

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

THIAGO DE ALMEIDA CORREIA

**RSSF PARA DETECÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS EM
TEMPO REAL**

**CAMPINAS
2017**

THIAGO DE ALMEIDA CORREIA

**RSSF PARA DETECÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS EM
TEMPO REAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações. Área de Concentração: Gerência de Redes e Serviços

Orientador: Profa. Dra.Indayara Bertoldi Martins
Co-Orientador: Prof. Dr.Omar Carvalho Branquinho

Ficha Catalográfica Elaborada por Marluce Barbosa
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI – PUC-Campinas

t621.3851 Correia, Thiago de Almeida.
C824r RSSF para detecção de incêndios florestais em tempo real / Thiago de Almeida Correia. - Campinas: PUC-Campinas, 2017.
94f.

Orientadora: Indayara Bertoldi Martins.

Coorientador: Omar Carvalho Branquinho.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Incêndios florestais. 3. Proteção ambiental. 4. Detecção de sinais. 5. Planejamento estratégico. I. Martins, Indayara Bertoldi. II. Branquinho, Omar Carvalho. III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

22.ed. CDD – t621.3851

THIAGO DE ALMEIDA CORREIA

**RSSF PARA DETECÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS
EM TEMPO REAL**

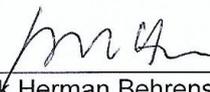
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica.
Orientador: Profa. Dra. Indayara Bertoldi Martins

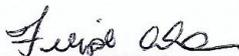
Dissertação defendida e aprovada em 15 de dezembro de 2017 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Indayara Bertoldi Martins
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Frank Herman Behrens
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Felipe Domingos da Cunha
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Dedico este trabalho a minha família, meu bem maior, que foi o meu alicerce. E aos meus pais pela educação e ensinamentos, além de mostrar o quanto é importante lutar pelos nossos objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade dada a minha pessoa para realização de um dos meus sonhos, pois assim como todo projeto existem momentos difíceis e sem fé certamente eu não teria alcançado esse objetivo;

A minha família, filha que apelidou os sensores de meus amiguinhos, esposa pela compreensão. Minha mãe sempre me ajudando e com suas orações passava mais tranquilidade. Ao meu pai que sempre esteve presente e ajudou muito durante meus experimentos. Minha irmã pelas orações e incentivos;

A Dra. Indayara Bertoldi Martins, minha orientadora que acreditou que eu seria capaz de realizar o desenvolvimento desse trabalho, pela sua atenção, infinita ajuda no trabalho, paciência, amizade e incentivo para enfrentar desafios ainda maiores;

Aos professores Dr(a)s. Omar Carvalho Branquinho, Eric Alberto de Mello Fagotto, Lia Toledo Moreira Mota, Marina Lavorato de Oliveira e David Bianchini, pelas sugestões e compartilhamento de seus conhecimentos;

Ao Dr. Frank Herman Behrens pela sua postura profissional, atenção, colaboração ao longo do meu trabalho e sempre motivando;

A PUC Campinas, pela disponibilização da bolsa e material para o desenvolvimento do projeto;

Aos meus colegas do curso Marcos Aurélio Fabrício, José Ricardo Alves e Francisco Ariza Neto que durante o mestrado contribuiu com conhecimento e principalmente sua amizade. Cada colega deu sua contribuição e todas sem dúvida foram essenciais para o aprimoramento deste trabalho;

Ao Mateus Leandro Paulino pela sabedoria, generosidade, colaboração e explicações sobre temas que eu não tinha domínio, além de dicas fundamentais para este projeto;

Ao meu amigo M.e Fábio Gomes Rocha, pelos seus ensinamentos e contribuição com novas ideias e sempre que precisei também estava ao meu lado para me ajudar;

Ao meu amigo Dr. Bruno da Silva Rodrigues por muitas vezes ter dedicado seu tempo para contribuir com dicas valiosas e explicações acerca do desenvolvimento deste projeto. Ao longo de todo período do meu trabalho esteve ao meu lado sempre disposto a ajudar e pessoas assim não apenas passa pela nossa vida, mas ficam presentes;

Ao meu amigo M.e Rodolfo da Silva Avelino por ter me incentivado a realizar o curso de mestrado e ter dedicado seu precioso tempo para me ajudar com explicações e orientações;

Ao meu amigo Clay, dicas e principalmente por me ajudar com seu sólido conhecimento de programação na fase mais difícil deste projeto. Amigo está sempre com você e não lhe abandona nos momentos mais frágeis de nossa vida;

Ao meu amigo Gustavo Lervolino Moraes que fez questão de me ajudar durante uma fase muito importante do meu projeto, fornecendo laboratório e sua contribuição com suas explicações;

Ao Carlos Virgílio Costa de Freitas e Rafael Vilas Boas Lima pela valiosa contribuição no empréstimo de alguns equipamentos, além de suas dicas e amizade;

Ao Arnaldo pelo empréstimo de seu computador;

Ao Alecsandre e M.e Renato pela ajuda grande ajuda;

A Karoline da equipe da pós-graduação, pela sua ajuda desde o meu ingresso no curso até o seu término;

A todos os demais colegas e familiares sou eternamente grato. Muito obrigado!

“Não se sinta mal quando as pessoas te procuram apenas quando precisam. Sinta-se privilegiado, você é a luz que vem à mente delas no momento de escuridão”.

Autor Desconhecido

RESUMO

No presente trabalho é apresentada uma estratégia comunicação em redes de sensores sem fio para a detecção em tempo real de incêndios florestais. Redes de sensores sem fios mesmo sendo uma tecnologia de baixo custo, podem ser utilizadas para aplicações de risco como na prevenção e detecção de incêndios florestais, de forma eficaz comparada com outras tecnologias mais caras. Elas também podem ser utilizadas na coleta de informações contribuindo em diagnosticar a causa de um determinado incêndio florestal. A estratégia de comunicação foi implementada em uma rede de sensores sem fio instalada dentro de uma floresta de eucalipto. Além da estratégia de comunicação este projeto realizou um planejamento físico da área, para localizar os melhores pontos de instalação dos nós sensores. Para ambos os testes foram utilizados módulos de rádio operando em 915 MHz. O posicionamento geográfico de cada módulo de rádio foi planejado baseando-se na intensidade do sinal recebido por cada módulo e considerando o seu posicionamento dentro de uma topologia em malha. A eficácia da estratégia de comunicação foi mensurada através dos parâmetros: taxa de perda de pacotes, atraso médio da coleta e processamento dos pacotes. A robustez da estratégia perante falhas do módulo de rádio, também foi investigada e avaliada.

Palavras chaves: Redes de Sensores sem Fio; Detecção de Incêndios; Atraso; PER; algoritmo de roteamento; RSSF.

ABSTRACT

This document presents a planning and communication strategy in wireless sensor networks for the real-time detection of forest fires. Wireless sensor networks, even being a low-cost technology, can be used for risk applications such as in the forest fire prevention and detection, effectively compared to other technologies more expensive. They can also be used in the monitoring of information that could contribute to diagnose the cause of a particular forest fire. The communication strategy was implemented in a wireless sensor network installed in a eucalyptus forest. In addition to the communication strategy, this project carried out a physical planning of the area, to locate the best points of installation of the sensor nodes. In both tests were used radio modules operating at 915 MHz. The geographic localization of each radio module was planned based on the intensity of the signal received by each module and considering its position within a mesh topology. The effectiveness of the communication strategy was measured through the PER and the average delay. The robustness of the strategy in case of radio module failure were also investigated and evaluated.

Keywords: Wireless Sensor Networks; Fire detection; Delay; PER; Routing Algorithm; WSN.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Focos de Incêndios no Brasil.....	16
Gráfico 2: RSSI Downlink e Uplink médio dos três testes.....	67
Gráfico 3: PER dos três testes do SS.....	68
Gráfico 4: Atraso dos três testes.....	69
Gráfico 5: PER do cenário com e sem falha.....	78
Gráfico 6: Atraso médio dos cenários com e sem falha.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Satélite NASA-AQ.....	22
Figura 2: Torres de Vigilância.....	23
Figura 3: Avião para detecção de incêndios.....	24
Figura 4: Drone da Guarda Nacional Republicana de Portugal.....	24
Figura 5: Arquitetura do Disaster Management in Forest.....	26
Figura 6: Arquitetura Robô.....	27
Figura 7: Arquitetura Smart.....	27
Figura 8: Setup Forest Fire Monitoring.....	28
Figura 9: Arquitetura do Design and Implementation.....	29
Figura 10: Sistema usando ondas eletromagnéticas.....	37
Figura 11: Link Budget.....	39
Figura 12: RFbee.....	45
Figura 13: BE900.....	46
Figura 14: UartSBee.....	46
Figura 15: Antena Omnidirecional.....	46
Figura 16: DK103.....	47
Figura 17: Bateria.....	47
Figura 18: ZN8PD1-53-S+.....	47
Figura 19: ZFRSC-123-S+.....	47
Figura 20: Atenuador 8496B.....	48
Figura 21: Atenuador 47-30-33.....	48
Figura 22: Atenuador 50R-019.....	48
Figura 23: Atenuador 50R-029.....	48
Figura 24: Aspire 3050.....	48
Figura 25: Plantação de Eucalipto.....	50
Figura 26: Corredor de Eucalipto.....	50
Figura 27: Topologia para SS.....	51
Figura 28: Métrica de custo.....	53
Figura 29: Modelos de topologia em malha.....	53
Figura 30: Header FRP.....	54
Figura 31: Fluxograma do GW.....	56
Figura 32: Pacote Hello.....	58

Figura 33: Resposta ao Hello.....	59
Figura 34: Pacote STN.....	60
Figura 35: Mensagem Broadcast.....	61
Figura 36: Topologia em Bancada.....	63
Figura 37: Diagrama de blocos para simulação em laboratório.....	63
Figura 38: Descoberta cenário validação em laboratório.....	64
Figura 39: Ambiente do laboratório.....	64
Figura 40: Topologia Cenário FRT.....	65
Figura 41: Descoberta do CH-10.....	66
Figura 42: Falha CH-40.....	67
Figura 43: Rota Alternativa.....	68
Figura 44: Topologia do cenário de validação do FRP.....	73
Figura 45: Etapa 1 - Descoberta CH-10.....	74
Figura 46: Etapa 2 - Descoberta CH-40.....	74
Figura 47: Etapa 3 - Descoberta CH-30.....	75
Figura 48: Etapa 4 - Descoberta CH-20.....	76
Figura 49: Matriz de Conectividade Completa.....	77
Figura 50: Topologia do cenário de validação do FRP.....	77
Figura 51: Topologia Operacional NS-11.....	78
Figura 52: Topologia sem falha para alcançar o NS-31.....	79
Figura 53: Rota alternativa para NS-31.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Total de área queimada por bioma em 2017.....	16
Tabela 2: Resultado do RSSI dos três testes.....	67
Tabela 3: Resultado da PER dos três testes.....	68
Tabela 4: Resultado do atraso médio pacotes recebidos dos três testes.....	68
Tabela 5: TR inicial.....	70
Tabela 6: TR após atualização do CH-10.....	71
Tabela 7: TR após atualização do CH-40.....	72
Tabela 8: TR após atualização do CH-30.....	72
Tabela 9: TR após atualização do CH-20.....	73
Tabela 10: RSSI da etapa 1 de validação.....	75
Tabela 11: Tempo cenário 1 de validação.....	76
Tabela 12: Valores de RSSI.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASK	= <i>Amplitude Shift Keying</i>
BE	= <i>Bit Error</i>
BT	= <i>Bit Transmitido</i>
CM	= <i>Caminho Mínimo</i>
CH	= <i>Cluster Head</i>
C	= <i>Cost</i>
dBm	= <i>decibel miliwatt</i>
DSDV	= <i>Destination-Sequenced Distance Vector</i>
DN	= <i>Discovery Neighbor</i>
DSR	= <i>Dynamic Source Routing</i>
FRP	= <i>Forest Routing Protocol</i>
FSK	= <i>Frequency Shift Keying</i>
FTDI	= <i>Future Technology Devices International</i>
GW	= <i>Gateway</i>
GPS	= <i>Global Positioning System</i>
ID	= <i>Identifier</i>
IBAMA	= <i>Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis</i>
ICMBio	= <i>Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade</i>
INPE	= <i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
IDE	= <i>Integrated Development Environment</i>
IOT	= <i>Internet of Things</i>
MN	= <i>Matriz de Caminho Mínimo</i>
MC	= <i>Matriz de Conectividade</i>
NOAA	= <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NBR	= <i>Neighbor</i>
NS	= <i>Nó Sensor</i>
AODV	= <i>On-Demand Distance Vector Routing</i>
OLSR	= <i>Optimized Link State Routing</i>
PKT	= <i>Packet</i>
PER	= <i>Packet Error Rate</i>
PSK	= <i>Phase Shift Keying</i>
PREVFOGO	= <i>Prevenção aos Incêndios Florestais</i>
RF	= <i>Rádio Frequência</i>
RAM	= <i>Random Access Memory</i>
RSSI	= <i>Received Signal Strength Indication</i>
RX	= <i>Receptor</i>
RSSF	= <i>Redes de Sensores Sem Fio</i>
RISC	= <i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RM	= <i>RSSI médio</i>
STN	= <i>Send Table Neighbor</i>
SISFOGO	= <i>Sistema Nacional de Informações sobre Fogo</i>
SS	= <i>Site Survey</i>
TR	= <i>Tabela de Roteamento</i>
TF	= <i>Table of Forward</i>
TN	= <i>Table of Neighbors</i>
TX	= <i>Transmissor</i>
USB	= <i>Universal Serial Bus</i>
VANT	= <i>Veículos Aéreos Não Tripulados</i>

SUMÁRIO

Capítulo 1.....	16
Introdução.....	16
1.1 Objetivos.....	19
1.2 Motivação e Organização.....	20
1.3 Principais Contribuições.....	20
Capítulo 2.....	22
Revisão Bibliográfica.....	22
2.1 Satélite.....	22
2.2 Torres de Vigilância.....	23
2.3 Via Aérea.....	24
2.4 Câmeras de Vigilância.....	25
2.5 RSSF.....	26
Capítulo 3.....	33
Fundamentação teórica.....	33
3.1 Redes de Sensores Sem Fio (RSSF).....	33
3.1.1 Classificação das Redes de Sensores Sem Fio.....	34
3.1.2 Nó Sensor.....	35
3.2 Comunicação das RSSF.....	36
3.3 Roteamento.....	39
Capítulo 4.....	44
Configuração, Planejamento e Arquitetura da RSSF.....	44
4.1 Hardware e Software.....	44
4.2 Site Survey – (SS).....	48
4.3 Forest Routing Protocol - FRP.....	50
4.3.1 Métrica e Funcionamento do FRP.....	50
4.3.2 Cenários de validação do FRP.....	60
Capítulo 5.....	67
Resultados e comentários.....	67
5.1 Resultados dos Testes 1, 2, 3 - SS.....	67
5.2 Resultados dos Cenários de validação do FRP.....	70
5.2.1 Descoberta da rede.....	70
5.2.2 RSSF com e sem falha.....	75
Capítulo 6.....	80
Conclusão e Trabalhos Futuros.....	80
Referências.....	82

Capítulo 1

Introdução

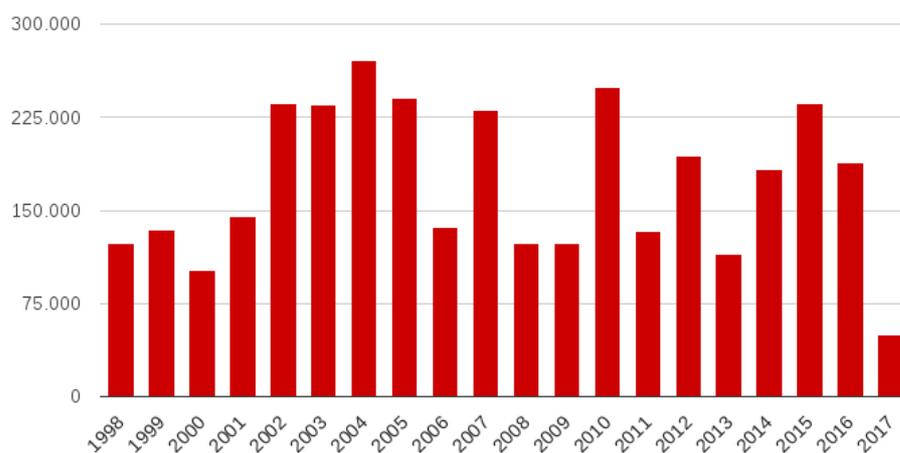
Em geral, os incêndios florestais podem causar impactos ambientais, sociais e econômicos [TETTO]. Uma das principais causas desses incêndios, é uso inadequado do fogo que traz graves consequências tanto na flora, quanto na fauna de uma área, gerando total desequilíbrio na natureza [SENAR]. Impactos são gerados em todas as esferas do ecossistema, tais como, o assoreamento de nascentes, contribuição para o aquecimento global, eliminação dos predadores naturais de algumas pragas. No âmbito social, seus efeitos também são alarmantes por afetarem diretamente a saúde humana, podendo causar e/ou agravar doenças respiratórias, alergias na pele, efeitos sobre o sistema nervoso e até levando ao óbito [TORRES].

Segundo a *Working on Fire* [WORKINGONFIRE], grupo internacionalmente reconhecido e especializado em combate a incêndios florestais, acredita-se que os incêndios florestais nos últimos anos estão mais frequentes, intensos e com maior tempo de duração. Os resultados dos incêndios florestais não poderiam ser diferentes. Muitas regiões estão sendo devastadas em todas as partes do planeta, como as que ocorreram em fevereiro de 2017 no Chile [AGENCIA BRASIL], registrando o seu maior e pior desastre natural, sendo mais de 160 mil hectares de florestas destruídos. Outro país que em 2017 sofreu com os incêndios foi Portugal [ESTADAO], registrando o segundo maior incêndio com pelo menos 64 mortes, dezenas de feridos e impactos destrutivos na vegetação e edificação. Os maiores registros de incêndios nos Estados Unidos desde os anos 2000 ocorreram entre janeiro e maio de 2017. Neste período foram detectados cerca de 57 mil incêndios, que destruíram mais de 1 milhão de hectares, de acordo com os Centros Nacionais de Informação Ambiental dos Estados Unidos. No mês de julho de 2017, cerca de 8 mil pessoas foram obrigadas a sair de suas moradias na Califórnia, enquanto os incêndios causavam destruição total em várias cidades [WORKINGONFIRE].

No Brasil este cenário também é alarmante, principalmente em épocas de seca quando a temperatura ambiente aumenta consideravelmente, contribuindo para uma das causas de incêndios. O Instituto Brasileiro do Meio

Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), mantém Centro Nacional de Prevenção aos Incêndios Florestais (PREVFOGO) que através do Sistema Nacional de Informações sobre Fogo (SISFOGO) torna-se possível a identificação de incêndios florestais a nível nacional. No gráfico 1 é apresentada uma série cronológica do total de focos de incêndios ativos detectados pelo satélite de referência, no período de 1998 até 08/08/2017.

Gráfico 1: Focos de Incêndios no Brasil



Fonte: Inpe

De acordo com estudos realizados em [TORRES], no Brasil existem cerca de 954 unidades de conservação com um total de 764.464 km², sendo 27,1% na Amazônia, 7,7% na Caatinga, 8,5% no Cerrado, 10% na Mata Atlântica, 2,7% Pampas e 4,6% no Pantanal. Na tabela 1 é apresentado o total da área (km²) queimada em 2017 separando por bioma.

Tabela 1: Total de área queimada por bioma em 2017

Área queimada (em km²) por bioma por mês

Ano	Mês	Amazônia	Caatinga	Cerrado	Mata Atlântica	Pampa	Pantanal	Total Mensal
2017	1	3085	6350	1270	1887	19	1206	13817
2017	2	1948	284	1184	1691	55	199	5361
2017	3	1416	1582	2902	1697	62	360	8019
2017	4	1019	1446	3832	920	216	148	7581
2017	5	3060	2647	16654	2290	860	594	26105
2017	6	5846	2763	29054	7656	1366	622	47307
Total anual		16374	15072	54896	16141	2578	3129	108190

Fonte: Inpe

A principal causa dessas queimadas no Brasil (tabela 1) está relacionada ao homem, seja pela limpeza e renovação de pastagens, queima de

restos culturais para preparação de plantios, eliminação de material lenhoso resultante de desmatamentos, queima da palha para colheita manual de cana-de-açúcar, vandalismo, balões de São João, disputas fundiárias, protestos sociais entre outras [ICMBIO].

Para evitar ou minimizar esses danos causados pelos incêndios florestais, um conjunto de ações é realizado em esfera local, regional e/ou nacional. Normalmente esse conjunto de ações é conhecido tecnicamente como manejo do fogo que possui quatro componentes essenciais: prevenção, pré-supressão, combate ou supressão e uso do fogo.

1) Prevenção: são todos os procedimentos, normas ou atividades designadas a evitar os incêndios florestais, por exemplo, a educação ambiental e técnicas de uso do fogo na propriedade rural.

2) Pré-supressão são ações e operações para gerenciar os recursos necessários para combater os incêndios. A detecção dos incêndios e o treinamento dos brigadistas são recursos que estão associados a pré-supressão.

3) Combate ou supressão: é a ação de extinguir o incêndio [SENAR].

4) Uso do fogo: é a técnica que utiliza a queimada controlada para renovação de pastagens, limpeza de restos de cultura, para plantio agrícola ou florestal no processo de derrubada e queima, entre outros.

A implementação de sistemas de vigilância abrange aspectos preventivos que tem objetivo de identificar os focos de incêndios, visando o menor tempo possível na sua descoberta e notificação através do estabelecimento de uma comunicação com a equipe responsável pelo combate ao incêndio. Existem várias formas de detecção de incêndios florestais e essas dependem de alguns fatores tais como a característica da vegetação, a extensão da área pretendida para o monitoramento e recursos materiais e financeiros disponíveis.

Atualmente, o monitoramento para detecção de incêndios florestais pode ser realizado utilizando diversas estratégias mecanizadas por alguma tecnologia ou apenas pelo monitoramento humano. Dentre estas estratégias pode-se citar: vigilância terrestre e por torres de observação, em que uma pessoa física é quem monitora a área [STIPANICEV], por monitoramento aéreo utilizando aeronaves [ICMBIO], por câmeras de vigilância, por tecnologias como redes de sensores sem fio (RSSF) [LEMOS] e imagens por satélites sendo esta tecnologia

uma das mais utilizadas nos dias de hoje, mesmo tendo como desvantagem o seu tempo de resposta para identificação do fogo de no mínimo 15 minutos [MANYANGADZE].

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de uma estratégia de comunicação entre os módulos de rádio (nós sensores – NS) de rede em malha, resiliente à falha de NS. A estratégia é baseada em um algoritmo para determinar as melhores rotas de comunicação. O algoritmo, nomeado *Forest Routing Protocol* (FRP), permite que a rede possa se auto descobrir utilizando as trocas de mensagens entre os nós sensores principais, denominado *Cluster Head* (CH), responsáveis pelo roteamento dos pacotes.

O *FRP* é operado em duas fases. Na primeira fase, o protocolo identificará quais são os CHs instalados na rede. Na segunda fase, o protocolo verifica quais são as melhores rotas para cada destino da rede. Ambas as fases são importantes para permitir que a rede encontre rotas alternativas em caso de falha de um CH ou enlace entre eles. Para a validação do FRP, primeiramente foi montado um *setup* experimental em bancada e posteriormente este *setup* foi testado em ambiente real, em uma floresta de eucalipto sendo utilizados NS operando em 915 MHz.

1.2 Motivação e Organização

Diante do cenário apresentado no início deste capítulo introdutório, pode-se perceber que existe uma necessidade de desenvolver sistemas rápidos, inteligentes, adaptáveis e flexíveis, visando controlar ou amenizar o problema dos incêndios florestais. Assim, este projeto e suas investigações são apresentados nos próximos capítulos e devem ser entendidos como uma contribuição as diferentes áreas das RSSF como na medicina, automação industrial, área militar, agricultura, meio ambiente, entre outras, e suas aplicações mais diversas formas de sensoriamento, tais como para detecção de queimadas florestais, monitoramento de animais e registro de temperatura de uma determina área, por exemplo.

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2, realiza-se uma pesquisa bibliográfica do estado arte das principais tecnologias utilizadas para a detecção de incêndios florestais.

No Capítulo 3, apresentam-se os principais elementos da arquitetura das redes de sensores, aliando-se aos conceitos fundamentais da mesma.

No Capítulo 4, apresenta-se e discute-se a estratégia de roteamento proposto, bem como o SS, descrevendo todos os passos realizados para elaboração do *setup* experimental.

No Capítulo 5 apresentam-se os resultados experimentais obtidos para a validação da proposta.

Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e considerações mais relevantes sobre o trabalho e algumas propostas para trabalhos futuros.

1.3 Principais Contribuições

Os estudos e pesquisas realizados são essenciais para a estratégia de roteamento e o SS, que juntos possibilitaram as seguintes contribuições:

- Desenvolvimento de uma estratégia de roteamento para as redes de sensores sem fio, tolerante à falha, tais como a falta de energia do nó sensor;
- Um dos pontos que permite a construção de uma rede de desempenho desejável é a realização do SS. Nesta etapa realiza-se *in loco* uma avaliação da área, através das medidas de intensidade do sinal de rádio de recepção nos CH, para identificar o melhor local de instalação.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

A eficiência de detecção e monitoramento dos incêndios florestais são de grande importância para o controle do fogo, minimização dos danos e pronto atendimento para o combate ao incêndio. A fim de atender essas necessidades ao longo dos últimos anos, muitas formas de detecção foram desenvolvidas. Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica de trabalhos relacionados às principais tecnologias e estratégias utilizadas para a detecção de incêndios, com ênfase nos trabalhos que utilizam as RSSF com o propósito de monitoramento. Na seção 2.1 é descrita uma das mais antigas e usadas tecnologias, o satélite. Na seção 2.2 é apresentada a detecção de incêndios por torres de vigilância. Na seção 2.3 são listadas as técnicas de detecção por vias aéreas. Na seção 2.4 é abordada a detecção por câmeras de vigilância. Por fim, na seção 2.5 são apresentados alguns trabalhos acadêmicos que visam o uso das RSSF para a detecção de incêndios florestais.

2.1 Satélite

O satélite é uma das tecnologias mais antigas e usadas hoje em dia para a detecção de incêndios florestais. Esse monitoramento foi usado pela primeira vez no início dos anos 80, quando a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) realizou o lançamento do satélite NOAA-6 com sensores de temperatura de alta resolução [DOZIER]. Nos últimos anos outros satélites foram lançados e atualmente existe uma constelação variada deles com sensores de luz e calor de distintas resoluções espaciais [ICMBIO].

Não são todas as imagens capturadas por um satélite que identificam um foco de incêndio, pois o satélite está calibrado para detectar temperaturas inferiores à temperatura de ignição da biomassa. Esses “pontos quentes” como são conhecidos na superfície terrestre podem ser interpretados com áreas onde a temperatura esteja elevada e não necessariamente seja um incêndio florestal [SOARES].

No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) é responsável pelo tratamento das imagens capturadas pelos satélites, e caso

sejam detectados focos de calor, as coordenadas geográficas são informadas para notificarem as unidades de conservação, para que estas possam realizar no próprio local (*in loco*) uma inspeção visual em campo [LEMOS].

Os satélites possuem um tempo de resolução espacial superior a 15 minutos, inviabilizando a detecção dos incêndios em tempo real, além desses possuírem um tempo de vida útil limitada e um alto valor de manutenção [LEMOS].

Outro fator determinante para uma boa detecção dos incêndios florestais, através de satélites são as condições meteorológicas, pois a qualidade dessas imagens é sensível à presença de nuvens [BATISTA]. Na figura 1 pode-se conhecer um dos principais satélites utilizados pelo INPE para a detecção de incêndios, o NASA-AQUA.

Figura 1: Satélite NASA-AQ



Fonte: NASA

2.2 Torres de Vigilância

Para o monitoramento baseado em torres de vigilância, é determinado um local fixo para a instalação das torres e essa escolha é um dos fatores determinantes para o sucesso dessa técnica. O local deverá prover uma ampla visão para a área com maior frequência e incidência de incêndios. As torres contam com pessoas para realizar a observação de toda a área e para o seu auxílio, as torres possuem binóculos, instrumentos para localização da coluna de fumaça e leitura de ângulo (goniômetro), mapa da área contendo topografia, tipo de vegetação e estradas, aparelho de radiocomunicação e livro de registro de ocorrência [ICMBIO].

Pesquisadores realizaram estudos e concluíram que as emissões de fumaça provenientes dos incêndios florestais são fatores importantes para a mortalidade de animais e seres humanos [JOHNSTON]. Os observadores dessas torres estão sujeitos a inalação de fumaças, além de risco de acidentes durante o seu trabalho, as possíveis falhas humanas devido fadiga e falta de observação da área de monitoramento, seja por distração ou necessidade de deslocamento [GUNAY]. Na figura 2 é apresentado um modelo de torres de vigilância utilizadas no Brasil pela ICMBio.

Figura 2: Torres de Vigilância



Fonte: ICMBio

2.3 Via Aérea

Trata-se de uma forma de monitoramento normalmente utilizado para atender grandes extensões territoriais. O monitoramento aéreo pode ser feito com aviões (figura 3) do monomotor ou multimotores, sendo estes últimos os preferidos por motivos de segurança, autonomia e velocidade [FLORESTA]. No Brasil, o uso de aviões para monitoramento de incêndios florestais não é comum, devido à falta de aeronaves e o alto custo operacional e manutenção [ICMBIO].

Figura 3: Avião para detecção de incêndios



Fonte: ICMBio

Outra solução de monitoramento que está crescendo é baseada em veículo aéreo não tripulado (VANT) ou *drones*. Portugal foi pioneiro na utilização de *drones* (figura 4) para detecção de incêndios florestais, com a utilização de dois modelos, sendo um com autonomia de voo de aproximadamente duas horas e um alcance de 10 quilômetros e um segundo modelo com uma autonomia de dez horas que lhes permite um alcance de 60 quilômetros [PUBLICO, TEKEVER].

Figura 4: Drone da Guarda Nacional Republicana de Portugal



Fonte: Público

2.4 Câmeras de Vigilância

Uma das técnicas de detecção de incêndios florestais que vem crescendo é o sistema de câmeras de vídeo, podendo ser administradas através de acesso remoto [STIPANICEV]. A demanda por câmeras de vídeo tem como objetivo substituir o observador, ou seja, quem trabalha nas torres de vigilância, podendo preservar assim, a sua vida. Uma outra vantagem desta técnica está relacionada à capacidade de capturar imagens e as enviarem para uma central para serem processadas e analisadas por especialistas, além de armazenar as imagens para futuras análises ou geração de históricos [JAKOVCEVIC].

As câmeras estão preparadas para realizar a detecção durante o dia, através da fumaça e no período noturno, através de pontos brilhantes que poderão indicar a presença de fogo [GUNAY]. Entretanto, uma das desvantagens desse sistema é o enorme número de alarmes falsos, necessidade de uma largura de banda de alta capacidade para a transmissão das imagens e alto custo de implementação [XIONG, ROSAS].

2.5 RSSF

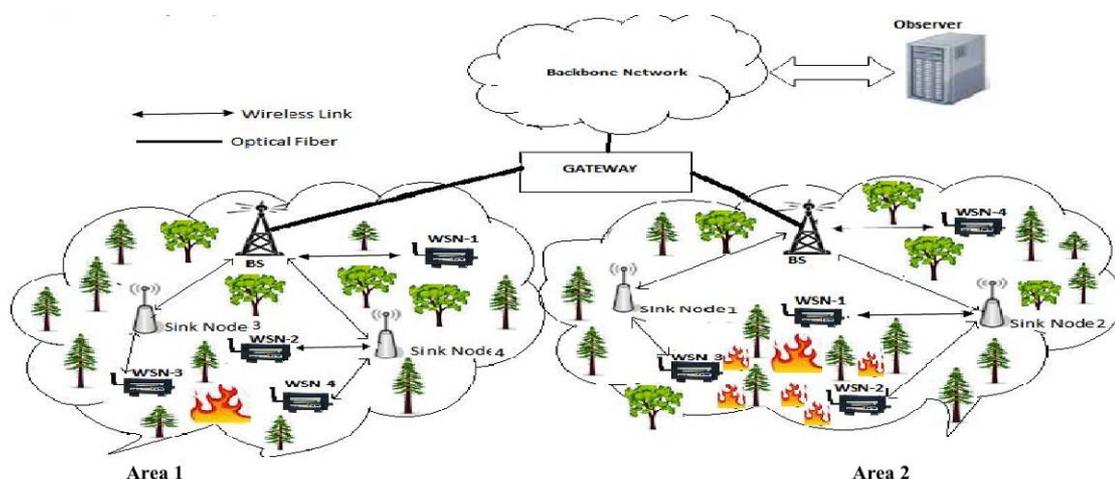
As RSSF são consideradas como uma das tecnologias mais importantes do século 21, identificando uma tendência da sua utilização para o sensoriamento nas mais diversas áreas, tais como medicina, automação industrial, área militar, agricultura, meio ambiente e principalmente as aplicações que agregam soluções à problemas relacionados as *Smart Cities e Internet of Things* [CHONG]. De acordo com essa tendência, muitas aplicações estão utilizando as RSSF com o objetivo de monitorar/detectar incêndios florestais. A seguir são apresentados alguns trabalhos sobre RSSF aplicados para incêndios florestais.

Em *Sensores Virtuais ou Sof Sensors: Uma Introdução* [LOTUFO], o artigo apresenta uma metodologia para desenvolvimento de sensores virtuais, também conhecidos como sensores inteligentes, que foram chamados de *Soft-Sensors* (Sensores Virtuais). Esses sensores possibilita a medição de variáveis que não poderiam ser medidas por sensores tradicionais. Entretanto, mesmo que esses sensores realizassem essas medidas, seria de forma limitada. O *soft-sensor* é uma solução alternativa para os sensores tradicionais, possibilitando que as variáveis de entrada sejam medidas sem os problemas de imprecisão, por exemplo, dando ao sistema maior precisão e tempo de computação aceitável.

Em *Forest Disaster management with Wireless Sensor Network* [BHOSLE], apresenta um modelo para a detecção de incêndios florestais que dentro de uma área vulnerável à ocorrência de incêndio, devem ser instalados alguns sensores para a detecção do fogo e os dados coletados serão enviados para um nó coletor, que avaliará se os dados estão dentro dos limites estabelecidos que indicam se há ou não fogo. Em caso desses dados

extrapolarem o limite, um alerta é enviado ao usuário final por meio da rede. A rede funciona através de um sensor que realiza a detecção de fogo e transmite, via rádio os dados para um elemento conhecido como *Sink Node*. Esse é responsável por interpretar inicialmente esses dados, verificando se os valores obtidos estão dentro do limite estabelecido. Se os dados estiverem abaixo do limite, uma mensagem de atenção será enviada ao usuário final, mas em caso de exceder o limite, um alerta de emergência é gerado e enviado para uma estação base encaminhar esse alerta até o usuário final. A solução também disponibiliza na estação base a capacidade de realizar a interpretação desses dados oriundos do sensor, pois em alguns casos o sensor está fisicamente mais próximo dessa estação que do *Sink Node*. Este artigo apresenta os conceitos e características de alguns padrões de sensores sem fio como possível solução para aplicar seu modelo proposto de detecção de incêndios florestais. Na figura 5 é apresentada a arquitetura proposta no modelo do artigo.

Figura 5: Arquitetura do Disaster Management in Forest

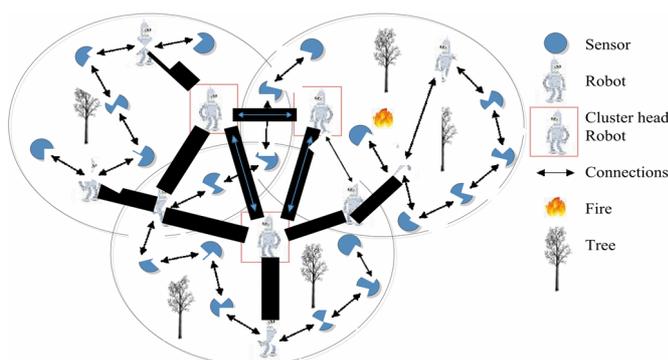


Fonte: Forest Disaster management with Wireless Sensor Network

Em *Robôt-based Forest Fire Detection and Extinguishing Model* [AFZAAL], propõe um algoritmo de detecção e extinção de incêndios florestais com o auxílio de sensores sem fio e robôs. Os robôs são distribuídos aleatoriamente na floresta devido aos obstáculos e, caso a temperatura atual detectada pelos sensores seja maior que a temperatura normal do ar, o robô é acionado para eliminar o fogo. A validação do modelo foi feita utilizando o *software Vienna Development Method-Specification Language* [AFZAAL].

A arquitetura proposta na figura 6, apresenta um grupo de robôs e dentro desse grupo, o robô com mais recursos é eleito como CH e a sua função é de eliminar o fogo, uma vez que for acionado após a detecção do sensor. Neste artigo os autores propõem um sistema de detecção de incêndios baseado em robôs.

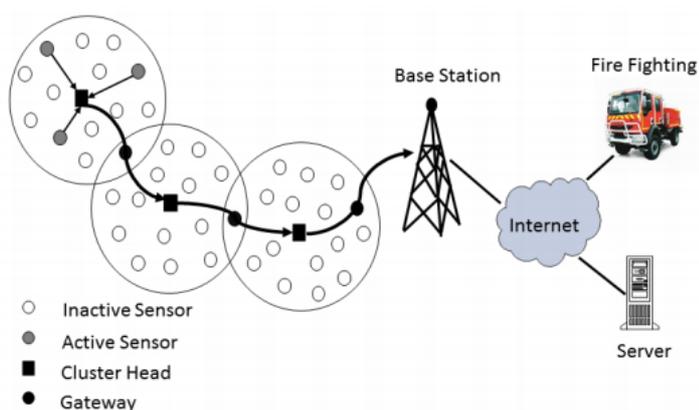
Figura 6: Arquitetura Robô



Fonte: Robôt-based Forest Fire Detection and Extinguishing Model

Em *Smart Data Mining Techniques for Emergency Detection Using Wireless Sensor Networks* [SAOUDI], o objetivo desse trabalho é criar uma rede capaz de monitorar os incêndios florestais, através de técnicas de mineração de dados. A proposta sugerida foi submetida ao ambiente de simulação *CupCarbon*. Sua arquitetura utiliza o agrupamento de sensores dentro de uma determinada área, com o objetivo de criar um *cluster* e um sensor que é definido como o principal CH, pois ele recebe as informações do sensor da área local e encaminha pela rede até chegar na central de processamento. Na figura 7 é apresentada a arquitetura proposta pelo artigo para detecção de incêndios florestais.

Figura 7: Arquitetura Smart



Fonte: Smart Data Mining Techniques for Emergency Detection Using Wireless Sensor Networks

A arquitetura foi dividida em três fases: *Clustering*, *Routing* e *Fire Detection*. Na fase de *Clustering* são formados agrupamentos de sensores para obter um processamento de rede mais eficiente. *Routing* é a fase responsável pelo roteamento das informações na rede, a fim de garantir que o alerta de fogo, por exemplo, chegue a central rapidamente. E por fim, a fase *Fire Detection* que tem como responsabilidade detectar o fogo através dos sensores. O artigo utilizou um ambiente de simulação para validar a sua proposta de arquitetura baseada em RSSF que detecta fumaça, luminosidade, umidade e temperatura, que utiliza a técnica de mineração de dados, para reduzir a quantidade de dados na rede, tornando-a mais eficiente e com economia de energia.

Em *Forest Fire Monitoring and Detection of Faulty Nodes using Wireless Sensor Network* [MOHAPATRA], avalia-se a necessidade de detectar sensores com falhas na rede, pois devido a sua exposição no ambiente florestal há grandes probabilidades de falhas. Outro objetivo dos autores, é também a detecção em tempo real de incêndios florestais através de sensores de temperatura e umidade. Para o envio dos dados coletados pelos sensores, a informação é encaminhada ao CH, que verifica qual a probabilidade de incêndio e uma vez detectado, um alerta é enviado para a base realizar o processamento. Os autores assumem condições em que uma grande quantidade de nós sensores está espalhada na floresta de forma aleatória e todos os nós se comunicam entre si e com o CH. Durante a fase inicial do processo de comunicação, o algoritmo proposto realiza uma análise desses resultados de consultas feitas nos sensores, para determinar qual formam os requisitos para a detecção de incêndios. Para certificar que a eficiência da proposta, foi montada uma rede com 5 sensores em laboratório. Na figura 8 são apresentados os sensores que foram utilizados para validar a proposta do algoritmo.

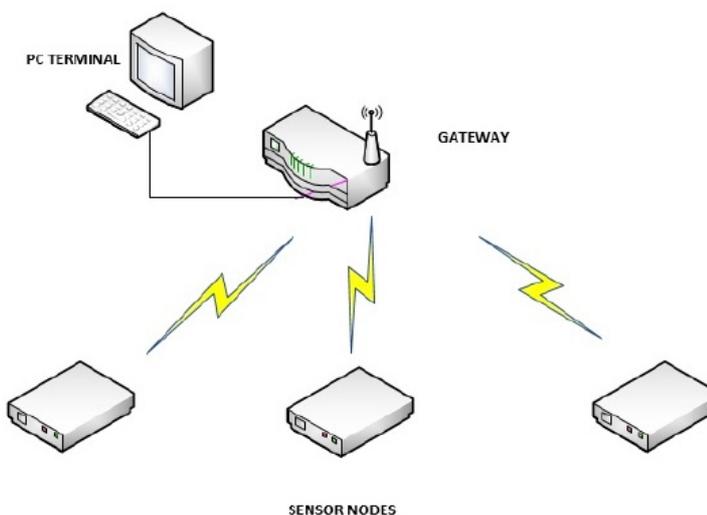
Figura 8: Setup Forest Fire Monitoring



Fonte: Forest Fire Monitoring and Detection of Faulty Nodes using Wireless Sensor Network

Em Design and Implementation of a Wireless Sensor Network to Detect Forest Fires [GRANDA], a proposta baseia-se em medir, em tempo real, os gases CO₂, CO e CH₄, e também a temperatura e a umidade do ambiente. Para localização do foco de incêndio, o sistema também possui um global positioning system (GPS). Todas as informações coletadas são enviadas para a base que interpreta os dados e disponibiliza em uma interface gráfica. Para o desenvolvimento do projeto, os autores projetaram dois protótipos, sendo um para detecção de gases e o segundo para detecção de umidade e temperatura. Ambos os nós sensores são dotados de uma interface de rádio para comunicação com a base ou gateway (GW). A base é responsável por interpretar os dados e apresentá-los em uma interface gráfica, onde possível acompanhar as mensagens de alertas da rede. O protótipo para detecção de incêndio florestal foi testado em um cenário real em Quito no Equador, para monitorar e detectar uma floresta que possuem altos índices de incêndio. Foi simulado um incêndio de queima de folhas de eucalipto e notou-se que o alarme foi ativado, além do GPS indicando rapidamente a localização do incêndio para intervenção o mais breve possível. Na figura 9 é ilustrada a arquitetura de hardware adotada pelos autores.

Figura 9: Arquitetura do Design and Implementation



Fonte: Design and Implementation of a Wireless Sensor Network to Detect Forest Fires

Em *Redes Sensores Sem Fio de baixo custo utilizando as plataformas livres para agricultura* [DA SILVA], os autores desenvolveram um dispositivo que utiliza células termoelétricas do tipo *Peltier* para gerenciar a temperatura. A RSSF proposta pelos autores é formada por três nós sensores remotos, que são espalhados pelo laboratório, além de um nó coordenador. Os nós sensores remotos são os responsáveis por realizar a coleta dos parâmetros ambientais, tais como a temperatura ambiente, umidade relativa do ar, umidade do solo, pressão barométrica além de detecção de presença de chuva. Os dados coletados pelos nós sensores serão enviados ao nó coordenador, uma espécie de gateway na rede, esses dados são enviados via rádio frequência e neste projeto foi utilizado o *ZigBee*. Esses dados também são armazenados localmente, em memória do tipo *Secure Digital* (SD), no próprio nó. O nó Coordenador, processa as mensagens que foram enviadas pelos nós sensores, armazena esses dados em banco de dados local além de disponibilizar esses em uma interface de usuário.

Em *Implementação em Hardware de uma Rede de Sensores para Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais* [HSIAO], neste artigo os autores criaram um sistema de RSSF de baixo custo, flexível, confiável e escalável para monitoramento e alerta de desastres naturais. A plataforma de hardware desenvolvida utiliza conceitos de RSSF e de Internet das Coisas como uma solução diferenciada em comparação aos sistemas atualmente empregados, que tem um alto custo de instalação e manutenção. O protótipo desenvolvido neste

artigo utilizou o *Arduino*, com um módulo de comunicação modelo NRF24 e para o sensoriamento sensores de baixo custo.

Em *Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de animais, utilizando rede de sensores sem fio, baseado no protocolo ZigBee e tecnologia GPS* [DONATTI], o objetivo do autor foi criar um sistema de comunicação sem fio, baseado em rádio frequência para coleta de dados referentes a localização dos animais, em função da (Latitude e Longitude). Para estabelecer a comunicação entre os sensores, foi utilizado o protocolo *ZigBee* em conjunto com a tecnologia GPS. Para validação dessa proposta foi desenvolvido dois sistemas, sendo um deles composto de nó coordenador e nó móvel, e o segundo um sistema composto de um celular. Ambos os sistemas efetuaram leituras das posições e deslocamento dos animais, o primeiro em tempo real e o segundo tendo os seus dados armazenados para uma avaliação posterior.

Neste capítulo foi apresentada a revisão bibliográfica sobre algumas tecnologias e estratégias para monitoração e detecção de incêndios florestais. A primeira tecnologia apresentada foi o satélite, uma tecnologia para detecção de incêndios florestais com um atraso de 15 minutos desde a localização do foco de incêndio até o processamento total e disponibilização deste alerta para consulta, além do fator custo de implementação e manutenção de um satélite.

As torres de vigilância necessitam de uma pessoa trabalhando nelas para detectar os incêndios. Entretanto, essa pessoa fica sujeita à inalação de fumaças, assim há possíveis falhas humanas devido a fadiga e além do alto custo para instalação dessas torres.

A próxima tecnologia é baseada em via aérea, podendo ser um avião adaptado com alguns sistemas embarcadas que permitem a identificação de focos de fogo ou até mesmo visualmente pelos tripulantes. A utilização de aviões para a detecção de incêndios florestais é ferramenta alto custo. Outro meio aéreo que vem se identificado como uma boa solução são os VANTs, mas devido a limitação de suas baterias, seu tempo de autonomia é reduzido inviabilizando monitoramentos de longas horas.

O monitoramento através de câmeras de vigilância foi apresentado como uma tecnologia que também está se evidenciando como boas soluções, embora haja alto custo para sua instalação e manutenção, além de ter uma

probabilidade relativamente alta para gerar alarmes falsos dos focos de incêndios. Nos trabalhos relacionados a RSSF, todos apresentaram uma proposta para detecção de incêndios em tempo real.

Nos trabalhos [BHOSLE, AFZAAL, SAOUDI] foram utilizados um ambiente de simulação para apresentar e validar suas propostas. Já no trabalho [MOHAPATRA] o autor validou sua proposta realizando um experimento controlado dentro de um laboratório enquanto que o autor da proposta [GRANDA] aplicou sua solução em uma floresta. Na literatura não foram identificados muitos trabalhos relacionados com a utilização da RSSF tendo uma abordagem sobre o planejamento da rede em camada física ou lógica, ou seja, o dimensionamento da área não foi avaliado para que fossem encontrados os melhores pontos de instalação de cada sensores. A localização geográfica dos sensores no ambiente é extremamente importante para garantir uma melhor performance dos serviços transportados pela rede. A localização do sensor impactará na qualidade possível do sinal que conseqüentemente impactará em um número menor de perda e atraso de pacotes.

Em [DA SILVA, HSIAO, DONATTI], foram apresentados trabalhos que utilizam as RSSF para implementar uma solução direcionada ao meio ambiente. Seus objetivos estão alinhados aos tipos de sensores para detecção de grandezas físicas, tais como temperatura, umidade relativa do ar, gases, dentre outras. Para a construção da RSSF os autores utilizaram os sensores já existentes no mercado e muito utilizado, tais como o *ZigBee* e *Arduino*.

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento do FRP que permite que o tráfego entre origem e destino utilize a melhor rota. Esse é o primeiro diferencial deste trabalho em relação aos trabalhos apresentados neste capítulo, pois permitirá que a rede de RSSF possa entregar os dados entre origem e destino, mesmo em caso de uma ou mais falhas na rede, como por exemplo a falta de energia de um sensor ou porque algum obstáculo está impossibilitando a sua comunicação com a rede. A escolha dessa rota será em função do melhor valor de *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) e número mínimo de saltos. Também é realizado o SS, através de um planejamento *in loco* para melhor posicionar geograficamente os CH e NS e assim validar a proposta de caminhos redundantes. O segundo diferencial desta proposta é o SS, pois nos trabalhos

aqui apresentados também não levaram em consideração os melhores pontos de instalação dos CH e NS. Como será discutido no capítulo 4 a performance da RSSF está relacionada também a qualidade do sinal, que através do SS poderá ser escolhido o melhor local. No próximo capítulo são descritos os principais conceitos sobre as tecnologias, recursos e soluções que foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 3

Fundamentação teórica

Este capítulo descreve conceitos fundamentais para a melhor compreensão das tecnologias e dos serviços utilizados neste trabalho, que são apresentados detalhadamente nos próximos capítulos. Nas seções 3.1 e 3.2 são descritos os principais conceitos relacionados às RSSFs e o seu processo de comunicação. E na seção 3.3 são apresentados conceitos e alguns modelos de roteamentos.

3.1 Redes de Sensores Sem Fio (RSSF)

Em um futuro próximo, “bilhões de coisas” distribuídas e inteligentes serão conectadas para suportarem novos tipos de aplicativos, serviços e formas de interação [ALKHABBAS]. Essas coisas conectadas entre si são conceituadas como *Internet of Things* (IoT) dentro de uma infraestrutura de rede. Geralmente o IoT é caracterizado por coisas pequenas amplamente distribuídas, com capacidade limitada de armazenamento, processamento e restrição de energia [BOTTA].

As RSSFs foram definidas como a terceira onda da computação, devido sua capacidade de processamento, monitoramento e transmissão de informações, além de ser um dos pilares da IoT [BERNDT]. As RSSFs são aplicadas com a finalidade de coletar dados de um determinado ambiente (tais como temperatura, umidade e entre outras). Esses dados são previamente processados e transmitidos por comunicação a rádio frequência (RF) e posteriormente são disponibilizados numa plataforma para tratamento dos dados e visualização das informações coletadas [BRAGA].

Existem diversos segmentos/setores onde as RSSFs estão sendo implementadas, tais como: no setor industrial, diretamente em fábricas de automóveis, celulose, siderurgia [BERNDT]; em áreas da medicina com o objetivo por exemplo de monitorar o funcionamento do coração, pressão arterial, detectar a presença de substâncias que possam indicar um problema biológico [ANTONIO] em um paciente; no segmento ambiental para monitorar por exemplo a qualidade da água e poluição do ar [TEIXEIRA].

3.1.1 Classificação das Redes de Sensores Sem Fio

As RSSFs são consideradas uma subclasse das redes *Ad Hoc*. Os elementos que as formam são chamados de nós sensores, que geralmente são dispositivos pequenos constituídos de sensores, processador, módulo de rádio, memória e bateria [MACEDO]. Elas possuem características que diferenciam das redes *Ad Hoc*, tais como escalabilidade, sensores fixos (em sua maioria), limitação de recursos de energia (capacidade de bateria) e comunicação *broadcast* [OLIVEIRA].

Assim como as redes de computadores, as RSSFs também foram divididas em camadas para melhor organização e gerência das suas entidades. Elas podem ser classificadas de acordo com a sua organização e com a sua mobilidade [MACEDO, TILAK, LOUREIRO].

Organização: as RSSFs podem ser homogêneas ou heterogêneas dependendo do tipo de dados, dimensão e funcionalidade. Para as homogêneas, os nós sensores possuem dimensões iguais, independentemente de sua funcionalidade na rede. Por exemplo, o monitoramento de variáveis do ambiente, tais como temperatura, umidade e fumaça, necessitam de nós sensores com os mesmo tamanho e capacidade de processamento e memória. Para as heterogêneas, os nós sensores podem ter tamanhos diferentes independente da sua funcionalidade. Por exemplo: em uma rede de vigilância são utilizados sensores de imagem/vídeo e som utilizando o mesmo sensor ou diferentes sensores. Os tipos de dados coletados são: imagens e sinais de áudio. Estes sensores poderão necessitar de diferentes capacidades de processamento e memória impactando no tamanho de cada sensor.

Mobilidade: os nós sensores podem ser móveis ou estáticos. Quando os nós sensores não possuem uma posição fixa, ou seja, alteram sua posição de acordo com suas necessidades são chamados de nós móveis. A utilização de nós sensores instalados em carros ou *drones*, são exemplos de aplicações que exigem que os nós sensores móveis se desloquem para captação dos dados. Já os sensores que não se movimentam e mantêm uma posição fixa são classificados como nós fixos e como exemplo dessa aplicação, pode-se destacar a leitura de temperatura e umidade relativa do ar dentro de uma solução de monitoramento de uma estufa agrícola.

3.1.2 Nó Sensor

O NS é considerado o principal elemento de uma rede de sensores sem fio, devido a importância da sua conexão com a rede [TEIXEIRA]. Normalmente, o NS é constituído de cinco componentes, são eles: memória, bateria, processador, módulo de transmissão e sensor.

Memória: A memória é um *hardware* responsável pelo armazenamento de dados, sejam eles volátil (temporário) ou não volátil. No armazenamento temporário, pode-se destacar como exemplo, a memória *random access memory* (RAM) que armazena, por exemplo a tabela de roteamento (TR), execução do *firmware* e dados coletados pelo sensor que ficam armazenado por um determinado tempo, para que estes dados sejam processados e posteriormente transmitidos através da rede para o CH [TEIXEIRA]. O armazenamento não temporário ocorre na memória flash que armazena o *firmware do NS* [HILL].

Bateria: Fonte de energia elétrica responsável pela alimentação de todos os componentes de um nó sensor [OLIVEIRA]. Basicamente existem duas fontes possíveis de alimentação dos sensores: fonte de energia constante (rede elétrica); fonte de armazenamento finito (bateria, painéis fotovoltaicos). Entretanto, o mais comum é o uso de baterias do tipo alcalinas e lítio [HILL].

Processador: Esse é o componente principal do NS, sendo responsável pela execução de tarefas, processamento de dados e controle das demais funcionalidades de outros componentes do NS. Geralmente o processador é mais conhecido como microcontrolador [LOUREIRO, TEIXEIRA]. A escolha do microcontrolador pode ser feita de acordo o consumo de energia, voltagem, custo, suporte para periféricos e o número de componentes externos necessários [HILL].

Módulo de transmissão: componente responsável pela transmissão e recepção dos dados. O principal tipo de comunicação é a RF utilizando as faixas de frequência permitidas de 868 MHz, 902-928 MHz e 2.4 GHz [BRAGA].

Sensor: são componentes sensíveis a detecção de algumas formas de energia, tais como luminosa, térmica e cinética, que necessitam ser medida, como temperatura, pressão, velocidade, corrente, aceleração, entre outras [THOMAZINI].

Em RSSF um dos fatores mais importantes para um pleno funcionamento é o consumo de energia, pois esse afeta diretamente a capacidade da rede e seu tempo de vida. Os NS utilizam baterias como fonte de alimentação e na maioria das vezes, tais como a instalação desses NS em ambientes de difícil acesso, torna-se onerosa a substituição dessas baterias. Atualmente novos desenvolvimentos de tecnologias empregadas para a construção de baterias, estão sendo realizados, mas ainda num ritmo mais lento [GINATTO].

O maior consumo de energia no NS normalmente ocorre durante a comunicação. Para melhor gerenciar o projeto de utilização de consumo de bateria em um RSSF, já está disponível o uso de simuladores para estimar a energia consumida e o tempo de vida dessas redes, permitindo obter resultados de redução de energia gasta pelos principais componentes, tais como processador e módulo de comunicação [SILVA].

O consumo de energia em um NS pode ser dividido em três partes, são elas: sensoriamento, comunicação e processamento dos dados. No sensoriamento a complexidade dos componentes depende diretamente do tipo de detecção, como por exemplo sensores para detecção de umidade relativa do ar, gases, dentre outros. Para interpretar essas grandezas físicas (umidade, temperatura, etc) os dados coletados, analógicos, são transformados em dados digitais, onde seu tratamento será de acordo com as especificações da aplicação. Na comunicação que é o maior responsável pelo consumo de energia em um NS, pois na transmissão das mensagens esse consumo é muito elevado. Assim como também na recepção, o consumo de energia também é bem significativo [ROHDE].

3.2 Comunicação das RSSFs

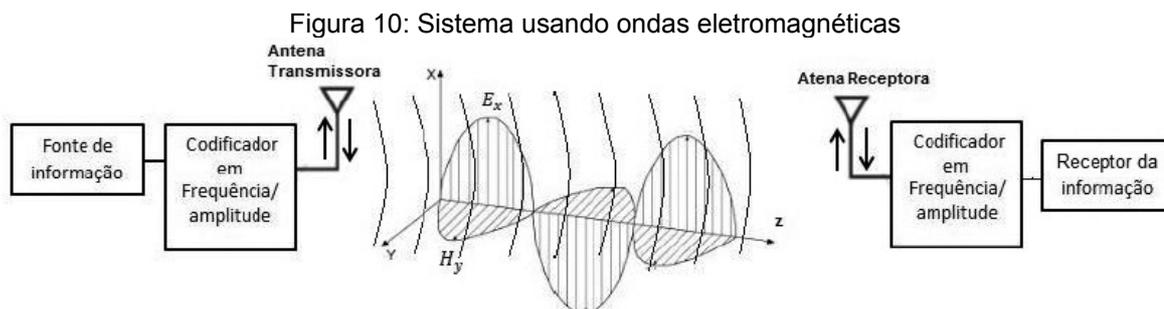
Dentro de uma RSSF, os NS precisam se comunicar para que os dados coletados pelos sensores possam ser entregues ao seu destino final, a fim de realizar o monitoramento, controle e/ou aquisição de dados. A conexão dos NS torna-se inviável com a utilização de meios guiados, como cabos de pares trançados, cabos coaxiais ou fibra óptica, devido ao tipo de ambiente que eles podem ser instalados. Geralmente a instalação no contexto desse trabalho ocorre

em ambientes inhóspitos, tais como floresta sendo viável a utilização de algumas tecnologias sem fio, como é apresentado nas próximas seções deste capítulo.

3.2.1 Rádio Frequência

O princípio de funcionamento de uma transmissão de dados por meio de uma RF está relacionado às ondas eletromagnéticas. Uma das vantagens das ondas eletromagnéticas em comparação as redes de meios guiados é sua alta velocidade, além das ondas de rádio poderem percorrer longas distâncias e transpor facilmente os obstáculos [BRANQUINHO, TANENBAUM].

Para ilustrar melhor a propagação do sinal em RF, na figura 10 é apresentado o processo de propagação. A origem gera os dados para serem transmitidos e esses codificados e enviados através de uma antena [PIZA].



Fonte: Ensinando os fundamentos de redes de sensores usando um sistema simples

Na figura 10 apresenta-se uma fonte de informação ou transmissor (TX) responsável por criar o sinal de rádio em seu módulo codificador com uma determinada potência. Este sinal é guiado até a antena que converterá a onda guiada em onda não guiada, promovendo um direcionamento da intensidade do sinal na direção da antena de recepção. A uma determinada distância encontra-se o receptor do sinal, que possui as mesmas características do transmissor e quando o sinal chegar na antena de recepção, essa irá captar parte da onda transmitida e a converterá em uma onda guiada novamente para ser processada pelo receptor (RX) [BRANQUINHO].

As ondas de rádio são ondas eletromagnéticas que levam a informação entre dois pontos, através da variação de suas características, como a amplitude, frequência e fase [BRANQUINHO]. O elemento básico que possibilita que essas ondas sejam enviadas é a antena, pois sua função é a conversão elétrica em onda de RF [PERES]. O ambiente no qual é instalado o sistema de rádio, poderá influenciar diretamente na propagação do sinal. Para melhor estudar o

comportamento dos sinais em diferentes ambientes, existem na literatura modelos, tais como o do espaço livre, log-normal, modelos para o meio urbano e modelos para vegetação [SOUSA].

O mecanismo que permite que um sinal em banda base modifique parâmetros de uma portadora, tais como amplitude, frequência ou fase é conhecido como modulação [OLIVEIRA]. A modulação poderá ser feita de maneira analógica ou digital [FOROUZAN]. Quando se modifica os parâmetros da onda, como a amplitude, frequência e fase, torna-se possível o uso de algumas técnicas de modulação, assim como a *Amplitude Shift Keying* (ASK), *Frequency Shift Keying* (FSK) e *Phase Shift Keying* (PSK). As redes de sensores sem fio geralmente utilizam três faixas de frequência: 868 MHz, 915 MHz e 2.4 GHz e uma largura de banda entre 1 kbps a 1 Mbps [VALLE].

Em RSSF geralmente há uma quantidade muito grande de NS espalhados e para manter uma melhor qualidade da comunicação, eles oferecem uma informação sobre a intensidade do sinal recebido, também conhecido como RSSI. O cálculo do RSSI está baseado na medida do decibel miliwatt (dBm), indicando a potência do sinal recebido pelo NS [GIACOMIN, PARAMESWARAN]. Como explicado anteriormente, o ambiente no qual está inserido os NS poderá diretamente afetar na potência do sinal, ou seja, o sinal poderá ser atenuado devido os obstáculos e distância entre os NS. O cálculo do RSSI é baseado na equação 1 [ASSUMPCAO]:

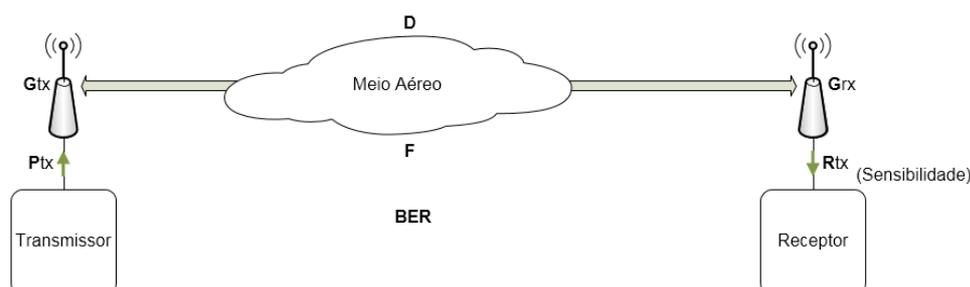
$$P(d) = P(d_0) - 10\eta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (1)$$

onde o $P(d)$ representa a média da potência recebida a uma distância (d); $P(d_0)$ representa a média da potência recebida a uma distância de referência conhecida d_0 ; η representa um coeficiente de perda, obtido de acordo com o tipo de ambiente; X_σ representa uma variável aleatória de distribuição normal de média nula e desvio padrão σ . Os valores de η e σ podem ser obtidos por meio do estudo do ambiente ou pela utilização de valores predefinidos de acordo com o tipo de ambiente [ANDERSEN].

Para um projeto de RSSF, a cobertura de cada célula, ou seja, o dimensionamento adequado para cada *link* de comunicação é importante, pois permitirá identificar a melhor distância entre o transmissor e o receptor. Em caso

de não realização desse dimensionamento, a relação entre sinal/ruído (SNR) poderá ser baixa o suficiente para que a transmissão tenha muita perda, tornando quase impossível de interpretar os dados recebidos [LEAO]. O cálculo responsável pelo dimensionamento desse *link* chama-se *link budget*, nele poderá identificar o quanto de energia/potência está sendo entregue no receptor [BRANQUINHO]. Na figura 11 é apresentado um *link* entre dois elementos de rádios que necessitam se comunicar entre si através de transmissão sem fio.

Figura 11: Link Budget



Onde:

P_{tx}	Potência de Transmissão em dBm
G_{tx}	Ganho da antena de Transmissão em dB
G_{rx}	Ganho da antena de Recepção em dB
P_{rx}	Potência de Recepção em dBm
D	Distância entre as antenas em metros
F	Frequência de Operação em hertz
Meio Aéreo	Tipo de Ambiente
BER	Bit Error Rate

Com referência a figura 11, o elemento transmissor gera um sinal, a uma potência X e através da antena é enviado ao meio, aqui representado por uma linha de transmissão. Durante o trajeto entre antena do transmissor e antena do receptor, o sinal é atenuado, devido a própria distância e possíveis obstáculos. Na equação 2 é possível calcular a distância entre os elementos de transmissão e recepção:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right) \quad (2)$$

A equação 2 foi desenvolvida pelo Harald Trap Friis, onde: P_{rx} corresponde a potência de recepção, P_{tx} a potência de transmissão, G_{tx} ganho de transmissão, G_{rx} ganho de recepção, λ comprimento da onda e D distância entre as duas antenas [ASSUMPCAO].

Ao longo de uma comunicação entre transmissor e receptor, erros podem ocorrer, mas esses são imprevisíveis e aleatórios. Os sistemas de RF

devem possuir meios para monitorar e se possível corrigir esses erros. A frequência de ocorrência dos erros nesta rede foi classificada como *Packet Error Rate* (PER), que é a medida por uma razão formada pelo número de bits errados (Be) para o total de bits enviados durante um determinado tempo (Bt).

$$PER = \frac{Be}{Bt} \quad (3)$$

Essa fórmula é utilizada para encontrar a quantidade de erros durante a transmissão de dados e as causas para esses erros podem ocorrer por diversas razões tais como: colisão por contenda, falhas de sincronização entre o transmissor e o receptor, defeitos de componentes, ruído dentre outras.

3.3 Roteamento

O objetivo do roteamento é determinar uma rota ou caminho para permitir que os pacotes sejam encaminhados de uma origem até o destino. Para determinar uma rota as redes utilizam algoritmos de roteamento, que é um software responsável pela decisão do melhor caminho até o seu destino [KUROSE]. Segundo Tanenbaum [TANENBAUM], os algoritmos de roteamento podem ser divididos em não adaptativos e adaptativos. Os algoritmos não adaptativos são aqueles que não baseiam suas decisões de roteamento levando em consideração medidas ou estimativas de tráfego da rede. Esse procedimento de tomada de decisão é conhecido como roteamento estático. Já os algoritmos de roteamento adaptativos tomam suas decisões em função de mudanças na topologia e também no tráfego. Essas informações são necessárias para a tomada de decisão entre os roteadores de forma automática, dando assim a definição de roteamento dinâmico.

O desenvolvimento de um novo algoritmo de roteamento deve atender a alguns requisitos, tais como: correção, simplicidade, robustez, estabilidade, equidade e otimização. As características de correção e simplicidade são auto explicativas. Um algoritmo robusto permite ser implementado em uma rede de grande porte e que essa funcione por muito tempo sem que ocorram falhas. Entretanto, existe a probabilidade de ocorrência de uma ou mais falhas, sejam elas de *hardware* e/ou de *software*. Com isso poderá haver uma mudança de rota para que a comunicação continue funcionando e as operações da rede se restabelecerem o mais rápido possível. A estabilidade de um algoritmo exige

condições de ser e se manter estável, sem que haja oscilações entre falhas. A equidade refere-se ao desempenho uniforme a todos os pares entre origem e destino que tenham necessidade de se comunicarem entre si na rede. A otimização muitas vezes está relacionada a melhor utilização da rede, como por exemplo com a redução do número de saltos que um pacote realiza para chegar ao seu destino [TANENBAUM].

Em RSSF construídas para atender cenários de emergência, tais como a detecção de incêndios florestais, por exemplo, há fatores como obstáculos e interferências que podem comprometer a conectividade fim-a-fim devido principalmente às possíveis interrupções [MOTA]. Segundo Jain, muitos algoritmos de roteamento proposto, acabam sendo ineficazes para atender essa vulnerabilidade das redes, em que haverá a necessidade de protocolos com características já antes mencionadas [FOROUZAN].

Nas RSSFs em geral, os nós sensores possuem uma capacidade limitada de processamento, memória e armazenamento. Desta forma, os novos protocolos e algoritmos desenvolvidos, tais como *Proactive Routing with Coordination* (PROC), *Directed Difusion*, *Dynamic Source Routing* (DSR), entre outros, devem prover mecanismos que levem em consideração essas limitações, bem como mecanismos de tolerância a falhas, devido a possíveis falhas de comunicação entre os NS, que podem ter como causa os obstáculos associados ao tipo de ambiente, tais como árvores, prédios, falta de energia, entre outros [MACEDO].

Como proposta, alguns autores desenvolveram algoritmos otimizados para atender os requisitos de cada cenário [MACEDO, TIAN]. Um dos recursos utilizados pelos desenvolvedores desses algoritmos é suportar fluxos de dados que podem ser classificados em dois grupos [TILAK]. Primeiro são as redes dirigidas a eventos. Neste caso, o fluxo de dados na rede é ocasional, ocorrendo somente quando um evento for detectado. As aplicações que normalmente utilizam esse tipo de rede são: monitoramento de queimadas, detecção de intrusão, localização de animais, entre outros [LOUREIRO]. Segundo são as redes de disseminação contínua, onde os nós sensores enviam mensagens dentro de intervalos regulares para outros nós ou geralmente para um GW. Nessas mensagens pode-se ter informações do tipo temperatura, umidade,

corrente, entre outros parâmetros. A exemplo dessa rede existem as aplicações para estudos ambientais, cidades inteligentes, monitoração de plantações, entre outros. Como visto, cada grupo de aplicação pode ter padrões de comunicação diferentes, assim torna-se viável o desenvolvimento de algoritmos otimizados para atender a cada tipo de fluxo de dados.

De acordo com [TILAK] os tipos de mensagens também podem variar conforme o modelo de fluxo de dados de uma rede. A seguir são apresentadas essas mensagens.

Mensagens de inundação (*Flooding*): nesse tipo de fluxo de dados a comunicação acontece quando um NS dispara uma mensagem a todos os nós da rede e esses por sua vez também repassam esses dados para outros vizinhos. Uma aplicação que normalmente faz uso dessa técnica é o monitoramento florestal, por exemplo, pois ao detectar um evento, os dados precisam chegar o mais rápido possível ao GW.

Comunicação ponto a ponto (*Unicast*): comunicação direcionada há um nó sensor específico;

***Multicast*:** nessa comunicação os dados são enviados há um grupo específico que possui permissão para receber os dados.

***Convergecast (many-to-one)*:** este fluxo de dados caracteriza-se por ter várias origens dos dados, mas que possuem somente um nó como destino. As RSSFs hierárquicas são exemplos desse tipo de técnica, pois os nós são divididos em grupos e esses enviam os dados para um CH. Devido à grande quantidade de aplicações, os desenvolvedores podem construir protocolos de roteamento para atender a cada um dos tipos de fluxo de dados citados acima, podendo aproveitar de suas características e assim economizar em energia e tráfego de pacotes na rede [MACEDO].

Na próxima seção são apresentados os principais algoritmos de roteamento usados em RSSF.

3.3.1 Protocolos de Roteamento

Assim como os protocolos de roteamento em redes de computadores, os protocolos das RSSF também são classificados de acordo com sua característica de conhecimento da topologia, tais como estado do enlace (*link*

state) e vetor de distância (*distance vector*). Para elaborar a TR, os protocolos baseados em estado do enlace, necessitam do conhecimento completo de toda a rede. Enquanto que os protocolos do tipo vetor de distância requerem apenas o conhecimento dos seus vizinhos para construção da TR [ALMEIDA].

Além da classificação quanto a topologia os protocolos de RSSF, também podem ser divididos em protocolos reativos e proativos. Protocolos reativos constroem a TR sob demanda, ou seja, somente quando houver a necessidade de uma comunicação que esses protocolos estabelecerão o melhor caminho até o destino. Já os protocolos proativos todos os dispositivos da rede já possuem o conhecimento da TR, permitindo que quando houver a necessidade de troca de tráfego os dados sejam enviados imediatamente, pois a tabela já se encontra disponível para determinar o melhor caminho [MACEDO].

A exemplo de protocolo baseado em estado do enlace, pode-se destacar o *Dynamic Source Routing* (DSR), devido a fase de descoberta de topologia que permite divulgar qual a qualidade do sinal da rota. Assim os nós sensores utilizaram a rota cuja qualidade seja a maior, evitando possíveis *links* que estejam oscilando [JOHNSON].

O *Destination-Sequenced Distance Vector* (DSDV) envia periodicamente para seus vizinhos as atualizações contendo suas rotas e respectivamente o número de *hops* para cada rota. Esse protocolo em relação aos protocolos *link state* destaca-se por possuir uma maior eficiência computacional e maior simplicidade [LEITE, ABOLHASAN].

Segundo Abolhasan o protocolo *Optimized Link State Routing* (OLSR) é o mais amplamente utilizado em redes que usam protocolos proativos. O OLSR foi projetado para realizar o roteamento *hop by hop* e orientado a tabelas de roteamento. Assim como outros algoritmos baseados no estado do enlace, cada nó mantém uma visão completa da topologia de rede por meio de atualizações constantes enviadas pelos equipamentos configurados com o OLSR.

De acordo com ABOLHASAN, são apresentados protocolos de roteamentos reativos, mas o mais difundido e que obtém o melhor desempenho é o *Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing* (AODV). Esse protocolo de roteamento foi criado com as características de rápida adaptação às mudanças topológicas, baixo processamento, consumo de memória e consumo de banda.

O protocolo *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH) foi projetado com um objetivo principal, reduzir o consumo de energia dos NS [MACEDO]. O LEACH foi desenvolvido para redes do tipo homogêneas, ou seja, NS com as mesmas características de hardware, que utiliza os ciclos para os quais são necessários para formar os CH. O CH é responsável por encaminhar os dados dos NS e outros CH para o próximo CH, até alcançar a base ou GW. O algoritmo realiza o balanceamento do consumo de energia entre os NS da rede, permitindo aumentar o tempo de vida da rede. O próprio algoritmo é responsável também por definir um coordenador ou CH, para que esse repasse para os seus vizinhos a mensagem de sincronização, propagando o início do ciclo [MACEDO].

As rotas determinadas pelo *Directed Diffusion* são criadas a partir de canais de comunicação estabelecidos entre os CHs e GW, ou entre os nós sensores e o nó sorvedouro [BALUZ]. Este protocolo implementa dois conceitos de roteamento, são eles: o roteamento centrado nos dados e a agregação de dados. No roteamento centrado nos dados ocorre através de uma requisição de informação de interesse, tais como uma aplicação realizado a requisição para a rede. O exemplo de funcionamento pode ocorrer quando algum nó sensor da rede deseja enviar uma mensagem a outro nó da rede, assim esse envia esta mensagem ao nó solicitante da mensagem [BALUZ].

No próximo capítulo é descrito o planejamento e configurações realizadas para a aplicação de um a estratégia de roteamento que é proposta principal do projeto.

Capítulo 4

Configuração, Planejamento e Arquitetura da RSSF

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados para a modelagem do *setup* experimental, *Site Survey* e a descrição lógica do algoritmo de roteamento desenvolvido. Nas seções 4.1 e 4.2 são apresentados os *hardwares* e os *softwares* para o planejamento do *Site Survey* e na 4.3 são descritos o funcionamento e os testes do algoritmo de roteamento.

4.1 Hardware e Software

Hardware

O principal *hardware* utilizado no projeto foram os módulos *RFbee* e *BE900*, que são descritos a seguir.

RFbee é constituído por um microcontrolador modelo AVR ATmega168 da *Atmel* e um transceptor CC1101 da *Texas Instruments*. O ATmega168 usa uma arquitetura *reduced instruction set computer* (RISC) de 8 bits, 1 KBytes SRAM, 512 Bytes EEPROM e 16 KBytes de memória *flash*. O CC1101 opera na frequência de 915 MHz, faixa de frequência *Industrial Scientific and Medical* que são as bandas reservadas internacionalmente para o desenvolvimento Industrial, científico e médico com baixo consumo de energia e com uma potência de transmissão máxima de 10 dBm. Utiliza-se o *RFbee* versão v1.1, fabricado pela *Seeed Studio* (figura 12).

Figura 12: RFbee



Fonte: Seeed Studio

BE900 é constituído por um microcontrolador modelo AVR ATmega328 da *Atmel* e um transceptor CC1101 da *Texas Instruments*. O AVR *Atmega 328* tem 8 bits com alto desempenho e baixo consumo, com 32 KBytes de ROM, 2 KBytes de RAM, 1 KBytes de EEPROM e clock de 8 MHz. O transceptor CC1101 possui um filtro passa faixa para maior sensibilidade e menor interferência de ruídos, ajustado para operar na banda de 915 MHz (902 - 907,5 MHz e 915-928 MHz). O *BE900* (figura 13) é fabricado pela *Radioit*.

Figura 13: BE900



Fonte: Radioit

UartSBee, versão 4 é o adaptador *universal serial bus* (USB) fabricado pela *Seeed Studio*. Ele (figura 14) é constituído por um *chip* modelo FT232RL da *Future Technology Devices International* (FTDI). Este adaptador permite a realização do *upload* do *firmware* e interface entre *gateway* e a rede de sensores.

Figura 14: UartSBee



Fonte: Seeed Studio

A antena omnidirecional da KLC, figura 15, é a utilizada em conjunto com o *BE900*.

Figura 15: Antena Omnidirecional



O módulo de desenvolvimento DK103 possibilita a integração entre os módulos de RF e os sensores, tais como temperatura, umidade e luminosidade. Neste projeto, todos os CHs e NS são conectados no DK103 da Radioit (figura 16).

Figura 16: DK103



Fonte 1: Radioit

Para alimentação do DK utiliza-se uma bateria modelo GP12-7SE de 12 volts com 7 Ah do fabricante *Powersafe* (figura 17).

Figura 17: Bateria



Fonte: Powersafe

Os divisores de sinal (*Power Splitter*) utilizados são os modelos ZN8PD1-53-S+ (figura 18) e ZFRSC-123-S+ (figura 19) da *Mini-Circuits*. O primeiro modelo possui uma porta comum de entrada do sinal de RF e oito portas de saída. Segundo o fabricante *Mini Circuits* o mesmo sinal que entra é multiplicado pelas portas de saída preservando sua amplitude. O segundo modelo possui uma porta de entrada e duas de saída.

Figura 18: ZN8PD1-53-S+



Fonte: Mini-Circuits

Figura 19: ZFRSC-123-S+



Fonte: Mini-Circuits

Os atenuadores de sinal RF são dispositivos que reduzem a potência e/ou amplitude de um sinal. Foram utilizados quatro modelos distintos:

- 1) O modelo 8496B *Attenuator* 110 dB (figura 20) da *Agilent* com capacidade de atenuação entre o 0-110 dB com intervalos de 10 dB.
- 2) O modelo 47-30-33 (ver figura 21) da *Weinschel*, com capacidade de atenuação fixa de 30 dB.
- 3) O modelo 50R-019 SMA da *JFW Industries* (figura 22), com capacidade de atenuação entre 0-10 dB, com intervalos de 1 dB,
- 4) O modelo e 50R-029 SMA (figura 23), da *JFW Industries* com capacidade de 0 -70 dB, com intervalos de 10 dB.

Figura 20: Atenuador 8496B



Fonte: Keysight

Figura 21: Atenuador 47-30-33



Fonte: Weinschel

Figura 22: Atenuador 50R-019



Fonte: JFW Industries

Figura 23: Atenuador 50R-029



Fonte: JFW Industries

O *notebook* utilizado neste trabalho é modelo *Aspire 3050* da *Acer* (figura 24), com 1 GB de memória RAM, 80 GB de HD e processador AMD *Sempron 3600+*.

Figura 24: Aspire 3050



Fonte: Acer

Software

O *firmware* implementado neste projeto é baseado no disponibilizado pelo *Radiuino* versão 1.0 [ASSUMPCAO] que é uma plataforma de código aberto para prototipagem usada em RSSF. Ela é constituída por um conjunto de *Hardware* e *Software*, funcionando através de um microcontrolador e um transceptor, podendo também incorporar outros módulos de *hardware* conforme a aplicação, tais como sensores de presença, luminosidade, temperatura, entre outras. O *Radiuino* possui uma implementação de *software* dividida em cinco camadas: Física, Acesso, Rede, Transporte e Aplicação. A plataforma *Arduino IDE* 1.8.5 possibilitou a manipulação do *firmware*, bem como o *upload* desse para os CH e NS.

O *notebook* é o GW e neste um *software* em Python foi implementado para permitir o envio e recebimento de todas as mensagens, bem como o de gerenciar todos os CH da rede.

O sistema operacional utilizado foi o *Xubuntu* 16.04 LTS baseado no *Linux Ubuntu*, e permitiu que todos os *softwares* deste projeto fossem instalados.

4.2 Site Survey – (SS)

A seção inicia com a apresentação da importância do SS para uma RSSF, na sequência é discutido onde e como ele foi planejado para os testes.

O *site survey* é a verificação técnica nos locais onde serão instalados os NS. Sua finalidade é dimensionar a área e identificar o local mais apropriado para a instalação dos NS e CH, para que estes tenham uma qualidade de sinal aceitável na recepção.

Para um bom funcionamento da comunicação RF é fundamental conhecer o ambiente onde os equipamentos da rede devem ser instalados. A caracterização do ambiente através da RSSI deve ser obtida com os módulos RF. Com as medidas da RSSI podem-se encontrar quais pontos de uma determinada área é mais susceptível as possíveis interferências, assim como os seus pontos de sombra, em que não há a possibilidade de receber o sinal de RF, descobrindo assim, a distância ideal máxima entre o GW e o CH, permitindo um planejamento eficaz do SS. Em caso de não realização do planejamento do SS, a comunicação da RSSF pode ficar parcialmente ou totalmente comprometida ou ineficaz.

A região escolhida para realização dos testes, é localizada à leste da cidade de São Paulo, no município de Santa Isabel [EMPLASA], em que há uma grande diversidade topográfica, com relevos planos e montanhosos. Foi escolhida uma área de plantio de eucalipto (figura 25), tendo uma topografia montanhosa. A escolha do eucalipto ocorreu por ser a cultura mais plantada no território nacional, segundo dados do IBGE [FLORESTAL] e, que há uma alta probabilidade de incêndios florestais. Geralmente as plantações de eucalipto, assim como outras culturas, tais como mogno, respeita um espaçamento entre as árvores, por exemplo de 3x3 metros [PIZA], permitindo assim, a existência de um corredor (figura 26), facilitando a propagação do sinal e portanto a comunicação de RF entre os CHs mais distantes.

Figura 25: Plantação de Eucalipto



Figura 26: Corredor de Eucalipto



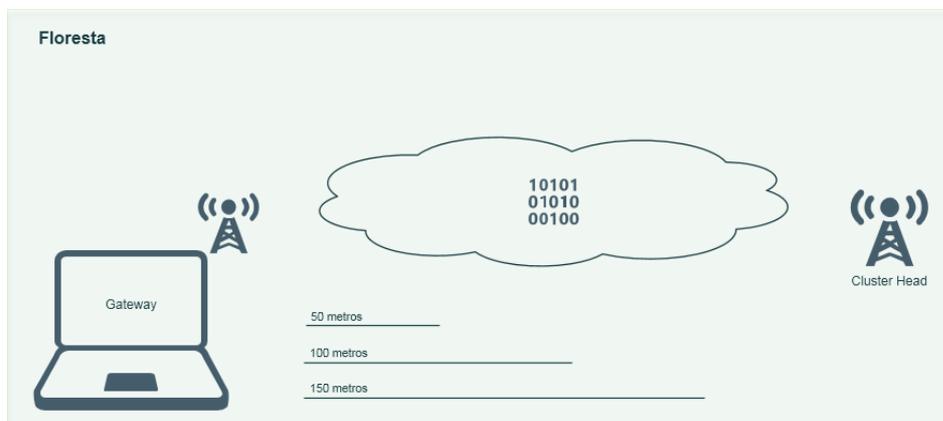
Para elaboração do *site survey* foi adotado o uso de um GW e CH (figura 27), ambos configurados para transmitir em potência de 10 dB para obter a distância máxima aceitável e com boa qualidade de sinal. O GW foi instalado em um ponto fixo com altura de 1 metro em relação ao solo, para minimizar possíveis interferências no sinal, oriunda de possíveis obstáculos espalhados ao longo do solo. O CH também respeitou a altura de 1 metro, sendo instalados em diferentes pontos, para identificar melhor qualidade na comunicação entre CH e GW.

A RSSI foi obtida nas duas direções (*downlink*, *uplink*) da comunicação entre o GW e o CH.

Foram realizados 3 testes de SS, sendo que no teste 1 foi feito a uma distância de 50 metros entre o GW e o CH, o teste 2 a uma distância de 100 metros e o teste 3 com uma distância de 150 metros (figura 27). Para validar a qualidade de sinal nesses três testes o GW gerou uma sequência de 1000 pacotes e a cada pacote recebido pelo GW foi registrado o valor da RSSI e ao

final do teste, apresentou-se um resumo com os seguintes dados: potência média de *downlink* e *uplink*; potência mínima e máxima de *downlink* e *uplink* e a quantidade de pacotes perdidos.

Figura 27: Topologia para SS



São descritos a seguir os 3 testes realizados para a obtenção dos parâmetros referentes ao RSSI, PER e Atraso que serão apresentados numericamente no Capítulo 5.

Teste 1: o CH é instalado a uma distância de 50 m em relação ao GW

Teste 2: o CH é instalado a uma distância de 100 m em relação ao GW

Teste 3: o CH é instalado a uma distância de 150 m em relação ao GW

Estes testes foram importantes para o planejamento do SS, permitindo identificar a melhor localização geográfica e distância para instalação do GW e CHs. Com isso foi possível realizar os demais testes que serão apresentados na próxima seção.

4.3 Forest Routing Protocol - FRP

Nesta seção é descrita em detalhes a métrica, funcionamento e os cenários de validação do FRP. Para validar seu funcionamento foram criados cenários testados em laboratório e *in loco*, modelando uma rede em operação sem falha e com falha. Na seção 4.3.1 descrevem-se a métrica e o funcionamento do FRP. Na seção 4.3.2 apresentam-se os cenários de validação.

4.3.1 Métrica e Funcionamento do FRP

Métrica

O FRP foi desenvolvido baseado na estratégia de roteamento de protocolos do tipo *link state* e *distance vector*. O FRP utiliza o número médio de *hops* (H) e a qualidade de sinal (RSSI) como uma métrica para determinar a melhor rota entre os CHs e GW. Com a topologia em malha definida pode-se calcular os parâmetros caminho mínimo baseado no H e RSSI médio para cada rota estabelecida, permitindo assim que o GW possa transmitir os dados pela melhor rota (menor custo).

A topologia pode ser representada por uma matriz de conectividade (M_c) que pode resultar em uma Matriz de Caminho mínimo (M_c) e RSSI mínimo (M_r) para o cálculo do H e RSSI. Por exemplo na figura 28, para uma topologia 2x2 é representada por uma matriz de 4 linhas e 4 colunas, representando os CHs da rede e seus respectivos enlaces. Quando houver um enlace ligando um CH ao outro, representa-se na matriz por '1' e quando não houver ligação, representa-se por '0'. Para obter a matriz de caminho mínimo (M_c), primeiramente deve ser considerado que cada CH gera fluxo de dados para todos os outros CHs, menos para ele próprio e adota o menor caminho para enviar cada fluxo de tráfego gerado ao seu destino. Assim o fluxo de tráfego gerado pelo CH 1 com destino no CH 2, tem como caminho mínimo 2 *hops* e um valor de RSSI de 10 dBm.

Após os cálculos de quantos *hops* mínimos e respectivos valores de RSSI entre os CHs da rede, é realizado o somatório de todos estes H dividido pelo número de fluxos de dados gerados por todos os CHs que constituem uma determina topologia em malha ($N*(N-1)$).

A topologia de rede utilizada neste trabalho segue o modelo da figura 28 e para modelos de topologia maior segue exemplos na figura 29 (a, b e c).

Figura 28: Métrica de custo

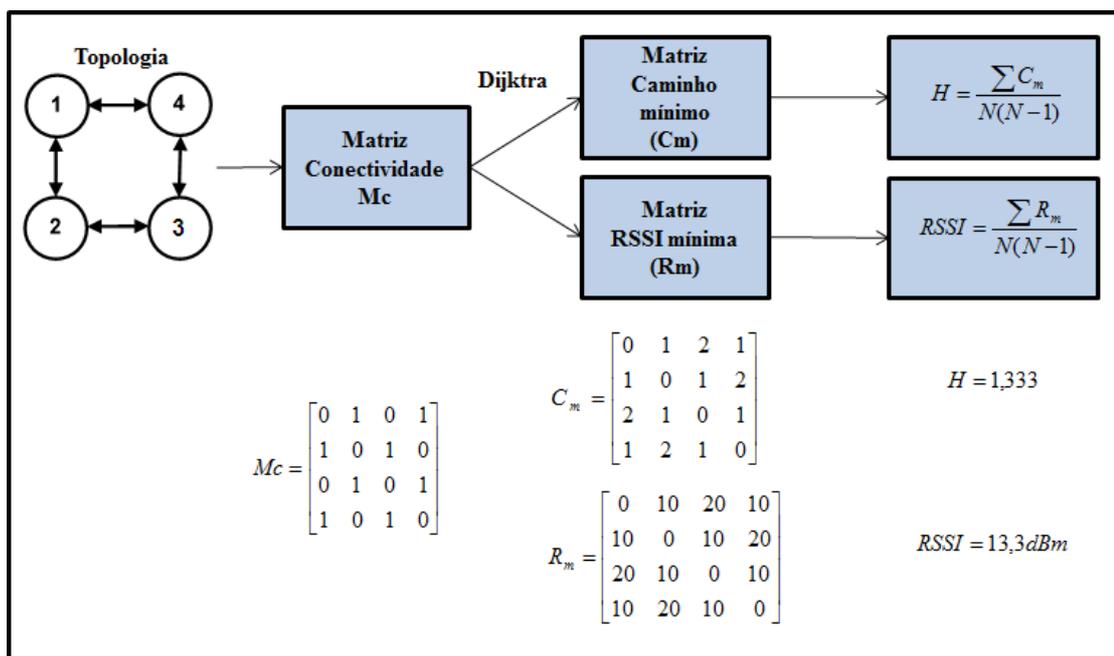
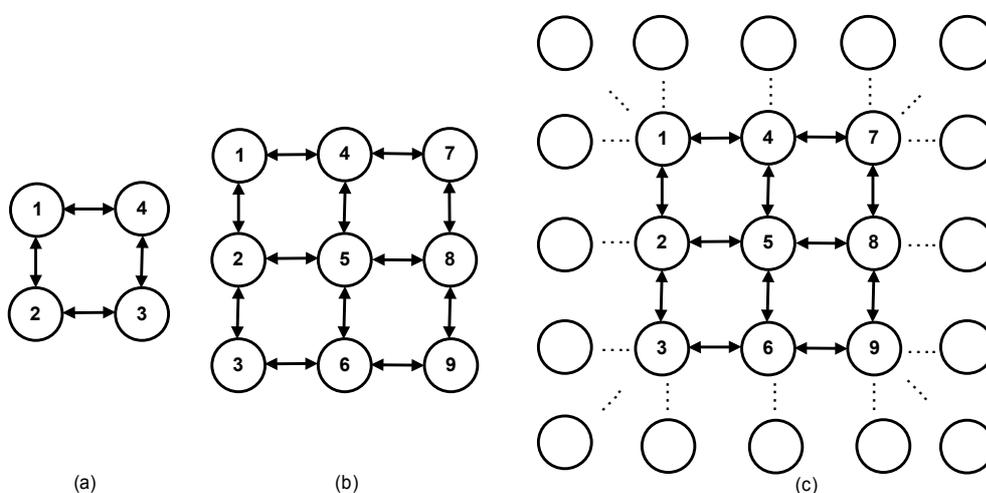


Figura 29: Modelos de topologia em malha



A escolha da rota alternativa está relacionada também ao RSSI e número de *hops*, que juntos serão utilizados pelo algoritmo de roteamento para apresentar o segundo melhor caminho em caso de falha na rede [MARTINS].

Funcionamento do FRP

A implementação do FRP foi dividida em duas camadas para melhor processamento e armazenamento de tabelas de roteamento: a primeira camada é executada no GW, pois esse possui capacidade de processamento e armazenamento de informações superior ao CH; a segunda camada é executada

nos CHs, que possuem características limitadas de *hardware*, tais como baixo processamento e armazenamento. Sendo assim, o GW torna-se o responsável pelo roteamento da RSSF, e sua função é o de criar e o de manter a TR para determinar as melhores rotas da rede. Para criar a TR, o GW recebe informações dos CHs, tais como quais os CHs instalados na rede e quais seus custos. O FRP também permite que os CHs possam encaminhar as mensagens oriundas dos NS com destino ao GW, ou seja, o CH será como um roteador nesta rede, responsável por encaminhar os dados até o GW. O CH é um NS sem os sensores responsáveis pela leitura das grandezas físicas, o FRP não foi desenvolvido para realizar a escolha de um CH na rede, essa escolha é estabelecida pelo projetista da rede.

O *firmware* implementado nos CHs é igual ao do GW e realiza as seguintes rotinas:

1. Descobrir os vizinhos que estão ao seu alcance e seus respectivos endereços;
2. Medir a qualidade de sinal para cada um dos seus vizinhos;
3. Enviar essas informações para o GW;

O *firmware* implementado nos NS é igual ao do CH e realiza as seguintes rotinas:

1. Coletas de grandezas físicas, tais como temperatura, umidade, luminosidade entre outras;
2. Encaminham esses dados coletados para o CH;

A fim de possibilitar a implementação do FRP, são necessárias adaptações no *firmware* original da plataforma Radiuino. Necessita-se criar uma nova estrutura na camada de rede, conforme apresentado na figura 30.

Figura 30: Header FRP

Header - Forest Routing Protocol					
1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	8 byte	8 byte
Destination	Type of Packet	ID	Reserved	Table of Neighbors	Table of Forward
Endereço Destino	Discovery Neighbor Send Table Neighbor Reply Neighbor	Endereço Local	Reservado	ID dos vizinhos e seu RSSI (downlink e uplink)	ID dos hops

A seguir são apresentadas as funções de cada campo:

Destination: Endereço ID do destino e como exemplo o 1 corresponde ao ID do GW e o 255 que indica *broadcast*;

Type of Packet: Esse campo pode ter até três valores, que corresponde ao tipo de pacote. O primeiro é *DiscoveryNeighbor* (DN) valor 1 que indica ser um pacote destinado ao CH para esse identificar quem são seus vizinhos. O segundo é *SendTableNeighbor* (STN) valor 2 que também é direcionado ao CH, mas neste caso solicitando que seja enviado quem são seus vizinhos. O terceiro é *ReplyNeighbor* (RN) valor 3 que é uma resposta do vizinho do CH;

ID: Endereço local, onde cada CH deve colocar neste campo o seu ID.

Reserved: Campo reservado para futuras implementações;

Table of Neighbors (TFN): Este campo é utilizado apenas pelo CH para armazenar o ID e custo do seu vizinho. Essa tabela permite que o GW crie sua TR e tenha conhecimento de toda a rede, tais como os valores de custo entre cada CH da rede. O tamanho desse campo é de 8 bytes, possibilitando um registro máximo de registro de ID igual 4, pois na topologia em malha cada CH terá exatamente no máximo 4 vizinhos;

Table of Forward (TF): Para que o pacote seja roteado na rede, o GW coloca nesse campo quais são os CHs por onde o pacote deve passar até chegar ao seu destino final.

Funcionamento do FRP no GW: GW é o responsável por iniciar a comunicação com a rede, neste momento denomina-se fase de descoberta da rede, pois seu objetivo é obter informações sobre a rede para construir sua TR. Esse início é sinalizado com o envio de dois pacotes oriundos do GW. O primeiro pacote é uma mensagem de descoberta de vizinhos DN e o segundo pacote é uma mensagem para envio da tabela de vizinhança STN. O trecho do código em *Python* que gera o pacote DN, pode ser visto no algoritmo 1:

Algoritmo 1

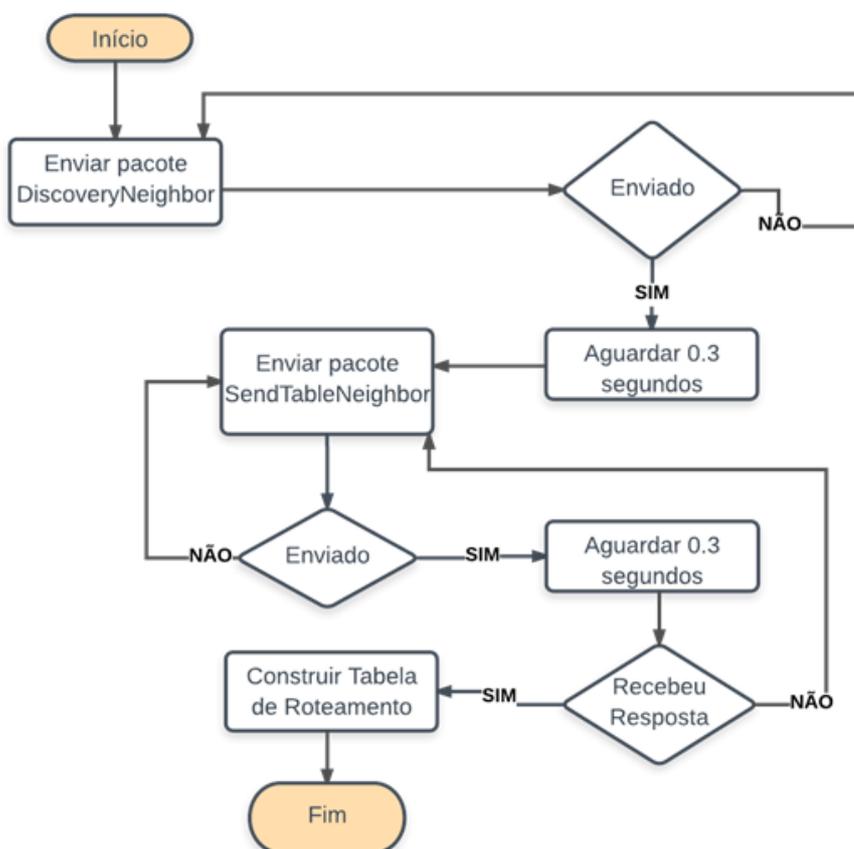
```

1:   for j in range(0,w):
2:     PacoteTX[9] = 1
3:     for i in range(1,53):
4:       TXbyte = chr(PacoteTX[i-1])
5:       ser.write(TXbyte)
6:       time.sleep(0.3)
7:   for j in range(0,w):
8:     PacoteTX[9] = 2
9:     PacoteTX[10] = 1
10:    for i in range(1,53):
11:      TXbyte = chr(PacoteTX[i-1])
12:      ser.write(TXbyte)
13:      time.sleep(0.3)

```

As linhas de 1 a 6 correspondem ao envio do primeiro pacote (PKT) do tipo DN. Essa mensagem solicita ao CH que esse identifique quais são os CHs vizinhos. O algoritmo aguarda 0.3 segundos antes de encaminhar o pacote STN, que corresponde as linhas de 8 a 12 e sua função é solicitar ao CH que ele envie sua tabela de vizinhos.

Figura 31: Fluxograma do GW



Na figura 31 o GW envia o pacote solicitando ao CH o qual realiza a descoberta de sua vizinhança e após o período de 0.3 segundos, o GW envia o segundo pacote solicitando ao CH que seja enviado a sua tabela de vizinhos. Assim que o GW receber essa resposta, o mesmo inicia a construção da TR e o processo se repete até que todos os CHs respondam quem são seus vizinhos, para que o GW possa ter o conhecimento total da rede e sempre manter a TR atualizada. Ao construir a TR o GW executa um algoritmo de melhor caminho, tais como o *Dijkstra*, para calcular as rotas até os CHs, como já mencionado anteriormente, o algoritmo utilizará como parâmetro a qualidade de sinal em função do RSSI e o número de saltos.

Funcionamento do FRP no CH: A implementação do FRP ocorreu no *firmware* do CH e houve a necessidade de dividir em blocos o algoritmo FRP, apenas para exemplificar o seu funcionamento. Ao receber uma mensagem do GW o CH analisará qual é o tipo de pacote, pois para cada pacote existe uma ação diferente. O primeiro trecho do algoritmo (algoritmo 2) a ser analisado corresponde ao pacote do tipo DN.

Algoritmo 2

```
1: if(pkt->NetHdr[0]==my_addr)
2:   if(pkt->NetHdr[1]==1)
3:     pkt->NetHdr[0]=255;
4:     pkt->NetHdr[2]=my_addr;
5:     Mac.send(pkt);
```

A linha 1 verifica se o pacote é direcionado para esse CH e caso seja, as linhas de 4 a 5 são executadas. Caso não seja, o CH verifica se o seu ID corresponde com algum ID informado na tabela TF, afim de descobrir se este pacote deve ser reenviado a rede ou descartado. A linha de número 2 verifica se o pacote oriundo do GW é do tipo DN e caso seja, então, as linhas 3 e 4 são executadas. Nessas linhas uma nova mensagem do tipo *Hello* é gerada pelo CH e o destino é um endereço de *broadcast*, para que todos os seus vizinhos ao seu alcance possam receber e processá-las.

Figura 32: Pacote Hello



Na figura 32 descreve-se o fluxo do pacote do tipo DN que foi gerado pelo GW e sua função é solicitar que o CH identifique quem são seus vizinhos. O primeiro passo do CH é verificar se ele é o destino, caso não seja o pacote será analisado na TF, mas caso esse CH seja o destino uma mensagem do tipo Hello será encaminhada a rede, usando como endereço de destino um *broadcast*.

O próximo trecho do algoritmo (algoritmo 3) a ser analisado corresponde ao PKT de resposta enviado pelos CHs, vizinhos que receberam a mensagem de *Hello*, enviada de acordo com a explicação do fluxograma do pacote *Hello*.

Algoritmo 3

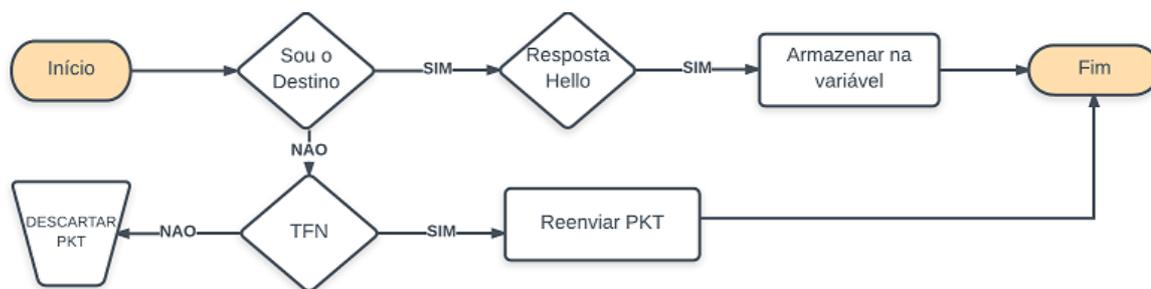
```

1:      if(pkt->NetHdr[0]==my_addr)
2:      if(pkt->NetHdr[1]==3)
3:      if(pkt->NetHdr[4]==1)
4:      Nbr1=pkt->NetHdr[2];
5:      Nbr1C=pkt->NetHdr[5];
6:      if(pkt->NetHdr[4]==2)
7:      Nbr2=pkt->NetHdr[2];
8:      Nbr2C=pkt->NetHdr[5];
9:      if(pkt->NetHdr[4]==3)
10:     Nbr3=pkt->NetHdr[2];
11:     Nbr3C=pkt->NetHdr[5];
12:     if(pkt->NetHdr[4]==4)
13:     Nbr4=pkt->NetHdr[2];
14:     Nbr4C=pkt->NetHdr[5];
  
```

Assim como todo pacote que chega ao CH, existe uma verificação se ele é o destino. A linha de número 2 indica que é uma mensagem de seu vizinho e deverá ser armazenada com as informações recebidas, tais como ID e RSSI. Esse armazenamento é realizado nas variáveis (Nbr1, Nbr1C ...) localizada na memória RAM do CH.

A figura 33 representa o fluxograma de processamento da mensagem que ocorre no CH ao receber uma resposta de seu vizinho:

Figura 33: Resposta ao Hello



Diferente dos demais blocos do algoritmo, este não envia uma nova mensagem para a rede e sim apenas armazena as informações enviadas por seus vizinhos. Essas informações ficam temporariamente salvas na memória RAM do CH e quando o GW solicitar essas informações o mesmo encaminhará. Esse próximo bloco de algoritmo que solicita essas informações será descrito nas próximas linhas.

O algoritmo 4 é executado quando o CH precisar responder ao GW sua tabela de vizinhos e neste trecho do algoritmo encontra-se um detalhe para que o pacote possa retornar seguindo a mesma rota pelo qual chegou até o CH.

Algoritmo 4

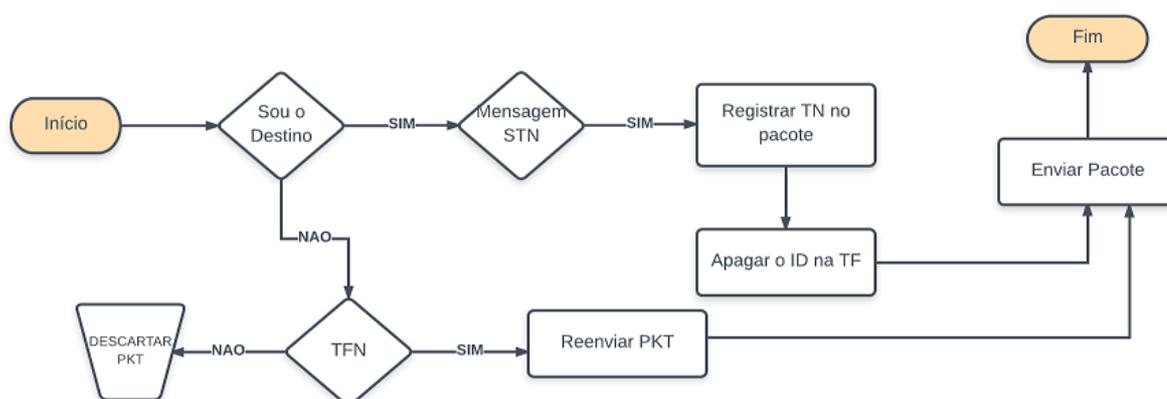
```

1:     if(pkt->NetHdr[0]==my_addr)
2:     if(pkt->NetHdr[1]==2;
3:         pkt->NetHdr[0]=1;
4:         pkt->NetHdr[2]=my_addr;
5:         pkt->NetHdr[4]=Nbr1;
6:         pkt->NetHdr[5]=Nbr1C;
7:         pkt->NetHdr[6]=Nbr2;
8:         pkt->NetHdr[7]=Nbr2C;
9:         pkt->NetHdr[8]=Nbr3;
10:        pkt->NetHdr[9]=Nbr3C;
11:        pkt->NetHdr[10]=Nbr4;
12:        pkt->NetHdr[11]=Nbr4C;
13:        pkt->NetHdr[12]=pkt->NetHdr[17];
14:        pkt->NetHdr[13]=pkt->NetHdr[18];
15:        pkt->NetHdr[14]=pkt->NetHdr[19];
16:        Mac.send(pkt);
  
```

Após a confirmação que essa mensagem é direcionada ao CH, conforme linha 1 o pacote é processado e segue para análise da linha 2. O valor 2 nesta linha indica que esse pacote é do tipo STN, ou seja, mensagem para enviar a tabela de vizinhos para o GW. As linhas de 5 e 6 dão um exemplo de como

registrar os valores aprendidos nas variáveis de vizinho no pacote que será enviado ao GW. Para fins de teste e considerando nosso cenário de topologia de rede 2x2, foram reservadas as linhas de 13 a 15 para armazenar a rota de volta do pacote até o GW. Esses valores são fixos e inseridos pelo GW e lidos somente quando esse bloco do algoritmo for lido, ou seja, apenas para as mensagens do tipo STN.

Figura 34: Pacote STN



A figura 34 representa o fluxo da mensagem do tipo STN ao ser recebida pelo CH. Dois processos importantes são realizados nesse trecho do algoritmo, no primeiro processo todos os valores registrados nas variáveis que foram reservadas para armazenar informações sobre seus vizinhos, devem ser copiados para o pacote. O segundo processo é apagar seu ID da TF para que o pacote possa ser entregue a rede e conforme já mencionado acima nesta seção, faz-se necessário apagar o ID para evitar que ocorra *loop* na rede.

A última parte do algoritmo é responsável pelo processamento da mensagem de *broadcast*, gerada pelo seu CH vizinho. O algoritmo 5 apresenta as linhas:

Algoritmo 5

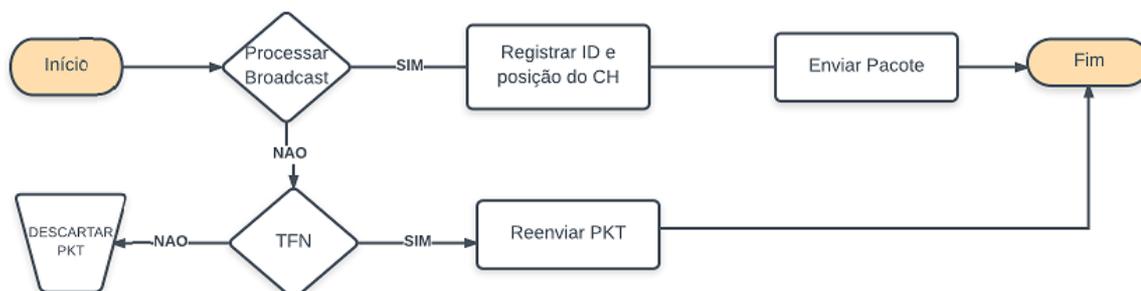
```

1: if(pkt->NetHdr[0]==255)
3:   pkt->NetHdr[0]=pkt->NetHdr[2];
4:   pkt->NetHdr[1]=3;
5:   pkt->NetHdr[2]=my_addr;
6:   pkt->NetHdr[4]=1;
8:   Mac.send(pkt);

```

A mensagem de *broadcast* é enviada pelo CH para solicitar o ID e medir o RSSI em relação ao seu vizinho. A função do CH vizinho ao receber essa mensagem é de registrar seu ID e informar o valor de RSSI.

Figura 35: Mensagem Broadcast



A figura 35 apresenta o processamento da mensagem de *Hello* no CH vizinho, ou seja, essa mensagem chega no vizinho para solicitar a ele que seja enviado seu ID e RSSI. A informação de RSSI será salva no momento em que o CH solicitante da mensagem receber o pacote, pois assim poderá consultar o nível de potência do sinal recebido desse vizinho.

4.3.2 Cenários de validação do FRP

Conforme testes realizados na seção 4.2, foi definido que a distância máxima aceitável entre os CHs deve ser de 100 metros. Além das distâncias, outras características da rede foram consideradas para permitir a execução e validação do FRP, possibilitando a escolha do melhor caminho entre origem e destino. Essas características formam o escopo e estão definidas a seguir:

1) Topologia: A topologia em malha para permitir a possibilidade de diferentes caminhos e melhor robustez em caso de falha;

2) Elementos: Quatro CHs para representar uma topologia 2x2 e um NS. Todos os elementos da rede são fixos, com exceção do NS que para a realização desse projeto foi necessária sua movimentação apenas para permitir que fossem realizados os experimentos e simulações de consulta;

3) Alcance: Cada CH conhecerá no máximo quatro vizinhos, devido a limitação física e capacidade de memória e processamento dos CHs serem mais limitados;

4) Validação: Os parâmetros utilizados para avaliar a estratégia de roteamento serão RSSI e quantidade de *hops*;

5) Comunicação: Para otimização da rede, é gerado o menor fluxo tráfego possível para descoberta dos elementos da rede. O GW comunica-se com os CHs utilizando pacotes *unicast*. Enquanto, que os CHs trocam apenas o *broadcast* para um primeiro momento de comunicação com seus vizinhos e depois toda troca de dados é *unicast*. A comunicação do GW com os NS será no formato *unicast*, pois o GW já possui o mapeamento da rede;

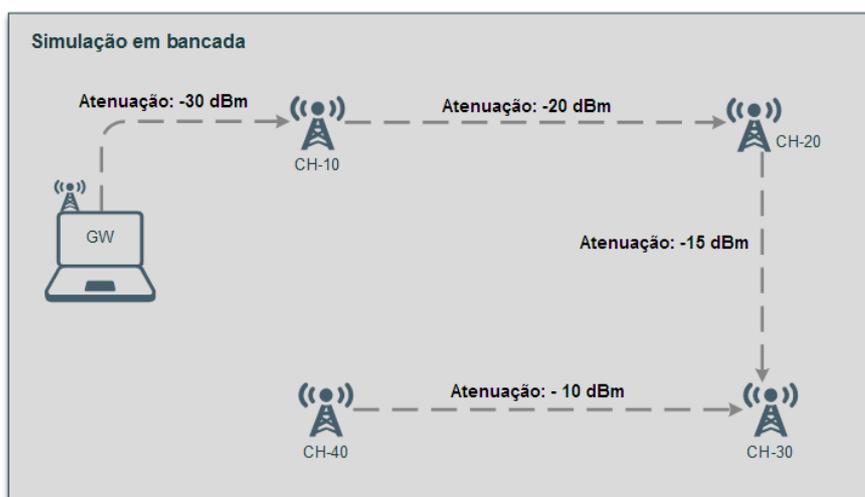
6) Tolerância a falhas: O protocolo permitirá que novos caminhos sejam usados em detrimento aos que apresentarem algum tipo de anormalidade e não estejam disponíveis.

Com o escopo definido, foram criado dois cenários de validação, sendo o primeiro uma simulação que ocorreu em bancada de laboratório e o segundo realizado *in loco*. Em ambos os cenários foram testadas possíveis falhas no CH para validação de rotas alternativas.

Cenário de validação 1

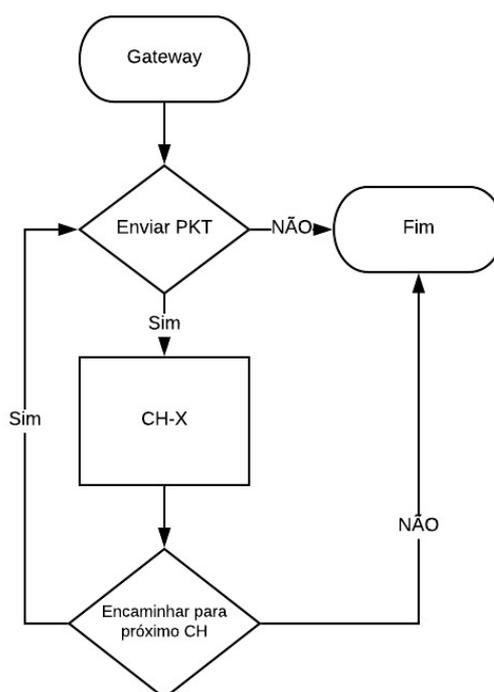
Devido à necessidade de um CH estabelecer comunicação apenas com o vizinho, houve a necessidade de se criar um ambiente que pudesse representar um ambiente real. Foi com essa necessidade que o primeiro cenário ocorreu na bancada de laboratório, utilizando os elementos *Power Splitter* e atenuadores, para simular as distâncias entre os CH. Se ligar os CHs e GW no *Power Splitter* sem o uso dos atenuadores, todos esses estariam se comunicando entre si e assim não seria possível simular o FRP. Para simular um ambiente conforme a topologia da figura 36, foi necessário a utilização dos atenuadores, pois na medida que se atenuava o sinal do CH, é como se estivesse posicionando esse a uma distância ainda maior, permitindo que o alcance se limite aos seus vizinhos e não a todos.

Figura 36: Topologia em Bancada



Neste laboratório simulou-se que cada CH tinha apenas um vizinho, assim foi possível a validação do encaminhamento de pacotes entre os CHs mais distantes do GW. Para identificação dos CHs esses foram nomeados como: CH-10, CH-20, CH-30 e CH-40. Para melhor compreensão dessa validação um diagrama de blocos (figura 37) foi criado para explicar a comunicação entre os CH instalados no laboratório. O Gateway envia um PKT para um CH-X, onde X representa os CHs 10, 20 30 ou 40. Quando o CH receber o PKT oriundo do Gateway, esse reenvia um novo pacote para um outro CH, ou descarta o PKT.

Figura 37: Diagrama de blocos para simulação em laboratório



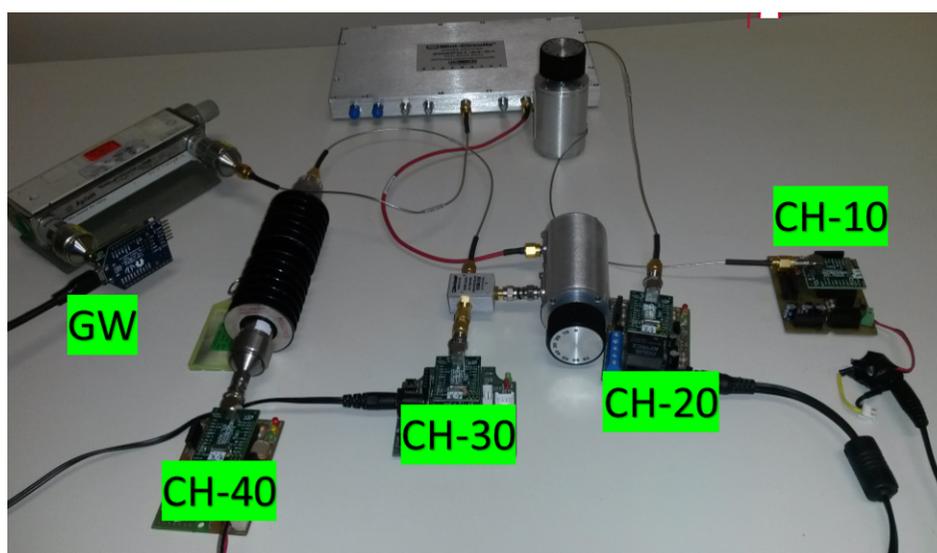
Foi estabelecido que seriam 5 pacotes de solicitação de descoberta de vizinhança e 200 pacotes para envio da tabela de vizinhança. Essa quantidade de pacotes foi determinada com o objetivo de validar a estratégia do algoritmo FRP. Neste primeiro cenário de validação, foi possível confirmar a eficiência do FRP através do ambiente simulado, pois permitiu que fossem representados os CH como se estivessem no ambiente real. O GW enviou o primeiro pacote para descoberta da rede ao CH-10 que ao receber o pacote gerou *broadcast* e neste exemplo somente o CH-20 é vizinho, portanto foi o único a receber. Quando o CH-20 respondeu à mensagem de *broadcast*, o CH-10 registrou em sua memória RAM, para que quando o GW solicitar o envio da TN esse já possa ser enviado. Na figura 38 segue um pequeno trecho extraído do software *Python* do resultado da descoberta de vizinhança do CH-10.

Figura 38: Descoberta cenário validação em laboratório

```
Sou o ID: 10  Vizinho: 20  Custo  45
```

No ambiente de simulação não registramos os valores de RSSI, pois o meio de comunicação estava atenuado o máximo possível para permitir apenas que os CHs pudessem ter apenas um vizinho, apenas a exceção do CH-20 e CH-30 que tinham dois vizinhos. A figura 39 apresenta uma foto da montagem do experimento em bancada, onde observa-se todos os 4 CH e o GW.

Figura 39: Ambiente do laboratório



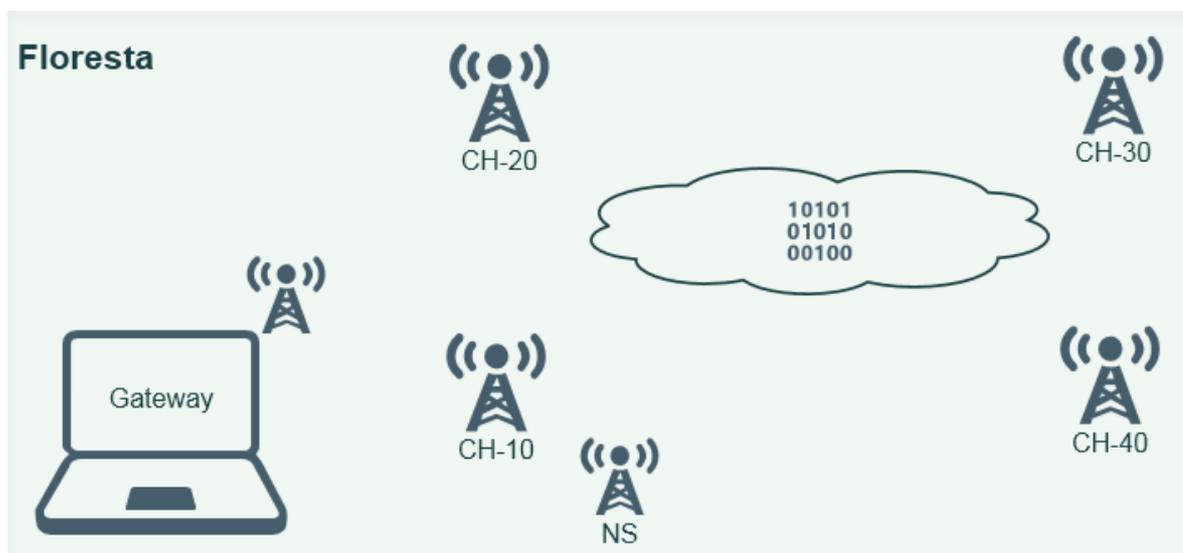
Para o cenário de validação *in loco*, as mesmas características físicas e elementos de *hardware* são utilizados. A topologia em malha 2x2 foi a considerada para a realização destes testes. Os resultados referentes aos

parâmetros PER, atraso e RSSI são utilizados para validar o algoritmo mesmo que ocorram as falhas nos CHs e estes serão apresentados e analisados no capítulo 5.

Cenário de validação 2

Quando a rede está em operação normal, ou seja, todos os CH funcionando conforme descoberta da rede, afirmamos que este é o cenário de validação sem falha. Entretanto, se houver uma falha na rede, tal como a queda de um CH, significa que houve mudança na rota e certamente a próxima rota escolhida foi a melhor, mas em relação a primeira esse é um cenário de validação com falha. A figura 40 apresenta uma topologia padrão utilizada nos próximos dois cenários de validação do FRP. O NS tem como objetivo realizar a leitura das grandezas físicas, tais como temperatura e umidade, uma aplicação instalada e desenvolvida no GW realizará a solicitação desses dados ao NS e esse por sua vez encaminhará para o CH mais próximo. O CH torna-se responsável por encaminhar essa mensagem até o GW, permitindo que essa informação seja interpretada e processada pela aplicação e disponibilizada para o usuário.

Figura 40: Topologia Cenário FRT



A) Sem falha

Neste primeiro cenário, os CHs não haviam trocado nenhuma informação na rede, ou seja, todos os CHs tinham acabado de serem ligados juntos com o *notebook*. Aqui o único CH que o GW tinha registrado para estabelecer comunicação inicial foi o CH-10 e esse foi o primeiro a receber um pacote para descoberta da rede. Analisando o CH-10, quando esse recepcionar o pacote será responsável por enviar um *broadcast* local apenas para os seus vizinhos que são alcançáveis. Foi estabelecido que seriam 5 pacotes de solicitação de descoberta de vizinhança e 200 pacotes para envio da tabela de vizinhança. Essa quantidade de pacotes foi determinada com o objetivo de validar a estratégia do algoritmo FRP. Neste caso e analisando a topologia acima, os vizinhos do CH-10 são o CH-20 e CH-40, logo esses são registrados pelo GW em sua tabela de rotas, após o CH-10 enviar a mensagem ao GW informando quem são seus vizinhos.

A figura 41 apresenta um pequeno trecho extraído do *software Python* como resultado da descoberta de vizinhos do CH-10.

Figura 41: Descoberta do CH-10

```
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -68.0 RSSI_Up: -64.5 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -68.5 RSSI_Up: -64.5 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -67.5 RSSI_Up: -65.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -68.5 RSSI_Up: -64.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -68.0 RSSI_Up: -64.5 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -63.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -67.5 RSSI_Up: -63.5 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -65.0 RSSI_Up: -60.5 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -66.0 RSSI_Up: -63.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -67.0 RSSI_Up: -64.5 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -70.0 RSSI_Up: -67.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -65.0 RSSI_Up: -61.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -66.0 RSSI_Up: -63.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -68.5 RSSI_Up: -65.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
Sou o ID: 10 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -60.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
```

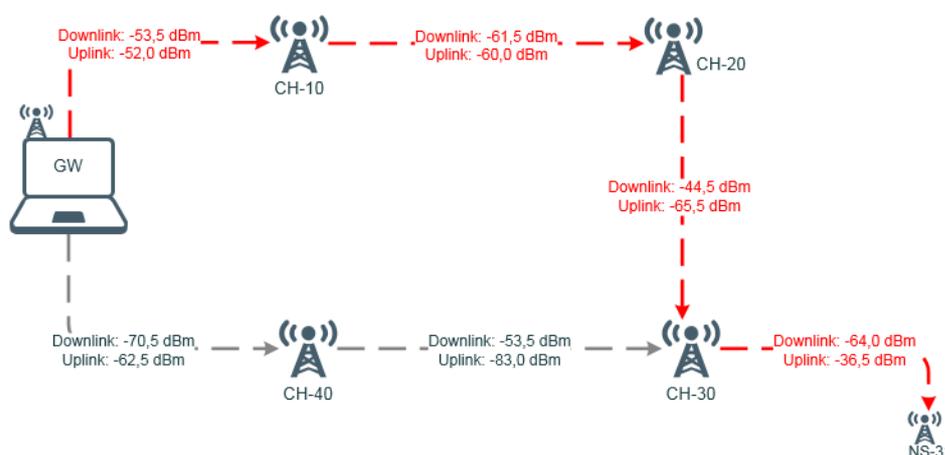
Nesta figura 41, percebe-se que o CH-10 possui dois vizinhos, são eles: o CH-40 e o CH-20 e seus respectivos valores de RSSI que serão avaliados no capítulo de resultados. Para todos os cenários foi adotado que o GW teria visada direta com os CH-10 e CH-20, para que tenha nesta primeira camada uma alternativa de caminhos caso o CH-10 venha apresentar alguma falha, tornando-o inacessível na rede.

B) Com falha

A topologia para este cenário é exatamente a mesma apresentada para descrever o cenário sem falha, com exceção que para simularmos uma falha haverá sempre um CH indisponível (desligamos para simular a falha), exigindo que a estratégia de roteamento utilize um caminho alternativo. Essa topologia foi desenvolvida e implementada *in loco*, ou seja, para validação do ambiente sem e com falha, utilizamos o ambiente real e não simulado.

A figura 42 apresenta a topologia do primeiro cenário alternativo e neste nota-se que o CH-40 encontra-se com falha e por isso não está ativo na rede. Para alcançar o NS-31 o GW não mais utilizará o melhor caminho que seria através do CH-10. Lembrando que a escolha desse melhor caminho havia sido realizada com base no custo dos seus enlaces, ou seja, até o destino NS-31 os enlaces com menor atenuação, foram através do CH-40. Todavia, esse CH apresentou uma falha e a alternativa para chegar até o CH-31 será através do CH-10, mesmo com um custo maior essa é a melhor opção no momento, enquanto que o CH-40 não se restabelece.

Figura 42: Falha CH-40



Foram enviados 500 pacotes para o NS-31 durante essa simulação de falha que ocorreu no CH-10. A estratégia de roteamento registrou e calculou os valores de RSSI em ambos os sentidos, *downlink* e *uplink*, de todos os enlaces até o NS-31 para que fosse possível conhecer melhor os custos totais de comunicação até o NS-31.

Figura 43: Rota Alternativa

ID: 31	30-N-D: -44,5	30-N-U: -35,5	10-20-D: -61,5	10-20-U: -60	20-30-D: -44,5	20-30-U: -65,5	10-G-D: -53,0	10-G-U: -52,5
ID: 31	30-N-D: -44,5	30-N-U: -35,5	10-20-D: -61,0	10-20-U: -60	20-30-D: -44,5	20-30-U: -65,0	10-G-D: -53,5	10-G-U: -52,5
ID: 31	30-N-D: -44,0	30-N-U: -35,5	10-20-D: -62,0	10-20-U: -60	20-30-D: -44,0	20-30-U: -64,5	10-G-D: -53,0	10-G-U: -52,5
ID: 31	30-N-D: -44,5	30-N-U: -35,5	10-20-D: -61,0	10-20-U: -60	20-30-D: -44,5	20-30-U: -65,5	10-G-D: -53,5	10-G-U: -52,5
ID: 31	30-N-D: -44,5	30-N-U: -35,5	10-20-D: -61,0	10-20-U: -60	20-30-D: -44,5	20-30-U: -64,5	10-G-D: -53,0	10-G-U: -52,5
ID: 31	30-N-D: -44,0	30-N-U: -35,5	10-20-D: -61,0	10-20-U: -59	20-30-D: -44,0	20-30-U: -65,0	10-G-D: -53,5	10-G-U: -52,5
ID: 31	30-N-D: -44,5	30-N-U: -35,5	10-20-D: -61,0	10-20-U: -60	20-30-D: -44,5	20-30-U: -65,0	10-G-D: -53,5	10-G-U: -52,5
ID: 31	30-N-D: -44,5	30-N-U: -35,5	10-20-D: -62,0	10-20-U: -60	20-30-D: -44,5	20-30-U: -64,5	10-G-D: -53,5	10-G-U: -52,5
ID: 31	30-N-D: -44,5	30-N-U: -35,5	10-20-D: -61,5	10-20-U: -60	20-30-D: -44,5	20-30-U: -64,5	10-G-D: -53,0	10-G-U: -52,5
ID: 31	30-N-D: -44,0	30-N-U: -35,5	10-20-D: -61,0	10-20-U: -60	20-30-D: -44,0	20-30-U: -64,5	10-G-D: -53,0	10-G-U: -52,5
ID: 31	30-N-D: -44,5	30-N-U: -35,5	10-20-D: -61,5	10-20-U: -60	20-30-D: -44,5	20-30-U: -65,0	10-G-D: -53,0	10-G-U: -52,5
ID: 31	30-N-D: -44,5	30-N-U: -35,5	10-20-D: -61,5	10-20-U: -60	20-30-D: -44,5	20-30-U: -65,0	10-G-D: -53,0	10-G-U: -52,5

A figura 43, indica que foi estabelecido com sucesso a comunicação com o NS-31 e consta o custo para cada enlace, possibilitando que o GW tenha sempre esses valores.

No capítulo 5 será apresentado e comentado os valores de RSSI desses enlaces, bem como o todo o processo de construção da TR para que o GW tenha o registro de toda a rede e conheça quais são as rotas alternativas em caso de falha na rede.

Capítulo 5

Resultados e comentários

Esta seção consolida todos os resultados obtidos durante os testes de SS e os cenários para validação do FRP propostos na seção 4.2 e 4.3, respectivamente, em forma de gráficos e de tabelas. Com os resultados deste capítulo, pode-se ter uma avaliação detalhada sobre a importância do planejamento do SS para a aplicação e também da eficiência da estratégia de roteamento implementada.

Para obtenção dos resultados foram realizados dois tipos de experimentos, sendo o primeiro, destinado ao SS da rede, com os resultados apresentados e descritos na seção 5.1; e o segundo, destinado a estratégia de roteamento com seus resultados apresentados e descritos na seção 5.2.

5.1 Resultados dos Testes 1, 2, 3 - SS

Os resultados do SS possibilitam que os CHs sejam instalados e posicionados geograficamente em pontos estratégicos em uma área no ambiente escolhido. Durante os testes foi reconfirmado (afirmado em teoria [LEAO]) que a topografia tem grande influência na comunicação RF. Com o SS *in loco*, a probabilidade de projetar uma RSSF com operação adequada, ou seja, propagando o sinal de RF para os pontos desejados com eficácia, é de 100%.

No ambiente florestal, além de sua topografia que é um fator que pode comprometer o desempenho da rede, tem-se outros fatores que também podem trazer impactos degradantes da operação da rede, tais como tipo de vegetação, clima da região, entre outros. Assim, a realização do planejamento personalizado do SS em função dessas características específicas do meio, torna-se essencial para o bom funcionamento da RSSF projetada.

Na floresta escolhida, nota-se que para a realização de uma cobertura completa da área, há a necessidade de se instalar antenas direcionais, para permitir um alcance maior e com maior qualidade entre os CHs.

No capítulo 4 (seção 4.2) foram propostos três testes de SS, para cada teste realizado são obtidos a RSSI, PER e atraso no CH e GW. Nos próximos gráficos (3 e 4) são apresentados os seus respectivos resultados.

1) RSSI

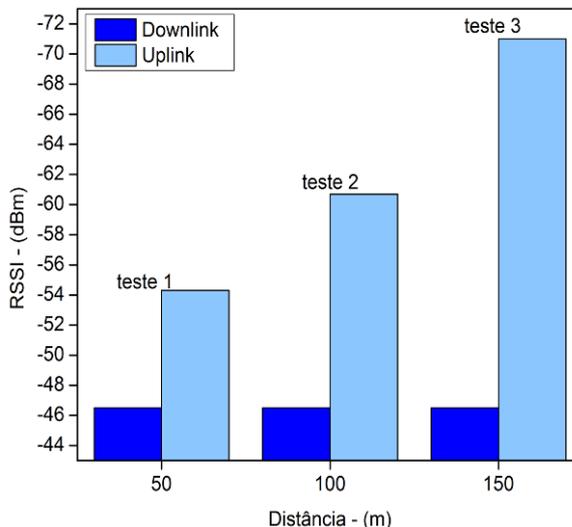
Na tabela 2 são apresentados os valores médios obtidos de RSSI *downlink* e *uplink*.

Tabela 2: Resultado do RSSI dos três testes

Teste	Potência	Downlink	Uplink
1	Mínima	-46.5 dBm	-56.5 dBm
	Média	-46.5 dBm	-54.3 dBm
	Máxima	-46.5 dBm	-53.0 dBm
2	Mínima	-46.5 dBm	-62.5 dBm
	Média	-46.5 dBm	-60.68 dBm
	Máxima	-46.5 dBm	-59.5 dBm
3	Mínima	-46.5 dBm	-75.5 dBm
	Média	-46.5 dBm	-70.92 dBm
	Máxima	-46.5 dBm	-67.5 dBm

Para melhor interpretação, os resultados da tabela 2 é apresentado no gráfico 2.

Gráfico 2: RSSI Downlink e Uplink médio dos três testes



Conforme mencionado na seção 4.2 a topografia da floresta escolhida tem o relevo montanhoso e na área mais baixa foi instalado o GW para permitir obter os melhores resultados de RSSI *downlink*, com boa qualidade de sinal em todos os três testes realizados. Assim, justifica-se o valor médio igual em todos os testes. Os valores de RSSI *uplink* são diferentes em todos os três cenários (gráfico 2) e a causa para essa diferença é na disposição física dos CH em relação ao GW. No teste 1 o CH e GW encontravam-se a uma diferença de

altitude de aproximadamente 2 metros. Já no teste 2 o CH está aproximadamente 8 metros mais alto que o GW. Enquanto que o teste 3, que apresentou uma maior atenuação, é justamente onde o CH foi instalado a mais de 15 metros de altura em relação ao GW. Para obter esses valores de altura foi utilizado a ferramenta *Google Earth Pro*. Para melhorar a qualidade desse sinal em quaisquer dos testes acima discutidos, recomenda-se a utilização de uma antena direcional, cujo sinal é mais direcionado ao GW.

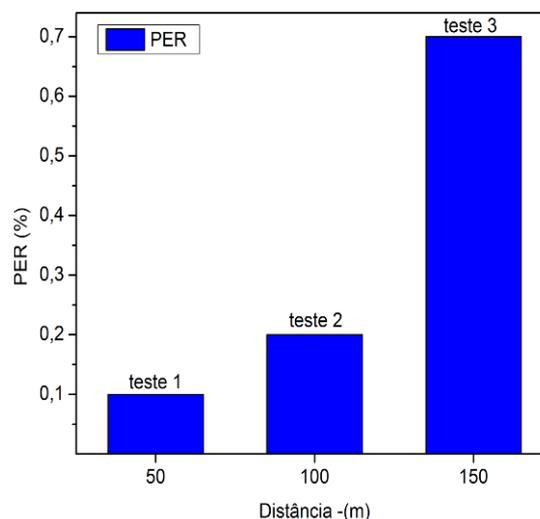
2) PER

O próximo parâmetro avaliado no SS é a PER tabela 3 (ou gráfico 3), que está relacionado diretamente com a qualidade do sinal.

Tabela 3: Resultado da PER dos três testes

Teste	Pacotes	Porcentagem (%)	Quantidade
	Enviados	100	1000
1	Perdidos	0.1	1
2	Perdidos	0.2	2
3	Perdidos	0.7	7

Gráfico 3: PER dos três testes do SS



Nota-se que na medida em que se aumenta a distância entre o GW e o CH, aumenta a PER devido à altura do CH em função a altura do GW. Quando a atenuação é muito alta no enlace, os pacotes começam a serem perdidos porque esses não chegam ao destino, aumentando consideravelmente a perda de pacotes. Quanto mais próximo o CH estiver do GW e na mesma linha de visada e altura, o nível de potência obtido pelos sensores será melhor e durante os testes foi comprovado essa teoria, pois o teste de número 3 o CH ficou sem visada e

mais alto em relação ao GW, mostrando-se não eficiente na comunicação devido à perda de pacotes.

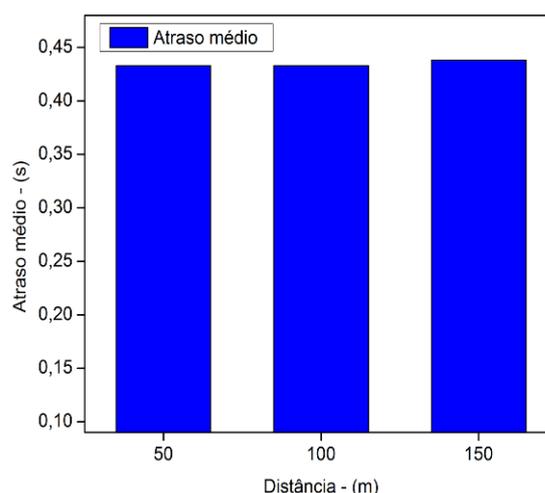
3) Atraso

O último parâmetro obtido do SS é o atraso médio, apresentado na tabela 4, (ou Gráfico 4) sendo o tempo de transmissão e recepção do pacote no GW.

Tabela 4: Resultado do atraso médio pacotes recebidos dos três testes

Teste	Tempo (segundo/pacotes)
1	0,433
2	0,433
3	0,433

Gráfico 4: Atraso dos três testes



Na seção 5.2 são apresentados os resultados referentes a validação da proposta da estratégia de roteamento nomeada como FRP.

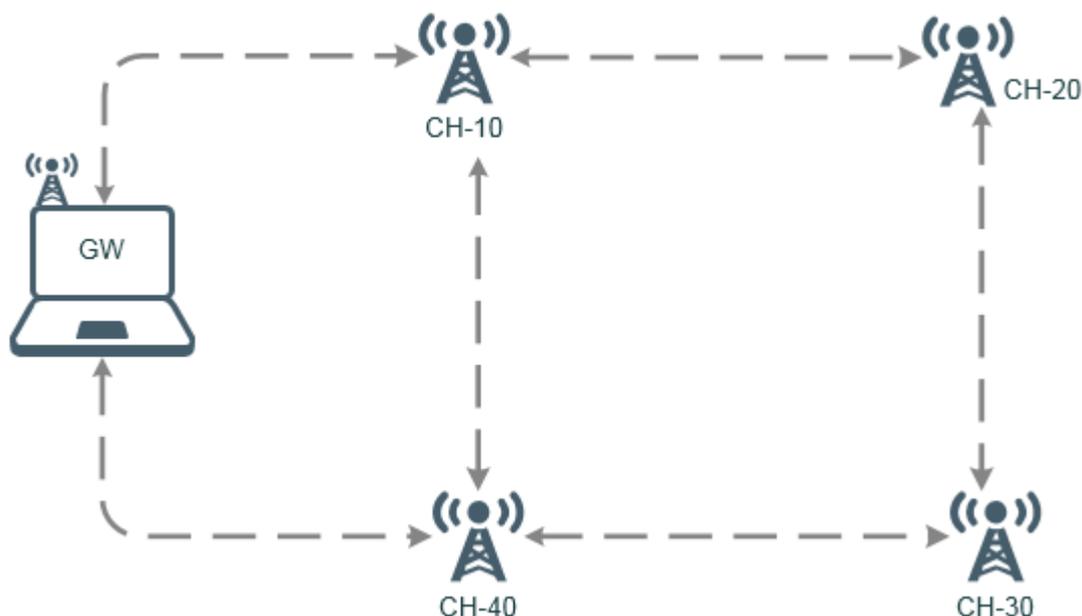
5.2 Resultados dos Cenários de validação do FRP

Esta seção apresenta os resultados referente a implementação do algoritmo FRP na rede. Dividiu-se esta seção em outras duas, sendo a primeira seção 5.2.1 para a validação da descoberta da rede e na seção 5.2.2 a validação de uma RSSF com e sem falha do CH.

5.2.1 Descoberta da rede

Nesta seção é possível conhecer os resultados do cenário de validação 2 apresentado na seção 4.3.2. Esse cenário possui quatro CHs conforme a topologia da figura 44.

Figura 44: Topologia do cenário de validação do FRP



Inicialmente no GW, a TR está apenas com a entrada do CH-10, conforme tabela 5, porém ainda sem detalhes de custo e alcance. As demais entradas sobre os CHs da rede serão acrescentadas conforme a execução do FRP. Para melhor entendimento dos próximos resultados, dividimos essa fase de descoberta em 4 etapas. Em cada etapa é apresentado o resultado da descoberta realizada pelo CH, com informações importantes a serem acrescentadas na TR, tais como custo. No final de cada etapa é mostrada a TR atualizada do GW.

Tabela 5: TR inicial

Tabela de Roteamento					
Destino	Custo	Via			
CH-10	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

A primeira etapa: na figura 45 é apresentado a resposta do CH-10 após o GW solicitar sua TN. Esse resultado é utilizado pelo GW para determinar quais são os custos entre os CHs e registrar na TR esses custos, conforme tabela 6.

Figura 45: Etapa 1 - Descoberta CH-10

Sou o ID: 10 RSSI_Down: -68.0 RSSI_UP: -64.5 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
 Sou o ID: 10 RSSI_Down: -68.5 RSSI_UP: -64.5 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
 Sou o ID: 10 RSSI_Down: -67.5 RSSI_UP: -65.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
 Sou o ID: 10 RSSI_Down: -68.5 RSSI_UP: -64.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
 Sou o ID: 10 RSSI_Down: -68.0 RSSI_UP: -64.5 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
 Sou o ID: 10 RSSI_Down: -66.5 RSSI_UP: -63.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
 Sou o ID: 10 RSSI_Down: -67.5 RSSI_UP: -63.5 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
 Sou o ID: 10 RSSI_Down: -65.0 RSSI_UP: -60.5 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
 Sou o ID: 10 RSSI_Down: -66.0 RSSI_UP: -63.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5
 Sou o ID: 10 RSSI_Down: -67.0 RSSI_UP: -64.5 Vizinho: 40 RSSI_Down: -54.5 RSSI_Up: -56.5 Vizinho: 20 RSSI_Down: -66.5 RSSI_Up: -65.5

Tabela 6: TR após atualização do CH-10

Tabela de Roteamento			
Destino	Custo	Via	
CH-10	141.5	-	-
CH-20	273.5	CH-10	-
CH-40	252.5	CH-10	-
-	-	-	-

Para simplificar o cálculo de melhor rota, foi adotado o valor médio de RSSI e posteriormente realizada a soma desses valores, gerando um número que representa o custo para cada enlace. Neste caso, o custo do GW até o CH-10 é de 141.5. O custo até CH-20 é de 273.5 através do CH-10. Já para alcançar o CH-40 o GW possui um custo de 252.5 através do CH-10.

A segunda etapa: o mesmo processo da primeira etapa é realizado, mas agora para o CH-40. A resposta está na figura 46, informando quem são os respectivos vizinhos do CH-40.

Figura 46: Etapa 2 - Descoberta CH-40

Sou o ID: 40 RSSI_Down: -60.0 RSSI_UP: -48.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -61.5 RSSI_Up: -59.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -79.0 RSSI_Up: -76.0
 Sou o ID: 40 RSSI_Down: -59.5 RSSI_UP: -48.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -61.5 RSSI_Up: -59.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -79.0 RSSI_Up: -76.0
 Sou o ID: 40 RSSI_Down: -59.5 RSSI_UP: -48.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -61.5 RSSI_Up: -59.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -79.0 RSSI_Up: -76.0
 Sou o ID: 40 RSSI_Down: -59.5 RSSI_UP: -48.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -61.5 RSSI_Up: -59.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -79.0 RSSI_Up: -76.0
 Sou o ID: 40 RSSI_Down: -60.0 RSSI_UP: -48.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -61.5 RSSI_Up: -59.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -79.0 RSSI_Up: -76.0
 Sou o ID: 40 RSSI_Down: -59.5 RSSI_UP: -48.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -61.5 RSSI_Up: -59.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -79.0 RSSI_Up: -76.0
 Sou o ID: 40 RSSI_Down: -59.5 RSSI_UP: -48.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -61.5 RSSI_Up: -59.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -79.0 RSSI_Up: -76.0
 Sou o ID: 40 RSSI_Down: -59.5 RSSI_UP: -48.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -61.5 RSSI_Up: -59.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -79.0 RSSI_Up: -76.0
 Sou o ID: 40 RSSI_Down: -59.0 RSSI_UP: -48.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -61.5 RSSI_Up: -59.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -79.0 RSSI_Up: -76.0
 Sou o ID: 40 RSSI_Down: -59.5 RSSI_UP: -48.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -61.5 RSSI_Up: -59.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -79.0 RSSI_Up: -76.0

O GW atualiza sua TR (tabela 7) com as informações do CH-40:

Tabela 7: TR após atualização do CH-40

Tabela de Roteamento			
Destino	Custo	Via	
CH-10	141.5	-	-
CH-20	273.5	CH-10	-
CH-30	260.0	CH-40	-
CH-40	105.0	-	-

O GW atualiza a TR, já substituindo quaisquer caminhos que tenham um custo superior ao que foi aprendido nesta etapa, veja o exemplo. Destino CH-10 através do CH-20 o custo seria de $105 + 121 = 246$, ou seja, maior que o custo atual 141.5, neste caso a entrada não sofrerá alteração. O custo até CH-40 agora é de 105.0, número menor que o registrado na etapa 1 de 252.5, neste caso será atualizada a TR, dando preferência para o menor custo. Já para alcançar o CH-30 o GW possui um custo de 260 passando pelo CH-40. Destino CH-20 através do CH-40 o custo seria de $105 + 121 + 132 = 358$, ou seja, maior que o custo atual 273.5, neste caso a entrada não sofrerá alteração.

Na terceira etapa: o GW solicita ao CH-30 (via CH-40) que sejam enviadas as suas informações a respeito da vizinhança. A resposta está na figura 47, informando quem são seus respectivos vizinhos.

Figura 47: Etapa 3 - Descoberta CH-30

Sou o ID: 30 RSSI_Down: -59.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -58.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 20 RSSI_Down: -60.5 RSSI_Up: -59.0
 Sou o ID: 30 RSSI_Down: -59.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -58.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 20 RSSI_Down: -60.5 RSSI_Up: -59.0
 Sou o ID: 30 RSSI_Down: -60.0 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -58.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 20 RSSI_Down: -60.5 RSSI_Up: -59.0
 Sou o ID: 30 RSSI_Down: -59.5 RSSI_Up: -59.5 Vizinho: 40 RSSI_Down: -58.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 20 RSSI_Down: -60.5 RSSI_Up: -59.0
 Sou o ID: 30 RSSI_Down: -59.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -58.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 20 RSSI_Down: -60.5 RSSI_Up: -59.0
 Sou o ID: 30 RSSI_Down: -59.5 RSSI_Up: -59.5 Vizinho: 40 RSSI_Down: -58.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 20 RSSI_Down: -60.5 RSSI_Up: -59.0
 Sou o ID: 30 RSSI_Down: -59.0 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -58.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 20 RSSI_Down: -60.5 RSSI_Up: -59.0
 Sou o ID: 30 RSSI_Down: -59.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -58.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 20 RSSI_Down: -60.5 RSSI_Up: -59.0
 Sou o ID: 30 RSSI_Down: -59.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 40 RSSI_Down: -58.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 20 RSSI_Down: -60.5 RSSI_Up: -59.0

O GW atualiza sua TR (tabela 8) com as informações do CH-30:

Tabela 8: TR após atualização do CH-30

Tabela de Roteamento			
Destino	Custo	Via	
CH-10	141.5	-	-
CH-20	273.5	CH-10	-
CH-30	260.0	CH-40	-
CH-40	105.0	-	-

O GW nesta etapa não precisou atualizar a TR, porque os valores de custo informados são superiores ao que já estão registrados. O CH-10 nesta etapa não foi atualizado, pois o CH-30 não possui visada com o mesmo. Para alcançar o CH-20 através do CH-30 o custo seria de 379.5, ou seja, maior que 273.5, também não haverá alteração na tabela para esse destino.

Na quarta e última etapa o GW solicita ao CH-20 que sejam enviadas as suas informações a respeito da vizinhança. A resposta está na figura 48, informando quem são seus respectivos vizinhos.

Figura 48: Etapa 4 - Descoberta CH-20

Sou o ID: 20 RSSI_Down: -64.0 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -65.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -66.0 RSSI_Up: -69.5
 Sou o ID: 20 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -65.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -66.0 RSSI_Up: -69.5
 Sou o ID: 20 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -59.5 Vizinho: 10 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -65.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -66.0 RSSI_Up: -69.5
 Sou o ID: 20 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -65.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -66.0 RSSI_Up: -69.5
 Sou o ID: 20 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -65.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -66.0 RSSI_Up: -69.5
 Sou o ID: 20 RSSI_Down: -64.0 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -65.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -66.0 RSSI_Up: -69.5
 Sou o ID: 20 RSSI_Down: -63.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -65.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -66.0 RSSI_Up: -69.5
 Sou o ID: 20 RSSI_Down: -63.5 RSSI_Up: -58.5 Vizinho: 10 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -65.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -66.0 RSSI_Up: -69.5
 Sou o ID: 20 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -59.0 Vizinho: 10 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -65.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -66.0 RSSI_Up: -69.5
 Sou o ID: 20 RSSI_Down: -64.0 RSSI_Up: -58.5 Vizinho: 10 RSSI_Down: -64.5 RSSI_Up: -65.5 Vizinho: 30 RSSI_Down: -66.0 RSSI_Up: -69.5

O GW atualiza sua TR (tabela 9) com as informações do CH-20:

Tabela 9: TR após atualização do CH-20

Tabela de Roteamento			
Destino	Custo	Via	
CH-10	141.5	-	-
CH-20	273.5	CH-10	-
CH-30	260.0	CH-40	-
CH-40	105.0	-	-

O GW nesta etapa não precisou atualizar a TR, porque os valores de custo informados são superiores ao que já estão registrados. O CH-20 nesta etapa não foi atualizado, pois o CH-40 não possui visada com o mesmo. Para alcançar o CH-30 através do CH-20 (via CH-10) o custo seria de 392.5, ou seja, maior que 260.0, também não haverá alteração na tabela para esse destino.

Por fim, a matriz de conectividade passa a ser conhecida pelo GW (ver figura 49). Quando houver um enlace ligando um CH ao outro, representa-se na matriz por '1' e quando não houver ligação, representa-se por '0'.

Figura 49: Matriz de Conectividade Completa

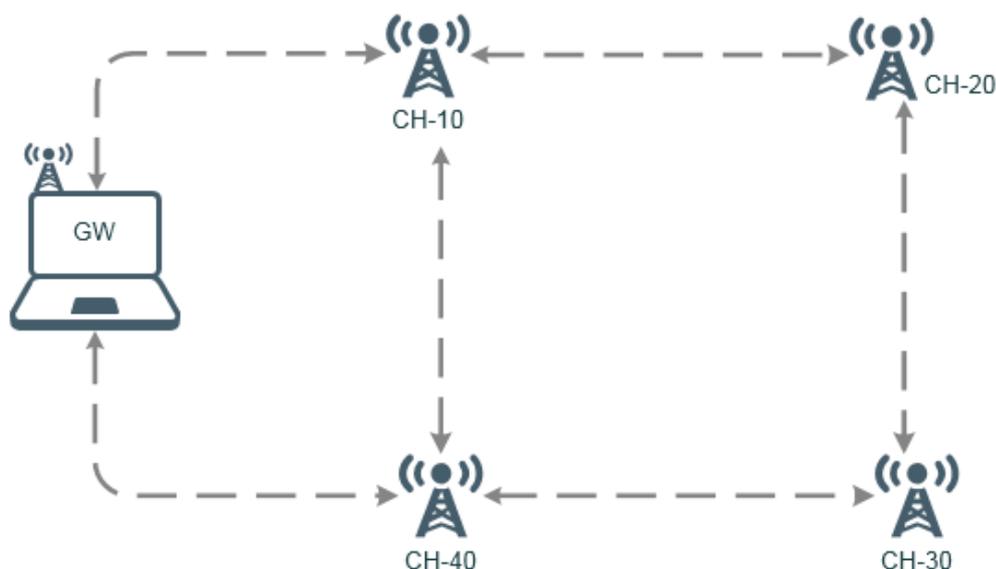
Matriz de Conectividade				
	CH-10	CH-20	CH-30	CH-40
CH-10	0	1	0	0
CH-20	1	0	1	0
CH-30	0	1	0	1
CH-40	0	0	1	0

Estas etapas representaram os resultados do FRP e foi observado que em algumas etapas um caminho alternativo era identificado, mas nem sempre essa nova rota tinha um custo melhor para se tornar o principal caminho. O FRP não descarta esse caminho alternativo, mas sim armazena em sua tabela de possibilidades e, ao cair o principal, esse caminho poderá ser utilizado como rota alternativa. Na seção 5.2.2 são apresentados os testes realizados com o NS associado a um CH e o uso dos caminhos alternativos.

5.2.2 RSSF com e sem falha

Nesta seção são apresentados os resultados dos testes realizados com os NS em pontos diferentes da rede (figura 50), simulando rotas alternativas e seus respectivos custos para cada caminho.

Figura 50: Topologia do cenário de validação do FRP



A realização dos testes tem o objetivo validar a comunicação da rede após a realização de descoberta, apresentada na seção 5.2.1, ou seja, para os

cenários apresentados nesta seção, considera-se que a rede já esteja mapeada pelo GW, permitindo a esse escolher as melhores rotas para um determinado destino consultando a TR. Em todos os testes desta seção, foram registrados separadamente os valores de RSSI *downlink* e *uplink* para cada enlace, permitindo assim que o GW sempre tenha o estado atual da rede.

Para validação do funcionamento do FRP, foram adicionados à topologia RSSF dois NS, nomeados NS-11 e NS-31, ambos foram instalados junto aos CH-10 e CH-30, respectivamente. Portanto, a validação da RSSF sem falha está separada em duas etapas, são elas: na primeira etapa é realizado a validação apenas para o NS-11, considerando apenas que há um único *hop*, através do CH-10, para alcançá-lo; na segunda etapa é apresentado o cenário de validação do NS-31, considerando que há 3 *hops*, através do CH-40 para alcançá-lo.

1) Sem Falha

Etapa 1 (NS-11): A figura 51 apresenta a topologia utilizada neste cenário de validação, onde o GW enviou 500 pacotes para o NS-11, com o objetivo de obter os valores de RSSI para os dois enlaces, são eles: conexão entre o GW e CH-10; e conexão entre o CH-10 e NS-11. Além da RSSI, também foram obtidos os valores de PER e tempo de resposta.

Figura 51: Topologia Operacional NS-11

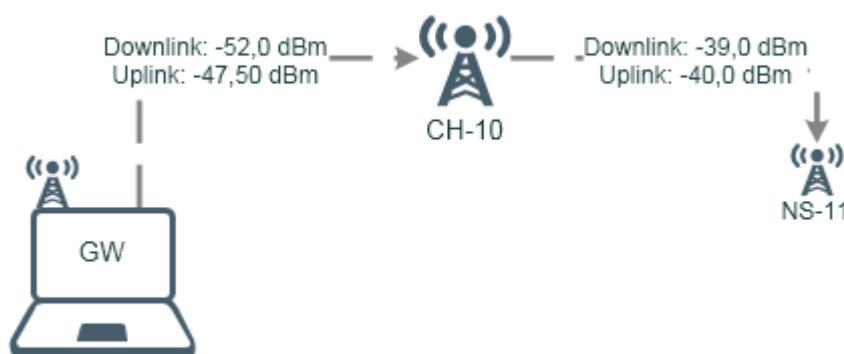


Tabela 10: RSSI da etapa 1 de validação

	NS-11		CH-10		GW	
	Downlink	Uplink	Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
NS-11	-	-	-39,0 dBm	-40,0 dBm	-	-
CH-10	-	-	-	-	-52,00 dBm	-47,50 dBm

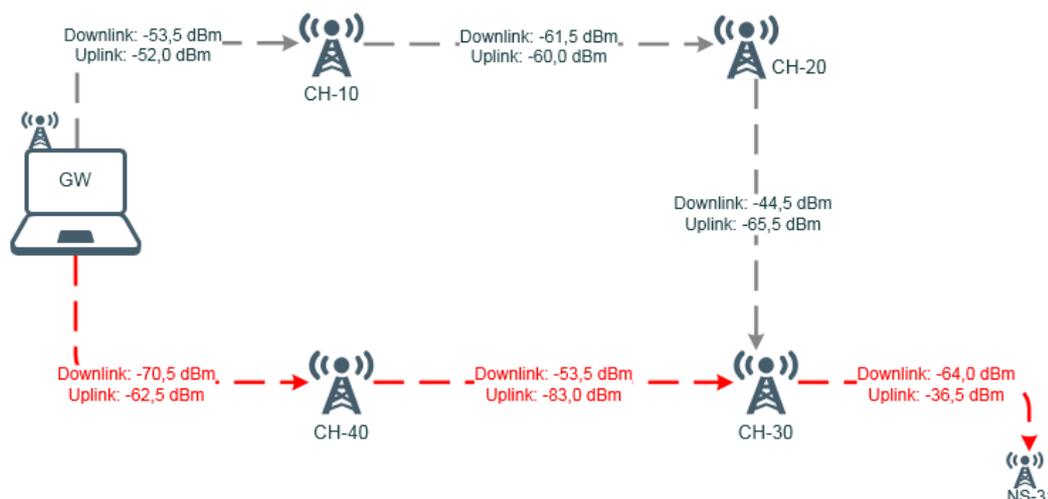
A tabela 10 apresenta os valores da média do RSSI de *downlink* e *uplink* para ambos os enlaces. Os dois outros parâmetros avaliados neste experimento foram a PER e o tempo de resposta médio, conforme tabela 11. Nota-se que o tempo de resposta médio para cada pacote de 0,372 segundos e sem perda de pacote.

Tabela 11: Tempo cenário 1 de validação

Tempo de Resposta Médio	PER
0,372 segundos	0%

Na etapa 2 (NS-31): a figura 52 apresenta a topologia utilizada neste cenário de validação e na sequência (tabela 12) a representação dos valores de RSSI para todos os enlaces.

Figura 52: Topologia sem falha para alcançar o NS-31



A topologia da figura 52 mostra a rede funcionando normalmente e neste caso a comunicação está acontecendo entre o GW e o NS-31 através do CH-40 que foi escolhido pelo algoritmo de roteamento como sendo a melhor rota. A linha tracejada na cor vermelha está indicando a rota utilizada pelo GW para comunicar-se com o NS-31.

Tabela 12: Valores de RSSI

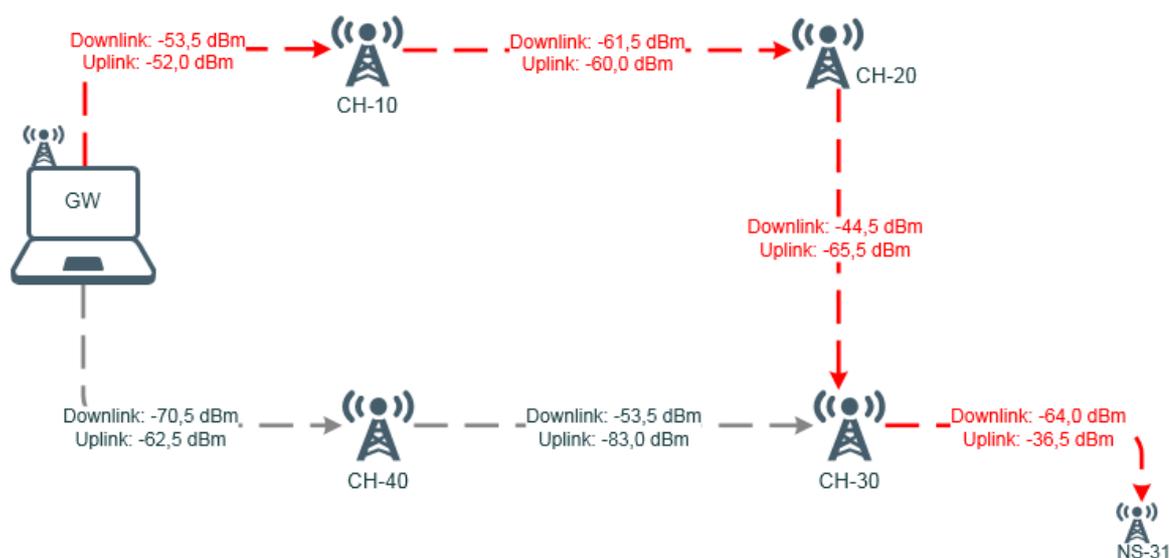
	NS-31		CH-30		CH-40		GW	
	Downlink	Uplink	Downlink	Uplink	Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
NS-31	-	-	-64,0 dBm	-36,5 dBm	-	-	-	-
CH-30	-	-	-	-	-53,5 dBm	-83,0 dBm	-	-
CH-40	-	-	-	-	-	-	-70,5 dBm	-62,5 dBm

O gráfico 5 apresenta a PER da comunicação entre GW e NS-31 através da rota principal. Analisando o gráfico 4 nota-se que houve uma perda de 2,8% do total de pacotes enviados e essa perda se dá em detrimento a alta atenuação, principalmente entre o CH-40 e CH-30. Neste enlace haviam alguns obstáculos (plantas e árvores) que certamente contribuíram para que a qualidade do sinal fosse comprometida. O tempo de resposta está apresentado no gráfico 6 e nesta comunicação a média do tempo foi de 0,238 segundos.

2) Com Falha

Para análise dos resultados do cenário de validação com falha, a topologia foi a mesma utilizada no cenário de validação sem falha (figura 52), ou seja, o destino continua sendo o NS-31, mas neste caso desligamos o CH-40, para representar uma falha. Assim, para que o GW comunique-se com o NS-31 o pacote segue a rota que está em destaque na cor vermelha (figura 53).

Figura 53: Rota alternativa para NS-31



Como já dito anteriormente, embora essa rota tenha enlaces com melhor qualidade, ou seja, menores valores de atenuação do sinal, não significa que é a rota preferencial. Analisando o gráfico 5 nota-se que houve uma perda de 10,8% do total de pacotes enviados, o maior número de saltos comprometeu a comunicação em relação à anterior, mas, ainda assim, é a rota alternativa para a comunicação entre o GW e NS-31. O tempo de resposta neste cenário com falha foi de 0,265 segundos.

Gráfico 5: PER do cenário com e sem falha

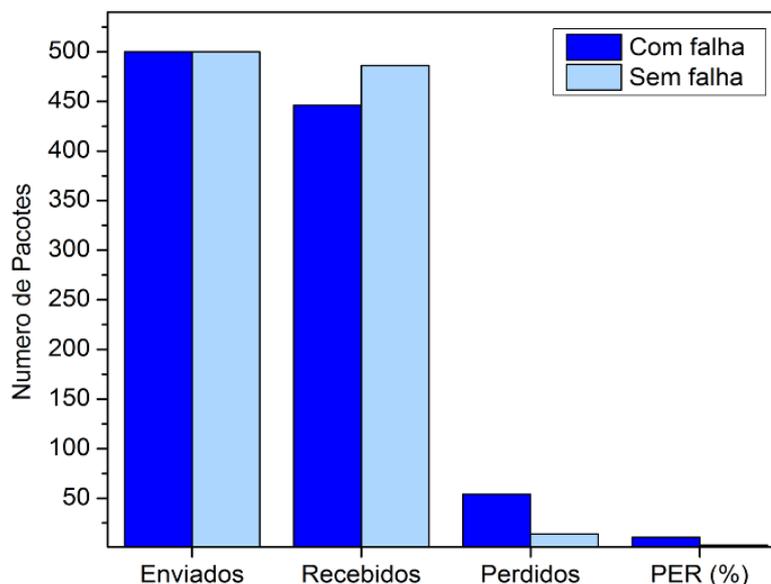
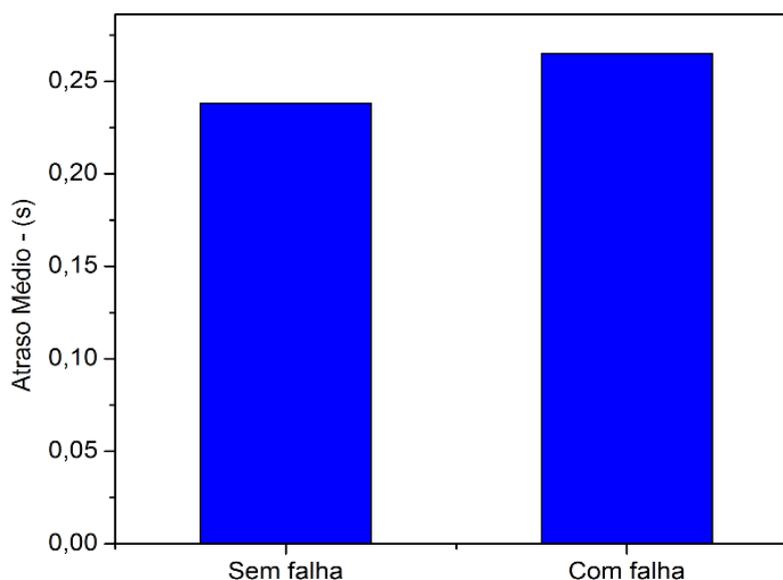


Gráfico 6: Atraso médio dos cenários com e sem falha



Os resultados obtidos durante os testes realizados *in loco*, foram essenciais para validação e apresentação da importância do *Site Survey* e estratégia de roteamento utilizando o protocolo desenvolvido (FRP). Nos três testes do *Site Survey* foi possível identificar os melhores pontos físicos de instalação dos CH e NS, pois com a utilização dos parâmetros RSSI, PER e atraso tornou-se viável a construção da rede utilizando a topologia em malha. Assim, que foi identificado os melhores pontos de instalação dos CH e NS, a estratégia de roteamento foi implementada, possibilitando a validação da

comunicação entre os elementos da rede. O resultado dessa validação apresentou que a rede pode ser tolerante a falhas, seja ela temporária como a obstrução por um animal que esteja próximo ao CH e NS, ou até mesmo uma falha não temporária e definitiva, quando um CH ou NS deixa de funcionar devido à falta de energia, por exemplo. Durante os testes para simular as falhas de um CH, foi desligado a sua fonte de energia para possibilitar a validação da comunicação através de outro CH, rota essa já estabelecida pelo GW.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

Tecnologias em RSSF vem sendo cada vez mais utilizadas para solucionar problemas nas mais diversas áreas tais como medicina, indústria, meio ambiente, agricultura, segurança, entre outras. Segundo os resultados das pesquisas em revisão bibliográfica, muitos trabalhos que já usam as RSSFs, não levam em considerações questões de planejamento físico do SS e estratégias de roteamento em função da aplicação. Dessa forma este trabalho focou em apresentar uma proposta de planejamento físico em função do menor número de hops e RSSI e da implementação de uma estratégia de roteamento.

Foram realizados experimentos em laboratório e em ambiente real, para validar a proposta apresentada durante o desenvolvimento do protocolo FRP. Analisando os resultados obtidos, nota-se a importância em se acrescentar no projeto o planejamento SS, para que possam identificar os melhores pontos de instalação dos sensores. Os testes de eficiência da estratégia de roteamento foram mensurados através dos parâmetros como RSSI, PER e atraso, mostrando que o FRP é eficaz, pois esse permite conhecer todos os CHs de uma rede, assim como custo de cada enlace. Essas informações sobre o custo são essenciais para que o FRP possa construir a TR completa da rede e conhecer rotas alternativas em caso de falha dos CHs.

O FRP pode ser implementado para a detecção de incêndios e também para outras aplicações que exija uma RSSF tolerante a falhas, visto que essa é uma das necessidades para aplicações críticas. A implementação do FRP em uma topologia em malha, permite que a rede seja escalável, principalmente nas florestas de eucalipto que são grandes áreas geográficas.

Neste trabalho foi validado a proposta do uso das RSSF que permite ser implementado para a detecção de incêndios florestais em tempo real, pois a comunicação entre os CHs apresentou-se robusta e com um tempo de resposta inferior a 1 segundo entre o GW e o CH.

Além da aplicação de incêndios florestais, o FRP mostrou-se capaz de ser implementado para estabelecer estratégias de roteamento em outras aplicações, tornando-o um protocolo de múltiplas aplicações de RSSF.

Trabalhos Futuros

Durante a pesquisa observou-se que a estratégia de roteamento pode ter futuras implementações, tais como utilizar os valores de energia disponível em cada CH como mais uma métrica de custo, implementar um modelo de simulação do algoritmo proposto, para facilitar o processo de validação de novas implementações.

O protocolo também poderá ser implementado em outras culturas, tais como mogno, visto que seu uso não restringe apenas ao eucalipto e complementando a solução pode-se desenvolver um aplicativo para gerenciar os alertas dos NS.

Disponibilização dos dados de sensoriamento diretamente da floresta, através da Internet e aperfeiçoar o protocolo FRP para permitir maior gerenciamento do consumo de energia entre os CHs.

Referências

[AFZAAL] H., and N. A. Zafar, “Robot-based forest fire detection and extinguishing model,” in 2016 2nd International Conference on Robotics and Artificial Intelligence, ICRAI 2016, 2016, pp. 112–117.

[AKYILDIZ] I., T. Melodia, and K. Chowdury, “Wireless multimedia sensor networks: A survey,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 14, no. 6, pp. 32–39, 2007.

[ALKHABBAS] D. P. F., Spalazzese R., “Architecting Emergent Configurations in the Internet of Things,” 2017 IEEE Int. Conf. Softw. Archit., pp. 221–224, 2017.

[ALMEIDA] Virgil Del Duca. Análise de desempenho de protocolos de roteamento Ad hoc DTN em redes de emergência. 2011.

[ANDERSEN] J. B., and T. S. Rappaport, “Propagation measurements and models for wireless communications channels,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 33, no. 1, pp. 42–49, 1995.

[ANTONIO] C. M. S. F., A.F. Loureiro, Jose Marcos S. Nogueira, Linnyer Beatrys Ruiz, Raquel Aparecida de Freitas Mini, Eduardo Freire Nakamura, “Redes de Sensores Sem Fio,” XXI Simpósio Bras. Redes Comput., 2003.

[AGENCIA BRASIL] “Incêndios no Chile.” [Online]. Available: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/internacional/noticia/2017-01/incendios-provocam-maior-desastre-florestal-da-historia-do-chile>. [Accessed: 20-May-2017].

[ABOLHASAN] M., T. Wysocki, and E. Dutkiewicz, “A review of routing protocols for mobile ad hoc networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 2, no. 1. pp. 1–22, 2004.

[ASSUMPCAO] Raphael Montali da, et al. Avaliação do impacto em rede de sensores sem fio com utilização de sistema de rádio sobre fibra. 2011.

[BATISTA] Antonio Cartos. “Detecção de incêndios florestais por satélites,” *Floresta*, v. 34, n. 2, 2004.

[BRAGA] Tiago Couto. “Monitorização ambiental em espaços florestais com rede de sensores sem fios,” 2010. Tese de Doutoramento. Universidade da Madeira.

[BHOSLE] A. S., and L. M. Gavhane, “Forest disaster management with wireless sensor network,” in 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), 2016, pp. 287–289.

[BALUZ] Rodrigo Augusto Rocha Souza. Uma aplicação de sistemas inteligentes híbridos ACO-Fuzzy para a otimização do desempenho em redes de sensores sem fio. 2013. Tese de Doutoramento. Tese (Mestrado), Universidade de Fortaleza, 90p., Fortaleza.

[BOTTA] A., W. De Donato, V. Persico, and A. Pescapé, “Integration of Cloud computing and Internet of Things: A survey,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 56, pp. 684–700, 2016.

[BRANQUINHO] Omar C., “Tecnologias de Redes Sem Fio,” ISBN 978-85-63630-49-0. Available: <https://www.scribd.com/doc/206659698/Tecnologias-de-Redes-sem-Fio>. [Accessed: 10-May-2017].

[BERNDT] Alexandre. Introdução a Redes de Sensores sem Fio (RSSF). In: *Mato Grosso Digital* 2008.

[CHALERMEK] D. E. I., Ramesh Govindan, “Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks,” *Proc. sixth Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Netw.*, pp. 56–67, 2000.

[CHONG] Y., and S. P. Kumar, “Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges,” in *Proceedings of the IEEE*, 2003, vol. 91, no. 8, pp. 1247–1256.

[DA SILVA] Lemos, Breno; DE OLIVEIRA, Thiago Queiroz. “Redes Sensores Sem Fio de baixo custo utilizando as plataformas livres para agricultura familiar”.

[DOZIER] J., “A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 11, no. C, pp. 221–229, 1981.

EMPLASA, “Emplasa.” [Online]. Available: <https://www.emplasa.sp.gov.br/RMSP>. [Accessed: 05-Nov-2017].

[DONATTI] Renan Nantes. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de animais, utilizando rede de sensores sem fio, baseado no protocolo ZigBee e tecnologia GPS. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2017.

[ESTADAO] “Incêndios em Portugal.” [Online]. Available: <http://internacional.estadao.com.br/noticias/geral/incendio-florestal-em-portugal-deixa-dezenas-mortos-e-feridos/70001846434>. [Accessed: 10-Sep-2017].

[FLORESTAL] “Florestal.” [Online]. Available: <http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/as-florestas-plantadas>. [Accessed: 20-Oct-2017].

[FLORESTA] F. UFPR, “Floresta.” [Online]. Available: <http://www.floresta.ufpr.br/firelab/tecnicas-de-combate>. [Accessed: 17-Oct-2017].

[FOROUZAN] Behrouz A. Comunicação de dados e redes de computadores. AMGH Editora, 2009.

[GRANDA] J. Cantuña, D. Bastidas, S. Solórzano, and J.-M. Clairand, “Design and implementation of a Wireless Sensor Network to detect forest fires,” in 2017 4th International Conference on eDemocracy and eGovernment, ICEDEG 2017, 2017, pp. 15–21.

[GIACOMIN] João Carlos; VASCONCELOS, Flávio Henrique. Qualidade da medição de intensidade de sinal nas comunicações de uma rede de sensores

sem fios: uma abordagem da camada física. INFOCOMP Journal of Computer Science, v. 5, n. 2, p. 83-92, 2006.

[GINATTO] Alex Leal. Otimização do tempo de vida em redes de sensores sem fio utilizando algoritmo de energia e protocolo difusão direcionada. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

[GUNAY] O., K. Taşdemir, B. Uğur Töreyn, and A. Enis Çetin, “Video based wildfire detection at night,” Fire Saf. J., vol. 44, no. 6, pp. 860–868, 2009.

[HILL] J. L., “System Architecture for Wireless Sensor Networks,” Spring, p. 186, 2003.

[HSIAO] Edward et al. Implementação em Hardware de uma Rede de Sensores para Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais. 2017.

[ICMBIO] “Manual do Brigadista.” [Online]. Available: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/servicos/sejaumbrigadista.pdf>. [Accessed: 07-Oct-2017].

[JAIN] R. K., S.; Fall, K. R. e Patra, “Routing in a delay tolerant network,” ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev., pp. 145–158, 2004.

[JAKOVCEVIC] T., M. Braovic, D. Stipanicev, and D. Krstinic, “Review of wildfire smoke detection techniques based on visible spectrum video analysis,” 2011 7th Int. Symp. Image Signal Process. Anal., no. September, pp. 480–484, 2011.

[JOHNSON] D. B., and D. A. Maltz, “Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks,” Mob. Comput., vol. 353, pp. 153–181, 1996.

[JOHNSTON] Fay H. et al. Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. Environmental health perspectives, v. 120, n. 5, p. 695, 2012.

[KUROSE] James F.; ROSS, Keith W.; ZUCCHI, Wagner Luiz. Redes de Computadores ea Internet: uma abordagem top-down. Pearson Addison Wesley, 2007.

[KARL] Holger; WILLIG, Andreas. Protocols and architectures for wireless sensor networks. John Wiley & Sons, 2007.

[LEAO] Lucas Augusto de Araújo Marques et al. Proposta de um algoritmo de roteamento baseado em lógica difusa para RSSF em ambientes fechados. 2015.

[LEMOS] Luiz Cesar Maia. “Estudo comparativo de Tecnologias para Detecção Precoce de Incêndios Florestais em Áreas de Reflorestamento no Brasil,” Projetos e Dissertações em Sistemas de Informação e Gestão do Conhecimento, v. 4, n. 1, 2015.

[LOUREIRO] Antonio AF et al. Redes de sensores sem fio. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC). sn, 2003. p. 179-226.

[LEITE] Luis Felipe Formiga Melhorando o desempenho do ZRP em um cenário emergencial usando redes ad hoc / Luis Felipe Formiga Leite. – Recife: O Autor, 2015.

[LOTUFO] Francisco Antonio; GARCIA, Claudio. Sensores Virtuais ou Soft Sensors: Uma Introdução. In: Proceedings of the 7th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications, Presidente Prudente. 2008. p. 1-9.

[MOHAPATRA] Santoshinee; KHILAR, Pabitra Mohan. Forest fire monitoring and detection of faulty nodes using wireless sensor network. In: Region 10 Conference, 2016 IEEE. IEEE, 2016. p. 3232-3236.

[MACEDO] Daniel Fernandes. “Um protocolo de roteamento para redes de sensores sem fio adaptável por regras de aplicação”. 2006. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, UFMG.

[MANYANGADZE] Tawanda. "Forest Fire Detection for Near Real Time Monitoring Using Geostationary Satellites." ITC, 2009.

[MARTINS] Indayara Bertoldi, et al. "Análise de trafego, capacidade e proteção em redes de pacotes opticos com chaveamento fotônico". Unicamp. 2007.

[MINICIRCUITS] "Minicircuits." [Online]. Available:
<https://www.minicircuits.com/app/AN10-006.pdf>. [Accessed: 05-May-2017].

[MOTA] Vinícius Fernandes Soares, "Um protocolo de roteamento tolerante a interrupções de comunicação para redes sem fios móveis em cenários de emergência". Universidade Federal de Minas Gerais. 2009.

[OLIVEIRA] Medeiros, Júlio Cesar de Oliveira. "Princípios de - Teoria e Prática". Editora Érica.

[PIZA] Luciana Vieira et al. Ensinando os fundamentos de redes de sensores sem fio usando um sistema simples. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 35, n. 1, p. 1507, 2013.

[PERES] André. "Mecanismo de autenticação baseado na localização de estações sem fios padrão IEEE 802.11". Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2010.

[PUBLICO] "Público." [Online]. Available:
<https://www.publico.pt/2015/03/15/sociedade/noticia/falcoes-e-aguias-da-gnr-em-testes-finais-para-cacar-incendios-nos-ceus-dos-geres-1689184>. [Accessed: 15-Sep-2017].

[PARAMESWARAN] Ambili Thottam et al. Is RSSI a reliable parameter in sensor localization algorithms: An experimental study. In: Field Failure Data Analysis Workshop (F2DA09). IEEE, 2009.

[ROSAS] R. Romero, “Remote detection of forest fires from video signals with classifiers based on K-SVD learned dictionaries,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 33, pp. 1–11, 2014.

[ROHDE] Guilherme Frederico. R-mac: Protocolo de acesso ao meio para consumo eficiente de energia em redes de sensores sem fio. 2009. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

[RODOLFO] Francisco de, et al. Proposta de um Proxy Manager para a Internet das coisas. 2016.

[SAOUDI] M., “Smart Data Mining Techniques for Emergency Detection Using Wireless Sensor Network. University College Dublin, Ireland. 2016”

[SENAR] Prevenção e Controle do Fogo na Agricultura. Brasília, 2015.

[SILVA] Celso Viana da et al. Avaliação em hardware de modelos de consumo de energia utilizados em simuladores de redes de sensores sem fio (RSSF). 2011.

[SEYBOLD] John S. “Introduction to RF propagation”, John Wiley & Sons, 2005.
STIPANICEV D., et al., “Vision based wildfire and natural risk observers,” in 2012 3rd International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications, IPTA 2012, 2012, pp. 37–42.

[SOUSA] Tony Andres Pereira de. Efeito do Ganho da Antena nas Perdas de Percurso de uma ligação. 2013. Tese de Doutorado.

[SOARES] R.V.; SANTOS, J.F., “Brazilian forest fires statistics in two periods: 1983/1987 and 1994/1997,” In: VIEGAS (Ed.). *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, 2007.

[SANTOS] Sergio Torres, “Redes de sensores sem fio em monitoramento e controle”. 2007. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

[STIPANICEV], Darko. Intelligent Forest Fire Monitoring System—from idea to realization. Annual... of the Croatian Academy of Engineering, v. 2010, p. 58-73, 2012.

[SHENG] N. Hu, X. Wu-Jun, L. Yuan-yuan, T. Meng-Yue, S. Shi-Chao, and F. Hong, “An improved method of self-adaptive localization for wireless sensor network in dynamic indoor environment,” Control Conference (CCC), 2012 31st Chinese. pp. 6574–6577, 2012.

[TANENBAUM] Andrew S. et al. Computer networks, 4-th edition. ed: Prentice Hall, 2003.

[TEKEVER] “Tekever.” [Online]. Available: <http://airray.tekever.com>. [Accessed: 15-Sep-2017].

[TETTO] A. F., R. V. Soares, A. C. Batista, and W. T. Wendling, “Eficiência do combate aos incêndios florestais, no período de 1965 a 2009, na Fazenda Monte Alegre, Paraná,” Sci. For. Sci., vol. 40, no. 96, pp. 483–489, 2012.

[THOMAZINI] D. e P. U. B. de A., “Sensores Industriais Fundamentos e Aplicações,” 8th ed. Érica, 2011.

[TIAN] T. F. A. He, John A. Stankovic, Chenyang Lu, “SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks,” 23rd Int. Conf. Distrib. Comput. Syst., pp. 46–57, 2003.

[TILAK] S., N. B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman, “A taxonomy of wireless micro-sensor network models,” ACM SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev., vol. 6, no. 2, pp. 28–36, 2002.

[TORRES] F. T. P., G. S. Lima, A. das G. Costa, G. de A. Félix, and M. R. da Silva Júnior, “Perfil dos incêndios florestais em unidades de conservação brasileiras no período de 2008 a 2012,” *Floresta*, vol. 46, no. 4, pp. 531–541, 2017.

[TEIXEIRA] João. “Wireless Sensor Network for Forest Fire Detection,” Tese de Mestrado. Universidade do Porto. 2017.

[VALLE] Odilson Tadeu et al. Codificação de rede na retransmissão oportunista de mensagens em redes de sensores sem fio IEEE 802.15. 4. 2014.

[WILCKEN] C. F., “Efeito do espaçamento no crescimento e nas relações hídricas de *Eucalyptus*,” 2008.

[WORKINGONFIRE] “Workingonfire.” [Online]. Available: <http://workingonfire.com.br/incendios-florestais-maiores-muito-mais-quentes-o-novo-normal>. [Accessed: 07-Sep-2017].

[XIONG] Z., R. Caballero, H. Wang, a M. Finn, M. a Lelic, and P.-Y. Peng, “Video-based smoke detection: possibilities, techniques, and challenges,” *Proc. Suppr. Detect. Res. Appl. Tech. Work. Conf.*, pp. 112–118, 2007.