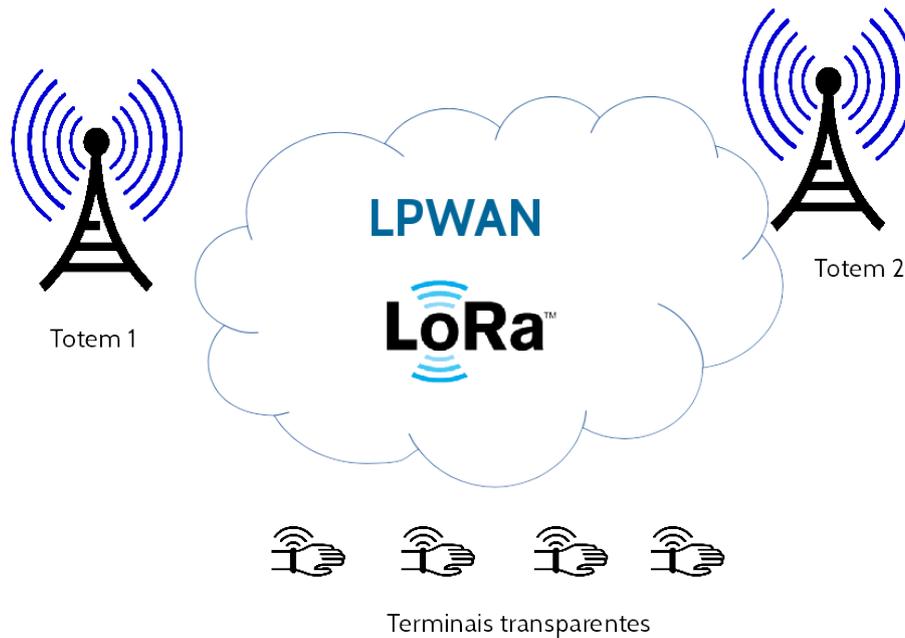


Figura 5.5: LPWAN – Comunicação com terminais transparentes.

interativo esse efeito é ainda mais severo, uma vez que as duas opções tecnológicas, IEEE 802.11g e Bluetooth, apresentam alcance muito curto, que se reduz ainda mais no ambiente de floresta. O IEEE 802.11g apresenta taxas de transmissão mais altas, porém com consumo mais alto em relação às tecnologias de LPWAN. Isso é um problema, uma vez que o visitante não terá pontos disponíveis para recarregar seu *smartphone* a não ser à noite, nos abrigos (há apenas dois abrigos na trilha Petrópolis-Teresópolis). Apesar de ter sido lançado há poucos anos o padrão IEEE 802.11ah, que apresenta uma versão de baixo consumo, ainda não há uma base instalada considerável. Mesmo módulos de testes, que seriam necessários para a realização dos experimentos, ainda possuem custo muito alto, inviabilizando o seu uso. Como opera numa faixa de frequências diferente, não há compatibilidade entre o IEEE 802.11ah e os padrões anteriores.

Já o Bluetooth, atualmente em sua versão 5.0, oferece a opção de baixo consumo desde a versão 4.0. O Bluetooth 5.0 foi liberado para uso comercial em dezembro de 2016 e está presente na maioria dos *smartphones*, além de manter a compatibilidade com as versões anteriores. Apresenta taxa de transmissão mais baixa do que o IEEE 802.11g, mas que é suficiente para a necessidade da aplicação integração interativa com a UC.

Porém, as dificuldades de propagação na floresta levam a um alcance menor para todas as tecnologias, sendo percebidos mais fortemente nas faixas de frequências mais altas. Assim, considerando qualquer uma das opções, interativa ou transparente, a comunicação na floresta apresentará interrupções. Portanto, a proposta contempla uma DTN composta por pontos fixos e móveis. Os pontos móveis são os terminais dos visitantes que, operando colaborativamente, fazem o encaminhamento dos pacotes entre si e para os pontos fixos, os totens. Os totens funcionam como quiosques de dados, concentrando as informações

e interconectando com o servidor central do parque e a Internet, como mostrado na Figura 5.6.

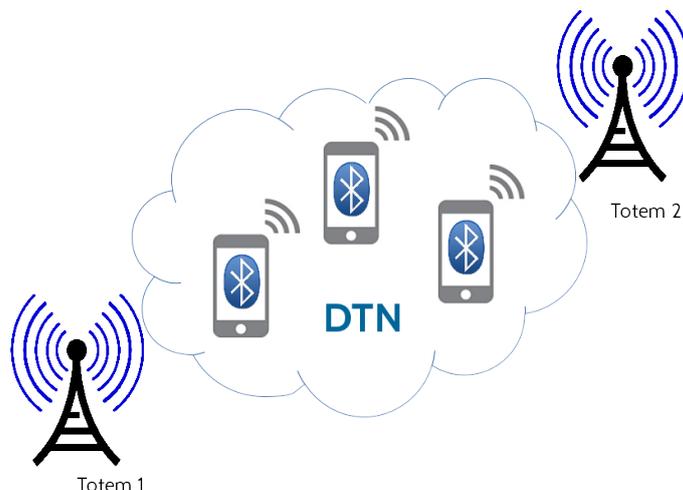


Figura 5.6: DTN.

O encaminhamento de pacotes entre os nós DTN é feito de forma oportunista. A cada minuto o terminal emite um *beacon* que possibilita o início da comunicação com outro na sua área de cobertura. A área de cobertura é aproximadamente um círculo com diâmetro de 500 m, dado que o alcance dos módulos LoRa utilizados é de cerca de 250 m, conforme descrito na Seção 4.3.1. Este período para envio do *beacon*, definido a partir da velocidade estimada de deslocamento dos visitantes e do alcance do sinal, mantém baixo o consumo da bateria, permitindo ainda que haja ao menos duas oportunidades de reconhecimento e troca de dados durante cada intervalo de contato. É importante que a oportunidade de comunicação não seja única, uma vez que a transmissão não é confiável e o *beacon* pode ser perdido. Dois visitantes com o perfil de caminhantes rápidos, têm um intervalo de contato de cerca de 2,5 minutos para descobrir a presença um do outro e trocar informações de localização. Esse é o menor tempo médio de contato, como mostram as medições descritas na Seção 4.3.4.

Com o intuito de manter a simplicidade e a leveza da solução, não é implementada a pilha de protocolos de DTN para os terminais do modo transparente. Seus conceitos principais são propostos para executar diretamente acima da camada física LoRa. A cada contato os terminais trocam dados, usando o encaminhamento “*store-carry-forward*” no qual uma mensagem pode ser armazenada por um longo período, até mesmo por horas ou dias, esperando que haja contato com um dispositivo próximo que possa servir de transporte de dados. O conceito de transferência em custódia é parcialmente implementado, uma vez que só ocorre na comunicação entre terminal móvel e totem.

Para os terminais no modo interativo é necessária a implementação da pilha DTN, pois a aplicação executa acima do protocolo 6LoWPAN na camada de rede. Como as tecnologias para conexão dos *smartphones* possuem alcance ainda mais curto do que o LoRa,

busca-se usar a informação de localização da aplicação de monitoração do modo transparente para melhorar os contatos entre visitantes. A informação de localização ajuda a definir qual o melhor nó móvel para transportar os dados até o próximo totem. Esta abordagem tenta tornar o processo de envio em si mais eficiente e aumentar a taxa de transmissão ao entregar os pacotes ao totem mais precocemente. Para isso é necessário mapear a identificação do visitante nas duas tecnologias, afim de que a posição e o deslocamento obtidos via LoRa, possam ser informados através do Bluetooth/IEEE 802.11g corretamente. Uma vez que o terminal *wearable* da aplicação de localização pode ser reaproveitado por vários visitantes, este mapeamento deve ser dinâmico e, idealmente, no momento de entrada na UC. Uma forma prevista é o visitante que optar pelo modo interativo ler o *qr code* impresso no *wearable* que contem o transmissor do LoRa e fazer um registro na rede com as duas informações. Para que a solução possa escalar bem, cada visitante guarda a sua própria informação e a comunica ao entrar na área de um ponto de DTN, implementado por um totem. O totem então pode processar essas informações localmente, seguindo uma abordagem de *fog computing*, ou enviar para um servidor central, para fazer as previsões de contato entre os nós DTN móveis. As previsões, contemplando todos os possíveis contatos no segmento até o próximo totem e o momento de sua ocorrência, são então comunicadas aos nós em si. Havendo mensagens a serem encaminhadas e a previsão de contato se concretizando, é feito o envio das mensagens.

Todavia, é preciso evitar que os *smartphones* fiquem sobrecarregados com a função de nó DTN. Para isso deve haver no *software* uma limitação para que o *smartphone* apenas receba e/ou encaminhe mensagens de outros visitantes quando tiver condições para isso. O terminal fica bloqueado pra receber mensagens a serem carregadas na eventualidade de não ter um mínimo de bateria e memória disponíveis, passando a apenas enviar as suas próprias mensagens. No caso extremo de reduzir a carga da bateria abaixo um segundo e último limiar, apenas as mensagens de resposta aos totens e de pedido de socorro serão enviadas, caso necessário.

5.3 Protocolo de Comunicação

Como o foco do projeto é na segurança física do visitante, provendo a monitoração da sua localização, este protocolo se destina apenas para a comunicação no modo transparente.

A recepção de um *beacon* possibilita o início da comunicação com outro elemento da rede na sua área de cobertura, seja este um totem ou terminal móvel. O *beacon* contém a identificação do terminal, sua última posição conhecida, quando esta posição foi determinada e se o visitante está em perigo (*help flag*). Essas informações são usadas para estimar a sua localização e seu deslocamento, dar encaminhamento prioritário ao pedido de socorro e retornar a notificação de resgate. Para minimizar o efeito de possíveis perdas

de pacotes, a mensagem de pedido de socorro será enviada a cada 15 s até que o terminal receba a notificação em resposta, confirmando o envio da equipe de resgate. Enquanto emite o pedido de socorro o terminal não executa nenhuma outra função, como forma de economizar bateria, exceto a função de atualização da localização via GPS caso possível.

A aplicação de localização, usada para prover o serviço de monitoramento e segurança de visitantes, é baseada em [21] e [32], trabalhos que propõem estimar a localização do visitante através da troca de mensagens entre sensores de RF. No projeto CenWits [21] é apresentado o conceito de sensor testemunha, que faz um registro de avistamento para armazenar e transmitir informações de localização, que retratam o movimento dos outros sensores. Quando se encontram ao longo do caminho, os sensores se tornam testemunhas entre si e trocam seus dados de localização, que serão enviados para um repositório central através de um ponto de acesso (AP - *Access Point*). Esses dados, que compõem o histórico de localizações anteriores de diversos sensores, podem ser usados para estimar as suas localizações.

Para minimizar a complexidade da implantação e, portanto, a necessidade de processamento do terminal móvel, as pilhas IP e DTN não são implementadas no terminal. A aplicação é executada diretamente acima da camada física, usando seu próprio mecanismo de controle de acesso meio. Esse mecanismo simples, desenvolvido para este trabalho de tese, é uma variação do *Clear Channel Assessment (CCA)*, usado no CSMA/CA, específico para sensores LoRa. O CCA envolve ouvir transmissões de RF na camada física. Os rádios utilizam dois limiares separados ao ouvir o meio RF. O limiar de detecção de sinal (SD - *Signal Detect*) é usado para identificar quaisquer transmissões de pré-âmbulo de outro rádio transmissor. O limiar de detecção de sinal (SD) é definido como 4 dB acima da relação sinal ruído (SNR). O limiar de detecção de energia (ED - *Energy Detect*) é usado para detectar qualquer outro tipo de transmissões de RF durante a verificação de disponibilidade do canal, uma vez que a banda usada é não regulamentada e outras transmissões RF podem ocupar o meio de transmissão. Na variação aqui proposta, o CCA é aplicado ao canal definido pelo fator de espalhamento (SF) a ser usado para a transmissão.

A escolha do canal de comunicação é feita considerando o uso dos diferentes fatores de espalhamento da tecnologia LoRa. Os *beacons* são enviados usando o SF 12, mas os registros de avistamento são trocados usando o SF que permite a maior taxa de transmissão possível. A escolha do SF é feita com base no RSSI e SNR do *beacon* recebido para principiar a comunicação entre os terminais. Se os valores de RSSI e SNR medidos estiverem dentro de limiares que permitem a operação em um dado SF, este será escolhido. Caso não seja possível, outro SF de valor mais alto será avaliado. O menor SF possível tanto para transmissor como para receptor será sempre escolhido, para aumentar a taxa de transmissão. Será usado o mesmo SF tanto para transmissão como para recepção de forma a simplificar e agilizar este *handshake* inicial. A exceção é o SF7, usado apenas para a comunicação dentro de grupos.

O sistema proposto acrescenta melhorias ao trabalho de Huang, no projeto CenWits [21]. No CenWits foi proposto um protocolo de envio de mensagens de informação de avistamentos que utiliza as mensagens de registros. Basicamente funciona com a troca dos registros e o descarte daqueles que excederem parâmetros de tempo na rede e quantidade de saltos percorridos. Entre as melhorias propostas está a possibilidade de um pedido ativo de socorro por parte do usuário. Isso é feito com a criação de dois novos tipos de mensagem e a adição de um campo, o *help flag*. As novas mensagens são: pedido de socorro e notificação de resgate, identificadas pelo *help flag*. Estas adequações permitem um atendimento mais rápido ao visitante em situação de risco. Não é preciso aguardar por um longo tempo até que o problema seja percebido através da ausência de dados deste visitante específico nas mensagens dos outros visitantes. Adicionalmente, é proposto um esquema dinâmico de grupo composto por visitantes que viajam juntos. O grupo evita a troca contínua de mensagens entre terminais que estão constantemente ao alcance um do outro. Um novo tipo de mensagem e dois novos campos também são criados para permitir a formação dinâmica de grupos e a eleição de seu líder. A escolha de um líder é baseada na capacidade da bateria disponível dos participantes. Também é feita uma adequação do registro de avistamento, reduzindo o seu tamanho. Essa redução visa facilitar a transmissão por tecnologias de baixa vazão tipicamente usadas em IoT. Na Figura 5.7, são mostradas as mensagens utilizadas no protocolo proposto. Cada uma delas pode possuir os seguintes campos:

- Campo *type* (4 bits) – descreve o tipo de mensagem. Oito tipos de mensagens são definidas e, portanto, há espaço para a sinalização de novos tipos de mensagens que podem ser criados conforme necessário no futuro. Um uso futuro possível, já prospectado, é o envio de alarme de incêndio por nós sensores a serem instalados nos totens. Os tipos de mensagens atualmente definidos são:
 - Pedido de socorro (*help request*) – enviado ativamente pelo usuário em risco, solicitando ajuda;
 - Notificação de resgate (*rescue notification*) – relata que há uma equipe de resgate a caminho;
 - *Totem beacon* – sinaliza a presença de um totem;
 - *Totem ack* – confirma o recebimento dos registros enviados ao totem por um terminal;
 - *Mobile beacon* – sinaliza a presença de um terminal móvel;
 - Solicitação/Aceitação de transmissão - usada durante o *handshake* inicial para solicitar ou aceitar a transmissão de registros, bem como para informar os parâmetros a serem utilizados na transmissão;

- Registro – armazena dados de avistamento de outro terminal ou atualiza a posição do próprio terminal;
 - Eleição de líder de grupo (*leader election*)– compartilha dados dos membros do grupo para a eleição de líder.
- Campo HF - *help flag* (4 bits) – informa se o visitante pediu socorro ou se há uma equipe de resgate a caminho. Em caso de pedido de socorro todos os bits terão valor 0. Para a notificação de resgate os bits terão valor 1. São usados 3 bits para prover redundância e permitir detecção de erro pela aplicação. Na aplicação interativa os bits extras podem ser usados para informar o tipo de problema que o visitante está enfrentando.
 - Campo ID (*mobile* ou *totem*) (15 bits) – identifica o totem ou o terminal móvel. Os primeiros endereços são fixos e atribuídos aos totens, os demais, são atribuídos sob demanda aos terminais. Os endereços dos terminais devem permanecer unívocos em toda a área durante o intervalo de monitoração, definido como 24h. Caso o terminal não seja localizado nesse prazo máximo, será enviado resgate mesmo sem solicitação, pois o visitante pode estar desacordado.
 - Campo ACK - *acknowledge* (1 bit) – indica que se trata de uma mensagem de confirmação de recebimento de registros. No caso de recebimento parcial ou com erros, este campo tem valor zero.
 - Campo GF *group flag* (1 bit) – diferencia se o ID móvel é um líder de grupo ou não. Juntamente com o ID móvel do líder, forma o ID do grupo.
 - Campo *record time* (16 bits) – armazena o momento de contato com outro terminal móvel, ou seja o momento em que um novo registro é gerado, com precisão de 1,5 segundos.
 - Campos *latitude* e *longitude* (24 bits cada, total 48 bits) – armazenam a última coordenada obtida, com precisão de 2,4 m. As coordenadas geográficas podem ser obtidas pelo GPS a cada minuto, caso haja conexão com os satélites, ou recebida de um totem quando o terminal móvel estiver em sua área de cobertura. O receptor de GPS usado nos experimentos tem precisão de 2,5 m [101].
 - Campo *location time* (16 bits) – armazena o momento em que as coordenadas foram obtidas, com precisão de 1,5 segundos.
 - Campo *hop count* (8 bits) – contém o número de vezes em que a mensagem foi repassada, incrementado a cada transmissão.

- Campo *max records* (11 bits) – informa o número máximo de registros de avistamento que o terminal aceita receber. O tamanho desse campo foi definido estimando a quantidade máxima de registros para o estudo de caso a partir da frequência de pessoas na trilha por dia. Essa frequência de pessoas é definida pela capacidade da trilha, ou seja, a quantidade de pessoas que a trilha suporta ainda com um impacto ambiental dentro de limites aceitáveis de acordo com a gestão da UC.
- Campo bateria (4 bits) – Dá uma estimativa da duração da bateria, que pode ser codificada em 16 níveis.
- CH - *channel* (2bits) – identifica o fator de espalhamento a ser usado para troca de registros. São usados apenas os fatores SF8, SF9, SF10 e SF11, porque os fatores SF7 e SF12 têm uso específico. O SF12 funciona como um canal comum, no qual são enviados os *beacons* e o SF7 é usado para a comunicação dentro de um grupo.

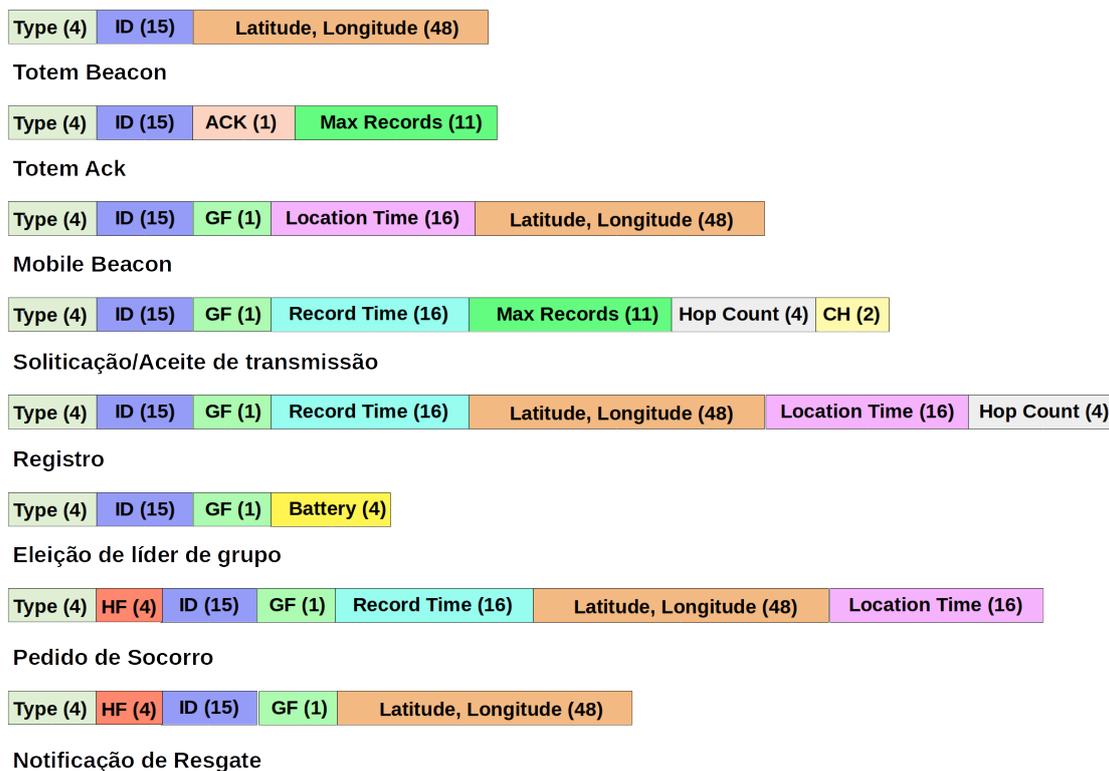


Figura 5.7: Formato das mensagens, indicando nome do campo e seu comprimento em bits, entre parênteses.

A troca de mensagens entre terminais e entre terminais e totens é definida pelo protocolo de comunicação desenvolvido para a aplicação de monitoração de localização. A Figura 5.8 ilustra a comunicação entre terminais. A comunicação é assíncrona e se inicia com a recepção do *beacon*. O terminal B registra a presença do terminal A. Em seguida, envia seu ID e solicita permissão para transmitir seus registros armazenados. O terminal

B também declara seus valores limites de recepção para contagem de saltos (*hop count*), tempo de registro (*record time*) e o número máximo de registros a serem recebidos (*max records*). Caso tenha memória disponível, A, o terminal remoto que originou o *beacon*, armazena os dados do contato atual e envia seus próprios limites de *hop count*, *record time* e *max records* e aceita a transmissão. Em seguida envia os próprios registros armazenados. Caso A ou B não tenham memória disponível, os campos *hop count*, *record time* e *max records* são informados com valor zero, informando ao terminal remoto para não enviar nenhum registro.

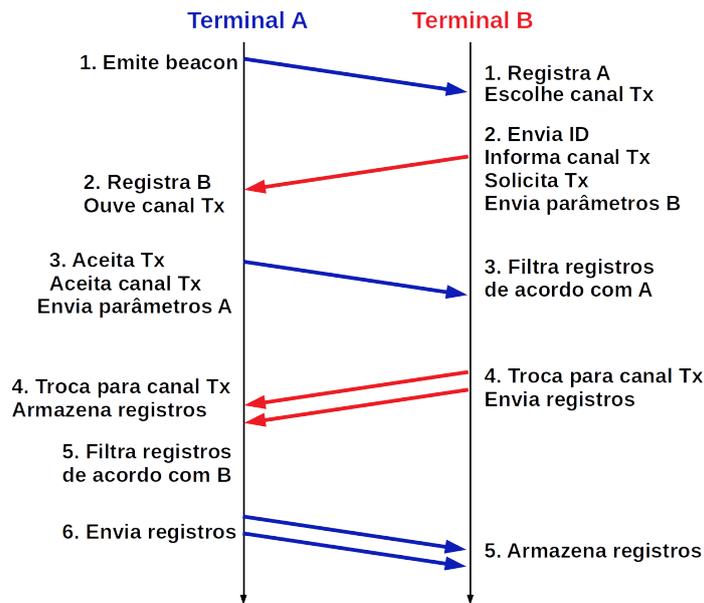


Figura 5.8: Comunicação entre terminais em operação normal.

Ambos os terminais também concordam qual SF será usado para trocar os registros. Ao receber um *beacon*, o terminal B avalia o nível de RSSI e SNR da comunicação e propõe a mudança para outro SF que permite uma taxa de transmissão mais alta. A definição de SF é feita pelo terminal que recebe o *beacon* e informada junto com seus metadados (*hop count*, *record time* e *max records*) enviando a identificação do SF no campo *channel*. A escolha do canal pode ser aceita ou modificada pelo terminal A. Se os valores de RSSI e SNR na recepção das mensagens enviadas por B não permitirem a operação no canal (SF) definido, então o terminal A envia junto com seus próprios metadados um SF mais alto. Os fatores de espalhamento escolhidos por A e B podem ser diferentes, uma vez que o comportamento do canal rádio pode diferir em cada direção, como mostrado na Seção 4.3. Porém será usado o mesmo SF por A e B para simplificar e agilizar tanto o *handshake* inicial como a configuração do transceiver durante a comunicação. A definição do SF igual e maior para ambos também é uma escolha conservadora buscando melhorar as chances de recepção correta dos dados.

Para a identificação do canal de transmissão em que é feito o envio dos registros, são

usados apenas dois bits, uma vez que apenas SF8, 9, 10 e 11 estão disponíveis. O SF 12 é usado exclusivamente para transmitir os *beacons* e o *handshake* inicial, devendo portanto estar livre a maior parte possível do tempo, de modo a evitar colisões. O SF 7 é usado para comunicações dentro de um grupo, uma vez que as distâncias nesse caso sempre serão curtas. Trocar os registros usando um fator de espalhamento diferente reduz colisões ao deixar o canal comum fornecido pelo SF12 livre, visto que a maior parte do tempo de comunicação entre dois terminais é usada para o envio dos registros de avistamento. Antes de iniciar a sua transmissão cada terminal ouve o canal escolhido, num mecanismo similar ao CCA *Clear Channel Assessment* para reduzir a chance de colisão. Depois de receber a transmissão dos registros do terminal B, o terminal A envia seus próprios registros armazenados.

O uso dos campos *hop count* e *record time* permite melhorar o gerenciamento da memória do terminal, evitando receber registros muito antigos ou já retransmitidos muitas vezes. O campo *max records* permite limitar o número de registros recebidos, mesmo que estejam de acordo com os parâmetros *hop count* e *record time*. Os registros que possuem valores acima dos limites informados não são enviados. Os registros com pedido de socorro são os primeiros a ser transmitidos. Após estes, são encaminhados os registros de contatos anteriores com outros dispositivos e, por fim, as notificações de resgate.

Para tornar mais eficiente a comunicação para visitantes que viajam juntos ou próximos, grupos são formados. Grupos são criados sem a necessidade de intervenção do visitante. Após o recebimento de 30 *beacons* seguidos, originados pelo mesmo terminal dentro de 30 minutos, é iniciada a formação do grupo ou a inclusão do terminal em um grupo existente. Esta quantidade de *beacons* foi definida como 30 porque os visitantes mais lentos, que andam a 25 m/min, enviam 10 *beacons* durante o tempo de contato de 10 minutos, ao cruzarem um outro com o outro. O tempo de cruzamento entre diferentes perfis de visitantes é avaliado na Seção 4.3.4. Multiplicando esses valores por 3, garantimos que esses visitantes estão realmente juntos e não apenas passando um pelo outro de forma eventual. Assim, 30 *beacons*, com período de 1 minuto, recebidos de um mesmo terminal durante um intervalo de 30 minutos é a condição para criação ou inclusão em um grupo.

Os terminais envolvidos na criação ou inclusão em um grupo trocam mensagens para a eleição do líder usando o SF7. Esta mensagem contém o ID do terminal e uma estimativa do tempo para a bateria se esgotar. O líder será o terminal com a maior duração prevista para a bateria. Em caso de empate, a escolha é feita pelo nó com maior ID. Depois que o grupo é formado, o líder e outros participantes do grupo têm o mesmo conjunto de registros de avistamento. O intervalo de 30 minutos durante o qual os membros permanecem próximos antes da criação ou inclusão no grupo, garante que o conjunto de registro será o mesmo. O grupo permanece sincronizado pelo *beacon* do líder, identificado pelo ID do grupo. O ID do grupo consiste no campo ID do líder e no sinalizador do grupo (GF). O terminal que não é um líder de grupo terá o campo GF com valor zero. O líder GF terá o

valor 1. Um visitante que se desloque sozinho, ou seja, um terminal isolado, também terá o campo GF com valor 1, para permitir a sua comunicação com demais grupos e usuários. Mensagens com GF zero são consideradas apenas para comunicação dentro do grupo.

Somente o líder enviará *beacons* e trocará registros de avistamento com outros terminais com os quais o grupo faça contato. Entre os registros enviados pelo líder, obrigatoriamente constam as informações recebidas quando da eleição do líder que identificam todos os participantes do grupo. Estes registros são criados pelo líder com valor zero no campo GF. Não há necessidade de o líder replicar os dados recebidos de um terminal fora do grupo para os outros participantes, pois todos ouvem a transmissão pelo ID do grupo. Dessa forma, todos mantêm o conjunto de registros de avistamento idêntico. A maior eficiência no uso de bateria vem justamente do fato dos membros do grupo não transmitirem dados. A operação de transmissão gera um consumo de energia muito maior do que a recepção de dados e a sincronização feita pelo grupo, conforme mostrado na Tabela 4.1.

Se o *beacon* do líder não for mais recebido por um intervalo superior a 10 minutos, ou seja, o tempo necessário para mandar 10 *beacons* e para um visitante lento sair da área de cobertura de outro, a eleição de um novo líder começa. Se durante a eleição o terminal não receber mensagens de outros terminais, entende-se que não faz mais parte de nenhum grupo e está se movendo isoladamente. Se a carga da bateria do líder reduz abaixo de limites pré-estabelecidos, o aparelho para de enviar *beacons* forçando uma nova eleição. Uma nova eleição também é realizada a cada hora, mesmo que o *beacon* do líder ainda seja recebido, como forma de atualizar a formação do grupo e eventuais partições sejam percebidas. Essas partições são reportadas no próximo totem. Caso não sejam recebidas novas mensagens com dados de localização do terminal ou terminais que se separaram durante o tempo estimado para a sua chegada a um novo totem, estes são considerados em perigo e é gerado um pedido de socorro. A eleição periódica também reduz as chances de que a bateria do líder seja esgotada.

No caso de dois grupos se cruzarem, poderá haver mudanças na liderança e fusão de grupos, caso os líderes permaneçam mutuamente nas suas áreas de cobertura. A mudança de líder não precisa ser informada para os membros do grupo, uma vez que estes ouvem a nova eleição e passaram a sincronizar com as mensagens enviadas para o novo ID de grupo. A comunicação dentro dos grupos é feita usando SF7, pois seus membros estão sempre próximos. Dessa forma, uma taxa de transmissão mais alta pode ser usada enquanto reduz o consumo e as chances de interferir em outras comunicações. O envio de *beacons*, seja por um terminal isolado ou por um líder de grupo, é feito usando o SF12

A comunicação entre terminais e totens, ilustrada nas Figuras 5.9 e 5.10, também é assíncrona e iniciada pela recepção de um *beacon*. Os totens anunciam suas coordenadas enviando *beacons* a cada 5 s, uma vez que não há restrições severas de energia ou armazenamento, como nos terminais móveis, e é importante aumentar a probabilidade de que um dispositivo que entre em uma área de totem consiga estabelecer comunicação.

Na Figura 5.9 o terminal A, que passa pela área de cobertura do totem, ouve o *beacon*. O terminal atualiza as suas coordenadas, informa a sua identificação e solicita a transmissão dos registros salvos em sua memória. Ao receber o aceite, A então encaminha todos os registros da sua memória. Estes registros podem ser processados localmente e/ou enviados para servidores de forma a estimar a localização dos visitantes. Caso haja um pedido de socorro, a solicitação é encaminhada para uma equipe de resgate, que responde com uma notificação ao enviar ajuda. A notificação de resgate tem a função de encerrar o envio do pedido de socorro pelo terminal do visitante em perigo. O terminal volta a emitir apenas *beacons* comuns, com período de 1 minuto.

Após o envio de todos os seus registros o terminal A aguarda pelo ACK do totem, confirmando o recebimento do número total de registros. Caso este número não seja o mesmo de registros enviados, todos são enviados novamente. Somente após a confirmação de recebimento, o terminal esvazia sua memória e o totem se torna responsável por encaminhar a informação na rede, num mecanismo semelhante à transferência de custódia.

Os totens registram a presença dos terminais móveis, informando ao servidor e/ou outros totens porventura alcançáveis, em qual trilha se encontra o visitante. É feita então uma previsão do seu deslocamento e do momento em que o visitante passará pelo próximo totem desta mesma trilha. Essa previsão é refinada com o acúmulo de registros sobre cada visitante, ao estimar a sua velocidade média de deslocamento acrescida de uma margem de folga, uma vez que o visitante pode fazer pausas para descanso ou desfrutar da natureza. Esta margem pode variar de acordo com o nível de perigo de cada trilha. A previsão de deslocamento é então usada para melhorar as chances de envio de dados na aplicação interativa e para iniciar a temporização para envio do pedido de socorro. O limite máximo para o pedido de socorro é o intervalo de monitoração, definido como 24h.

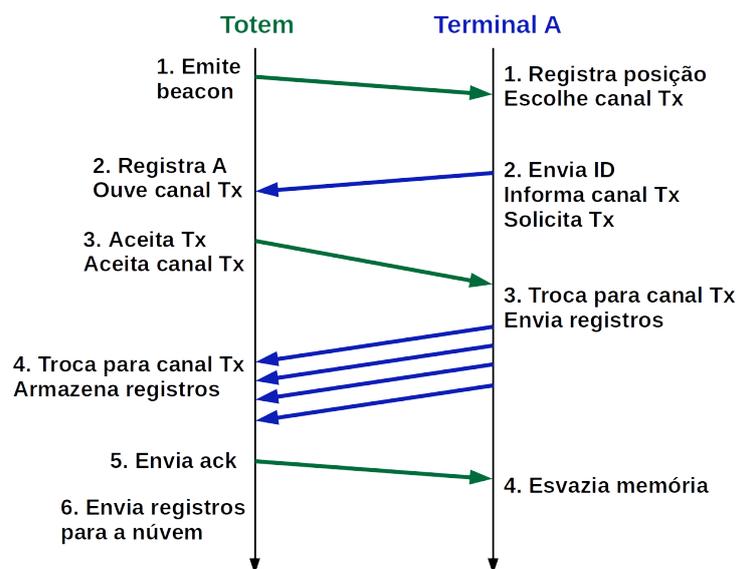


Figura 5.9: Comunicação entre totem e terminal.

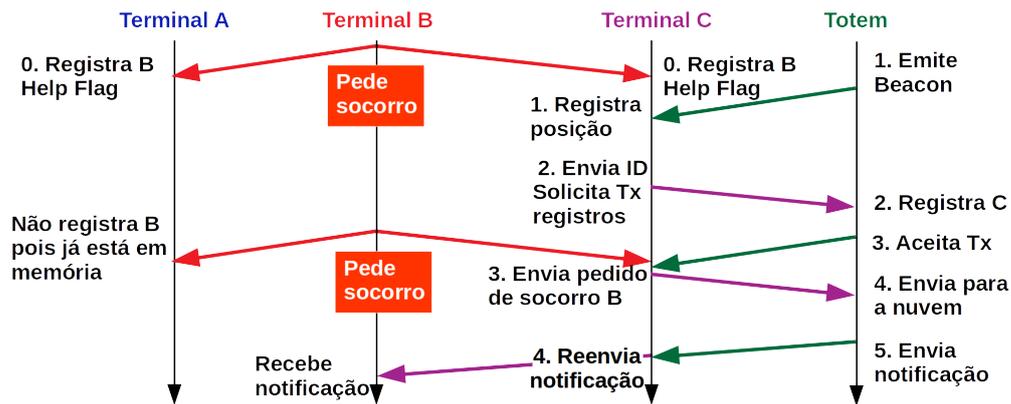


Figura 5.10: Comunicação em situação de emergência.

5.3.1 Máquinas de Estados Finitos

Um protocolo de comunicação é definido como um conjunto de regras que governa o formato e o significado de quadros, mensagens ou pacotes que são trocados através de entidades pares [126]. Nesta seção é feita a especificação para cada entidade de protocolo, suas próprias ações, as mensagens trocadas com outras entidades de protocolo e a correta ordenação destas mensagens. Segundo Araújo *et al.* [127] duas propriedades devem ser garantidas no projeto de protocolos de comunicação: segurança (*safety*) e vivacidade (*liveness*). A primeira diz respeito à correção sintática, garantindo que o protocolo não entrará em estado ou situação indesejados. A propriedade de vivacidade diz respeito à correção semântica, assegurando que o protocolo provê as funções a serem fornecidas aos usuários, especificadas na descrição do serviço do protocolo.

Máquinas de estados finitos são tradicionalmente usadas em abordagens de síntese de protocolos de comunicação. Uma máquina de estados finitos (*FSM - Finite-State Machine*) é definida por uma 7-tupla Q, V, t, q_0, V', o, D onde $Q \neq \emptyset$ é um conjunto finito de estados, V é um conjunto finito de entradas, t é a função de transição de estados, $q_0 \in Q$ é o estado inicial, V' é um conjunto finito de saídas, o é a função de saída e D é o domínio de especificação, sendo este último um subconjunto de $Q \times V$. t e o caracterizam o comportamento da FSM, ou seja, $t(q, v) : Q \times V \rightarrow Q$ e $o(q, v) : Q \times V \rightarrow V'$. Se $D = Q \times V$, então t e o são definidos para toda combinação estado atual-entrada possível e, portanto, a FSM é denominada completamente especificada [127].

A especificação de serviço de um protocolo pode ser feita utilizando uma FSM para prover um modelo global ou segundo a perspectiva da entidade. As FSMs apresentadas a seguir descrevem o funcionamento do protocolo apresentado na Seção 5.3 segundo a perspectiva da entidade. Foram desenvolvidas em conjunto com o graduando Felipe F. da Silva em seu trabalho de conclusão de curso, que contempla também a implementação do protocolo em si. Este trabalho de fim de curso é co-orientado pela autora desta tese.

A Figura 5.11 ilustra a comunicação entre totem e terminal móvel. À esquerda temos

a máquina de estados executada pelo totem e, à direita, a máquina de estados do terminal. O estado “INICIAL” é o estado em que, por um intervalo de tempo, o totem não emite *beacons* para os terminais.

Através das FSMs é possível perceber estados sujeitos a bloqueio, em que há a espera de alguma ação por parte da outra entidade. Para garantir a propriedade de segurança, são inseridos temporizadores como forma de evitar que o totem ou o terminal permaneçam em um estado indesejado. É preciso lembrar que a transmissão não é confiável podendo haver extravios de pacotes ou recepção com erros.

Nestas figuras, ocorre uma primitiva, um envio de um *beacon* no totem e o seu recebimento, no terminal móvel. A comunicação é iniciada pelo totem. Caso seja aceita pelo terminal, o totem pode iniciar o procedimento de recepção e armazenamento dos dados. Não há um procedimento específico de encerramento, que se dá por temporização após o envio dos dados. Após aguardar o tempo pré-determinado, ambas as entidades percebem que as transmissões se encerraram e retornam para o estado inicial.

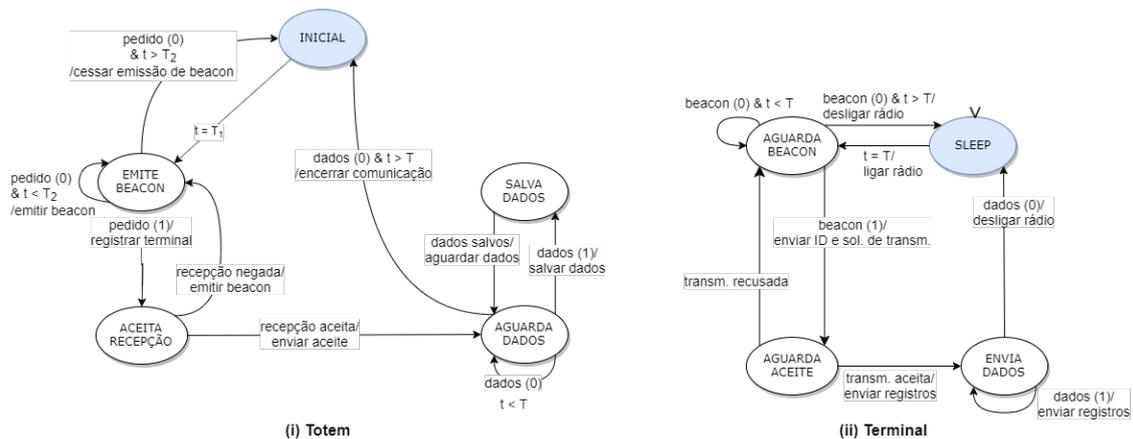


Figura 5.11: Máquina de estados da comunicação entre totem e terminal.

A FSM que descreve a comunicação entre terminais foi feita usando um modelo global, uma vez que a comunicação se dá entre duas instâncias da mesma entidade. Aqui também a primitiva que inicia a comunicação é o envio/recebimento de um *beacon*, como mostra a Figura 5.12). Após sair do estado “SLEEP” e ligar seu transceptor, o terminal “escuta” o meio por um período aleatório. Isto reduz a probabilidade de colisão causada pelo envio simultâneo do *beacon* por mais de um terminal. Da mesma forma que na comunicação com o totem, são feitas solicitações de transmissão de dados com o envio de metadados dos registros que deseja transmitir (“SOLICITA TRANSM.”). São feitas as transmissões de dados de ambos os terminais. Novamente o encerramento é feito pela temporização.

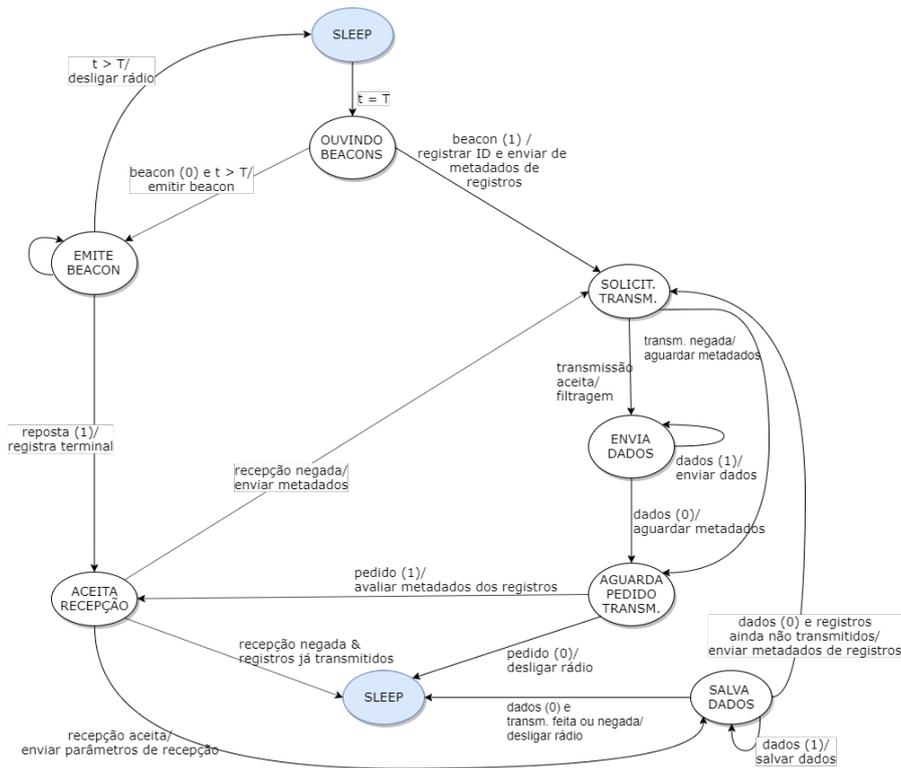


Figura 5.12: Máquina de estados da comunicação entre terminais.

5.4 Considerações

Acredita-se que a abordagem multi-tecnológica da presente proposta de tese permite desenvolver uma rede sem-fio que seja adequada aos desafios do ambiente de floresta e permita o uso de aplicações de assistência ao visitante da unidade de conservação. O estudo de caso e as medições experimentais descritas no Capítulo 6 explicitam os desafios, mas também indicam a viabilidade que poderá ser confirmada com novos testes e simulações.

Capítulo 6

Estudo de Caso

Este projeto foi realizado em parceria com o Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO), unidade de conservação composta por uma área de 20 mil hectares que abrange os municípios de Teresópolis, Petrópolis, Magé e Guapimirim, no estado do Rio de Janeiro. De acordo com o ICMBio, em 2015 foram mais de 217.000 visitantes na área do parque. O estudo de caso deste trabalho é a aplicação da rede proposta na travessia entre as cidades de Petrópolis e Teresópolis através do PARNASO, utilizando simulador de eventos discretos NS-3 (*Network Simulator version 3*) [128, 129]. Percorre-se a trilha de cerca de 29 km em três dias, com pernoite em dois abrigos de montanha.

A travessia Petrópolis x Teresópolis, apesar de linda e cheia de atrativos, exemplifica alguns dos problemas vividos pelo Parque e seus visitantes. O Parque sofre com a falta de controle e conhecimento da visitação e das atividades executadas pelos visitantes. Estes por sua vez não possuem informações nem de segurança da trilha nem sobre o atrativo em si, como dados da fauna e da flora, nível de dificuldade da trilha, etc.

O procedimento atual do PARNASO exige que, antes do início da caminhada, seja assinado o Termo de Conhecimento de Riscos e Normas. O termo, entregue nas portarias do Parque, é importante para o registro da entrada e saída dos visitantes. Atualmente, essa é a única forma de registro dos visitantes. O horário de entrada e o tempo estimado de percurso são usados para prever a chegada do visitante nos abrigos de montanha. Assim, no caso de algum visitante se perder, essa ocorrência, se for percebida, só o será à noite e possivelmente depois de várias horas. Não há também nenhuma estimativa da localização do visitante perdido, dificultando o resgate.

A Figura 6.1 ilustra o percurso da travessia Petrópolis-Teresópolis. Os pontos indicados dentro de círculos azuis são as localizações dos dois abrigos para pernoite. O trecho entre os abrigos é o mais propenso à ocorrência de desaparecimentos. Os pontos indicados pelas bandeiras laranja triangulares são os pontos de interesse da trilha, que correspondem aos pontos previstos no roteiro da travessia para colocação de totens. Além destes foi adicionado mais um totem no final da trilha bifurcada para os Portais de Hércules/Vale da Morte.

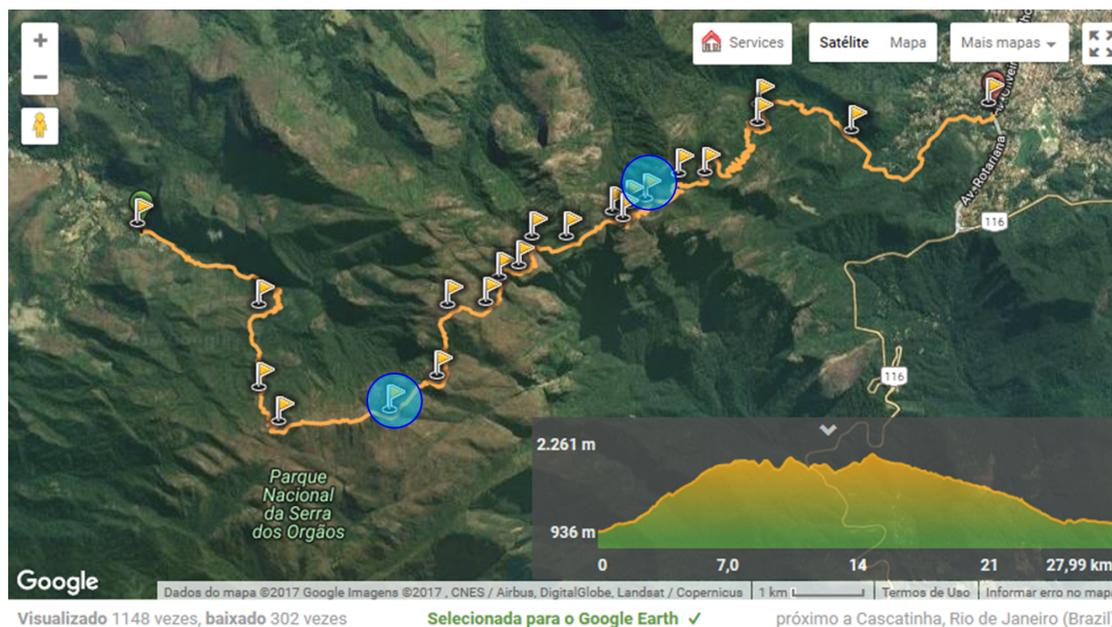


Figura 6.1: Percurso da travessia Petrópolis-Teresópolis.

6.1 Roteiro da Travessia

Idealmente, os totens devem ser localizados ao menos nas entradas, saídas e entroncamentos de trilhas, além de lugares com riscos específicos, como cachoeiras e grutas.

A Figura 6.2 mostra uma das paisagens do segundo dia de trilha, com a visão de picos da Serra dos Órgão. As Figuras 6.3(a) e 6.3(b) mostram locais típicos de instalação de totens: o final da travessia Petrópolis – Teresópolis, na sede de Teresópolis, e uma cachoeira dentro do PARNASO sujeita ao risco de cabeças d’água.

O roteiro recomendado [130] tem início na portaria do parque em Petrópolis, localizada no bairro do Bonfim, e tem duração de 3 dias. O sentido Petrópolis-Teresópolis se justifica tanto pela menor dificuldade na passagem de determinados trechos críticos, quanto pela beleza da paisagem, podendo-se admirar de frente a majestosa cadeia de montanhas da Serra dos Órgãos. O roteiro da travessia e a distribuição proposta para os totens de comunicação seguem a seguinte organização:

- Primeiro dia: Bonfim-Castelos do Açú
- Duração estimada: 6 horas

A caminhada até o Açú é considerada pesada devido à grande variação altitudinal. Parte-se da portaria do Parque (a cerca de 1.100 m de altitude), chegando-se a 2.245 m na Pedra do Açú. A caminhada é relativamente curta (pouco mais de 7 km de extensão) mas demora cerca de 6 horas para o montanhista médio.

- Primeiro totem - entrada da trilha

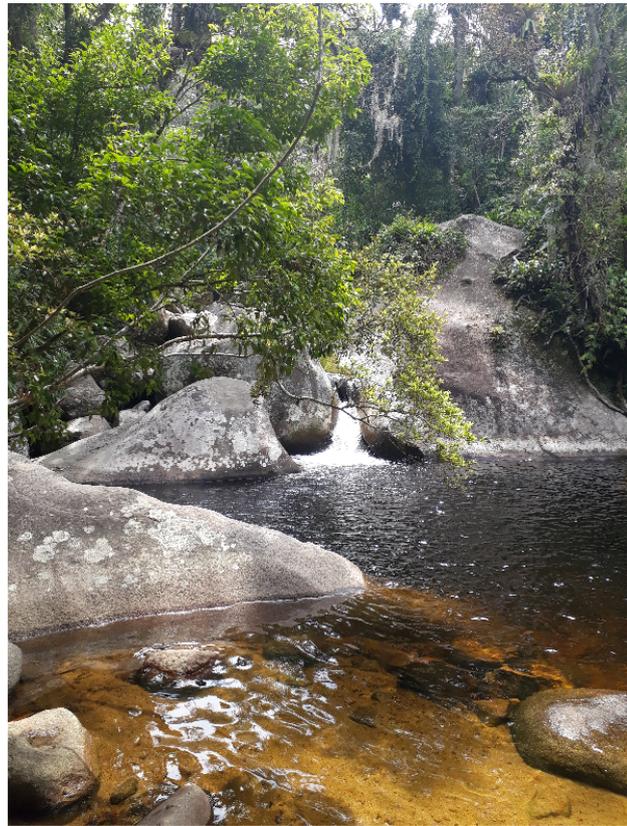
A travessia começa na Sede Petrópolis do PARNASO, no bairro do Bonfim.



Figura 6.2: Paisagem do segundo dia.



(a) Final da travessia na sede de Teresópolis.



(b) Cachoeira.

Figura 6.3: Locais para a instalação de totens.

- Segundo totem - Gruta do Presidente e a Cachoeira Vêu da Noiva
Após cerca de 40 minutos na trilha chega-se à entrada para a Gruta do Presidente e a Cachoeira Vêu da Noiva.
Sempre que possível, devem ser colocados totens em entradas de grutas e perto de cachoeiras, pois são pontos de risco para os visitantes. Especificamente a localização próxima a cachoeiras permite enviar alertas de cabeças d'água.
- Terceiro totem - Pedra do Queijo
Mais 50 minutos de caminhada e chega-se à Pedra do Queijo, um bom local para descanso com vista panorâmica para o Vale do Bonfim e os picos da Alcobaça, do Alicate e outras montanhas de Petrópolis.
A princípio locais com vista panorâmica são bons locais pra um totem, pois provavelmente têm menos obstáculos para a propagação, iluminando uma área de cobertura maior. Também são locais de parada ou de passagem frequente de visitantes, facilitando a identificação dos caminhantes que se encontram na trilha.
- Quarto totem - Ajax
Após mais 40 minutos de subida chega-se ao Ajax, local com fonte de água. O acampamento é proibido no local.
Locais com maior visitação, como pontos de água, são bons locais para rastrear o visitante, da mesma forma que pontos panorâmicos.
- Quinto totem - Isabeloca
Após a passagem pelo Ajax inicia-se o trecho de subida mais íngreme de Petrópolis. Conhecido como Isabeloca, em homenagem a uma suposta passagem pelo local da princesa Isabel em lombo de mulas. Este trecho encontra-se bastante erodido.
Um longo trecho de subida íngreme e erodido significa um trecho perigoso. Como há alto risco de acidentes é importante monitorar os visitantes neste local.
- Sexto totem - Pico do Cruzeiro
Ao fim da Isabeloca chega-se ao Chapadão, trecho mais plano de onde já se avista a Pedra do Açú, também conhecida como pico do Cruzeiro, ponto mais alto de Petrópolis, e os Castelos do Açú, interessante formação rochosa cheia de reentrâncias onde é possível se abrigar da chuva e do vento.
Ponto final do dia de travessia e ponto dominante da região. Iluminará o final da Isabeloca e o Chapadão, aumentando a área de cobertura com o uso de menos recursos.
- Sétimo totem - Abrigo 1

Próximo aos Castelos do Açú existe um dos dois abrigos de montanha ao longo da travessia e a área de *camping* adjacente. Este é o local do primeiro pernoite. Assim como o ponto de água, os abrigos são fundamentais pra rastrear os visitantes, justificando a escolha como local para um totem. Facilidades adicionais, como alimentação elétrica, também influenciam a escolha.

- Segundo dia: Castelos do Açú-Pedra do Sino
- Duração aproximada: 7 horas

No segundo dia de caminhada é indispensável a presença de guia experiente. É frequente a ocorrência de montanhistas perdidos, principalmente em dias com muita neblina. É uma região com muitos riscos o que torna necessário aumentar a quantidade de totens para ampliar a cobertura e prover um melhor serviço.

A caminhada é quase toda nos campos de altitude, formação vegetal de pequeno porte que, no Estado do Rio de Janeiro, só ocorre na Serra dos Órgãos, em Itatiaia e no Parque Estadual do Desengano. É um tipo de vegetação que facilita a propagação por apresentar menos *clusters* de reflexão que causam o fenômeno de multipercorso.

– Oitavo totem - Morro do Marco

Seguindo na direção leste chega-se ao Morro do Marco após cerca de 30 minutos. O local é facilmente identificado pela pirâmide de pequenas pedras que dá nome ao morro. No Morro do Marco é possível pegar uma variante da trilha e conhecer os Portais de Hércules, uma espécie de mirante na beira das vertentes mais inclinadas da Serra dos Órgãos, com bela visão do vale da Morte.

Pontos de bifurcação também são pontos de grande interesse para um totem, pois facilitam a identificação da localização de visitantes perdidos.

– Nono totem - Portais de Hércules/Vale da Morte

O próprio nome do local já inspira a colocação de um totem. Essa localização permite atender também a visitantes que se percam no Vale, além da trilha em si.

– Décimo totem - Vale da Luva

Descendo o Morro do Marco, em cerca de 30 minutos chega-se ao Vale da Luva, local coberto pela interessante mata nebulosa, com grande abundância de plantas epífitas, entre as quais destacam-se orquídeas endêmicas da Serra dos Órgãos. O Vale é cortado por um pequeno riacho onde é possível se refrescar e encher os cantis. O local é uma alternativa de acampamento para aqueles que pretendam fazer a travessia com apenas um pernoite ou para roteiros mais longos do que três dias.

Por ser um ponto de água e de pernoite oferece ótimas possibilidades para rastrear visitante.

– Décimo primeiro totem - Morro da Luva

Em seguida inicia-se a subida do Morro da Luva. O cume é atingido em cerca de 30 minutos. Após a descida em superfície rochosa, onde a trilha não é bem marcada e o risco de se perder em dias de neblina é alto, chega-se à Cachoeirinha (mais 30 minutos), local com água abundante e ponto recomendado para descanso.

O topo do morro da luva é um lugar essencial para a colocação de um totem para iluminar a descida e cobrir uma região de alto risco.

– Décimo segundo totem - Cachoeirinha

Assim como outros pontos já identificados no percurso, é um local com água e descanso, sendo portanto bom para rastrear visitantes. Soma-se a esta característica o fato de ser logo após uma área de alto risco. A comparação dos seus dados com os do totem anterior pode ser muito útil na identificação de visitantes com problemas.

– Décimo terceiro totem - Elevador

A subida do Elevador, logo após a Cachoeirinha, é uma escada de ferro que exige equilíbrio para passar com mochilas cargueiras.

Por ser um trecho extremamente difícil de ser vencido, podendo causar acidentes, é mandatório a colocação de um totem no Elevador.

– Décimo quarto totem - Morro do Dinossauro

Na sequência chega-se, após cerca de 40 minutos, ao Morro do Dinossauro, um dos pontos mais altos do parque, de onde já é possível avistar a Pedra do Sino, o Vale das Antas e a Pedra do Garrafão.

Pontos dominantes são excelentes lugares para totem, possibilitando iluminar uma área grande.

– Décimo quinto totem - Nascentes do Rio Soberbo

A descida até o Vale das Antas leva cerca de 40 minutos. No vale estão outras nascentes do Rio Soberbo e o local tem água o ano inteiro. O camping é proibido no local em função da fragilidade do ambiente e das nascentes do rio Soberbo.

A colocação de um totem neste local é útil para encaminhar medições de volume de água. O rio soberbo é o que mais sofre a ocorrência de cabeça d'água no PARNASO, trazendo grande risco aos visitantes.

– Décimo sexto totem - Dorso da Baleia

Após mais uma subida íngreme chega-se ao Dorso da Baleia, em frente à vertente da Pedra do Sino. Do local é possível avistar a maior parede de escalada (*bigwall*) do Brasil, onde estão as vias Franco-Brasileira e Terra de Gigantes. A colocação de um totem neste ponto permite monitorar acidentes que ocorram na escalada e encaminhar com rapidez pedidos de socorro.

– Décimo sétimo totem - Cavalinho

Após a descida de uma gruta, inicia-se a subida do paredão que leva à Pedra do Sino. A subida é íngreme e a passagem conhecida como Cavalinho é o ponto mais perigoso da travessia, sendo obrigatório o uso de cordas. Por ser o ponto mais perigoso da travessia, além do uso de cordas, também é obrigatório a presença de um totem.

– Décimo oitavo totem - Subida ao cume da Pedra do Sino

Após o Cavalinho, o montanhista segue por uma estreita trilha que contorna a Pedra do Sino até encontrar a trilha de subida para o cume, ponto culminante da Serra dos Órgãos (2.263 m). Dependendo da hora de chegada neste ponto, pode-se optar pela subida ao cume ou descida para montar o acampamento ou se instalar no abrigo da Pedra do Sino (Abrigo 4). É proibido acampar no cume da Pedra do Sino.

Pontos de entroncamento são sempre pontos de interesse para a localização de um totem, pois permitem saber que o visitante passou por um ponto de bifurcação.

– Décimo nono totem - Abrigo 2

O abrigo, assim como o ponto de água é fundamental pra rastrear os visitantes.

– Vigésimo totem - Pedra do Sino

A subida até a Pedra do Sino à noite é altamente recomendável, principalmente em noites de tempo bom. A vista da cidade do Rio de Janeiro à noite é impressionante e vale o passeio.

É um ponto dominante, com chance de iluminar uma grande área e, portanto, de grande interesse para um totem.

• Terceiro dia: Pedra do Sino-Teresópolis

• Duração estimada: 4 horas

O percurso do terceiro dia inclui apenas a descida da Pedra do Sino até a Sede Teresópolis do PARNASO. São 11 km de descida relativamente suave com belas vistas do município de Teresópolis e do Parque Estadual dos Três Picos.

– Vigésimo primeiro totem - Ruínas do antigo Abrigo 3

Abaixo da cota de 2.000 m, a estrutura da vegetação começa a mudar. O campo de altitude é substituído por uma mata nebulosa, com grande quantidade de bromélias e orquídeas. A trilha sombreada pela mata passa pelas ruínas do antigo Abrigo 3, local de descanso com mirante.

Por ser um mirante e local de descanso este é um bom ponto para rastrear visitantes. O fato de ser um mirante também pode contribuir para aumentar a área iluminada. Voltamos a ter mais dificuldades com a propagação devido ao aumento do porte da vegetação. Entretanto, a relativa facilidade desta parte da travessia reduz um pouco a necessidade de monitoração.

– Vigésimo segundo totem - Acesso a outras trilhas

Uma alternativa para aqueles que desejam mais aventura é fazer outras trilhas com acesso a partir do Abrigo 4, como a trilha do Garrafão, antes de descer.

Como já foi falado anteriormente, pontos de entrada de trilha e de entroncamento são importantes pra rastrear visitantes.

– Vigésimo terceiro totem - Cachoeiras

Na descida passa-se por duas cachoeiras, com destaque para a Véu da Noiva de Teresópolis com cerca de 16 metros de queda.

Localizar o totem junto às cachoeiras. Além de ser ponto de interesse, que portanto facilita rastrear visitantes, totens próximos a cachoeiras permite difundir alerta de cabeça d'água.

– Vigésimo quarto - saída da trilha

A travessia termina próximo à Estrada da Barragem do Rio Beija Flor, na Sede Teresópolis do PARNASO, bairro do Soberbo.

Um total de vinte e quatro totens, sendo vinte e três distribuídos ao longo da travessia e mais um próximo aos Portais de Hércules, são propostos para atender às demandas de segurança física e monitoração da localização dos visitantes. Embora ainda seja um número significativo, é bem menor do que a quantidade de totens necessários para prover cobertura total estimados em duzentos totens na Seção 5.2.1. Os lapsos de cobertura são cobertos pela DTN formada pelos terminais móveis dos visitantes, permitindo encaminhar pedidos de socorro e dados de localização mesmo longe dos totens.

6.2 Simulação no NS-3

A aplicabilidade da proposta para a trilha Petrópolis-Teresópolis é verificada através de simulações realizadas com o auxílio do simulador de eventos discretos NS-3. Esta simulação foi realizada em conjunto com os doutorandos Thales T. de Almeida e Fernando Molano Ortiz.

O objetivo desta simulação é avaliar a capacidade de transferência de dados nos contatos entre visitantes e totens por meio da simulação computacional. Também são avaliados RSSI e PDR da rede simulada para caracterizar estes contatos. Foram simulados 23 totens que cobrem a trilha, distribuídos de acordo com o roteiro da travessia. O totem extra, adicionado para iluminar os Portais de Hércules, não foi simulado uma vez que está fora do traçado principal. Os contatos são ocasionados pela passagem de um transmissor móvel, que se comporta como um visitante, pela área de cobertura dos totens que compõem a trilha. A área de cobertura de cada totem é definida pelo modelo de propagação e pela potência irradiada.

O modelo de propagação é um parâmetro importante para descrever o comportamento do enlace de comunicação sem-fio na simulação. O Capítulo 4 é dedicado ao estudo da propagação dentro da floresta e dos modelos de propagação adequados ao ambiente. Para a geração dos valores de potência recebida, foi utilizado o método de Monte Carlo [131], considerando-se o modelo de propagação composto Nakagami/Gama, descrito pela Equação 4.6. Para cada distância de referência foram geradas 2.000 amostras independentes de possíveis valores de potência média do sinal, sorteadas para cálculo da potência recebida no NS-3 pelos totens.

A Tabela 6.1 mostra os parâmetros configurados no ambiente do NS-3 para representar o cenário de um nó móvel. A camada física do protocolo LoRa foi implementada através de adaptações da biblioteca LoRaWAN desenvolvida por Magrin *et al.* [132]. Os parâmetros da simulação refletem a realização dos experimentos práticos, conforme descrito na Seção 4.2.1, com o uso do mesmo nível de potência irradiada, fator de espalhamento, largura de banda e taxa de código. Foram considerados terminais móveis com as velocidades de um visitante médio e de um praticante bem treinado. As alturas das antenas também reproduzem as alturas usadas nos experimentos práticos.

Tabela 6.1: Parâmetros de simulação no NS-3.

Descrição	Valor
Comprimento da trilha	29 km
Número de receptores (totens)	23
Altura das antenas de recepção	2,0 m
Protocolo PHY	LoRa
Fator de espalhamento	SF12
Frequência	915 MHz
Largura de banda	500 kHz
Taxa de código	4/5
Velocidade do móvel	3 km/h (50 m/min) 6 km/h (100 m/min)
Altura da antena de transmissão	1,5 m
Potência de transmissão	14 dBm
Tamanho do pacote	47 bytes
Número de execuções	10 rodadas

Semelhante à Seção 4.3.3, ao viajar a 3 km/h (50 m/min), os terminais enviam e recebem mais pacotes do que a 6 km/h (100 m/min) pois o tempo de contato é maior. Como consequência, as medições mostram melhor a variação nos valores amostrados. Na Figura 6.4 pode-se observar a variação da potência no enlace, através do RSSI, para as duas velocidades de deslocamento. Para comparação, são mostrados os valores de RSSI para cada pacote recebido na simulação e no experimento prático, considerando o cenário de um nó móvel. As amostras coletadas nos experimentos, prático e simulado, discordam em relação ao padrão de comportamento. Essa discordância já era esperada devido às diferenças apresentadas na Seção 4.5 entre o histograma das medidas reais e a curva gerada pelo modelo de propagação. Ainda assim existem semelhanças importantes entre as duas curvas, principalmente para a velocidade mais baixa. O experimento mais lento – com mais amostras – mostrado na Figura 6.4(a), apresenta uma aproximação maior entre dados simulados e dados medidos do que o experimento mais rápido (Figura 6.4(b)), havendo correspondência aproximada entre os intervalos de contato e os valores máximos e mínimos de potência medida para os experimentos práticos e simulados.

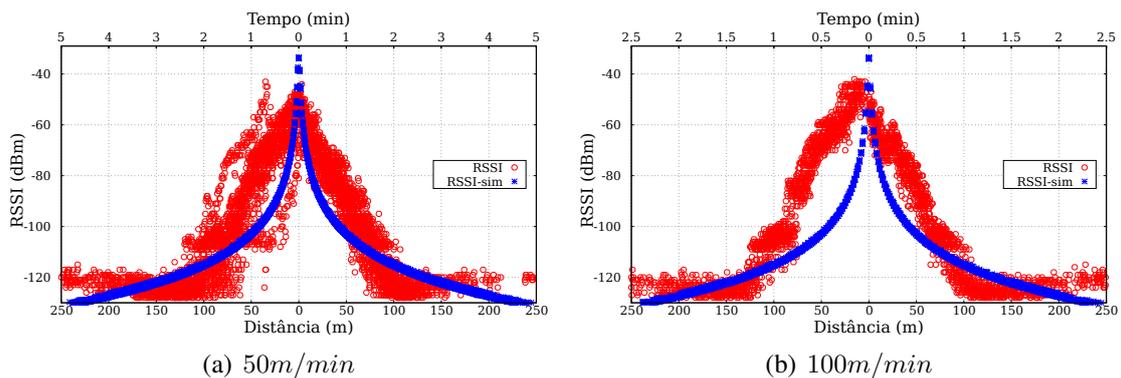


Figura 6.4: RSSI em função da distância e da velocidade – cenário com um nó móvel – simulado x prático.

Para este mesmo tipo de cenário, com um nó móvel e um totem fixo, as Figuras 6.5 e 6.6 mostram o RSSI simulado em função da distância entre transmissor móvel e receptores fixos do primeiro dia de trilha e para a trilha completa, considerando a velocidade de 3 km/h (50 m/min). Não foi possível representar no simulador a presença de obstáculos e variações de densidade e tipo de vegetação no entorno de cada totem. Assim, todos eles apresentam um comportamento semelhante, seja na área de cobertura, com diâmetro de aproximadamente 500 m, seja na faixa dinâmica de excursão do sinal. Entretanto, a aleatoriedade das amostras obtidas pelo Método Monte Carlo, que busca reproduzir a aleatoriedade encontrada nos experimentos práticos, ainda pode ser percebida na variação dos valores do RSSI com a distância em cada totem. Essa variação é da ordem de unidades de dB. Lembrando que a cada 3 dB tem-se a duplicação do sinal em escala linear, percebe-se que essas variações são relevantes, reproduzindo o comportamento observado

na prática.

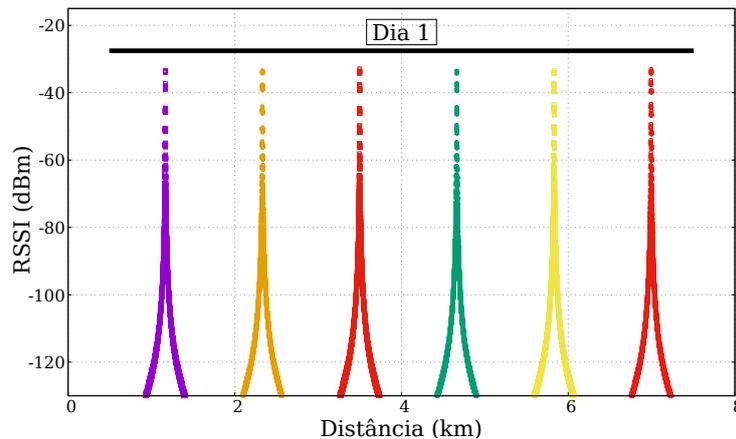


Figura 6.5: RSSI em função da distância entre transmissor móvel e receptores fixos para o primeiro dia de trilha – simulado.

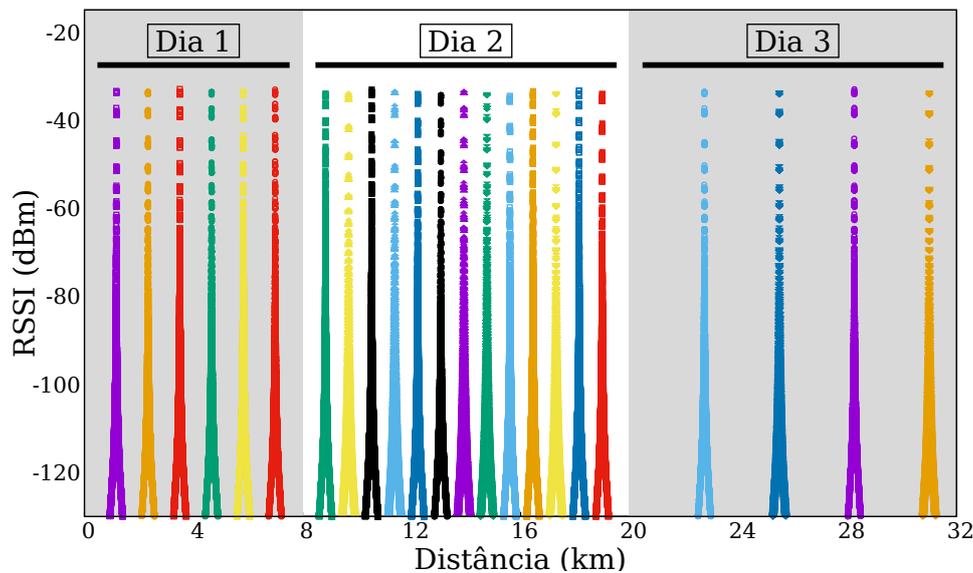


Figura 6.6: RSSI em função da distância entre transmissor móvel e receptores fixos para a trilha completa – simulado.

A Figura 6.7 apresenta a variação da PDR entre um terminal móvel e um totem, em que o aumento da entrega de pacotes reflete o aumento da intensidade do sinal. Os valores apresentados são as médias de todos os 23 totens presentes na rede simulada. Na simulação, não são avaliadas as ocorrências de erros na transmissão ou na decodificação dos pacotes, o que explica o valor mais alto da PDR dos experimentos simulados em relação à PDR dos experimentos práticos. Na transmissão real, os pacotes estão sujeitos à ocorrência de erros. A principal causa dos erros é fenômeno de multipercurso, em que as várias componentes refletidas podem produzir além de variações da envoltória do sinal, ruído e/ou interferência intersimbólica, pelo espalhamento temporal dos bits. Canais de faixa

estreita, como os usados nesse trabalho, sofrem menos estes efeitos, mas ainda podem ocorrer. No caso de múltiplos transmissores na mesma frequência, estes também podem ser considerados fontes de ruído.

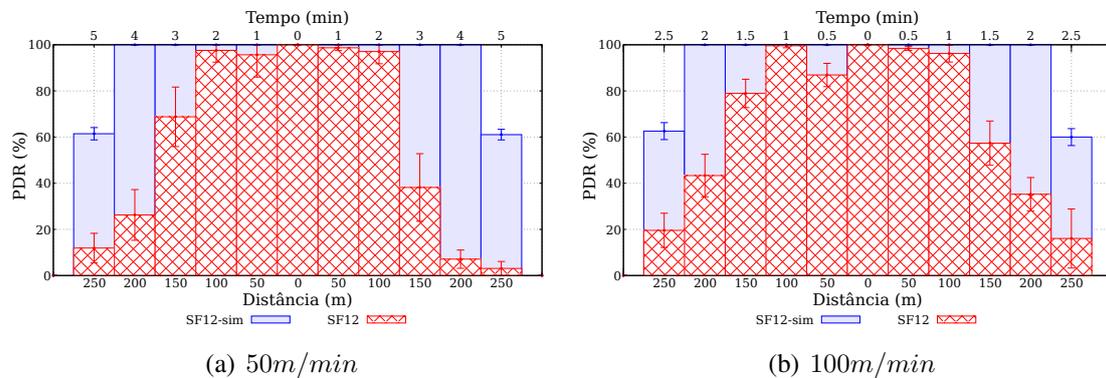


Figura 6.7: PDR em função da distância e da velocidade – cenário com um nó móvel – simulado x prático.

Na Figura 6.8 é avaliada a capacidade de transferência de dados da rede simulada através da carga de bytes efetivamente transmitida por um visitante, considerando o conjunto dos nós da rede. A carga diária máxima por visitante esperada é da ordem de 182 kB no pior caso. Entretanto esse requisito não é atendido usando o fator de espalhamento SF12, principalmente no trecho do percurso com menos totens.

Isso acontece porque a carga de dados gerada por visitante depende da quantidade de visitantes na trilha e dos registros de encontros ocorridos entre eles. Já a capacidade de transferência da rede é função da quantidade de totens na rede e da quantidade de pacotes que estes totens recebem. Entretanto a quantidade e o posicionamento dos totens é função dos riscos que cada local oferece ao visitante ou seu potencial para a auxiliar na localização de visitantes perdidos. Já a quantidade de pacotes varia com o tempo de contato, o tamanho dos pacotes e o fator de espalhamento usado.

Na Figura 6.8 podemos ver o crescimento da capacidade de transferência acumulada dia a dia, para as duas velocidades de deslocamento. A curva vermelha representa esse crescimento para um visitante mais lento, que se desloca a 3 km/h (50 m/min). Como o tempo de contato para esse visitante é maior, são enviados mais pacotes favorecendo a maior transferência de dados. Dia a dia podemos ver os seguintes valores:

- 1o dia: Aproximadamente $150kB$, abaixo da carga do pior caso de $182kB$.
- 2o dia. Aproximadamente $500kB - 150kB = 350kB$. Acima de $182kB$.
- 3o dia. Aproximadamente $600kB - 500kB = 100kB$. Abaixo de $182kB$.

A curva azul representa esse crescimento para um visitante mais rápido, que se desloca a 6 Km/h (100 m/min). Como o tempo de contato para esse visitante é menor, são enviados

menos pacotes levando a uma menor transferência de dados. Podemos ver a evolução valores ao longo dos dias:

- 1o dia: Aproximadamente 80 kB , abaixo da carga do pior caso de 182 kB .
- 2o dia. Aproximadamente $250 \text{ kB} - 80 \text{ kB} = 170 \text{ kB}$. Abaixo de 182 kB .
- 3o dia. Aproximadamente $300 \text{ kB} - 250 \text{ kB} = 50 \text{ kB}$. Abaixo de 182 kB .

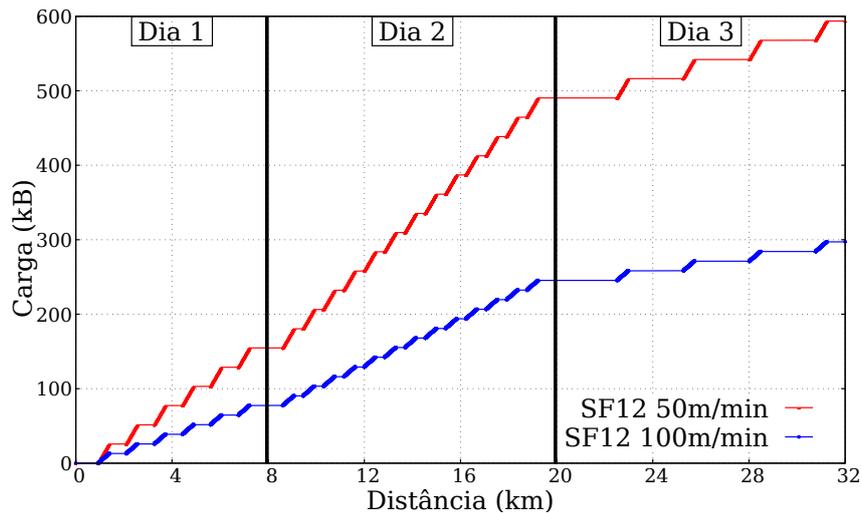


Figura 6.8: Carga acumulada oferecida à rede em função da distância e da velocidade com um nó móvel percorrendo toda a trilha.

Esse pior caso foi definido usando os dados de visitação da parte alta do PARNASO de 2018 de cerca de 6.000 visitantes por mês na alta temporada de montanha. Não existe um controle da visitação por trilha, então não há dados precisos, assim foi necessário fazer uma estimativa. Como a trilha da travessia é a mais visitada, foi considerado que metade dos 6.000 visitantes do parque se destinam a ela, chegando ao valor de 100 visitantes por dia. Essa estimativa está de acordo com a capacidade máxima dos abrigos de montanha que também é de 100 visitantes. Caso estes 100 visitantes caminhem sozinhos ao longo da trilha, sem a formação de grupos, seus contatos devem gerar 4.950 registros por dia, combinando-os 2 a 2. Considerando o tamanho de cada registro de 13 bytes, do *beacon* de terminal móvel de 10,5 B e das duas mensagens de aceite somadas de 13,25 B, temos 36,75 B de dados transmitidos. Assim chega-se à carga diária de aproximadamente 182 kB ($\approx 4.950 \times 36,75 \text{ B}$) por visitante no pior caso, com a não formação de grupos.

Normalmente, ao se fazer o dimensionamento de uma rede para prover um determinado serviço, existe um conhecimento prévio da demanda a ser atendida, ou seja, do tráfego gerado pelos assinantes. Esse conhecimento vem de um estudo mercadológico que contempla o perfil e a quantidade de assinantes numa área. No caso de redes móveis, inclui também o perfil de mobilidade dos assinantes. Assim, as redes são dimensionadas para atender a essa demanda com uma probabilidade de bloqueio e/ou de descarte de pacotes

dentro de limites aceitáveis, definidos por uma agência regulamentadora ou pelo mercado no caso de redes não reguladas. Entretanto a nossa rede proposta se comporta de maneira diferente das demais, pois permite o agrupamento dinâmico de visitantes feito de maneira automática e sem ingerência da rede. Então mesmo conhecendo seu perfil de geração de tráfego e de mobilidade não é possível determinar com precisão a demanda gerada. Assim, estamos fazendo um estudo do pior caso, da carga máxima gerada por um usuário individual. Porém, da mesma forma que em redes comerciais há a probabilidade de bloqueio de parte das tentativas de estabelecimento de comunicação ou de descarte de parte dos pacotes, aqui também não é previsto, por razões financeiras e de logística, atender à totalidade do pior caso. Entretanto são propostas formas de melhorar o atendimento da demanda gerada pela carga máxima de um usuário.

O uso de outros fatores de espalhamento para a transferência de registros, e o agrupamento de visitantes são formas previstas no sistema proposto para lidar com esta demanda, melhorando o desempenho da rede. Fatores de espalhamento mais baixos que o SF12 possuem maior taxa de transmissão e menor tempo ao ar, permitindo o envio de mais pacotes, aumentando a capacidade da rede. Como descrito na Seção 5.3, a escolha do SF para envio dos registros deve ser feita com base no RSSI e no SNR do *beacon* recebido e é parte do protocolo de acesso ao meio desenvolvido neste trabalho para a comunicação de sensores LoRa.

A formação de grupos, também descrita na Seção 5.3, permite reduzir a quantidade de registros trocados uma vez que apenas o líder transmite e recebe registros. Dessa forma, a carga de dados diária por visitante transmitida pela rede é reduzida. A ocorrência da formação de grupos é um fato esperado como corriqueiro, uma vez que a orientação do PARNASO é de que a travessia seja feita sempre em companhia de um guia capacitado e experiente. A formação automatizada do grupo, sem a necessidade de intervenção do visitante, também facilita a sua efetiva ocorrência. O impacto dos grupos na redução da carga na rede depende do seu tamanho, porém não há informações disponíveis, hoje, que permitam dimensionar o tamanho médio dos grupos. As informações sobre visitação disponibilizadas pela equipe do PARNASO são genéricas e se restringem à quantidade de visitantes na parte de alta montanha.

6.3 Considerações

O estudo de caso, feito através do levantamento de dados sobre a trilha da travessia Petrópolis x Teresópolis e da simulação usando o NS-3, demonstra a importância do uso da DTN para aumentar a conectividade ao longo da trilha, cobrindo as lacunas de sinal existentes entre os totens.

Também foi percebida a necessidade de utilizar o protocolo de acesso ao meio e o esquema de formação de grupos, descritos na Seção 5.3. Estes dois recursos são formas

de adaptar a demanda da aplicação às limitações da tecnologia de comunicação sem-fio escolhida para a aplicação de monitoração de localização do visitante. Estas e outras contribuições deste trabalho estão resumidas na conclusão final desta tese, apresentada no Capítulo 7.

Capítulo 7

Conclusão

O presente trabalho tratou do desenvolvimento de um projeto para oferecer aplicações de assistência ao visitante de sistemas florestais, melhorando a segurança física e tornando interativa a experiência de visitantes de unidades de conservação. O projeto consiste no desenvolvimento de uma proposta de infraestrutura de comunicação capaz de permitir a comunicação, mesmo em situações de conectividade intermitente.

Neste projeto, a comunicação dentro da floresta é usada para suportar um sistema de monitoramento de localização de visitantes. O sistema de monitoramento proposto compreende uma infraestrutura esparsa de pontos de acesso sem fio, chamados totens e terminais móveis vestíveis que são usados por visitantes, além de uma aplicação de localização e um protocolo que regula a troca de mensagens entre dispositivos.

Os totens podem anunciar suas coordenadas e fornecer comunicação de dados aos terminais, encaminhando seus dados para a nuvem. A comunicação entre o totem e a nuvem será feita por qualquer meio disponível: 2G, 3G, 4G, 5G, Wi-Fi, etc.. A especificação desta comunicação não está contemplada no projeto. No entanto, a infraestrutura composta por totens é esparsa devido à necessidade de reduzir custos e possíveis impactos ambientais. Assim, os totens geralmente não estarão em contato um com o outro e devem ser colocados em locais que permitam uma cobertura otimizada, considerando o sinal nas trilhas, a atenuação causada pela diferença de altura entre as antenas e os riscos de cada parte da trilha.

A comunicação de terminais móveis prevê a troca periódica de dados de localização com totens e entre si, permitindo rastrear o movimento dos visitantes. Considerando os dados levantados pelas medições do cenário móvel, nas Seções 4.3.3 e 4.3.4, o menor tempo médio de contato, que ocorre se os visitantes são caminhantes treinados, é de aproximadamente 2,5 minutos. Durante esse intervalo, os terminais devem descobrir a presença um do outro e trocar registros de informações de localização. Para isso, a cada minuto o terminal emite um *beacon* que permite o início da comunicação com outro em sua área de cobertura, aproximadamente um círculo com um diâmetro de 500 m para a tecnologia de LPWAN LoRa, configurada para SF 12. Esse período mantém o consumo de bateria baixo

e ainda permite pelo menos duas oportunidades de comunicação durante cada intervalo de contato. A oportunidade não deve ser única, pois a transmissão não é confiável e o *beacon* pode ser perdido.

Esta estrutura, que se pretende ser reduzida, e a comunicação dos terminais entre si servirão de base para troca de informação permitindo a interação digital com o ambiente, trazendo mais uma nova aplicação para os conceitos de LBS, IoT e DTN. Esta nova aplicação com suas características e ambiente peculiares possui desafios também no que toca às características das redes empregadas, sendo necessários estudos futuros de desempenho das aplicações com as restrições vislumbradas, segurança da comunicação e estudo da gerência da rede e da experiência do usuário.

7.1 Principais Contribuições

A principal contribuição é o desenvolvimento de uma metodologia para comunicação em ambientes florestais, que permita o uso de aplicações de assistência ao visitante deste tipo de sistema. O grande aumento na busca por atividades de ecoturismo e a importância cada vez maior de buscar educação e preservação ambiental levaram à percepção da necessidade de prover assistência ao visitante das unidades de conservação e são os motivadores deste trabalho.

A seguir são relacionadas as contribuições obtidas durante a realização deste:

- análise de diferentes tecnologias de comunicação em ambientes florestais;
- especificação de uma arquitetura de comunicação que torna factível a assistência aos visitantes de unidades de conservação;
- formulação do problema de ILP para posicionamento da infraestrutura fixa de comunicação, os totens, usando um método que permitiu reduzir o tempo de processamento da resolução;
- proposta de duas aplicações para assistência aos visitantes, com foco na aplicação básica para segurança física do visitante através da monitoração da sua localização;
- proposta de um protocolo para suportar a aplicação de monitoramento da localização de visitantes e resgate rápido, considerando também a possibilidade da formação de grupos;
- proposta de um protocolo leve para controle de acesso ao meio em uma rede de sensores LoRa, os terminais dos visitantes;
- e um estudo da camada física, isto é, radiocomunicação, na floresta tropical úmida.

A aplicação proposta além de monitorar a localização do visitante também adiciona uma solicitação de resgate ativa. Com o uso dessa opção o visitante não precisa aguardar até que a sua ausência nos registros de outros visitantes seja percebida após um longo período de tempo. Assim, o objetivo é aumentar a segurança das atividades de ecoturismo.

Os trabalhos derivados da realização desta tese foram publicados nos seguintes eventos e periódicos:

- Ferreira, A. E., Ortiz, F. M., Costa, L. H. M. K., Foubert, B., Amadou, I., and Mitton, N. - "A Study of the LoRa Signal Propagation in Forest, Urban, and Suburban Environments", in *Annals of Telecommunications*, vol. 75, no. 5, pp. 333-351, Springer, ISSN 1958-9395, DOI 10.1007/s12243-020-00789-w, 2020.
- Ortiz, F. M., Almeida, T. T., Ferreira, A. E., and Costa, L. H. M. K. - "Experimental vs. Simulation Analysis of LoRa for Vehicular Communications", in *Computer Communications*, vol. 160, pp. 299-310, Elsevier, ISSN 0140-3664, DOI 10.1016/j.comcom.2020.06.006, 2020.
- Ferreira, A. E., Ortiz, F. M., Almeida, T. T., Costa, L. H. M. K. - "A Visitor Assistance System Based on LoRa for Nature Forest Parks", in *Electronics*, vol. 9 (4), 696, MDPI, ISSN: 2079-9292, DOI 10.3390/electronics9040696, 2020
- Ferreira, A. E., Ortiz, F. M., and Costa, L. H. M. K. - "Caracterização de Disrupções na Faixa ISM de 900 MHz em Ambiente de Floresta", in XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT 2019, Petrópolis, RJ, Brazil, September 2019.
- Ferreira, A. E., Ortiz, F. M., and Costa, L. H. M. K. - "Avaliação de Tecnologias de Comunicação Sem-Fio para Monitoramento em Ambientes de Floresta", in XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC 2019, Gramado, RS, Brazil, May 2019.
- Ortiz, F. M., Almeida, T. T., Ferreira, A., E. and Costa, L. H. M. K. - "Caracterização de Desempenho de uma Rede LoRa em Ambientes Urbanos: Simulação vs. Prática", in III Workshop de Computação Urbana (CoUrb SBRC 2019), Gramado, RS, Brazil, May 2019. Best paper award.
- Queiroz, G. F. C., Ferreira, A. E., Ortiz, F. M., Couto, R. S. and Costa, L. H. M. K. - "Posicionamento de Pontos de Acesso Sem-fio para Segurança de Visitantes em Parques Florestais", in XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC 2018, Campos do Jordão, SP, Brazil, May 2018.

Os estudos e conceitos apresentados aqui também podem ser usados para atender a outras necessidades de comunicação em ambientes com vegetação densa, como aplicações agrícolas ou extrativistas.

7.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, é proposta a realização de novos experimentos para tecnologias como Bluetooth Low Energy e IEEE 802.11ah, mais adequadas para o uso no modo interativo da assistência ao visitante.

A modelagem da conectividade dos totens via rede em malha sem fio é mais uma frente de trabalho e estudo; para isso será feito um estudo das disrupções e seu impacto na comunicação também entre os totens. É necessário o desenvolvimento de um modelo de propagação que descreva melhor o ambiente de floresta tropical úmida.

Por fim, faz-se necessária a realização de mais simulações, levando em consideração as restrições da otimização, uso dos vários fatores de espalhamento do LoRa e demais configurações possíveis dos elementos da rede com a inclusão de terminais móveis adicionais.

A implementação física do caso estudado em um projeto piloto é uma grande aspiração, que, entretanto, depende de alocação de recursos que não estão disponíveis no momento. Apesar dessa realidade, alguns passos estão sendo dados na direção da realização do piloto, que são a implementação das aplicações, e o projeto do hardware do terminal transparente, ambos em trabalhos de conclusão de curso de graduação.

Adicionalmente, diversas outras linhas de estudo se abrem a partir deste trabalho, incluindo

- Estudo e comparação de mecanismos de eleição em grupos aplicado aos grupos de visitantes;
- Estudo e comparação de mecanismos de formação de grupos em redes *ad-hoc*, avaliando o consumo de energia, também aplicado aos grupos de visitantes;
- Estudo do consumo de energia comparando os fatores de espalhamento do LoRa;
- Verificação formal do protocolo proposto;
- Desenvolvimento de um modelo de propagação para o ambiente de floresta tropical úmida;
- Estudo da otimização de posicionamento de pontos de acesso em redes esparsas, aprofundando a abordagem inicial já feita;
- Estudo de desempenho da arquitetura proposta, considerando os fatores de espalhamento, *duty cycle*, *time on air*, máximo de símbolos e preâmbulo dos quadros na tecnologia LoRa;
- Estudo de segurança da arquitetura proposta.

7.3 Considerações Finais

A relevância econômica e social do ecoturismo, bem como a necessidade de preservação e educação ambiental fazem com que a realização deste trabalho seja muito gratificante. A trajetória, desde a ideia inicial, surgida de forma despretensiosa em uma conversa entre integrantes do CEFET Petrópolis e do PARNASO, até a finalização desta tese, traz à mente as possibilidades do que a pesquisa e o uso da tecnologia podem realizar para melhorar o bem estar do ser humano e seu relacionamento com o meio ambiente.

Referências Bibliográficas

- [1] CROTTI, R., MISRAHI, T. “The Travel & Tourism Competitiveness Report 2017. Paving the Way for a More Sustainable and Inclusive Future”. In: *World Economic Forum: Geneva, Switzerland*, 2017.
- [2] UNWTO, M. “Global Report on Adventure Tourism”, *AM Reports, Volume nine*, 2014.
- [3] HUDDART, D., STOTT, T. “What Is Adventure Tourism?” In: *Adventure Tourism*, Springer, pp. 1–9, 2020.
- [4] “ICMBio - Parque Nacional da Serra dos Órgãos - Hidrografia”. <http://www.icmbio.gov.br/parnaserradosorgaos/atributos-naturais/50-hidrografia.html>, . acessado em 05/12/2017.
- [5] “Secretaria de Estado do Ambiente - SEA - Monitoramento auxilia no combate a incêndios florestais”. <http://www.rj.gov.br/web/sea/exibeconteudo?article-id=4007635>. acessado em 25/01/2018.
- [6] “ICMBio - Parque Nacional da Serra dos Órgãos - Setor de Prevenção e Combate a Incêndios Florestais”. <http://www.icmbio.gov.br/parnaserradosorgaos/component/content/article/19-uncategorised/57-setor-de-prevencao-e-combate-a-incendios-florestais.html>, . acessado em 25/01/2018.
- [7] SON, B., HER, Y.-S., KIM, J.-G. “A design and implementation of forest-fires surveillance system based on wireless sensor networks for South Korea mountains”, *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, v. 6, n. 9, pp. 124–130, 2006.
- [8] AL-AMMAR, M. A., ALHADHRAMI, S., AL-SALMAN, A., et al. “Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms”. In: *2014 International Conference on Cyberworlds*, pp. 245–252, Oct 2014. doi: 10.1109/CW.2014.41.

- [9] MAINETTI, L., PATRONO, L., SERGI, I. “A survey on indoor positioning systems”. In: *2014 22nd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, pp. 111–120, Sept 2014. doi: 10.1109/SOFTCOM.2014.7039067.
- [10] ALLIANCE, L. “A technical overview of LoRa and LoRaWAN”, *White Paper, November, 2015*.
- [11] BAHARUDIN, A. M., YAN, W. “Long-range wireless sensor networks for geolocation tracking: Design and evaluation”. In: *Electronics Symposium (IES), 2016 International*, pp. 76–80. IEEE, 2016.
- [12] VO, Q. D., DE, P. “A Survey of Fingerprint-Based Outdoor Localization”, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 18, n. 1, pp. 491–506, Firstquarter 2016. ISSN: 1553-877X. doi: 10.1109/COMST.2015.2448632.
- [13] FIGUEIREDO, C. M. S., NAKAMURA, E. F., RIBAS, A. D., et al. “Assessing the communication performance of wireless sensor networks in rainforests”. In: *2009 2nd IFIP Wireless Days (WD)*, pp. 1–6, Dec 2009. doi: 10.1109/WD.2009.5449672.
- [14] CAVALCANTE, A. M. *Estratégias Computacionais Aplicadas em Técnicas de Traçado de Raios 3D para o Aumento da Eficiência na Caracterização de Canais de Propagação de Redes Sem Fio*. Tese de D.Sc., UFPA/ITEC/PPGEE, Campus Universitario do Guamá, Belém-Pará-Brasi, 2007.
- [15] WANG, H., FAPOJUWO, A. O. “A survey of enabling technologies of low power and long range machine-to-machine communications”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 19, n. 4, pp. 2621–2639, 2017.
- [16] MADAMORI, O., MAX-ONAKPOYA, E., GRANT, C., et al. “Using Delay Tolerant Networks as a Backbone for Low-Cost Smart Cities”. In: *2019 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, pp. 468–471, 2019. doi: 10.1109/SMARTCOMP.2019.00090.
- [17] KHAJENASIRI, I., ESTEBSARI, A., VERHELST, M., et al. “A review on Internet of Things solutions for intelligent energy control in buildings for smart city applications”, *Energy Procedia*, v. 111, pp. 770–779, 2017.
- [18] KULATUNGA, C., SHALLOO, L., DONNELLY, W., et al. “Opportunistic Wireless Networking for Smart Dairy Farming”, *IT Professional*, v. 19, n. 2, pp. 16–23, 2017. doi: 10.1109/MITP.2017.28.

- [19] SOBIN, C. “A survey on architecture, protocols and challenges in iot”, *Wireless Personal Communications*, v. 112, n. 3, pp. 1383–1429, 2020.
- [20] HUI, P., CHAINTREAU, A., GASS, R., et al. “Pocket switched networking: Challenges, feasibility and implementation issues”. In: *Workshop on Autonomic Communication*, pp. 1–12. Springer, 2005.
- [21] HUANG, J.-H., AMJAD, S., MISHRA, S. “Cenwits: a sensor-based loosely coupled search and rescue system using witnesses”. In: *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 180–191. ACM, 2005.
- [22] TAHAT, A., KADDOUM, G., YOUSEFI, S., et al. “A look at the recent wireless positioning techniques with a focus on algorithms for moving receivers”, *IEEE Access*, v. 4, pp. 6652–6680, 2016.
- [23] CARBONÉS FARGAS, B. *IoT and tracking capabilities in LPWANs*. Tese de Mestrado, Technical University of Denmark, 2017.
- [24] HUNKELER, U., TRUONG, H. L., STANFORD-CLARK, A. “MQTT-S—A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks”. In: *2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE’08)*, pp. 791–798. IEEE, 2008.
- [25] LIMA, M. M., OLIVEIRA, H. A. B. F. D., NAKAMURA, E. F., et al. “Agregação de Dados com Desvio de Buracos para Redes de Sensores Sem Fio com Sinks de Alto Alcance”. In: *Anais do XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos – SBRC 2016*, pp. 614–629. SBRC, 2016.
- [26] JIMENEZ, A. R., SECO, F., PRIETO, C., et al. “A comparison of pedestrian dead-reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU”. In: *IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP)*, pp. 37–42. IEEE, ago. 2009.
- [27] ZHU, C., ZHENG, C., SHU, L., et al. “A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks”, *Journal of Network and Computer Applications*, v. 35, n. 2, pp. 619–632, 2012.
- [28] HUANG, C.-F., TSENG, Y.-C. “The Coverage Problem in a Wireless Sensor Network”, *Mob. Netw. Appl.*, v. 10, n. 4, pp. 519–528, ago. 2005. ISSN: 1383-469X. Disponível em: <<http://dl-acm-org.ez29.capes.proxy.ufrj.br/citation.cfm?id=1160162.1160175>>.

- [29] VAN LE, D., OH, H., YOON, S. “Environment learning-based coverage maximization with connectivity constraints in mobile sensor networks”, *IEEE Sensors Journal*, v. 16, n. 10, pp. 3958–3971, 2016.
- [30] CRUZ, P., SILVA, F. F., PACHECO, R. G., et al. “SensingBus: um Sistema de Sensoriamento Baseado em Ônibus Urbanos”. In: *XXXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC'2017*, pp. 473–486, Belém, PA, maio 2017.
- [31] CRUZ, P., COUTO, R. S., COSTA, L. H. M. K. “Um Algoritmo de Posicionamento de Pontos de Coleta para uma Rede de Sensores Baseada em Ônibus Urbanos”. In: *XXXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC'2017*, pp. 473–486, Belém, PA, maio 2017.
- [32] JIANG, L., HUANG, J.-H., KAMTHE, A., et al. “SenSearch: GPS and witness assisted tracking for delay tolerant sensor networks”. In: *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless*, pp. 255–269. Springer, 2009.
- [33] HUANG, Y.-T., CHEN, Y.-C., HUANG, J.-H., et al. “YushanNet: A delay-tolerant wireless sensor network for hiker tracking in Yushan national park”. In: *Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware, 2009. MDM'09. Tenth International Conference on*, pp. 379–380. IEEE, 2009.
- [34] BURGHARDT, D., EDUARDES, A., WEIBEL, R. “WebPark–Entwicklung eines mobilen Informationssystems für Erholungs-und Naturschutzgebiete”, *Kartographische Nachrichten*, v. 53, n. 2, pp. 58–64, 2003.
- [35] GONÇALVES, A. “Projecto Webpark-Infomação Geográfica Relevante para Visitantes de Áreas Protegidas.” 2006.
- [36] KRUG, K., MOUNTAIN, D., PHAN, D. “Location-based services for mobile users in protected areas”, *GeoInformatics*, v. 6, n. 2, pp. 26–29, 2003.
- [37] LAWSON, S. R., MANNING, R. E., VALLIERE, W. A., et al. “Proactive monitoring and adaptive management of social carrying capacity in Arches National Park: an application of computer simulation modeling”, *Journal of Environmental Management*, v. 68, n. 3, pp. 305–313, 2003.
- [38] DOS SANTOS, A. D. J., DE LIMA BRAGA, M., VELLOSO, P. B., et al. “Análise da Capacidade de uma Rede Tolerante a Atrasos e Desconexões na Bacia Hidrográfica Amazonense”, .

- [39] SANTOS, A. D. J. D. *Caracterização de Redes Tolerantes Atrasos e Desconexões na Bacia Hidrográfica Amazônica*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.
- [40] DE M. CAMPOS, M. M., DE OLIVEIRA, W. V., DE SOUSA JR., V. A., et al. “Medição de baixo custo para caracterização de canal 5G mMTC no cenário Dual-stripe”. In: *XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*, pp. 116–120, 2018.
- [41] RAO, T. R., BALACHANDER, D., KIRAN, A. N., et al. “RF propagation measurements in forest & plantation environments for Wireless Sensor Networks”. In: *International Conference on Recent Trends in Information Technology*, pp. 308–313. IEEE, 2012.
- [42] ITU-R. *P.1546-5 Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz*. Relatório técnico, International Telecommunication Union, Geneva, 2013.
- [43] ITU-R. *P.1812-4 A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands*. Relatório técnico, International Telecommunication Union, Geneva, 2015.
- [44] ITU-R. *P.1406-2 Propagation Effects Relating to Terrestrial Land Mobile and Broadcasting services in the VHF and UHF Bands*. Relatório técnico, International Telecommunication Union, Geneva, 2015.
- [45] ITU-R. *P.1411-9 Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz*. Relatório técnico, International Telecommunication Union, Geneva, 2015.
- [46] WEISSBERGER, M. A. *An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by trees*. Relatório técnico, ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY ANALYSIS CENTER ANNAPOLIS MD, 1982.
- [47] HALL, M. “COST project 235 activities on radiowave propagation effects on next-generation fixed-service terrestrial telecommunication systems”. In: *1993 Eighth International Conference on Antennas and Propagation*, pp. 655–659. IET, 1993.
- [48] MESTRE, P., RIBEIRO, J., SERODIO, C., et al. “Propagation of IEEE802.15.4 in Vegetation”. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011*, v. 2, pp. 1–6, 2011.

- [49] WEISSBERGER, M., MEIDENBAUER, R., RIGGINS, H., et al. *Radio wave propagation: A handbook of practical techniques for computing basic transmission loss and field strength*. Relatório técnico, ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY ANALYSIS CENTER ANNAPOLIS MD, 1982.
- [50] ABDELAAL, A. M., OTHERS. *Modeling of Signal Fading Phenomena in Code Division Multiple Access System in Sudan*. Tese de Doutorado, Sudan University of Science and Technology, 2011.
- [51] JOAQUIM, A., AZEVEDO, F. E. S. S. “An empirical propagation model for forest environments at tree trunk level”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 56, n. 6, pp. 2357–2367, 2011.
- [52] STOYANOVA, T., KERASIOTIS, F., PRAYATI, A., et al. “A practical RF propagation model for wireless network sensors”. In: *Third International Conference on Sensor Technologies and Applications*, pp. 194–199. IEEE, 2009.
- [53] ITU-R. *P.833-9 Attenuation in vegetation*. Relatório técnico, International Telecommunication Union, Geneva, 2012.
- [54] SIEKKINEN, M., HIIENKARI, M., NURMINEN, J. K., et al. “How low energy is bluetooth low energy? comparative measurements with zigbee/802.15.4”. In: *Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2012 IEEE*, pp. 232–237. IEEE, 2012.
- [55] PENDÃO, C. G., MOREIRA, A. C., RODRIGUES, H. “Energy consumption in personal mobile devices sensing applications”. In: *Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2014 7th IFIP*, pp. 1–8. IEEE, 2014.
- [56] CHANG, K.-H. “Bluetooth: a viable solution for IoT?[Industry Perspectives]”, *IEEE Wireless Communications*, v. 21, n. 6, pp. 6–7, 2014.
- [57] BOUALOUACHE, A. E., NOUALI, O., MOUSSAOUI, S., et al. “A BLE-based data collection system for IoT”. In: *New Technologies of Information and Communication (NTIC), 2015 First International Conference on*, pp. 1–5. IEEE, 2015.
- [58] FRANK, R., BRONZI, W., CASTIGNANI, G., et al. “Bluetooth low energy: An alternative technology for VANET applications”. In: *Wireless on-Demand Network Systems and Services (WONS), 2014 11th Annual Conference On*, pp. 104–107. IEEE, 2014.
- [59] TABISH, R., MNAOUER, A. B., TOUATI, F., et al. “A comparative analysis of BLE and 6LoWPAN for U-HealthCare applications”. In: *GCC Conference and Exhibition (GCC), 2013 7th IEEE*, pp. 286–291. IEEE, 2013.

- [60] JOH, H., YANG, I., RYOO, I. “The internet of everything based on energy efficient P2P transmission technology with Bluetooth low energy”, *Peer-to-Peer Networking and Applications*, v. 9, n. 3, pp. 520–528, 2016.
- [61] CHO, K., PARK, G., CHO, W., et al. “Performance analysis of device discovery of Bluetooth Low Energy (BLE) networks”, *Computer Communications*, v. 81, pp. 72–85, 2016.
- [62] DARROUDI, S. M., GOMEZ, C. “Bluetooth Low Energy Mesh Networks: A Survey”, *Sensors*, v. 17, n. 7, pp. 1467, 2017.
- [63] BLUETOOTH, S. “Specification of the Bluetooth System-Covered Core Package version: 5.0”. 2016.
- [64] KHOROV, E., LYAKHOV, A., KROTOV, A., et al. “A survey on IEEE 802.11 ah: An enabling networking technology for smart cities”, *Computer Communications*, v. 58, pp. 53–69, 2015.
- [65] SEMTECH CORPORATION. “LoRa™ Modulation Basics AN1200.22”. <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>, 2015.
- [66] RAZA, U., KULKARNI, P., SOORIYABANDARA, M. “Low Power Wide Area Networks: An Overview”, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 19, n. 2, pp. 855–873, Secondquarter 2017. ISSN: 1553-877X. doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [67] TAMIR, T. “On radio-wave propagation in forest environments”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 15, n. 6, pp. 806–817, 1967.
- [68] OLIVEIRA, C. T., MOREIRA, M. D. D., RUBINSTEIN, M. G., et al. “Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões”. In: *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, Belém, PA, maio 2017.
- [69] CERF, V., BURLEIGH, S., HOOKE, A., et al. *Delay-tolerant networking architecture*. Relatório técnico, 2007.
- [70] RAMADAS, M., BURLEIGH, S., OTHERS. “Licklider transmission protocol specification”, 2008.
- [71] FARRELL, S., CAHILL, V., GERAGHTY, D., et al. “When TCP breaks: Delay- and disruption-tolerant networking”, *IEEE Internet Computing*, v. 10, n. 4, pp. 72–78, 2006.
- [72] ZANELLA, A., BUI, N., CASTELLANI, A., et al. “Internet of things for smart cities”, *IEEE Internet of Things journal*, v. 1, n. 1, pp. 22–32, 2014.

- [73] ISLAM, S. R., KWAK, D., KABIR, M. H., et al. “The internet of things for health care: a comprehensive survey”, *IEEE Access*, v. 3, pp. 678–708, 2015.
- [74] ZHU, C., LEUNG, V. C., SHU, L., et al. “Green internet of things for smart world”, *IEEE Access*, v. 3, pp. 2151–2162, 2015.
- [75] DA XU, L., HE, W., LI, S. “Internet of things in industries: A survey”, *IEEE Transactions on industrial informatics*, v. 10, n. 4, pp. 2233–2243, 2014.
- [76] YIM, J., KIM, S., KIM, N.-K., et al. “IPv6 based real-time acoustic data streaming service over Bluetooth Low Energy”. In: *Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM), 2015 IEEE Pacific Rim Conference on*, pp. 269–273. IEEE, 2015.
- [77] KIM, N.-K., KIM, S., KO, J., et al. “Poster: Packet Aggregation Scheme for 6Lo Networks in IoT Environments”. In: *Proceedings of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services Companion*, pp. 45–45. ACM, 2016.
- [78] GOMEZ, C., PARADELLS, J., BORMANN, C., et al. “From 6LoWPAN to 6Lo: Expanding the Universe of IPv6-Supported Technologies for the Internet of Things”, *IEEE Communications Magazine*, v. 55, n. 12, pp. 148–155, 2017.
- [79] NIEMINEN, J., SAVOLAINEN, T., ISOMAKI, M., et al. *Ipv6 over bluetooth (r) low energy*. Relatório técnico, 2015.
- [80] SALMAN, T. “Internet of Things Protocols and Standards”, 2015.
- [81] AUGUSTIN, A., YI, J., CLAUSEN, T., et al. “A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of things”, *Sensors*, v. 16, n. 9, pp. 1466, 2016.
- [82] ORTIZ, F. M., FERREIRA, A. E., COSTA, L. H. M. K. “Caracterização de Desempenho de uma Rede LoRa: Simulação vs. Prática”. In: *Anais do III Workshop de Computação Urbana*, pp. 170–183, 2019.
- [83] GOURSAUD, C., GORCE, J.-M. “Dedicated networks for IoT : PHY / MAC state of the art and challenges”, *EAI endorsed transactions on Internet of Things*, out. 2015. doi: 10.4108/eai.26-10-2015.150597.
- [84] BOR, M., VIDLER, J., ROEDIG, U. “LoRa for the Internet of Things”. In: *International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN)*, pp. 361–366, 2016.

- [85] WIXTED, A. J., KINNAIRD, P., LARIJANI, H., et al. “Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks”. In: *SENSORS, 2016 IEEE*, pp. 1–3. IEEE, 2016.
- [86] BOR, M., VIDLER, J., ROEDIG, U. “LoRa for the Internet of Things”. In: *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks, EWSN '16*, pp. 361–366, USA, 2016. Junction Publishing. ISBN: 978-0-9949886-0-7.
- [87] MARAIS, J. M., MALEKIAN, R., ABU-MAHFOUZ, A. M. “LoRa and LoRaWAN testbeds: A review”. In: *AFRICON, 2017 IEEE*, pp. 1496–1501. IEEE, 2017.
- [88] VAN DE VELDE, B. “LoRa forwarder”. <https://github.com/texus/LoRaWAN-forwarder>, 2017.
- [89] LIAO, C.-H., ZHU, G., KUWABARA, D., et al. “Multi-Hop LoRa Networks Enabled by Concurrent Transmission”, *IEEE Access*, v. 5, pp. 21430–21446, 2017.
- [90] VASSIS, D., KORMENTZAS, G., ROUSKAS, A., et al. “The IEEE 802.11g standard for high data rate WLANs”, *IEEE Network*, v. 19, n. 3, pp. 21–26, 2005.
- [91] SPECIFICATION, Z. “ZigBee Alliance Std., 2005”. 2005.
- [92] WOOLLEY, M. *TBluetooth 5 – Go Faster. Go Further*. In: Report, Bluetooth SIG, Bluetooth 5 Core Specification, 2016.
- [93] COLLOTTA, M., PAU, G., TALTY, T., et al. “Bluetooth 5: a concrete step forward towards the IoT”, *arXiv preprint arXiv:1711.00257*, 2017.
- [94] LOUREIRO, A. A. F., NOGUEIRA, J. M. S., RUIZ, L. B., et al. “Redes de sensores sem fio”. In: *Minicursos de XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'2003)*, pp. 179–226, 2003.
- [95] DE QUEIROZ, G. F. C., FERREIRA, A. E., ORTIZ, F. M., et al. “Posicionamento de Pontos de Acesso Sem-fio para Segurança de Visitantes em Parques Florestais”. In: *Aceito em XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores SBRC'2018*, 2018.
- [96] FERREIRA, A. E., ORTIZ, F. M., COSTA, L. H. M. K. “Avaliação de Tecnologias de Comunicação Sem-Fio para Monitoramento em Ambientes de Floresta”. In: *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pp. 116–129, 2019.

- [97] MENG, Y. S., LEE, Y. H., NG, B. C. “Study of propagation loss prediction in forest environment”, *Progress In Electromagnetics Research*, v. 17, pp. 117–133, 2009.
- [98] ABREU, K., COUTINHO, L. “Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação com ênfase em índice de vegetação e métricas da paisagem”, *Vértices. Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro*, v. 16, n. 1, pp. 173–198, 2014.
- [99] ALVES, G. C. G. “Modelagem da propagação radiomóvel no ambiente Cerrado nas faixas denominadas VHF/UHF”, 2015.
- [100] FEMERJ. *Metodologia de Classificação de Trilhas*. In: Report FEMERJ: Nº STE-2015/01, Federação de Esportes de Montanha do Estado do Rio de Janeiro - FEMERJ, 2015.
- [101] AG, U. H. “NEO-6: U-blox 6 GPS Modules Data Sheet”. [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf), 2011. Accessed on Dec. 2019.
- [102] ITU-R. *P.1057-5 Probability distributions relevant to radiowave propagation modelling*. Relatório técnico, International Telecommunication Union, Geneva, 2017.
- [103] YACOUB, M. D. *Foundations of mobile radio engineering*. Abingdon, Inglaterra, Reino Unido, Routledge, 2019.
- [104] DUBROVNIK, C. X. P. A. *VOLUME V: Propagation in Non-Ionized Media. REPORT 236-6 Influence of Terrain Irregularities and Vegetation Tropospheric Propagation*. Relatório técnico, International Telecommunication Union, Geneva, 1986.
- [105] DUBROVNIK, C. X. P. A. *VOLUME V: Propagation in Non-Ionized Media. REPORT 239-6 Propagation Statistics Required for Broadcasting Services Using the Frequency Range 30 to 1000 MHz*. Relatório técnico, International Telecommunication Union, Geneva, 1986.
- [106] DUBROVNIK, C. X. P. A. *VOLUME V: Propagation in Non-Ionized Media. REPORT 567-3 Methods and Statistics for Estimating Field-strength Values in the Land Mobile Services Using the Frequency Range 30 MHz to 1 GHz*. Relatório técnico, International Telecommunication Union, Geneva, 1986.

- [107] SEKER, S., SCHNEIDER, A. “Experimental characterisation of UHF radiowave propagation through forests”. In: *IEE Proceedings H-Microwaves, Antennas and Propagation*, v. 140, pp. 329–335. IET, 1993.
- [108] KOVÁCS, I. Z., EGGERS, P. C., OLESEN, K. “Radio channel characterisation for forest environments in the VHF and UHF frequency bands”. In: *Gateway to 21st Century Communications Village. VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference (Cat. No. 99CH36324)*, v. 3, pp. 1387–1391. IEEE, 1999.
- [109] BRETAS JÚNIOR, P. C. B., PIRETTI, S. P. “Modelagem estatística de canais sem fio em desvanecimento composto nas faixas de 700 MHz e 2500 MHz”, 2012.
- [110] NOGA, K., PALCZYŃSKA, B. “Overview of fading channel modeling”, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, v. 56, n. 4, pp. 339–344, 2010.
- [111] LAOURINE, A., ALOUINI, M.-S., AFFES, S., et al. “On the performance analysis of composite multipath/shadowing channels using the G-distribution”, *IEEE Transactions on Communications*, v. 57, n. 4, pp. 1162–1170, 2009.
- [112] FRAIDENRAICH, G., YACOUB, M. D. “The α - η - μ and α - κ - μ fading distributions”. In: *2006 IEEE Ninth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, pp. 16–20. IEEE, 2006.
- [113] ABDI, A., KAVEH, M. “On the utility of gamma PDF in modeling shadow fading (slow fading)”. In: *1999 IEEE 49th Vehicular Technology Conference (Cat. No. 99CH36363)*, v. 3, pp. 2308–2312. IEEE, 1999.
- [114] JOSHI, A., VISHNUKANTH, I. N., SAMDARIA, N., et al. “GPS-less animal tracking system”. In: *Wireless Communication and Sensor Networks, 2008. WCSN 2008. Fourth International Conference on*, pp. 120–125. IEEE, 2008.
- [115] DRAGINO INC. “LoRa Shield Manual”. http://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora_Shield, 2018. Acessado em dezembro/2018.
- [116] AI-THINKER INC. “ESP-01/07/12 Series Modules User’s Manual Version 1.1”. https://wiki.ai-thinker.com/_media/esp8266/esp8266_series_modules_user_manual_v1.1.pdf, 2017. Acessado em dezembro/2018.
- [117] DIGI INTERNATIONAL INC. “Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol”. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>, 2009. Accessed on Dec. 2019.

- [118] AZIMI, I., RAHMANI, A. M., LILJEBERG, P., et al. “Internet of things for remote elderly monitoring: a study from user-centered perspective”, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, v. 8, n. 2, pp. 273–289, Apr 2017. ISSN: 1868-5145. doi: 10.1007/s12652-016-0387-y. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12652-016-0387-y>>.
- [119] MACHADO, G. V. L. *Disseminação de mensagens de emergência em vias com baixo fluxo veicular utilizando redes IEEE 802.11P*. M. Sc. dissertation, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.
- [120] “ICMBio - Parque Nacional da Serra dos Órgãos - Caminhos da Serra do Mar”. <http://www.icmbio.gov.br/parnaserradosorgaos/destaques/167-caminhos-da-serra-do-mar.html>, . acessado em 28/02/2020.
- [121] “SISS-Geo SISTEMA DE INFORMAÇÃO”. <https://www.biodiversidade.ciiss.fiocruz.br/apresenta%C3%A7%C3%A3o-0>. acessado em 05/02/2020.
- [122] CHAME, M., BARBOSA, H. J., GADELHA, L., et al. “Sistema de Informação em Saúde Silvestre - SISS-GEO”, *Grandes Desafios da Computação no Brasil - Relatos do 3º seminário*, pp. 72–87, 2014.
- [123] SCOTT, K. L., BURLEIGH, S. “Bundle protocol specification”, 2007.
- [124] DIAS, M. H., ALEM, R. A., SANTOS, J. C. “Análise Crítica do Modelo de Tamir para Predição de Alcance de Rádio-Enlaces em Florestas”. In: *9th International Information and Telecommunication Technologies Symposium, Rio de Janeiro–Brasil*. IEEE, 2010.
- [125] STUTZMAN, W. L., THIELE, G. A. *Antenna theory and design*. 3rd ed. Hoboken, Nova Jérсия, USA, John Wiley & Sons, 2012.
- [126] TANNENBAUM, A. S. *Computer networks*. Londres, Reino Unido, Pearson Education, 2002.
- [127] ARAÚJO, S., PEDROZA, A., MESQUITA, A. “Uma metodologia de projeto de protocolos de comunicação baseada em técnicas evolutivas”, *20 o Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBT'03)*, 2003.
- [128] RILEY, G. F., HENDERSON, T. R. “The ns-3 Network Simulator”. In: *Modeling and Tools for Network Simulation*, pp. 15–34, Berlin, Heidelberg, Springer, 2010.
- [129] HENDERSON, T. R., LACAGE, M., RILEY, G. F., et al. “Network simulations with the NS-3 simulator”. In: *SIGCOMM Demo*, p. 527, 2008.

- [130] “ICMBio - Parque Nacional da Serra dos Órgãos - Guia do Visitante”. <http://www.icmbio.gov.br/parnaserradosorgaos/guia-do-visitante.html#>, . acessado em 05/12/2017.
- [131] HAMMERSLEY, J. *Monte carlo methods*. Londres, Reino Unido, Berlim, Alemanha, 2013.
- [132] MAGRIN, D., CENTENARO, M., VANGELISTA, L. “Performance evaluation of LoRa networks in a smart city scenario”. In: *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–7, May 2017. doi: 10.1109/ICC.2017.7996384.