

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Sistema de Monitoramento da Invasão de
Vegetação em Linhas de Transmissão
Usando Redes de Sensores Sem Fio



Túlio Ítalo Oliveira de Medeiros

João Pessoa – PB, Brasil

Fevereiro – 2018

TÚLIO ÍTALO OLIVEIRA DE MEDEIROS

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DA INVASÃO DE VEGETAÇÃO EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO USANDO REDES DE SENsoRES SEM FIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Dr. Yuri Percy Molina Rodriguez
Dr. Fabrício Braga Soares de Carvalho

JOÃO PESSOA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Medeiros, Túlio Ítalo Oliveira de Medeiros

Sistema de Monitoramento da Invasão de Vegetação Usando Rede de Sensores Sem Fio – João Pessoa, 2018.

77 f.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Yuri Percy Molina Rodriguez e Prof. Dr. Fabrício Braga Soares de Carvalho.

Dissertação (Mestrado) – UFPB.

1. Linhas de Transmissão; 2. Monitoramento da Invasão de Vegetação; 3. Rede de Sensores Sem Fio;

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

SISTEMA DE MONITORAMENTO DA INVASÃO DE VEGETAÇÃO EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO USANDO REDES DE SENsoRES SEM FIO

Elaborado por

TÚLIO ÍTALO OLIVEIRA DE MEDEIROS

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA

PROF. DR. YURI PERCY MOLINA RODRIGUEZ (Presidente)

Waslon Terlizzi A. Lopes
PROF. DR. WASLON TERLLIZZIE ARAÚJO LOPES

Fábricio Braga
PROF. DR. FABRÍCIO BRAGA SOARES DE CARVALHO

Alfredo Gomes Neto
PROF. DR. ALFREDO GOMES NETO

João Pessoa/PB, 08 de fevereiro de 2018.

Aos meus pais, José Cavalcanti e Maria das Dores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder a força necessária para concluir este trabalho.

Ao professor e orientador Fabrício Braga Soares de Carvalho, por todo o apoio na elaboração e desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por todo o aprendizado transmitido.

Ao professor e orientador Yuri Percy Molina Rodriguez, por todo o auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

A minha família, em especial aos meus pais por sempre me apoiarem, investirem em mim, e me incentivar a buscar os meus sonhos durante toda a minha vida. Obrigado por me ensinarem e implantarem valores que fizeram a pessoa que sou hoje.

Aos meus colegas do laboratório, que transformaram os desafios em momentos de aprendizado, satisfação e amizade. Compartilhando respostas nas dúvidas e soluções nas dificuldades.

A minha amiga e namorada Maria Eduarda Noberto dos Santos, por todo incentivo e apoio, pela ajuda nos momentos de dificuldade e também por todos os bons momentos proporcionados.

Ao professor Cleonilson Protásio de Souza, pela contribuição positiva na elaboração do trabalho.

A todos que contribuiram de forma intencional ou não para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	X
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
RESUMO.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.2 OCUPAÇÃO DA FAIXA DE PASSAGEM DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO .	19
1.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	21
1.4 OBJETIVOS	24
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	24
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1 REDES DE SENsoRES SEM FIO.....	26
2.2 SENSORIAMENTO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	26
2.3 UNIDADE DE RADIOFREQUÊNCIA.....	27
2.4 UNIDADE DE PROCESSAMENTO.....	29
2.5 UNIDADE DE CONVERSÃO DE ENERGIA E REGULAÇÃO DE TENSÃO	30
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
3.1 MÉTODOS DE MONITORAMENTO DA VEGETAÇÃO	33
3.1.1 Inspeção de Campo	33
3.1.2 Vigilância Aérea por Vídeo	34
3.1.3 Imagens Aéreas Multiespectrais	36
3.1.4 Rede de Sensores Multimídia Integrada	37
4 MODELAMENTO MATEMÁTICO.....	41
4.1 OBSTRUÇÕES NA PROPAGAÇÃO DO SINAL	41
4.1.1 Zonas de Fresnel	43
4.1.2 Perda da Potência do Sinal Devido à Difração.....	45
4.1.3 Difração por Múltiplos Obstáculos	47
5 MATERIAIS E MÉTODOS	51
5.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	51
5.1.1 Distância Máxima de Operação sem Interferência.....	52

5.1.2	Distância Máxima de Operação com Interferência	53
5.1.3	Sensibilidade do Sistema	54
5.1.4	Operação sob Variações Bruscas na Corrente	55
5.2	MÉTODO PROPOSTO PARA O MODELAMENTO DO DECAIMENTO DA TRANSMISSÃO	56
5.3	SOFTWARE DESENVOLVIDO	60
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
6.1	EXPERIMENTOS DE VALIDAÇÃO.....	64
6.1.1	Distância Máxima sem Interferência	64
6.1.2	Distância Máxima com Interferência	65
6.1.3	Análise dos Resultados dos Experimentos das Distâncias	66
6.1.4	Sensibilidade do Sistema	67
6.1.5	Operação sob Variações Bruscas na Corrente	68
7	CONCLUSÕES	71
7.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	72
7.2	PUBLICAÇÕES	72
REFERÊNCIAS.....		74

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Conceito da Aplicação do Sistema Proposto.	22
Figura 1.2 – Diagrama de Blocos dos Nós Sensores.....	23
Figura 2.1 – Exemplo de Topologia de uma RSSF.	29
Figura 2.2 – Rede de Sensores sem Fio Proposta.....	30
Figura 2.3 – Captador de Energia.	31
Figura 3.1 – Inspeção Visual da Vegetação em uma Faixa de Passagem.	34
Figura 3.2 – Helicóptero Equipado para Serviço de Inspeção Aérea.	35
Figura 3.3 – Imagem Aérea Multiespectral Capturada.	37
Figura 3.4 – Fluxograma do Método Proposto por Ahmad.....	38
Figura 4.1 – Propagação de Sinal com Antena Receptora em Região Sombreada..	42
Figura 4.2 – Primeira Zona de Fresnel de uma Propagação.....	44
Figura 4.3 – Obstáculo do Tipo “Gume de Faca”	46
Figura 5.1 – Configuração Adotada no Experimento sem Interferência de Vegetação.....	52
Figura 5.2 – Configuração Adotada no Experimento com Interferência de Vegetação.....	53
Figura 5.3 – Configuração Adotada no Experimento para Testar a Sensibilidade.	54
Figura 5.4 – Configuração Adotada no Experimento de Operação sob Variações Bruscas de Corrente.	56
Figura 5.5 – Modelo Proposto.	58
Figura 5.6 – Procedimento Realizado para Determinar a Equação do Posicionamento dos Obstáculos.	59
Figura 5.7 – Fluxograma do Software Desenvolvido.	61
Figura 6.1 – Gráfico Comparativo entre os Decaimentos com e sem Interferências.	66
Figura 6.2 – Gráfico da Distância entre a Linha de Visada dos Nós Sensores e a Vegetação pela Potência Recebida.	67
Figura 6.3 – Gráfico Comparativo entre os Dados Experimentais e o Modelamento Matemático.	68
Figura 6.4 – Interferências na Operação sob Variações Bruscas de Corrente.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Distância Normatizada Mínima entre os Condutores e a Vegetação ...	21
Tabela 2.1 - Características do Módulo XBEE-PRO S2.....	28
Tabela 6.1 – Desempenho do XBEE-PRO S2 sem Interferência.....	65
Tabela 6.2 – Desempenho do XBEE-PRO S2 com Interferência.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- ITU-R – Setor de Rádio da União Internacional de Telecomunicações
- OQPSK – Modulação por Deslocamento de Fase em Quadratura Deslocada
- PRS – Porcentagem de Recebimento com Sucesso
- RISC – Computador com um conjunto reduzido de instruções
- RSSI – Indicador da Potência Recebida do Sinal
- RSSF – Redes de Sensores Sem Fio
- SEP – Sistema Elétrico de Potência

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{adP_i} = Contribuição dos obstáculos principais

A_{ads_j} = Contribuição dos obstáculos secundários

C_N = Fator de correção empírico da atenuação

DL = Perda devida à difração

d = Distância até o transmissor

d_1 = Distância do ponto em que se deseja calcular o raio para a antena transmissora

d_2 = Distância do ponto em que se deseja calcular o raio para a antena receptora

f = Frequência do sinal

G_d = Perda causada pela difração

H = Altura da vegetação

H = Distância entre o topo da vegetação e a linha de visada dos nós sensores.

h_0 = Altura da obstrução

h_{ER} = Altura da curvatura da superfície no ponto do obstáculo como resultado do raio efetivo da terra

h_1 = Altura da antena transmissora

h_2 = Altura da antena receptora

L_T = Total de perdas

PL_{fs} = Perda no espaço livre

P_R = Potência recebida

P_T = Potência transmitida

R_n = Raio da enésima zona de Fresnel

S_N = Distância entre o pico do enésimo obstáculo principal e o pico do próximo obstáculo principal

x = Distância entre antenas emissora e receptora

y = Distanciamento entre antenas e obstáculos do tipo “gume de faca”

λ = Comprimento de onda do sinal transmitido

RESUMO

SISTEMA DE MONITORAMENTO DA INVASÃO DE VEGETAÇÃO NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO USANDO REDES DE SENsoRES SEM FIO

Acidentes provocados pela invasão de vegetação nas linhas de energia em zonas urbanas e rurais são causas comuns de interrupção no fornecimento de energia elétrica no Brasil. Este trabalho apresenta um novo método para monitorar a invasão de vegetação em linhas de transmissão e propõe um modelo matemático para o problema. O método proposto é baseado em uma Rede de Sensores sem Fio (RSSF) na qual um conjunto de nós sensores é posicionado sequencialmente ao longo de uma linha de transmissão. O objetivo principal do sistema de monitoramento é detectar a invasão de vegetação por meio do decaimento da potência do sinal entre dois nós sensores consecutivos. Quanto menor a potência recebida entre dois nós sensores, maior a invasão de vegetação. Medições experimentais demonstraram que é possível realizar a detecção por meio do uso de RSSFs e validaram o modelo matemático referente ao decaimento do sinal.

Palavras-Chave: Linhas de Transmissão, Monitoramento da Invasão de Vegetação, Rede de Sensores Sem Fio.

ABSTRACT

VEGETATION ENCROACHMENT MONITORING SYSTEM IN TRANSMISSION LINES USING WIRELESS SENSOR NETWORKS

Accidents provoked by vegetation encroachment in power lines located in urban and rural areas are common causes of interruption in electricity supply in Brazil. This work presents a novel monitoring system for measuring the vegetation encroachment around transmission lines and proposes a mathematical model for the problem. The proposed system is based on a Wireless Sensor Network (WSN) in which a set of sensor nodes is sequentially deployed along a large transmission power line. The main objective of the proposed measurement system is to assess the vegetation encroachment by means of the signal power decay between two consecutive sensor nodes. The lesser the received power between two sensor nodes, the larger is the vegetation encroachment. Experimental measurements showed that it is possible to perform the detection through the use of RSSFs and validated the mathematical model of the signal power loss.

Keywords: Transmission Power Lines, Vegetation Encroachment Measurement, Wireless Sensor Network.

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

No Brasil, o Sistema Interligado Nacional, que detém cerca de 96% da capacidade de produção de energia do país, possui uma malha de 129 mil km de linhas de transmissão (ONS, 2015). Dentro desse contexto, tem-se um forte investimento em medidas para auxiliar na prevenção de falhas ocorridas em um SEP (Sistema Elétrico de Potência) (QAYYUM, MALIK e SAAD, 2014).

As linhas de transmissão são apontadas como uma das partes mais vulneráveis do SEP, dado que em toda a sua extensão estão sujeitas aos mais diversos tipos de fenômenos naturais, como descargas atmosféricas, queimadas, invasão de vegetação, dentre outros (JÚNIOR, 2013). Estas situações podem causar problemas na linha, resultando em faltas que podem levar à interrupção da transmissão de energia. Devido a isto, há uma preocupação em se desenvolver técnicas que possam ajudar a prevenir tais problemas. No caso de linhas de transmissão, muitos esforços se concentram em antecipar as falhas, uma vez que, além do fator de vulnerabilidade das linhas, há também o fato de que a realização de uma checagem física das linhas demanda um grande investimento por parte da empresa de energia (SAHA, IZYKOWSKI e ROSOLOWSKI, 2010).

Diversos critérios norteiam as atividades desenvolvidas por colaboradores que realizam a inspeção e executam tarefas de manutenção nas linhas de transmissão aéreas. Várias etapas e procedimentos devem ser seguidos para realizar uma inspeção eficiente; uma delas é a etapa de diagnóstico (CEMIG, 2007). A etapa de diagnóstico envolve o processo de localização, que equivale à indicação do ponto em que o evento ocorreu e ainda avalia processos classificatórios do evento ocorrido. Em todos os casos, há a motivação para o desenvolvimento de ferramentas automatizadas que possam auxiliar equipes de manutenção. A utilidade de um processo adequado de localização se torna essencial ao se observar que muitas linhas de transmissão possuem centenas de quilômetros de extensão. Desse modo, a indicação do local da falta pode reduzir o tempo gasto na manutenção. Por outro lado, os processos classificatórios podem auxiliar na preparação, por parte da

equipe de manutenção, do conjunto de medidas a serem adotadas na normalização do sistema (JÚNIOR, 2013).

A maior parte das linhas de transmissão do Brasil foi implantada há mais de 15 anos (CRAIDE, 2012), possuindo um baixo grau de monitoramento e automação. O envelhecimento das linhas e o constante aumento no consumo de energia remetem à problemática da necessidade de uma maior confiabilidade do sistema. Esta confiabilidade está associada ao uso constante de dados coletados da rede para prevenir a falta não intencional do fornecimento de energia elétrica (QAYYUM, MALIK e SAAD, 2014).

O crescimento populacional torna necessário o desenvolvimento de tecnologias que dependem diretamente da energização, beneficiando famílias, ativando indústrias e contribuindo para o avanço tecnológico (INTER ACADEMY COUNCIL, 2007). Acidentes em zonas urbanas e rurais são causas comuns de interrupção no fornecimento de energia elétrica no Brasil (MENEZES, 2015). Na busca para minimizar estes transtornos, diversas companhias de energia adotam métodos de controle da altura da vegetação nas faixas de passagem (AHMAD, MALIK, *et al.*, 2013).

Acidentes causados pela invasão de vegetação nas linhas de energia em zonas urbanas e rurais são causas comuns de interrupção no fornecimento de energia elétrica (QAYYUM, MALIK e NAUFAL, 2015). A instalação e a manutenção das redes de transmissão levam à adoção de métodos como o corte total ou parcial da vegetação próxima às linhas, objetivando a prevenção da interrupção do fornecimento de energia elétrica (DUPRAS, PATRYC, *et al.*, 2016). Estas medidas tendem a ser agressivas e podem não garantir a operação sem interrupções das linhas a longo prazo por não haver um monitoramento da retomada do crescimento da vegetação.

Este trabalho propõe uma solução para realizar o monitoramento da invasão da vegetação nas faixas de passagem das companhias de energia elétrica. Esta solução baseia-se no uso de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) para monitorar a vegetação nos diversos trechos da rede, além de disponibilizar esta informação para o operador. Uma RSSF constitui-se de diversos nós sensores espalhados e interligados a um nó sorvedouro, que processa as informações recebidas (CARVALHO, LEAL, *et al.*, 2012). Em outro contexto, uma Rede de

Sensores Sem Fio (RSSF) consiste em uma grande quantidade de nós sem fio para monitorar variáveis espaciais e temporais de maneira distribuída. As RSSFs são amplamente aplicadas para monitorar o ambiente natural, incluindo a invasão da vegetação (MESTRE, SERÔDIO, *et al.*, 2010).

Neste trabalho, é introduzida uma solução para monitorar a invasão de vegetação automaticamente e de forma distribuída ao longo das linhas de transmissão de energia. A idéia principal é implantar vários nós de uma RSSF ao longo da linha de transmissão de energia a ser monitorada, em que cada nó transmite dados para o próximo nó vizinho. A RSSF implantada ao longo da linha de energia de transmissão permite, com base em uma métrica de qualidade de transmissão/recebimento, o monitoramento do nível de invasão da vegetação ao longo da linha. A métrica de qualidade usada é a potência recebida do sinal em cada nó, de maneira que quanto menor for a potência recebida em um determinado nó, maior será a invasão da vegetação no trecho em que o mesmo está localizado.

1.2 OCUPAÇÃO DA FAIXA DE PASSAGEM DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

A definição de alguns termos utilizados nas normas que tratam da ocupação da faixa de passagem devem ser mencionados, como (CELGPAR, 2010):

- Faixa de passagem – É a faixa de terra ao longo do eixo da linha aérea de subtransmissão e transmissão, podendo ser de domínio ou de servidão, cuja largura deve ser no mínimo igual à da faixa de segurança.
- Faixa de domínio – É a faixa de terra ao longo do eixo da linha aérea de subtransmissão e transmissão, declarada de utilidade pública, adquirida pelo proprietário da linha por meio de acordo por instrumento público extrajudicial, decisão judicial ou prescrição aquisitiva (aquisição de uma propriedade pela posse pacífica e ininterrupta durante certo tempo), devidamente inscrita no cartório de registro de imóveis, com largura no mínimo igual à da faixa de segurança.
- Faixa de servidão: é a faixa de terra ao longo do eixo da linha aérea de subtransmissão e transmissão cujo domínio permanece com o

proprietário (não é adquirida pelo proprietário da linha), porém com restrições ao uso. O referido direito sobre o imóvel alheio pode ser instituído através de instrumento público, particular, prescrição aquisitiva por decurso de prazo ou ainda por meio de medida judicial, mediante inscrição à margem da respectiva matrícula imobiliária. Neste caso, a concessionária, além do direito de passagem da linha, possui o livre acesso às respectivas instalações.

- Faixa de segurança: é a faixa de terra ao longo do eixo da linha aérea de subtransmissão e transmissão, necessária para garantir seu bom desempenho, a segurança das instalações e de terceiros.
- Largura da faixa de segurança: é o espaço de terra transversal ao eixo da linha de subtransmissão e transmissão e determinado em função de suas características elétricas e mecânicas, necessário para garantir o bom desempenho da linha, sua inspeção, manutenção e a segurança das instalações e de terceiros.
- Invasão: é todo ato de ocupação e ou de instalação de benfeitorias não autorizadas pela companhia de energia dentro da faixa de passagem da linha de transmissão, as quais podem colocar em risco a operação da mesma. A invasão também pode ter causas naturais, como a invasão de vegetação (ELEKTRO, 2013).

As faixas de linhas de transmissão caracterizam-se como locais que possuem limitações no que diz respeito ao uso e ocupação. A ocupação correta e a manutenção das faixas de servidão e de segurança contribuem para garantir a operação, a execução dos serviços de manutenção, a maior rapidez na localização de problemas nas linhas, bem como a preservação do meio ambiente e a segurança de pessoas e bens em suas proximidades. O uso compartilhado desses locais depende de estudos técnicos e de segurança estabelecidos nas normas técnicas brasileiras e nas especificações e procedimentos das concessionárias de energia (CELGPAR, 2010).

A norma técnica NBR 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica – estabelece os critérios a serem observados para a coexistência da linha de transmissão com obstáculos e com a execução de atividades por terceiros na faixa de passagem e no seu entorno (ABNT, 1996).

No que diz respeito à vegetação próxima às linhas de transmissão, a norma institui a cultura de cereais, horticultura, floricultura, fruticultura e pastagens, desde que constituída de espécies cuja altura máxima na idade adulta garanta que a distância do condutor mais baixo à vegetação não seja inferior a 4 metros. Plantações de médio e de grande porte não são permitidas nas faixas de passagem. O item 13.2 da NBR-5422 da ABNT impõe condições mínimas de segurança para a existência de cultivo dentro da faixa de passagem. Uma das condições impostas é a distância mínima entre o condutor e a vegetação, conforme apresentado na Tabela 1.1 (ELEKTRO, 2013).

Tabela 1.1 – Distância Normatizada Mínima entre os Condutores e a Vegetação.

Tensão Nominal Entre Fases – kV(ef)	Distância – H (m) (Condutor – Vegetação)
69	4,0
88	4,1
138	4,4

Fonte: (ELEKTRO, 2013)

Apesar da normatização que trata da vegetação nas faixas de passagem buscar garantir a segurança dos mais de 129 mil km de linhas de transmissão do Brasil (ONS, 2015), boa parte dos trechos das linhas estão em áreas de difícil acesso ou passam sob áreas de densas florestas (SILVA e BRITO, 2016). Sendo assim, um constante monitoramento da vegetação nestas regiões se faz necessário para evitar distúrbios na rede de transmissão.

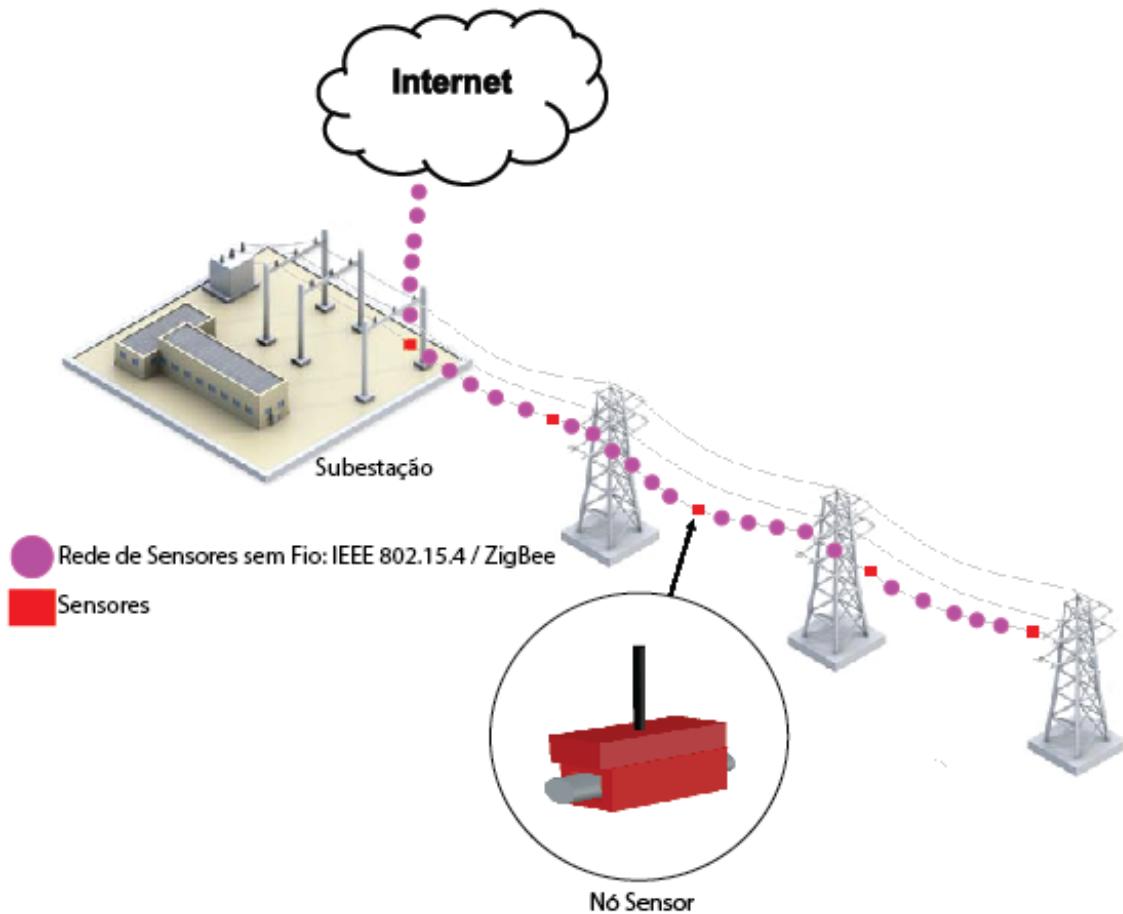
1.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema de monitoramento proposto, a ser aplicado em linhas de transmissão, é apresentado de forma esquemática na Figura 1.1. Ele é composto por um conjunto de nós sensores, que são instalados nos condutores da linha de transmissão a ser monitorada, e por outro nó localizado na subestação, que atua como central de monitoramento. Este nó possui um módulo de comunicação Wi-Fi, que compartilha a informação na Internet para que possa ser acessada de qualquer local pelo operador.

Os equipamentos instalados nas linhas de transmissão incluem sistema de colheita de energia, microcontrolador, módulo de rádio e uma antena. As

informações processadas pelo microcontrolador são enviadas via rádio operando em 2,4 GHz, que transmite esses dados até o nó localizado na subestação. Este nó também recebe comandos do operador do sistema, caso se queira atualizar os dados do monitoramento da vegetação.

Figura 1.1 - Conceito da Aplicação do Sistema Proposto.



Fonte: Própria.

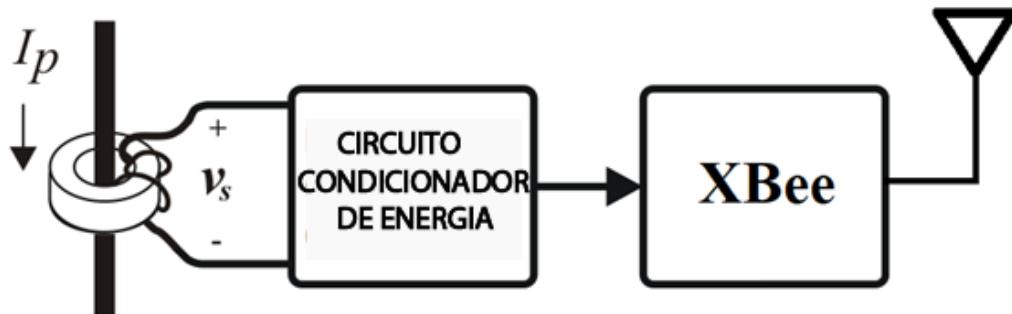
Conforme mostrado na Figura 1.1, pode-se inferir que: quanto maior for o número de nós, maior será o comprimento da linha de transmissão monitorada. A idéia principal para monitorar a invasão da vegetação baseia-se no fato de que, se dois nós compartilham a linha de visada com o caminho da linha de energia, então a qualidade de transmissão/recebimento destes nós é afetada pelo nível de invasão da vegetação na sua linha de visada. Dessa forma, com a aplicação correta do método proposto e uma métrica de qualidade adequada da transmissão/recepção,

seria obtido um sistema de monitoramento automático e distribuído do nível de invasão da vegetação em linhas de transmissão.

Uma característica importante do sistema de monitoramento proposto é que seus nós são auto-alimentados por indução magnética, devido à corrente elétrica que passa pelas próprias linhas (SOUZA, RODRIGUEZ e CARVALHO, 2014). A alimentação dos equipamentos é de 5 VDC, fornecida por captores de energia, que garantem a operação dia e noite dos sistemas sem interrupções. Uma proposta do sistema de colheita de energia será detalhada na Seção 2.5. No caso de uma eventual desenergização das linhas, o sistema também será desligado. Não há baterias para garantir a operação do sistema quando não houver energia nas linhas.

A razão de não haver outra fonte de alimentação para o sistema está ligada à grande quantidade de nós sensores instalados para monitoramento em uma determinada rede, pois ao adicionar-se uma bateria para cada nó sensor, os custos da rede como um todo seriam aumentados. A Figura 1.2 apresenta o diagrama de blocos dos nós instalados nas linhas de transmissão.

Figura 1.2 – Diagrama de Blocos dos Nós Sensores.



Fonte: Adaptado de (SOUZA, MOREIRA e RODRIGUEZ, 2017).

O funcionamento do sistema se dá de forma que o crescimento uniforme da vegetação entre um par de nós sensores causa um decaimento da potência recebida no nó receptor do trecho. Esta variação de potência corresponde à qualidade da transmissão dos dados que estão sendo enviados pelo sistema. Sendo assim, quando há crescimento expressivo de vegetação entre dois nós sensores, a qualidade na comunicação entre os nós é afetada, e esta informação é transmitida pela rede até a subestação. Juntamente com a informação de alerta de crescimento além do permitido, há uma identificação do trecho em ameaça. A partir desta

identificação e do nível de alteração da potência recebida no determinado nó do trecho, o operador deve decidir o grau de emergência no qual deve ser realizada a inspeção visual deste trecho.

1.4 OBJETIVOS

Neste trabalho será avaliada a utilização de uma rede de sensores sem fio no contexto do monitoramento da invasão de vegetação uniforme nas faixas de passagem. O objetivo principal é propor um método para o monitoramento do crescimento uniforme de vegetação, desenvolver protótipos e qualificar a eficiência do método proposto por meio de experimentos laboratoriais e de campo em diferentes condições de operação. Além disto, objetiva-se propor um modelo matemático para representar o decaimento da potência do sinal.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto está estruturado da seguinte forma:

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre redes de sensores sem fio, sensoriamento das linhas de transmissão e dos dispositivos de *hardware* utilizados no sistema proposto.

No Capítulo 3 são ilustrados alguns métodos de detecção da invasão de vegetação nas faixas de passagem encontrados na literatura científica.

No Capítulo 4 são detalhados os conceitos utilizados para realizar o modelamento matemático do decaimento do sinal para diferentes distâncias entre nós.

No Capítulo 5 são apresentadas as metodologias dos experimentos realizados, bem como o método proposto para o modelamento matemático, assim como a lógica e funcionamento do *software* implementado no microcontrolador.

No Capítulo 6, os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados são apresentados e analisados.

No Capítulo 7 as conclusões deste trabalho são expostas, bem como as perspectivas de continuação desta pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será exposta uma abordagem sobre redes de sensores sem fio, sensoriamento das linhas de transmissão e unidades de radiofrequência e processamento. Por fim, a unidade de conversão de energia e regulação de tensão utilizada no sistema proposto é apresentada.

2.1 REDES DE SENsoRES SEM FIO

O desenvolvimento de tecnologias nas áreas de sensoriamento, sistemas eletromecânicos e comunicação sem fio estimula o crescimento constante do uso de sensores inteligentes em diversos setores. O uso destes sensores, em diferentes aplicações, está ligado à utilização em redes de sensores sem fio. Uma RSSF consiste em uma rede com vários nós distribuídos, que possuem capacidade de autoconfiguração e adaptação em caso de problemas como perdas de nós ou falhas na comunicação (AKYILDIZ, SANKARASUBRAMANIAM e CAYIRCI, 2002).

Neste tipo de rede, cada nó pode possuir diversos sensores (temperatura, infravermelho, calor, umidade, corrente elétrica, dentre outros) ou equipamentos interligados (como câmeras, por exemplo). Estes nós sensores podem ser organizados em grupos (*clusters*), no qual um ou mais nós sensores possuem a capacidade de detectar um evento e identificar se deve ou não ser realizada a transmissão em *broadcast* da informação (CHONG e KUMAR, 2003).

2.2 SENSORIAMENTO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

O sistema proposto neste trabalho trata da problemática de se manter um monitoramento contínuo da invasão de vegetação nas linhas de transmissão das concessionárias de energia. Propõe-se que esta funcionalidade seja garantida por meio do uso de centenas de nós sensores espalhados pela rede, munidos de módulos de comunicação e microcontroladores. Os nós sensores devem ser fixados nas linhas e têm sua alimentação garantida pela captura da energia da rede por meio da indução eletromagnética.

A RSSF funcionará de forma que os módulos se comuniquem sequencialmente até a informação chegar às "estações base", que geralmente estão localizadas a quilômetros de distância do último nó sensor, nas subestações (YANG, DIVAN, et al., 2009). A informação será novamente processada e enviada via Internet para a interface de monitoramento.

O sensoriamento remoto de toda a rede traz um aumento considerável na confiabilidade do sistema elétrico, prevenindo as companhias de futuros problemas com interrupções não intencionais no fornecimento de energia. Outra vantagem está ligada ao fato de que ao se eliminar a necessidade da realização de inspeções visuais de campo e do uso constante de *drones* para monitoramento, é possível reduzir drasticamente os custos relacionados ao controle do dossel arbóreo nas faixas de passagem.

As linhas de transmissão operam em ambientes com várias adversidades, como elevado campo magnético, temperaturas altas e condições climáticas adversas (QAYYUM, MALIK e SAAD, 2014). O sistema proposto considera em seu projeto as condições de funcionamento às quais o mesmo será submetido, como: captura de energia suficiente para o funcionamento do módulo, provimento de comunicação sem fio entre os nós sensores e unidade de processamento com capacidade para transferência de informações em tempo real.

Um dos desafios na implementação da aplicação proposta é garantir a comunicação confiável entre os nós sensores, considerando as possíveis interferências no sinal. Uma das possíveis interferências provém da rede elétrica de alta tensão, que no caso do sistema proposto está muito próxima aos dispositivos. Visando medir a interferência causada por altos níveis de corrente em condutores próximos aos nós sensores, testes laboratoriais foram realizados com este objetivo, como será visto na Seção 5.1.4.

2.3 UNIDADE DE RADIOFREQUÊNCIA

Neste trabalho é utilizado o módulo de radiofrequência XBee-PRO S2 (DIGI INTERNATIONAL, 2017). Este módulo foi desenvolvido para utilizar o padrão IEEE 802.15.4 e atender aos requisitos de baixa transferência de dados, fácil conectividade e baixo consumo de energia. Este módulo tem uma taxa de

transferência de dados de até 250 kbps e opera na banda de frequência conhecida por ISM (industrial, científica e médica) de 2,4 GHz (DIGI INTERNATIONAL, 2017).

O módulo XBee-PRO S2 utiliza modulação por deslocamento de fase em quadratura deslocada (OQPSK) para modular a sua portadora (CALLAWAY, GORDAY, *et al.*, 2002). Este tipo de modulação contribui para minimizar efeitos adversos na comunicação sem fio, como ruídos de banda larga de frequência causados por impulsos normalmente observados em linhas de transmissão (YANG, DIVAN, *et al.*, 2009).

Uma das características do protocolo ZigBee, utilizado no módulo de rádio XBee PRO S2, é a possibilidade de configurar a rede para transmitir um dado que representa o fator de qualidade dos pacotes recebidos (DIGI INTERNATIONAL, 2017). Este fator de qualidade da comunicação na rede é chamado de RSSI (Indicador da Potência Recebida do Sinal), e pode ser obtido de diferentes maneiras, a depender do modo de operação no qual o módulo está configurado.

O XBee-PRO S2 tem mais de 65.000 endereços de rede disponíveis para suportar configurações de rede de larga escala (DIGI INTERNATIONAL, 2017). Este dispositivo também possui criptografia para melhorar a segurança da comunicação. A Tabela 2.1 mostra um sumário das características do módulo de rádio XBee-PRO S2 utilizado neste trabalho.

Tabela 2.1 - Características do Módulo XBee-PRO S2.

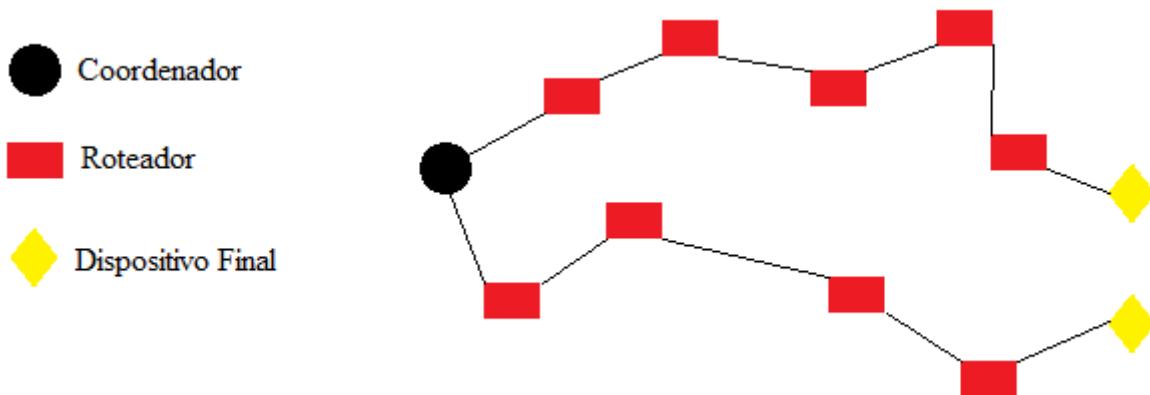
Características	
Potência de Transmissão	18 dBm (Máxima)
Taxa de Transferência	Até 250 kbps
Taxa de Transferência de Interface Serial	Até 115,2 kbps
Sensibilidade de recepção	-100 dBm (1% de erro)
Tipo de Antena	RSPMA de 2,1 dBi
Características de Energia	
Tensão de Operação	2,8 – 3,4 V
Corrente de Operação	até 214 mA @3,3 V

Fonte: (DIGI INTERNATIONAL, 2017).

A comunicação pode ser realizada ponto a ponto, multipontos ou em pares, em que cada nó da rede pode ser configurado como coordenador, roteador ou dispositivo final. Este tipo de configuração simplifica a construção da topologia de rede desejada, facilitando, por exemplo, a elaboração de redes de grande porte

(TODOROV, NIKOLOVA e NIKOLOV, 2016), como a que é proposta neste trabalho. Na Figura 2.1 pode-se observar um exemplo de topologia que pode ser adotada para o método proposto neste trabalho.

Figura 2.1 – Exemplo de Topologia de uma RSSF.



Fonte: Própria.

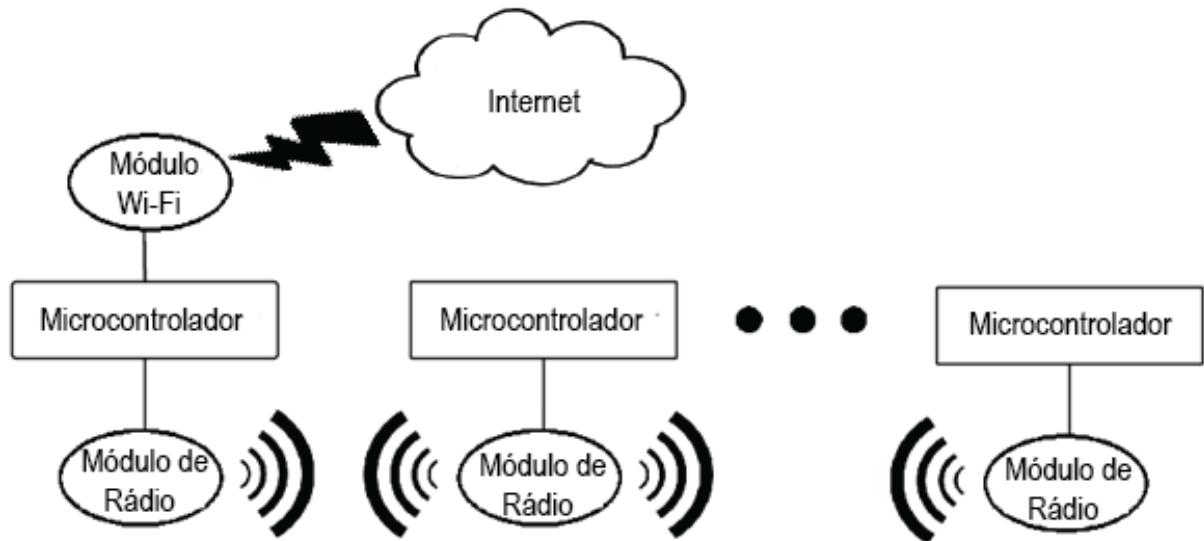
O coordenador atua como um nó central, que é configurado para sincronizar a transmissão na rede e estabelecer rotas entre os roteadores e os dispositivos finais. Desta maneira, a rede pode se auto-organizar em casos de falhas, o que representa mais uma vantagem do protocolo. Para a problemática deste trabalho, em caso de falha em um trecho da rede, o sistema irá passar pelo processo de *self-healing*, em que uma nova tabela de rotas pode ser estabelecida pelo nó coordenador e a parte da rede que permanece sem falhas pode continuar sendo monitorada normalmente.

2.4 UNIDADE DE PROCESSAMENTO

A unidade de processamento é composta por uma plataforma de prototipação, o Arduino Uno®. Este dispositivo é útil no desenvolvimento e criação de protótipos com arquitetura RISC (Computador com Número Reduzido de Instruções) avançada. É muito utilizada por fabricantes, estudantes e educadores. Essa placa fornece aos usuários um ambiente de desenvolvimento de *hardware* e *software* de fonte totalmente aberta, possuindo funcionalidade de computação avançada e possibilitando sua compatibilidade com uma grande variedade de dispositivos (ARDUINO, 2017).

Diversos módulos externos utilizados para expandir o *hardware* do Arduino podem ser acoplados no mesmo de forma simples (ARDUINO, 2017). Neste trabalho, os Arduinos que compõem a unidade de processamento da Rede de Sensores possuem módulos de rádio, que simplificam a conexão física entre a plataforma Arduino e o módulo XBee PRO S2. A Figura 2.2 apresenta o diagrama de blocos dos *hardwares* utilizados na RSSF proposta.

Figura 2.2 – Rede de Sensores Sem Fio Proposta.

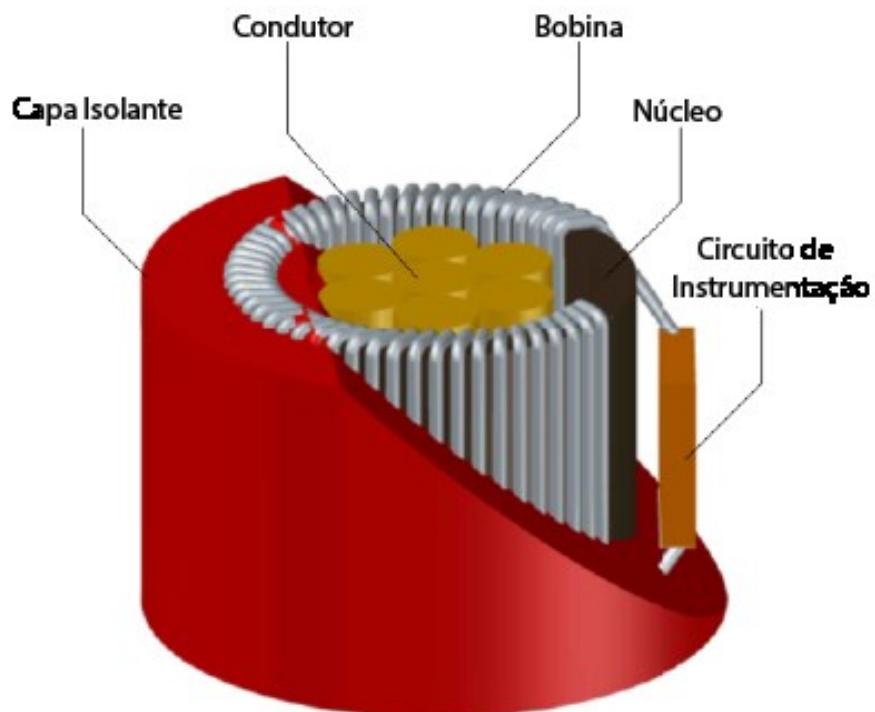


Fonte: Própria.

2.5 UNIDADE DE CONVERSÃO DE ENERGIA E REGULAÇÃO DE TENSÃO

A conversão de energia se dá por meio de um sistema de captação de energia elétrica, que é composto de duas partes separáveis fisicamente. Estas partes podem ser "grampeadas" juntas ao redor da linha, formando um circuito magnético completo, conforme exposto na Figura 2.3. O sistema então capta a energia da linha. O captador fornece energia para o subsequente circuito. Este circuito adequa o valor da tensão para a faixa de operação do sistema embarcado. Este trabalho faz uso do projeto de captação de energia desenvolvido e patenteado por pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba (SOUZA, RODRIGUEZ e CARVALHO, 2014).

Figura 2.3 – Captador de Energia.



Fonte: (SOUZA, RODRIGUEZ e CARVALHO, 2014).

O sistema de captação de energia é uma parte importante no planejamento de uma RSSF. Alguns métodos propostos na literatura para detectar a invasão de vegetação fazem uso de baterias para fornecer energia necessária para o funcionamento dos nós sensores, como será mostrado no Capítulo 3.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados alguns métodos de monitoramento a invasão de vegetação em linhas de transmissão presentes na literatura.

3.1 MÉTODOS DE MONITORAMENTO DA VEGETAÇÃO

Diversos fatores podem causar curtos em linhas de transmissão. Curtos em linhas de transmissão podem ocorrer quando dois condutores entram em contato (AGGARWAL, JOHNS, *et al.*, 2000). Isto pode acontecer devido a condições ambientais, como ventos fortes e flacidez dos condutores. No entanto, uma das causas mais comuns é a invasão da vegetação sob as linhas, que além de ocasionar curtos pode também causar danos maiores, resultando na interrupção total da operação da linha afetada (LOUIT, PASCUAL e BANJEVIC, 2009).

Uma das características das linhas de transmissão é o fato delas serem interligadas em cascata. Sendo assim, problemas em qualquer parte do sistema podem causar transtornos também no restante das linhas conectadas em cascata (SONG e KEZUNOVIC, 2007). Diversas técnicas que realizam o monitoramento da vegetação nas faixas de passagem são apresentadas na literatura, dentre elas (AHMAD, MALIK, *et al.*, 2013):

- Inspeção de campo;
- Vigilância aérea por vídeo;
- Imagens aéreas multiespectrais;
- Rede de sensores multimídia integrada.

3.1.1 Inspeção de Campo

Uma das práticas mais adotadas por companhias de energia é a inspeção de campo usando veículos (AHMAD, MALIK, *et al.*, 2013). Neste tipo de operação, uma patrulha com ao menos dois funcionários da empresa percorre trechos da linha realizando inspeção visual. Os funcionários que inspecionam as linhas são equipados com computadores que contêm informações sobre os componentes elétricos instalados em cada torre. Após a análise do técnico no local, decide-se se

haverá corte de árvores que podem pôr em risco a operação da linha (ANDRE e MATOS, 2009). Este método é caro devido à necessidade de manter grandes equipes de funcionários qualificados (que sejam capazes de identificar riscos para a linha de transmissão), equipados com *laptops*, dados geográficos, mapas, etc, conforme ilustrado na Figura 3.1. Além disso, a operação exige muito tempo em função da dimensão das linhas e também depende do julgamento humano, que pode resultar em erros.

Figura 3.1 – Inspeção Visual da Vegetação em uma Faixa de Passagem.



Fonte: (AHMAD, MALIK, et al., 2013).

3.1.2 Vigilância Aérea por Vídeo

Helicópteros e aeronaves contendo câmeras de vigilância ou sensores instalados podem ser empregados para realizar o monitoramento, como mostra a Figura 3.2 (HOOPER e BAILEY, 2004). Companhias de energia investem uma grande quantidade de dinheiro para a manutenção das linhas de transmissão, que podem apresentar milhares de quilômetros. Em alguns trechos, a linha passa em regiões florestais densas, que necessitam da vigilância por meio de filmagens aéreas.

O método da vigilância aérea por vídeo é mais empregado nas regiões em que há dificuldades para o acesso de pessoas. O helicóptero voa em velocidade

reduzida (entre 80 e 96 km/h) com câmeras instaladas na própria aeronave, conforme exemplificado na Figura 3.2, com funcionários fazendo uso de binóculos para auxiliar na operação do equipamento. Estas câmeras gravam do início da operação até o seu final e devem ficar distanciadas de 30 a 50 metros da linha de transmissão para ter melhor eficácia (HOOPER e BAILEY, 2004).

Figura 3.2 – Helicóptero Equipado para Serviço de Inspeção Aérea.



Fonte: (ENERGISA, 2013).

Este método é mais usado para regiões onde há densas florestas ou terrenos geograficamente acidentados. Esta técnica consiste em analisar as gravações para tomar decisões sobre a intervenção ou não na vegetação dos trechos analisados. Algumas dificuldades são encontradas para conseguir adquirir dados precisos, tais como (AHMAD, MALIK, *et al.*, 2013):

- Reconhecimento da localização dos alvos: a tarefa de vigilância de vídeo automatizada para linhas de energia baseia-se em extrair os postes e as linhas de transmissão das imagens capturadas. A mudança da perspectiva do alvo é o principal problema no reconhecimento de padrões. Além disso, as condições ambientais, como a intensidade da luz, clima e o ambiente

(árvores, estradas e cercas) são também fatores-chave que tornam o reconhecimento do alvo mais difícil.

- Estabilização da câmera: o 'balanço da câmera' é um problema muito comum, que distorce as imagens capturadas por qualquer câmera de vigilância montada em um veículo ou no ar. A câmera de vigilância precisa, portanto, de estabilização para cumprir a tarefa de monitoramento.
- Análise dos dados: lidar com a grande quantidade de informações coletadas durante a operação aérea é um dos principais problemas deste método. Os dados digitais são processados por softwares de reconhecimento de padrões, em que algoritmos baseados em redes de aprendizagem de máquina e redes neurais são aplicados para analisar os dados e localizar os defeitos. Isto pode ser realizado depois que a patrulha aérea recebe os dados ou durante a patrulha, em que vários processadores de sinais são necessários para a alta velocidade de processamento computacional exigida. Com o investimento em sistemas de análise de dados eficiente, torna-se viável realizar o processamento dos dados.

3.1.3 Imagens Aéreas Multiespectrais

Imagens aéreas multiespectrais consistem em uma tecnologia remota que captura imagens em uma determinada frequência juntamente com o espectro eletromagnético, que são separáveis por filtros ou por meio de instrumentos sensíveis a determinados comprimentos de onda (JARDINI, MAGRINI, *et al.*, 2007).

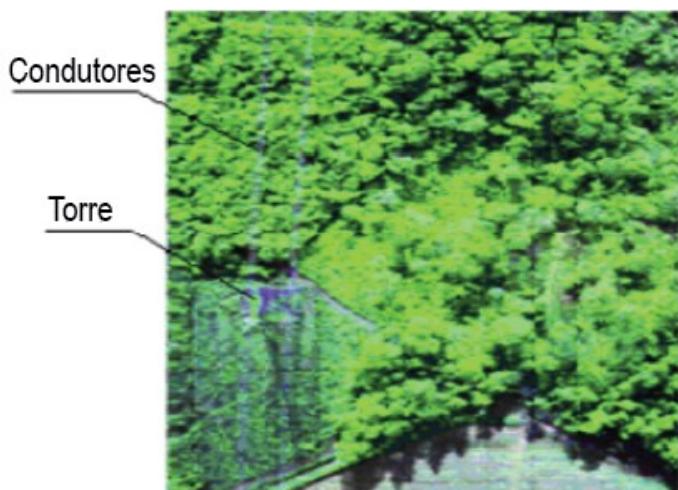
Câmeras multiespectrais são instaladas em helicópteros, aeronaves ou balões para capturar imagens das regiões em que há riscos de invasão da vegetação nas linhas. Após a captura, as imagens são processadas por sistemas de informações geográficas, como pode ser observado na Figura 3.3.

Anteriormente este método era inaplicável, pois não havia meios computacionais que realizassem o processamento da imagem para detectar as linhas. No entanto, os atuais avanços na resolução de imagens e na tecnologia fotométrica tornaram esta solução viável.

Apesar do método de imagens multiespectrais ter se mostrado mais preciso se comparado com os métodos de inspeção de campo e vigilância aérea, pesquisas

mostraram que as imagens capturadas podem não ser tão precisas devido aos parâmetros dos sensores e a variações atmosféricas (AHMAD, MALIK, *et al.*, 2013). Além disso, a baixa altitude de vôo necessária para este método dificulta a sua execução em áreas remotas e acidentadas (MILLS, CASTO, *et al.*, 2010).

Figura 3.3 – Imagem Aérea Multiespectral Capturada.



Fonte: (AHMAD, MALIK, *et al.*, 2013).

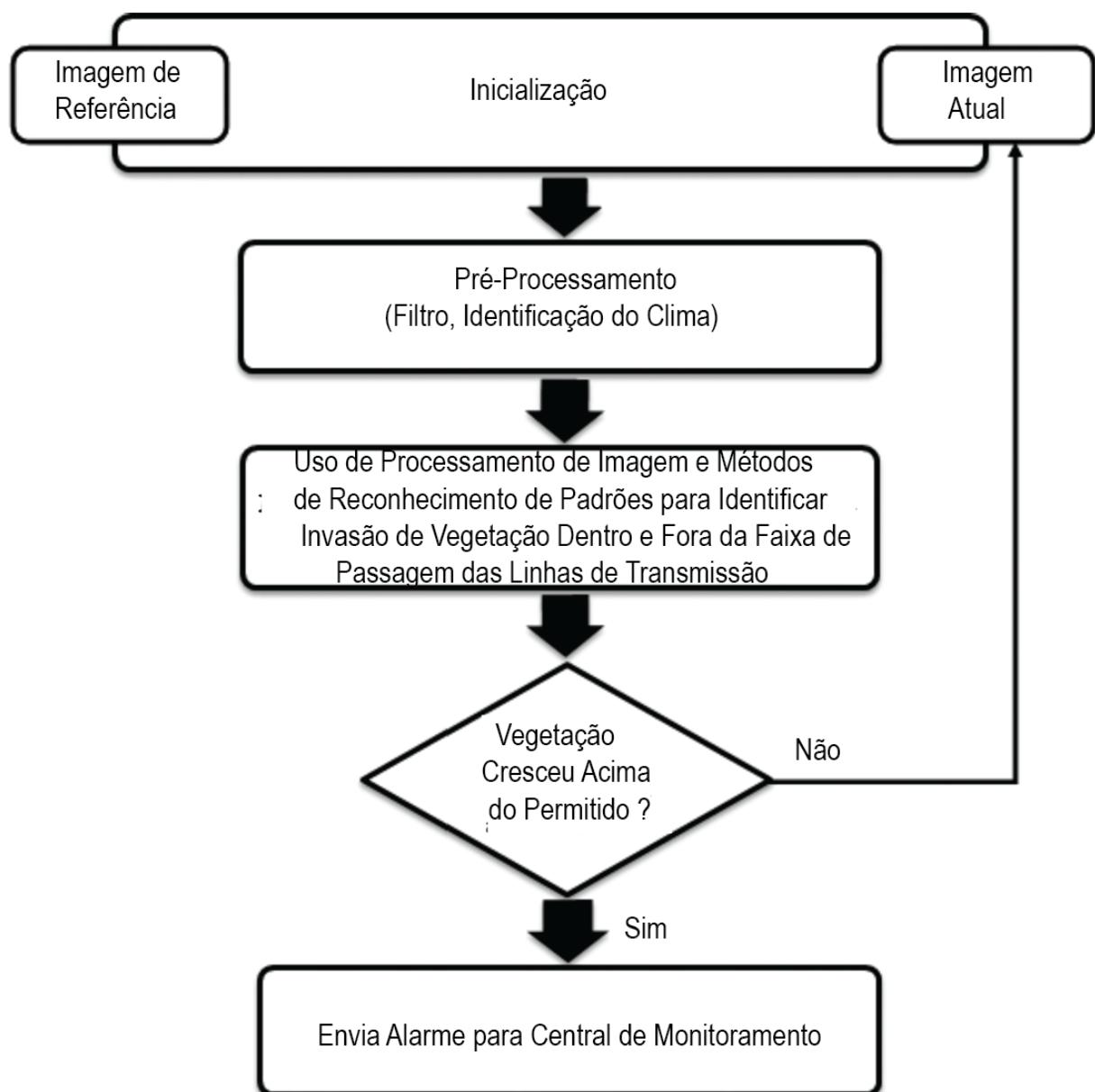
3.1.4 Rede de Sensores Multimídia Integrada

O trabalho realizado por Ahmad (2014) propõe um método para realizar o monitoramento por meio de RSSF. O conceito baseia-se em uma plataforma de processamento de imagem focado em detecção e análise de invasões de vegetação nas linhas de transmissão. O método proposto sugere o uso de nós sensores com câmeras integradas instalados nos postes de transmissão, formando assim uma rede que transmite as imagens de cada trecho até uma base central. A câmera presente em cada nó sensor é de baixa resolução (VGA), facilitando a transmissão Wi-Fi do dado pela rede (AHMAD, MALIK, *et al.*, 2014).

O método tem o objetivo de determinar a altura da vegetação e processar a imagem para determinar a distância relativa entre a linha de transmissão e a vegetação. Além disso, o processamento da imagem visa também identificar possíveis riscos às linhas que existam fora da faixa de passagem. Após chegar à estação base, todas as imagens dos diversos trechos da linha são processadas e enviadas para um servidor *online*. Caso haja a identificação de possíveis riscos, um sinal de alarme é enviado (AHMAD, MALIK, *et al.*, 2014). O fluxograma do

funcionamento do método proposto é mostrado na Figura 3.4. Observa-se que o método realiza a comparação entre a imagem atual de cada trecho e a imagem de referência, que é capturada no momento da inicialização do sistema. Após esta etapa, o sistema realiza o processamento da imagem e define se há ou não invasão de vegetação. Caso haja invasões, um alerta é emitido indicando o trecho em que há a necessidade de inspeção.

Figura 3.4 – Fluxograma do Método Proposto por Ahmad.



Fonte: (AHMAD, MALIK, et al., 2014).

O custo deste método está diretamente ligado à implantação dos nós sensores (incluindo módulo de rádio, câmera, bateria solar e encapsulamento

blindado), que precisam ser montados em cada poste que esteja cercado por vegetação densa. A principal vantagem do método é que ele pode fornecer resultados mais precisos quando comparado com os métodos de captura de imagens aéreas, visto que as imagens capturadas por este método são próximas das linhas e da vegetação (AHMAD, MALIK, *et al.*, 2014).

Uma das desvantagens deste método está associada à grande quantidade de informações a serem processadas, o que exige grande esforço computacional. Outra desvantagem está ligada ao investimento inicial, que deve incluir uma câmera e uma bateria solar para cada nó sensor, o que aumenta o custo por nó do sistema.

4 MODELAGEM MATEMÁTICO

4 MODELAMENTO MATEMÁTICO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos necessários para a formulação do modelamento matemático do sistema proposto.

4.1 OBSTRUÇÕES NA PROPAGAÇÃO DO SINAL

Uma das premissas do projeto de um enlace de radiofrequência é garantir a desobstrução da linha de visada entre as antenas dos transmissores e dos receptores. A depender do tipo de antena, a energia emitida pela mesma pode ser irradiada igualmente em todas as direções ou pode ser concentrada em uma determinada direção. A energia eletromagnética é irradiada por meio de antenas e propaga-se em frentes de ondas esféricas (SABBAN, 2016).

Uma parte da frente de onda eletromagnética segue o menor caminho entre as antenas transmissoras e receptoras, e este caminho é normalmente chamado de linha de visada direta (RAPPAPORT, 2009). Do ponto de vista da antena receptora, este caminho contém a maior parte da potência do sinal recebido. Porém, um obstáculo não necessita bloquear a linha de visada para que se observem efeitos no nível de potência recebido. Portanto, para ser considerada desobstruída, a linha de visada deve ter um volume mínimo ao seu redor que esteja livre de obstruções. Este volume adjacente ao caminho de visada é definido por meio do conceito de zonas de Fresnel (GUO e BARTON, 2002).

Elementos físicos ao longo do caminho de propagação, a exemplo da vegetação, podem causar reflexões em parte do feixe de propagação. O nível do sinal resultante é composto pela combinação das frentes de onda, que será igual à soma vetorial dos campos eletromagnéticos. Este fenômeno é conhecido como recepção multipercurso. Observa-se que, deste modo, a frente de onda refletida viaja por uma distância mais longa que a da linha de visada para alcançar a antena receptora. Há um deslocamento de fase entre as frentes de onda diretas e as refletidas. Este deslocamento na frente de onda refletida se dá devido ao comprimento excessivo do trajeto somado à mudança de fase induzida na frente de onda pelo ponto de reflexão. Os sinais somam-se na antena receptora de forma

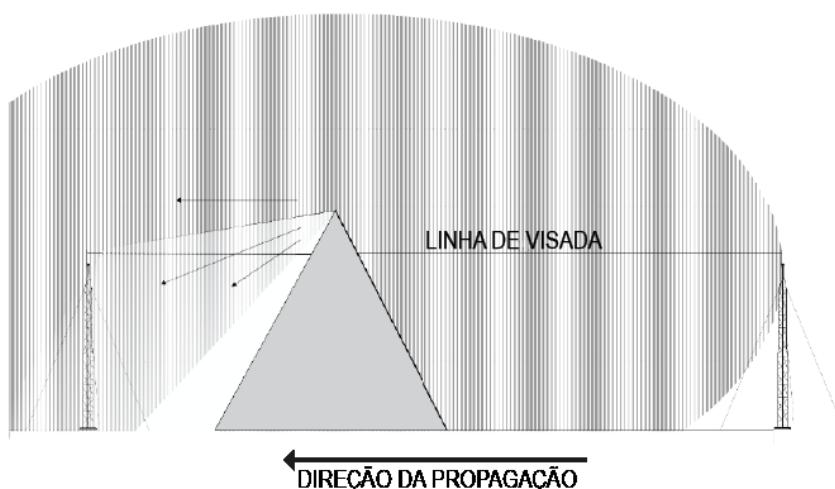
construtiva ou destrutiva, a depender da diferença de fase total (RAPPAPORT, 2009).

O mecanismo de reflexão para propagação de frentes de onda eletromagnética é muito complexo e as mudanças resultantes na amplitude e fase da frente de onda refletida dependem de muitas variáveis. Os fatores primários incluem a frequência da frente de onda de propagação, o ângulo de incidência, a condutividade da superfície refletiva e a polarização da frente de onda incidente (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2001).

A perda de potência na frente de onda refletida é atribuída a: parte da energia incidente que está sendo absorvida pelo material refletivo; às propriedades elétricas do material refletivo (permissividade, permeabilidade e condutância); e à frequência da frente de onda. Estes são os principais fatores que determinam a mudança na amplitude da frente de onda refletida (CALLAWAY, GORDAY, *et al.*, 2002).

A difração sofrida pelas frentes de ondas eletromagnéticas em torno de um obstáculo é explicada pelo Princípio de Huygens-Fresnel, que afirma, em essência, que cada ponto no plano de uma frente de onda atua como uma fonte pontual de ondas secundárias que irradiam na direção da propagação (SELEZOV, KRYVONOS e GANDZHA, 2018). Se uma obstrução do tipo gume de faca estiver localizada adjacente a uma fonte de onda, uma parte da frente de onda se propagará na região das sombras atrás da obstrução. Isto é ilustrado graficamente na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Propagação de Sinal com Antena Receptora em Região Sombreada.



Fonte: Adaptada de (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2016).

A intensidade do campo em um ponto localizado na região das sombras é igual à soma vetorial dos campos eletromagnéticos que chegam de todas as fontes secundárias. Um receptor localizado na região sombreada ainda pode receber um nível de sinal viável, embora muito atenuado (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2016).

4.1.1 Zonas de Fresnel

Zonas de Fresnel são as infinitas elipsoides concêntricas que caracterizam o padrão de radiação em uma comunicação a rádio. A primeira zona é a que define o volume ao redor da linha de visada entre duas antenas que concentra mais de 50% da energia do sinal, e deve estar livre de obstáculos (GUO e BARTON, 2002).

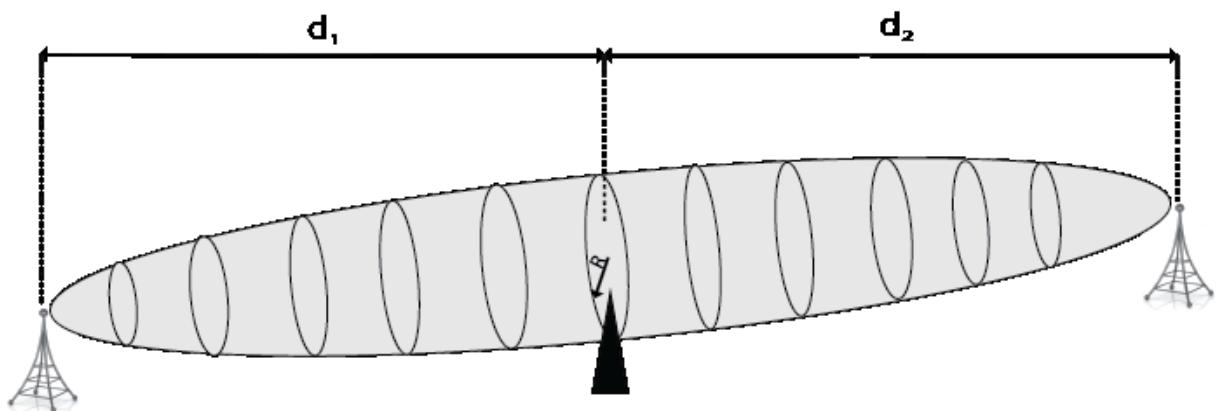
Para os obstáculos que interferem na primeira zona de Fresnel, mas não bloqueiam a linha de visada, observa-se uma interferência construtiva ou destrutiva da frente de onda refletida. Sabe-se que uma zona de Fresnel constitui-se de uma região tridimensional, de modo que as obstruções podem interferir de cima, de baixo ou dos lados do caminho da visada direta. Uma obstrução no limite exterior da primeira zona de Fresnel proporcionará uma mudança de fase relativa a 180°. Com um deslocamento adicional de 180° induzido no ponto de reflexão, o deslocamento de fase relativo será um comprimento de onda inteiro e as frentes de onda se somarão de forma construtiva. À medida que a obstrução invade a zona de Fresnel, o deslocamento de fase diminuirá em proporção à redução do comprimento da trajetória percorrida pelo sinal. Com isto, a mudança de fase induzida pelos obstáculos se tornará o fator dominante. Uma invasão maior na área interna da primeira zona de Fresnel resultará em uma diminuição ou desvanecimento do nível de potência do sinal recebido (SABBAN, 2016).

No ponto em que a obstrução se torna tangente ao caminho da visada direta, as perdas de sinais serão ainda maiores. Uma prática comum adotada para evitar o desvanecimento do sinal é manter pelo menos 60% do raio da primeira zona de Fresnel sem obstruções (GUSTRAU, 2012).

Quando um obstáculo no caminho da propagação bloqueia a linha de visada direta, podem-se obter efeitos degenerativos na transmissão. Para que o sinal atinja a antena de recepção localizada na sombra de um obstáculo, a forma do obstáculo é um fator importante. Para superfícies lisas e arredondadas, como o topo de uma

colina, o sinal pode ser totalmente perdido. Por outro lado, se o obstáculo exibir um perfil pontiagudo, do tipo "gume de faca", alguma porção da frente de onda pode ser difratada em torno ou sobre o obstáculo. Este é o caso de vegetações ou montanhas rochosas (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2001). O nível de sinal difratado que atinge a antena receptora depende da geometria do caminho. Esta geometria está ligada à altura relativa do obstáculo em relação à linha de visada direta, bem como à localização do obstáculo ao longo do caminho da propagação. Na Figura 4.2 pode-se observar o formato elíptico de uma zona de Fresnel, no qual se pode notar que o maior raio está localizado no meio da elipsoide, quando $d_1 = d_2$.

Figura 4.2 – Primeira Zona de Fresnel de uma Propagação



Fonte: Própria

A Equação (1) pode ser usada para calcular o raio em um determinado ponto da elipsóide (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2016):

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1)$$

Sendo:

R_n = raio da enésima zona de Fresnel (em metros);

d_1 = distância do ponto em que se deseja calcular o raio para a antena transmissora (em metros);

d_2 = distância do ponto em que se deseja calcular o raio para a antena receptora (em metros);

λ = comprimento de onda do sinal transmitido (em metros).

Observa-se na Figura 4.2 que há uma obstrução do tipo “gume de faca” na posição em que $d_1 = d_2$. Para verificar se há ou não uma obstrução danosa na primeira zona de Fresnel por parte de um determinado obstáculo, deve-se calcular o raio de Fresnel neste ponto e verificar se há uma invasão superior a 40% da área (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2016).

4.1.2 Perda da Potência do Sinal Devido à Difração

Quando há o encontro de ondas eletromagnéticas em propagação com um obstáculo, elas contornam-se pela extremidade superior do anteparo. Este fenômeno é chamado de difração, e caracteriza-se pelo fato do "encurvamento" das ondas diminuírem à medida que se aumenta a frequência de operação do transmissor. As ondas se espalham após atingir o obstáculo, o que possibilita o seu encontro com o receptor, mesmo que haja um bloqueio da visada direta (PUC-RIO, 2014).

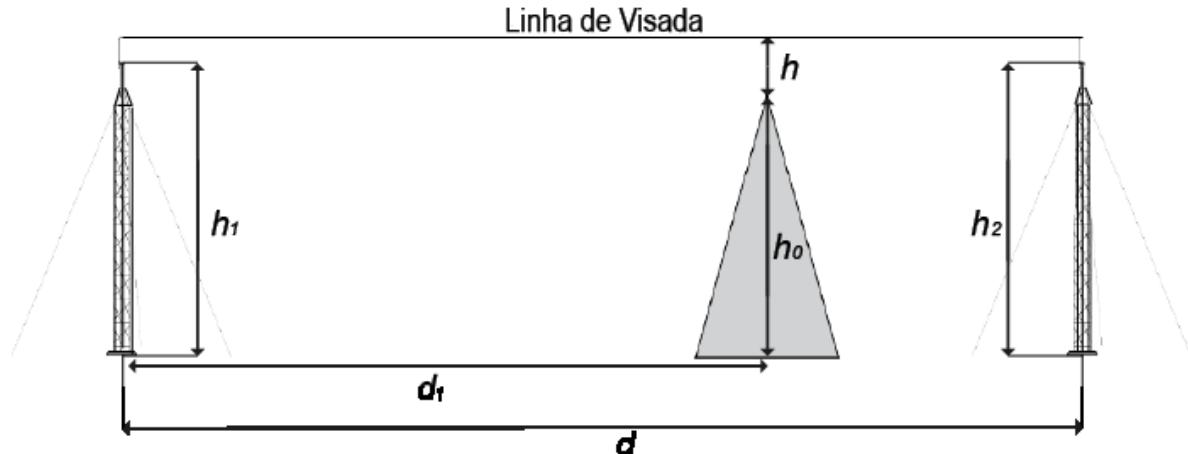
A combinação das ondas secundárias de Huygens gera novas frentes de onda. O campo resultante no receptor é a soma vetorial de todas as ondas secundárias geradas (SELEZOV, KRYVONOS e GANDZHA, 2018).

A atenuação do sinal causada devido à difração por um obstáculo do tipo “gume de faca” pode ser calculada fazendo-se uso do parâmetro de difração de Fresnel-Kirchoff, ‘v’, e da integral complexa de Fresnel, que pode ser vista na Equação (2) (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2016).

$$f(v) = \int_v^{\infty} \left(\frac{1+j}{2} \right) \exp\left(\left(\frac{-j\pi t^2}{2}\right)\right) dt \quad (2)$$

O valor do parâmetro de difração está relacionado à altura relativa entre o obstáculo e a linha de visada direta, chamada de ‘ h ’, possuindo valor negativo caso o topo do obstáculo esteja abaixo da linha de visada ou positivo caso esteja acima, conforme apresentado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Obstáculo do Tipo “Gume de Faca”



Fonte: Adaptada de (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2016)

A altura do obstáculo em relação à linha de visada é calculada por meio da Equação (3) (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2016):

$$h = h_0 + h_{ER} - h_1 - \frac{h_2 - h_1}{d} \times d_1 \quad (3)$$

Em que

h_0 = altura da obstrução (em metros);

h_{ER} = altura da curvatura da superfície no ponto do obstáculo como resultado do raio efetivo da terra (em metros);

h_1 = altura da antena transmissora (em metros);

h_2 = altura da antena receptora (em metros);

d = distância total entre as antenas (em quilômetros);

d_1 = distância entre a antena transmissora e o obstáculo (em metros).

Para o caso do modelamento proposto, o termo h_{ER} da Equação 3 é desconsiderado, visto que as distâncias entre transmissores e receptores são pequenas, o que causa uma pequena influência em 'h' por parte da curvatura da terra. Considera-se que h_1 e h_2 são iguais. Obtendo-se o valor de 'h', pode-se calcular o parâmetro de difração de Fresnel-Kirchoff por meio da Equação (4) (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2016):

$$v = h \times \sqrt{\frac{2 \times (d_1 + d_2)}{\lambda \times d_1 \times d_2}} \quad (4)$$

Em que

h = altura do obstáculo em relação à linha de visada (em metros);

d_1 = distância entre a antena transmissora e o obstáculo (em metros);

d_2 = distância entre a antena receptora e o obstáculo (em metros);

λ = comprimento de onda (em metros).

Com o valor do parâmetro de difração, a perda de sinal devido à difração pode ser calculada em dB. Esta perda ' G_d ' é uma função da integral de Fresnel, em que soluções aproximadas são apresentadas nas equações (5), (6), (7), (8) e (9), para diferentes valores de ' v ' (LEE, 1993).

$$G_d = 0, \text{ para } 1 \leq v \quad (5)$$

$$G_d = -20 \times \log_{10}(0,5 + 0,62 \times v), \text{ para } 0 \leq v \leq 1 \quad (6)$$

$$G_d = -20 \times \log_{10}(0,5 \times \exp(0,95 \times v)), \quad \text{para } -1 \leq v \leq 0 \quad (7)$$

$$G_d = -20 \times \log_{10} \left(0,4 - \sqrt{0,1184 - (0,1 \times v + 0,38^2)} \right), \quad (8)$$

$$\text{para } -2,4 \leq v \leq -1$$

$$G_d = -20 \times \log_{10} \left(\frac{-0,225}{v} \right), \text{ para } v \leq -2,4 \quad (9)$$

4.1.3 Difração por Múltiplos Obstáculos

Para situações de múltiplos obstáculos, diversos métodos empíricos são encontrados na literatura para calcular a perda por difração. Dentre estes, o método P.526-7 recomendado pelo ITU-R (Setor de Rádio da União Internacional de Telecomunicações) é um dos que consideram o efeito da curvatura dos obstáculos (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2001).

No método ITU-R/P.526-7, o primeiro obstáculo principal é o que define o horizonte do transmissor, o segundo é o que define o horizonte do primeiro obstáculo, e assim sucessivamente até a antena receptora. Este procedimento é chamado de método da "corda esticada". Os obstáculos secundários caracterizam-se por estarem localizados entre obstáculos principais. Com isto, a atenuação total

causada no sinal pelos múltiplos obstáculos pode ser calculada pela soma dos efeitos individuais de cada um deles, conforme apresentado na Equação (10) (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2001).

$$A_{ad}(dB) = \sum_{i=1}^N A_{adP_i}(dB) + \sum_{j=1}^M A_{adS_j}(dB) + C_N \quad (10)$$

Em que

A_{adP_i} = contribuição dos obstáculos principais;

A_{adS_j} = contribuição dos obstáculos secundários;

C_N = fator de correção empírico da atenuação.

Cada atenuação causada por um obstáculo principal é calculada como um obstáculo isolado em um enlace fictício, nos quais os extremos são os vértices da "corda esticada" que liga o transmissor ao receptor (CARVALHO, 2003). Os obstáculos secundários são tratados de forma que apenas o mais relevante entre um par de obstáculos principais é considerado para o cálculo da atenuação. Um fator de correção empírico da atenuação é calculado para compor parte da atenuação total, corrigindo eventuais erros devido às aproximações. Este fator pode ser calculado por meio da Equação (11) (PUC-RIO, 2014):

$$C_N = \left[\frac{(S_2 S_3 \dots S_N)(S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_{N+1})}{(S_1 + S_2)(S_2 + S_3)(S_3 + S_4) \dots (S_N + S_{N+1})} \right] \quad (11)$$

Em que

S_N = distância entre o pico do enésimo obstáculo principal e o pico do próximo obstáculo principal (em km).

Para o modelamento matemático proposto neste trabalho, que considera a vegetação uniforme entre as antenas, não há obstáculos secundários, sendo assim, desconsidera-se este fator nos cálculos. Sabe-se que o fator de correção empírico da atenuação tem seu cálculo baseado na distância entre os picos dos obstáculos principais. Sendo assim, considerando-se a vegetação uniforme e contínua em toda

sua extensão no trecho entre as antenas, este fator de correção torna-se desprezível devido à proximidade entre os picos dos obstáculos principais.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos experimentais, os materiais utilizados na execução dos testes, o método proposto para modelar matematicamente o decaimento da potência do sinal e a implementação do *software* utilizado no microcontrolador do sistema proposto.

5.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O método proposto neste trabalho objetiva realizar o monitoramento do dossel arbóreo nas faixas de passagem das linhas de transmissão por meio da interferência causada pela vegetação na propagação do sinal. Para isto, é fundamental haver uma definição segura da distância máxima na qual os módulos mantêm uma comunicação confiável, mesmo com a possível interferência acentuada de vegetação. Isto garante que a informação seja recebida na estação base, independente da interferência entre os nós nos trechos em que o monitoramento se faz necessário. Por meio de experimentos, também pode ser definida a distância máxima na qual o sistema opera sem a interferência de vegetação, garantindo assim a comunicação confiável para estas situações.

Com o propósito de definir estas distâncias de forma experimental para as diferentes situações, diversas medições de campo foram realizadas no Campus I da Universidade Federal da Paraíba, em João Pessoa. O local escolhido para os testes possibilita avaliar o sistema em situações próximas às quais o mesmo será submetido no seu ambiente de aplicação. A vegetação do ambiente do experimento é composta por arbustos alinhados e podados uniformemente.

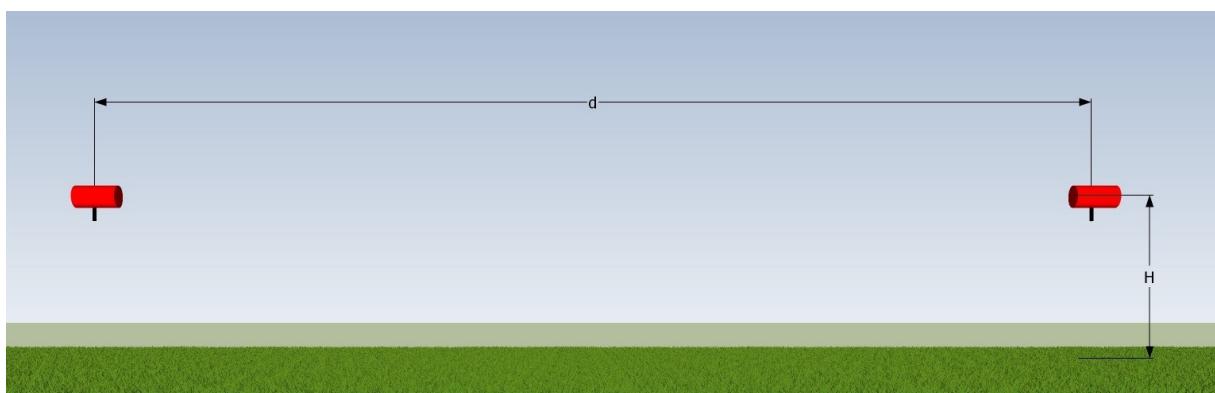
Os experimentos de validação dividem-se em quatro etapas: definição da distância máxima de operação com interferência de vegetação; determinação do alcance máximo sem interferências; comprovação da sensibilidade do sistema à vegetação; e operação sob variações bruscas de corrente. O principal objetivo da definição exata dos valores das distâncias com e sem interferências é possibilitar a elaboração de redes de monitoramento nas quais se podem monitorar a vegetação apenas nos trechos desejados, e nos demais transmitir a informação. Nos testes de sensibilidade, expõe-se o sistema proposto a situações de operação real, testando

seu funcionamento e quantizando a sua precisão. Com os experimentos de operação com variações bruscas na corrente, expõe-se o sistema proposto a mais um elemento presente na sua aplicação, objetivando analisar sua eficiência sob esta condição de operação. Deve-se ressaltar que os resultados adquiridos nestes experimentos estão diretamente ligados ao modelo do módulo de rádio utilizado (XBee PRO S2 com potência máxima de saída de 18 dBm).

5.1.1 Distância Máxima de Operação sem Interferência

Em regiões em que os estudos prévios realizados pela companhia de energia apontam que não há possibilidades da vegetação causar danos na rede de transmissão, não há a necessidade do monitoramento da mesma. Sendo assim, pode-se fazer uso dos nós sensores posicionados em distâncias maiores, visto que não haverá interferência significativa na comunicação entre eles. A fim de estimar a distância segura na qual dois nós sensores podem estar distanciados, o experimento mostrado na Figura 5.1 foi executado, no qual não há presença de vegetação na altura dos nós sensores. O experimento foi realizado em campo aberto e com pouca vegetação, sendo esta de pequeno porte (altura máxima de 10 cm). Este experimento foi executado aumentando-se a distância ‘d’ até que não houvesse mais comunicação eficiente entre os dispositivos. Uma altura H de 3,5 m foi adotada para ambos os nós sensores, contribuindo para a realização do experimento de forma que não houvesse obstáculos na linha de visada entre os nós.

Figura 5.1 – Configuração Adotada no Experimento sem Interferência de Vegetação.



Fonte: Própria.

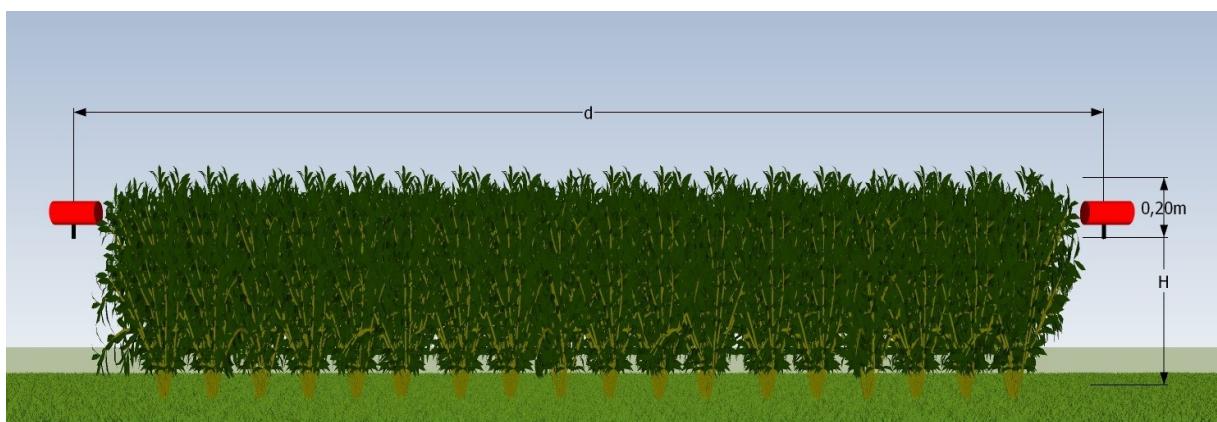
A distância 'd' inicial para verificação da potência recebida no nó receptor foi de 100 m. Após observar o valor da potência recebida em 5 medições e verificar o seu intervalo de variação, o mesmo número de medições é realizado para verificar o PRS (Porcentagem de Recebimento com Sucesso) médio. Este procedimento é repetido para todas as distâncias examinadas até a distância máxima na qual a comunicação é eficiente, que foi de 700 m.

O principal objetivo deste experimento é definir o distanciamento máximo entre dois nós sensores, considerando a situação na qual não há invasão de vegetação entre eles. Na prática, esta distância deve servir como referência para o distanciamento entre os nós em trechos das linhas nos quais não há necessidade do monitoramento da vegetação.

5.1.2 Distância Máxima de Operação com Interferência

Este experimento objetiva definir a distância máxima na qual os nós sensores possuem confiabilidade na transmissão dos dados com interferência de vegetação. Ele foi realizado de forma que os sistemas embarcados são afastados a uma distância 'd' e posicionados 20 centímetros abaixo da altura da vegetação, conforme apresentado na Figura 5.2. Este posicionamento objetiva impor o sistema a operar com interferência de vegetação uniforme em todo o espaço entre os nós sensores. O experimento foi realizado aumentando-se a distância 'd' até que não houvesse mais comunicação eficiente entre os dispositivos.

Figura 5.2 – Configuração Adotada no Experimento com Interferência de Vegetação.



Fonte: Própria.

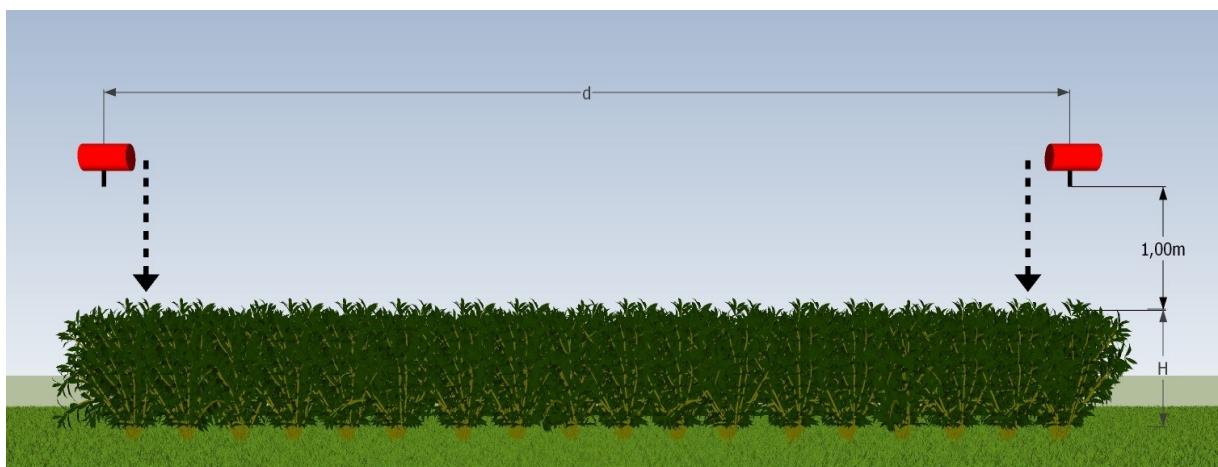
O objetivo do experimento é estimar o espaçamento limite entre os nós para regiões em que seja necessário realizar o monitoramento, considerando-se a situação na qual há obstáculos acima da linha de visada direta em todo o percurso do sinal. Isto garante que, para a distância definida experimentalmente, o sistema manterá uma comunicação confiável independente de haver um nível de invasão crítico de vegetação no ambiente da aplicação.

A distância 'd' inicial para aferição da potência recebida no nó receptor foi de 5 m. Após verificar o valor da potência recebida em 5 medições e observar o seu intervalo de variação, o mesmo número de medições é realizado para verificar o PRS médio. Neste teste, 100 pacotes são enviados sequencialmente objetivando-se verificar a taxa de sucesso na entrega dos dados. Este procedimento é repetido para todas as distâncias em passos de 50 m até que 'd' seja igual a 250 m.

5.1.3 Sensibilidade do Sistema

Para verificar a sensibilidade do sistema à variação no crescimento da vegetação entre os nós sensores, um terceiro experimento foi elaborado e executado. Neste experimento, que é apresentado na Figura 5.3, dois nós sensores são posicionados a uma altura 'h' de 1 m acima da vegetação na máxima distância entre os nós para uso em regiões de monitoramento, que foi encontrada no experimento comentado na Seção 5.1.2.

Figura 5.3 – Configuração Adotada no Experimento para Testar a Sensibilidade.



Fonte: Própria.

Em seguida, os nós sensores são movidos em direção à vegetação em passos de 10 centímetros até atingir a altura da vegetação ‘H’, simulando assim o crescimento da vegetação em relação aos nós sensores. O objetivo principal deste experimento é observar as alterações na potência recebida no nó receptor e a PRS, mediante o aumento da interferência, devido à vegetação entre os nós. O procedimento baseia-se em observar a redução da potência recebida no nó receptor à medida que os nós se aproximam da vegetação. Ao mesmo tempo em que se analisa a potência, testa-se o PRS e verifica-se a eficiência da comunicação para cada passo de 10 cm de aproximação em direção à vegetação. O experimento é realizado 5 vezes, objetivando definir um valor médio de potência recebida e PRS.

A distância de 1 m entre os nós sensores e a vegetação é adotada visando-se analisar a sensibilidade de detecção do sistema a uma possível invasão crítica da vegetação. A distância segura normatizada entre a vegetação e os condutores é de cerca de 4 m (ELEKTRO, 2013). O posicionamento dos nós sensores nos condutores da linha, como é mostrado na Figura 1.1 permitirá o monitoramento de invasões críticas, garantindo que haja tempo hábil para uma equipe técnica realizar uma intervenção no local.

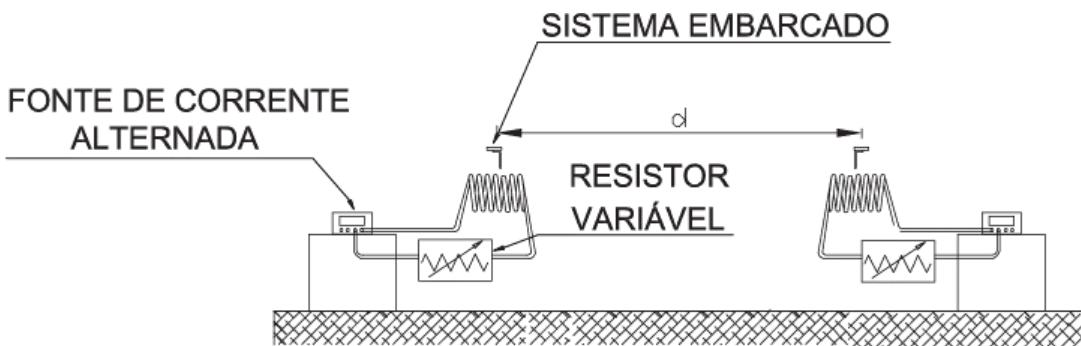
5.1.4 Operação sob Variações Bruscas na Corrente

Conforme mencionado na Seção 2.3, o tipo de modulação utilizada no módulo de rádio do sistema proposto colabora para imunizar a comunicação contra ruídos típicos em linhas de transmissão (CALLAWAY, GORDAY, *et al.*, 2002). Para comprovar que o sistema opera sem perdas na qualidade da comunicação, com os nós sensores posicionados próximos a condutores que sofrem alterações bruscas na corrente elétrica, um experimento laboratorial foi concebido e executado. Dois nós sensores foram posicionados a 2 cm de espirais (simulando uma elevada concentração de corrente elétrica), utilizadas para aumentar a corrente elétrica e, consequentemente, o campo magnético. A Figura 5.4 apresenta a configuração deste experimento.

O experimento foi realizado a uma distância ‘d’ de 10 m. Para a análise, uma sequência de 100 pacotes é enviada e mede-se a potência recebida média dos pacotes e a PRS à medida que se varia constantemente o campo magnético ao

redor dos nós. O campo magnético gerado em laboratório foi equivalente ao campo magnético das linhas de transmissão com correntes que variam de 0 a 50 A, realizando mudanças bruscas durante o período de transmissão dos pacotes, que possuiu duração de 20 segundos. A carga utilizada é um resistor variável, que controla a corrente durante o experimento.

Figura 5.4 – Configuração Adotada no Experimento de Operação Sob Variações Bruscas de Corrente.



Fonte: Própria.

5.2 MÉTODO PROPOSTO PARA O MODELAMENTO DO DECAIMENTO DA TRANSMISSÃO

O método proposto para o modelamento do decaimento da transmissão baseia-se em considerar a invasão uniforme de vegetação entre dois nós sensores. Propõe-se modelar o efeito da vegetação na propagação do sinal como um caso de difração por múltiplos obstáculos do tipo "gume de faca". Este método consiste em aplicar a teoria da difração por "gume de faca" nos sucessivos obstáculos, considerando-se isoladamente os seus efeitos na propagação do sinal. Sendo assim, a perda por difração de todo o percurso pode ser calculada por meio da soma das perdas de cada obstáculo.

Para se realizar o cálculo das perdas totais do sinal, devem-se considerar as perdas no espaço livre. Perda no espaço livre consiste na perda de potência do sinal resultante das perdas no caminho de visada direta pelo espaço livre. Estas perdas não estão associadas a obstáculos e não estão ligadas a fatores como ganho das antenas. A Equação (12) pode ser utilizada para calcular a perda de caminho em dB (SEYBOLD, 2005).

$$PL_{fs} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - 147,55 \quad (12)$$

Em que,

PL_{fs} = Perda no espaço livre;

d = Distância até o transmissor (em metros);

f = Frequência do sinal (em Hz).

A perda total sofrida pelo sinal pode então ser calculada somando-se as perdas no espaço livre às perdas por difração. A Equação (13) pode ser utilizada para realizar este cálculo.

$$L_T = PL_{fa} + DL \quad (13)$$

Em que

L_T = Total de perdas;

PL_{fa} = Perda no espaço livre;

DL = Perdas devido à difração.

Com o valor total das perdas, pode-se determinar a potência recebida na antena receptora por meio da Equação (14):

$$P_R = P_T - L_T \quad (14)$$

Em que

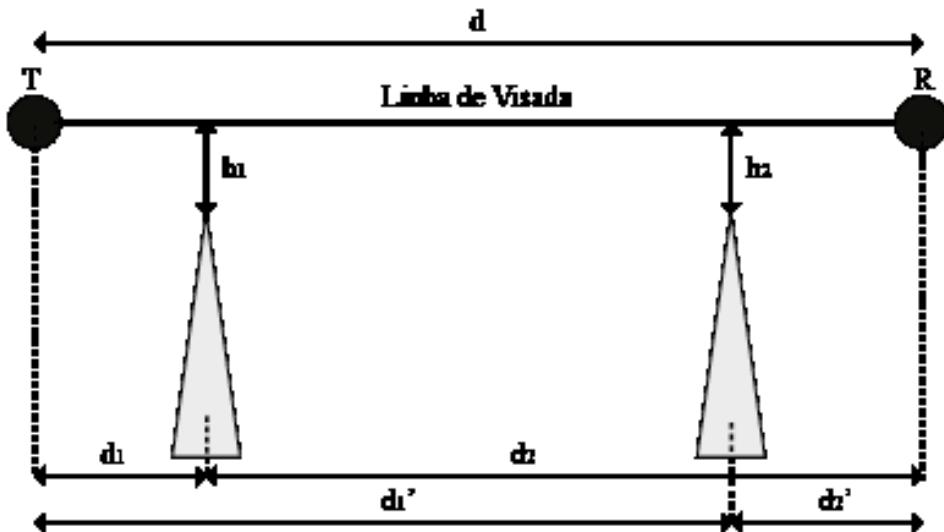
P_R = Potência recebida;

P_T = Potência transmitida;

L_T = Total de perdas.

Para simplificar a aplicação do modelo em diferentes distanciamentos entre nós, faz-se o uso de dois obstáculos do tipo "gume de faca" para modelar o efeito destrutivo no sinal causado pela interferência da vegetação. Além disso, adota-se um distanciamento fixo entre os obstáculos e as antenas receptora e emissora. A Figura 5.5 apresenta conceitualmente o modelo proposto, onde se pode observar o distanciamento uniforme entre os obstáculos e as antenas transmissora e receptora, visto que se considera $d_1 = d_2'$ e $d_2 = d_1'$.

Figura 5.5 – Modelo Proposto.



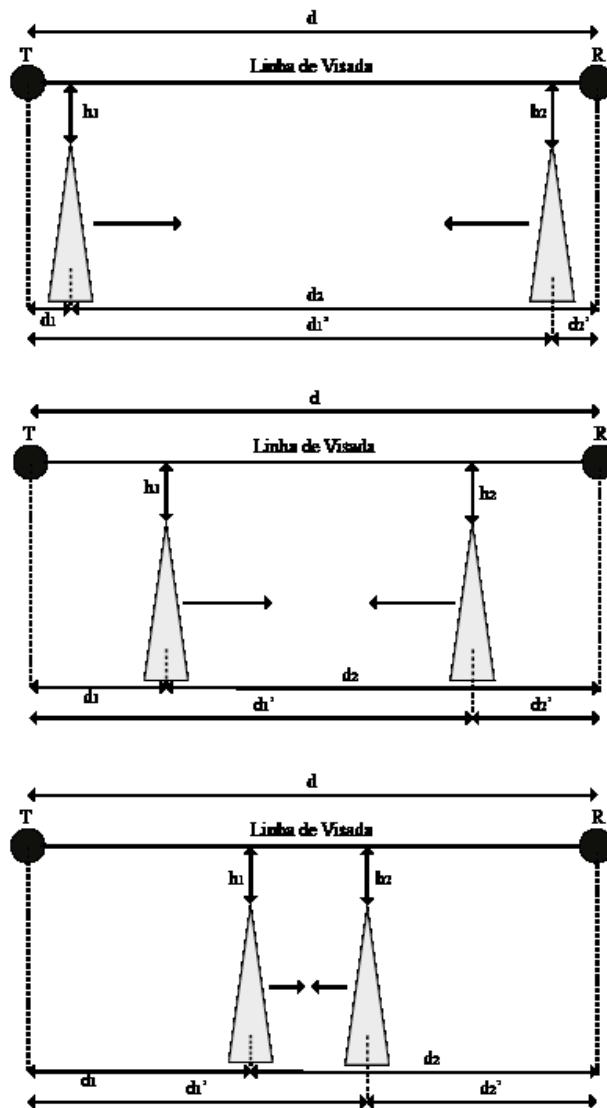
Fonte: Própria.

O distanciamento adotado entre as antenas e os obstáculos varia de acordo com a distância total entre os nós. Para determinar uma equação que generalize o posicionamento relativo dos obstáculos em relação às antenas, calculou-se o decaimento da potência do sinal em diferentes posicionamentos das antenas em relação à vegetação. Para isto, foram calculados os decaimentos para três diferentes distanciamentos entre nós: 150, 200 e 250 metros (mesmos distanciamentos para os quais foram coletados dados experimentais). Para cada distanciamento entre nós, variou-se o afastamento entre os obstáculos e as antenas uniformemente em passos de 1 m até que os obstáculos se aproximassem no centro ($d_1 \cong d_2'$). A Figura 5.6 apresenta graficamente este procedimento.

Para cada variação de d_1 e d_2' , calculou-se a curva de decaimento do sinal utilizando-se uma alteração da distância entre a linha de visada das antenas e o topo dos obstáculos (h_1 e h_2) de 1 até 0 m em passos de 10 cm. Para cada valor de h_1 e h_2 , o parâmetro de Fresnel-Kirchoff foi calculado, por meio da Equação (4). Com os valores dos parâmetros, foi possível calcular, por meio das Equações (5), (6), (7), (8) ou (9), a perda devida à difração sofrida pelo sinal mediante a variação de h_1 e h_2 . Após os cálculos das perdas por difração para cada obstáculo, calcularam-se as perdas no espaço livre por meio da Equação (12). A perda total é formada pela soma das perdas no espaço livre com as perdas devido à difração. Por meio da Equação (14), a variação da potência recebida, mediante as alterações nos

valores de h_1 e h_2 (simulando o crescimento da vegetação em relação aos nós sensores), foi calculada para cada distanciamento entre antenas e obstáculos. Este procedimento foi realizado para as três distâncias analisadas.

Figura 5.6 – Procedimento Realizado para Determinar a Equação do Posicionamento dos Obstáculos.



Fonte: Própria.

Após esta etapa, calculou-se o erro quadrático médio entre as diferentes curvas de atenuação do sinal modeladas e as curvas obtidas experimentalmente, para os diferentes distanciamentos entre nós. Este procedimento permitiu identificar qual afastamento entre obstáculos e antenas reproduz uma curva de decaimento próxima da curva experimental, para cada distanciamento entre nós. Os afastamentos ideiais encontrados para as distâncias de 150, 200 e 250 metros,

foram de 21, 23 e 24 metros, respectivamente. Após a identificação dos afastamentos ideais entre antenas e obstáculos para os diferentes distanciamentos entre nós, realizou-se uma interpolação dos valores. Isto possibilitou a definição da Equação (15), que viabiliza calcular o distanciamento entre os obstáculos do tipo “gume de faca” e as antenas a depender do distanciamento entre nós.

$$y = -0,0002x^2 + 0,11x + 9 \quad (15)$$

Em que,

y = distanciamento entre antenas e obstáculos do tipo “gume de faca” (em metros);

x = distância entre antenas emissora e receptora (em metros).

Por exemplo, usando-se a Equação (15) para a distância entre nós de 230 m, devem-se distanciar ambos os obstáculos a 21,43 m das antenas. Após definir o distanciamento dos obstáculos, pode-se calcular o decaimento do sinal mediante o crescimento da vegetação para qualquer distância entre nós dentro da faixa de operação (0 – 250m).

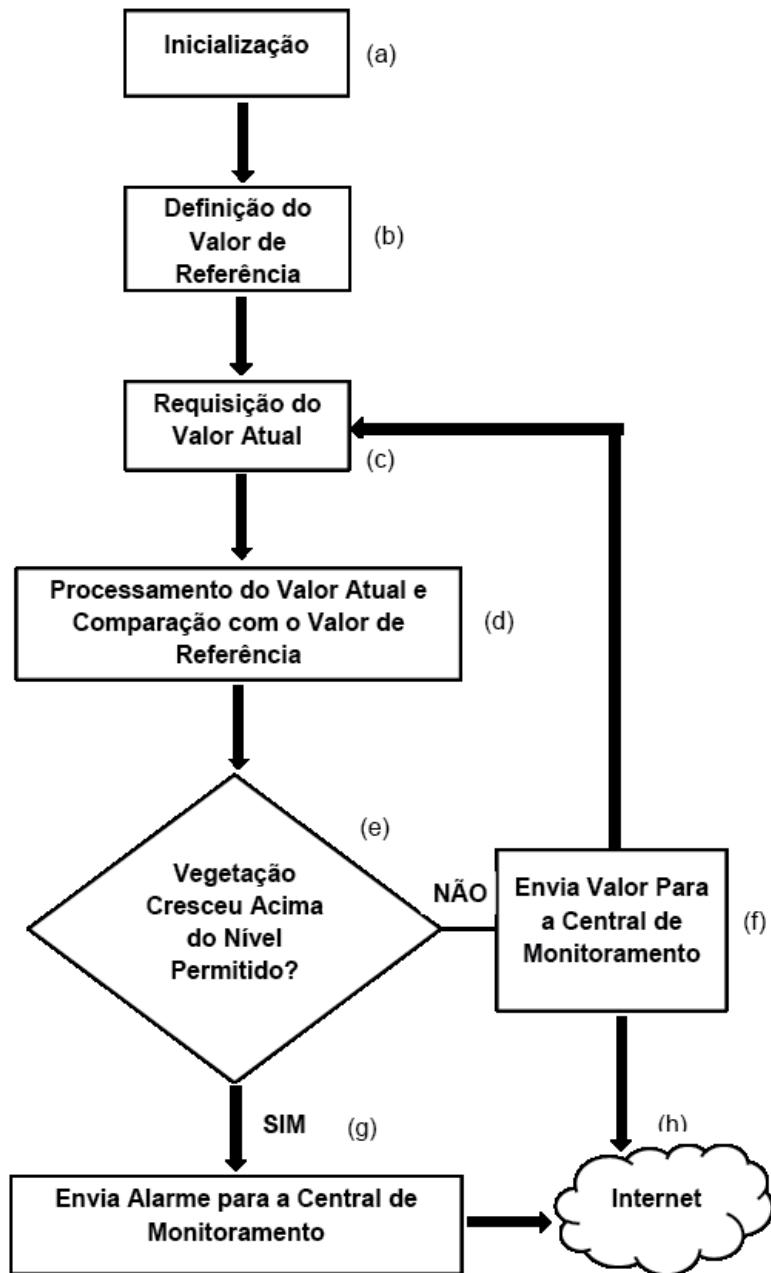
5.3 SOFTWARE DESENVOLVIDO

O *software* desenvolvido para o sistema proposto baseia-se em realizar transmissões de dados por toda a rede continuamente, e logo após cada “salto” entre dois nós, requerer e processar o valor (em dBm) da potência do pacote recebido (RSSI) e enviá-la pela rede até o nó coordenador. Esta operação é realizada par a par e demora cerca de 0,5 segundos por salto, o que para a aplicação proposta é suficientemente rápido, pois trata-se do monitoramento da vegetação, que cresce lentamente. Por exemplo, uma rede com 10 mil nós sensores pode realizar sua completa varredura em aproximadamente 1 hora e 23 minutos.

Na Figura 5.7 pode-se observar um fluxograma do funcionamento do *software* desenvolvido para os microcontroladores da RSSF elaborada. Na inicialização (a), o sistema inicia sua operação enviando pacotes por toda a rede para verificar que há comunicação entre todos os nós. O valor de referência (b) mencionado no fluxograma implica no valor de potência recebida calculado por meio do modelamento matemático proposto, que será composto pela perda no espaço livre somada às perdas causadas pela vegetação inicial do momento da instalação.

Este valor de referência serve como fator de comparação para detectar alterações nos novos valores de potência recebida calculados pelo software. Em termos práticos, este valor também pode ser composto pela média dos valores de potência recebida no momento da inicialização.

Figura 5.7 – Fluxograma do Software Desenvolvido.



Fonte: Própria.

O valor atual (c) refere-se aos valores de potência medidos após a inicialização do sistema. Após esta etapa, em (d), o software compara o valor atual medido com o valor de referência. Ao detectar uma alteração acima do limiar

preestabelecido no valor atual em relação ao valor de referência em (e), o sistema transmite um alerta pela rede até a estação base informando em qual trecho há a invasão (g). Caso não haja alterações, o valor da potência recebida é enviado para a central de monitoramento (f) para ficar armazenado em um banco de dados acessível pela Internet (h) e um novo valor de potência recebida é requerido.

A identificação do trecho também é realizada via *software*, pois cada nó possui sua identidade digital e a transmite para a estação base tanto no alerta quanto na atualização do valor da potência recebida. Desta forma, a única diferença no *software* entre os nós é a identificação que cada um recebe ao ter sua codificação gravada na memória. No entanto, nos nós coordenadores (central de monitoramento), que estão usualmente localizados nas subestações, os seus microcontroladores estão programados para armazenar em um banco de dados *online* as informações recebidas via módulo de rádio.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, avaliando-se os dados coletados experimentalmente e comparando-os com o modelo matemático proposto.

6.1 EXPERIMENTOS DE VALIDAÇÃO

Diversos testes foram realizados nos protótipos dos nós sensores, objetivando validar o desempenho da rede de sensores. É importante conhecer bem o comportamento do sistema proposto para os casos de operação estudados, pois estes devem ser utilizados para auxiliar no planejamento das redes de sensores sem fio para o monitoramento. As distâncias definidas experimentalmente servem de referência para a elaboração de redes de monitoramento da invasão de vegetação, que fazem uso dos mesmos componentes eletrônicos utilizados neste trabalho.

6.1.1 Distância Máxima sem Interferência

O experimento para definição da distância máxima sem a interferência de vegetação mostra que os nós podem estar separados por até 700 metros e ter boa confiabilidade na comunicação. A Tabela 6.1 apresenta a relação da distância com o intervalo de potência recebida (RSSI) e a média do PRS para este cenário.

Em regiões em que não há a necessidade de se realizar o monitoramento da vegetação, pode-se adotar um distanciamento maior entre os nós. O resultado deste experimento implica na distância máxima na qual dois nós podem estar afastados em regiões em que se deseja apenas transmitir os dados para os próximos nós, e não realizar o monitoramento. Este dado comprova que a adoção de distâncias maiores em trechos em que não há necessidade de monitoramento pode proporcionar redução no número de nós necessário para monitorar a rede, visto que a distância entre os nós seria de até 700 metros, e não de menos ou igual a 250 m.

Tabela 6.1 – Desempenho do XBee-PRO S2 sem interferência.

Distância (m)	RSSI (dBm)	PRS
100	[-65 -67]	98%
150	[-67 -68]	98%
200	[-68 -69]	96%
250	[-69 -71]	96%
300	[-73 -75]	95%
350	[-80 -83]	95%
400	[-85 -88]	95%
450	[-91 -92]	95%
500	[-92 -93]	95%
550	[-93 -95]	94%
600	[-95 -96]	93%
650	[-96 -97]	93%
700	[-98 -101]	91%

Fonte: Própria.

6.1.2 Distância Máxima com Interferência

No experimento para definição da distância máxima com interferência de vegetação, mostrado na Figura 5.2, a maior distância na qual se obteve mais de 90% de PRS foi para 250 metros. A Tabela 6.2 mostra a relação da distância com a potência recebida (RSSI) e o PRS. Nota-se que apesar da interferência causada pela vegetação, os módulos são capazes de manter uma comunicação confiável até 250 m de distância. Isto pode ser comprovado por meio da redução observada no PRS no trecho de 5 a 250 m, que foi de apenas 8%.

Tabela 6.2 – Desempenho do XBee-PRO S2 com interferência.

Distância (m)	RSSI (dBm)	PRS
5	[-39 -43]	99%
50	[-71 -74]	98%
100	[-87 -89]	96%
150	[-93 -95]	95%
200	[-95 -97]	95%
250	[-99 -100]	91%
275	[-103 -106]	32%

Fonte: Própria.

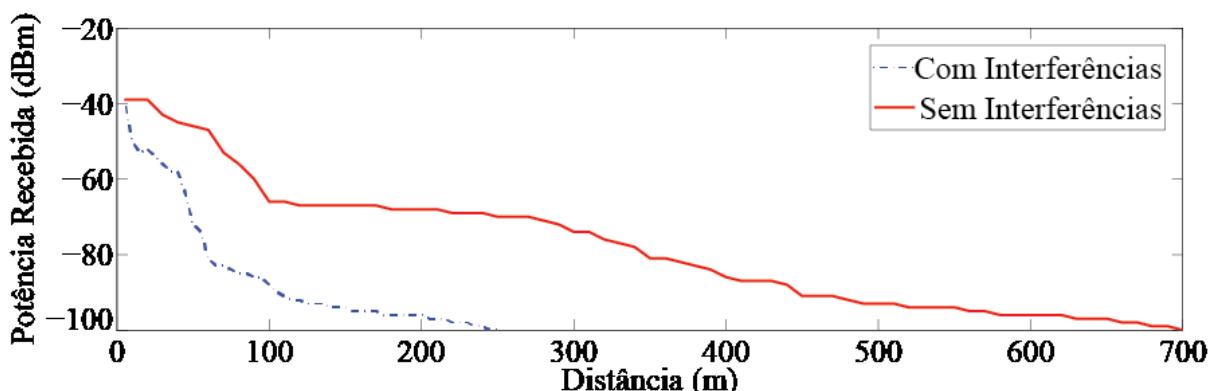
O resultado deste experimento implica que nas regiões onde se faz necessário o monitoramento da vegetação, a máxima distância na qual dois nós

sensores podem estar separados é de 250 m, e sua potência recebida para esta distância é de aproximadamente -99 dBm, conforme apresentado na Tabela 6.2.

6.1.3 Análise dos Resultados dos Experimentos das Distâncias

A distância na qual o sistema proposto mantém uma transmissão eficiente de dados sem interferência de vegetação é cerca de três vezes maior do que na distância com interferência. O gráfico mostrado na Figura 6.1 ilustra o decaimento na potência recebida tanto para o caso em que há interferências (com nós sensores 20 cm abaixo da altura da vegetação e distanciados de 250 m) quanto para o caso em que não há. Nota-se que há um decaimento acentuado na potência recebida quando há presença da vegetação na linha de visada dos nós sensores, se comparado com o caso em que não há interferência. A linha contínua no gráfico apresentado na Figura 6.1 mostra que, sem interferência da vegetação, há um decaimento mais lento à medida que se aumenta a distância entre os nós sensores. A perda de potência para o caso em que não há interferência se dá devido à perda por percurso, que é a dissipação da potência do sinal radiada pelo transmissor, no percurso até o receptor, considerando-se os efeitos do canal de propagação. No caso em que há interferências de vegetação, além da perda por percurso, há a perda devida a mecanismos ondulatórios, como a difração, causados pela vegetação como um todo (RAPPAPORT, 2009).

Figura 6.1 – Gráfico comparativo entre os decaimentos com e sem interferências.

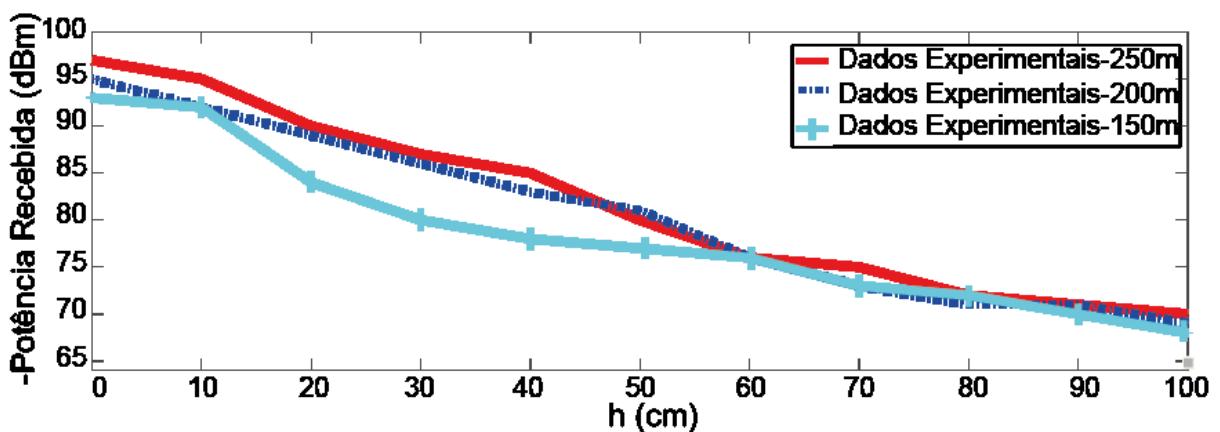


Fonte: Própria.

6.1.4 Sensibilidade do Sistema

No experimento para verificar a sensibilidade do sistema proposto, observa-se um nível de precisão que atende aos requisitos do projeto. Na Figura 6.2 é mostrada a curva de atenuação gerada pelos dados coletados experimentalmente para as distâncias entre nós de 150, 200 e 250 m.

Figura 6.2 – Gráfico da distância entre a linha de visada dos nós sensores e a vegetação pela potência recebida.



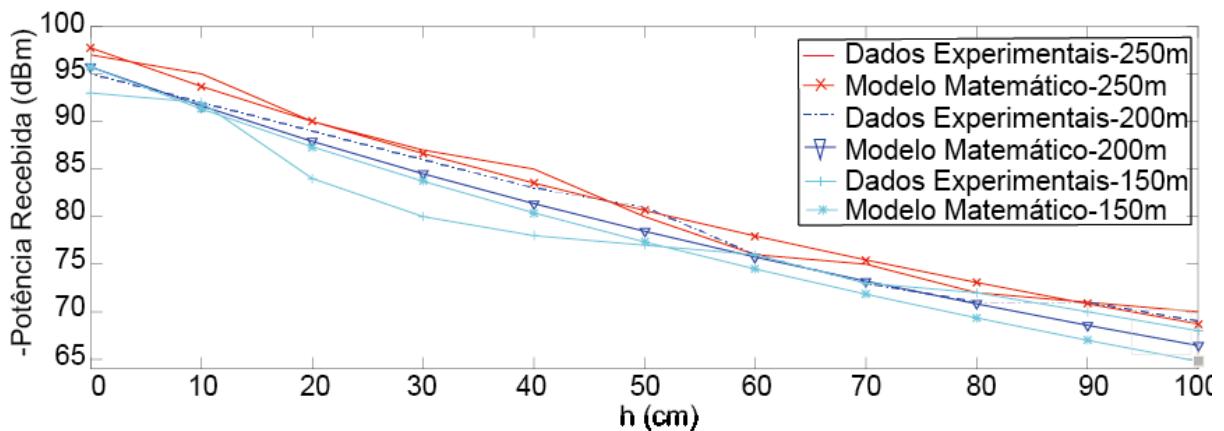
Fonte: Própria.

Pode-se observar uma alteração da potência recebida mediante a aproximação da vegetação em relação aos nós sensores. Sabe-se que ‘ h ’ representa a distância entre a linha de visada dos nós sensores e a vegetação, conforme comentado em 4.1.2. Observa-se que à medida que a distância da linha de visada entre os nós sensores e a vegetação aumenta, há um aumento da potência recebida. Nota-se pelo gráfico que quanto maior o valor de ‘ h ’, maior é a potência recebida no nó receptor. Quando ‘ h ’ se aproxima de zero, ou seja, quando a vegetação aproxima-se da linha de visada dos nós sensores, a potência recebida no nó receptor é menor do que a potência recebida referente a valores maiores de ‘ h ’. Percebe-se que há uma alteração de mais de 25 dB no nível de potência à medida que a vegetação aproxima-se dentro do raio de 1 m da linha de visada dos nós sensores.

O modelamento matemático objetiva calcular curvas de decaimento próximas às curvas obtidas experimentalmente. Conforme comentado na seção 4.1.2, aplicando-se as equações (4) e (5), (6), (7), (8) ou (9), pode-se realizar cálculos aproximados do decaimento da potência recebida para diferentes

distanciamentos entre nós. A Figura 6.3 apresenta as curvas teóricas calculadas por meio do modelamento matemático e as curvas obtidas experimentalmente, para as distâncias entre nós de 150, 200 e 250 m. Observa-se um erro quadrático médio de no máximo 1,0525 dB das curvas do modelamento matemático em relação às curvas dos dados experimentais.

Figura 6.3 – Gráfico comparativo entre os dados experimentais e o modelamento matemático.



Fonte: Própria.

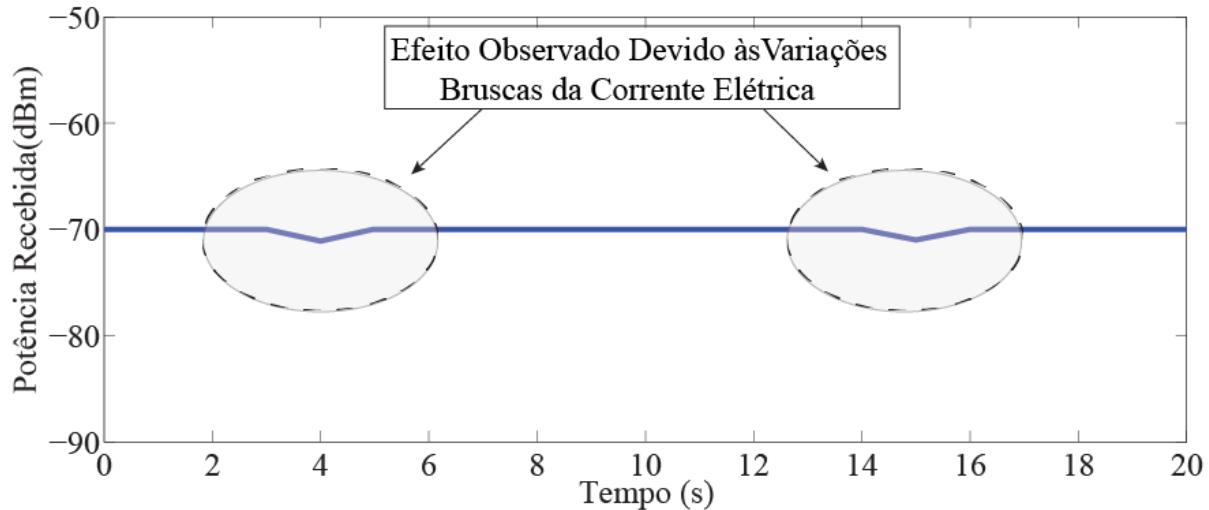
6.1.5 Operação sob Variações Bruscas na Corrente

No experimento para avaliação da operação do sistema próximo a condutores nos quais há grandes variações de corrente, objetiva-se analisar a operação do sistema em um meio com campo magnético variável, semelhante ao ambiente de aplicação (próximo às linhas de transmissão). Observa-se que na frequência de operação do módulo de rádio (2,4 GHz) não há interferências significativas na comunicação. Nota-se que se alterando a corrente elétrica bruscamente, há uma variação de no máximo 2% na potência recebida. Após cerca de 1 segundo de operação sem alterações no campo magnético, o sistema reestabelece o nível de potência inicial, conforme detalhado na Figura 6.4, que apresenta um gráfico da variação da potência recebida no nó receptor em função do tempo de realização do experimento.

A variação da potência recebida neste experimento não deve ser considerada para efeitos de planejamento da operação do sistema proposto, visto que o nível de variação observado não implicará em um falso alerta por parte do

sistema; as variações têm curta duração quando comparadas com a frequência na qual o sistema requer uma medição da potência recebida; a variação encontrada pode ser natural da operação do sistema, o que pode ser comprovado por meio dos resultados dos experimentos realizados para determinação das distâncias de operação com e sem interferências de vegetação (mostrados nas Tabelas 6.1 e 6.2).

Figura 6.4 – Interferências na operação sob variações bruscas de corrente.



Fonte: Própria.

7 CONCLUSÕES

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho, propõe-se uma nova solução para monitorar automaticamente a invasão da vegetação ao longo das linhas de transmissão. Este método funciona de maneira distribuída, utilizando uma RSSF implantada ao longo da linha de transmissão.

Os resultados dos experimentos realizados demonstram que é possível detectar a invasão da vegetação por meio do uso de uma RSSF. Além disso, o modelamento matemático proposto no trabalho se apresenta como uma ferramenta útil de previsão de funcionamento do sistema a qualquer distância entre nós dentro da faixa de operação.

A vantagem em relação aos métodos tradicionais de inspeção de campo é a redução nos custos envolvidos com o monitoramento em longo prazo, visto que uma equipe de campo só será enviada ao local para realizar operações de poda da vegetação.

Se comparado com os métodos de imagens aéreas, o sistema proposto gera uma economia considerável no que diz respeito ao monitoramento da vegetação, uma vez que após o investimento inicial de confecção e instalação dos nós sensores na rede, haverá apenas intervenções de manutenções preventivas.

Quando comparado ao método proposto por Ahmad (2014), de monitoramento por meio de Rede de Sensores Multimídia Integrada, pode-se concluir que o método proposto gera uma redução nos custos. Isto é explicado pelo fato da detecção da vegetação no sistema proposto ser realizada fazendo-se uso de uma característica do próprio módulo de rádio. Sendo assim, não há necessidade de se investir em câmeras para todos os nós da rede, como proposto pelo trabalho de Ahmad (2014).

Assim como os outros métodos de monitoramento remoto, a técnica proposta limita-se a indicar trechos da linha nos quais a vegetação está excedendo os limites preestabelecidos pela companhia de energia. O método proposto auxilia na detecção de possíveis invasões de vegetação nos trechos em que o monitoramento é realizado, indicando por meio de alertas quais regiões devem ser inspecionadas visualmente para avaliação da necessidade de intervenções preventivas no dossel arbóreo. O alerta recebido não garante que há um risco

iminente no trecho, mas torna mais eficaz o planejamento das inspeções visuais da equipe.

7.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuação da presente pesquisa, pode-se realizar um estudo teórico e experimental mais apurado do decaimento da potência do sinal para diferentes tipos de vegetação. Além disso, há a possibilidade de serem desenvolvidos experimentos com módulos de rádio de maior potência de transmissão, bem como utilizar antenas com diferentes ganhos. Com isto, é possível analisar se haverá um aumento efetivo no alcance da comunicação entre os módulos, e consequentemente, uma melhoria no custo-benefício da rede de sensores. A análise de diferentes módulos de rádio com diferentes antenas, em diferentes ambientes com vegetações distintas, traria uma maior precisão no estudo e contribuiria para possibilitar uma possível aplicação prática de maior escala do método.

Pode-se também desenvolver estudos acerca do impacto no sinal de transmissão causado por variações atmosféricas e climáticas, objetivando mensurar o impacto destes fenômenos na potência recebida do sinal.

Em relação ao modelamento matemático, podem-se desenvolver estudos comparativos entre os métodos propostos na literatura e um novo método, que considere o tipo de folhagem e a densidade da vegetação.

Além disso, é possível ampliar os estudos em relação aos *softwares* implementados nas unidades de processamento dos nós sensores. Estudos sobre o comportamento dos *softwares* em funcionamento em redes com grande quantidade de nós propiciará conhecimentos e desafios que devem ser superados para a aplicação do sistema em larga escala.

7.2 PUBLICAÇÕES

Um artigo preparado a partir deste trabalho foi submetido, aceito e apresentado no SBAI (Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente) 2017.

Título: Sistema de Monitoramento do Crescimento da Vegetação em Linhas de Transmissão Usando Redes de Sensores sem Fio

Local do evento: PUCRS Porto Alegre, Rio Grande do Sul;

Data: 01 a 04 de Outubro de 2017.

Outro artigo preparado a partir deste trabalho foi submetido e aceito ao I2MTC (International Instrumentation and Measurement Technology Conference) 2018.

Título: Vegetation Encroachment Monitoring System for Transmission Lines Using Wireless Sensor Networks

Local do evento: Royal Sonesta Hotel, Houston, Texas, USA

Data: 14 a 17 de Maio de 2018.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Errata da NBR5410 - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica. [S.I.]. 1996.
- AGGARWAL, R. K. et al. An overview of the Condition Monitoring of Overhead Lines. Electric Power System Research, v. 53, p. 15-22, Janeiro 2000.
- AHMAD, J. et al. Vegetation Encroachment Monitoring for Transmission Lines Right-of-Ways: A survey. Electric Power Systems Research, v. 95, p. 339-352, Junho 2013.
- AHMAD, J. et al. A Novel Method for Vegetation Encroachment Monitoring of Transmission Lines Using a Single 2D Camera. Springer, Londres, v. 18, p. 419-440, Agosto 2014.
- AKYILDIZ, I. F.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. Wireless Sensor Networks: A survey: Computer Networks. IEEE Communication Magazine, p. 393–422, 2002.
- ANDRE, A. M.; MATOS, J. Multi-System Overhead Lines Inspection – the Experience of LABELEC with EDP Distribution Lines. 20th International Conference on Electricity Distribution, 2009. 8–11.
- ARDUINO. Características do Arduino, 2017. Disponível em: <<http://www.arduino.cc>>. Acesso em: 29 Março 2017.
- CALLAWAY, E. et al. Home Networking with IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks. IEEE Communications Magazine, v. vol. 40, n. ed. 8, p. p. 70 - 77, Agosto 2002.
- CAMPBELL SCIENTIFIC. Line of Sight Obstruction, 2016. Disponível em: <<https://s.campbellsci.com/documents/au/technical-papers/line-of-sight-obstruction.pdf>>. Acesso em: 12 Maio 2017.
- CARVALHO, F. B. S. et al. Aplicações Ambientais de Redes de Sensores Sem Fio. Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação, v. 2, 2012. ISSN 1.
- CARVALHO, J. N. Propagação em Áreas Urbanas na Faixa de UHF - Aplicação ao Planejamento de Sistemas de TV Digital. Dissertação: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003.
- CELGPAR. Especificação Técnica para Limitação do Uso de Faixa de Linhas de Subtransmissão e Transmissão da CELG PAR - 69 kV, 138 kV e 230 kV. [S.I.]. 2010.

- CEMIG. Critérios de Inspeção de Segurança: Manutenção de Linhas de Transmissão. Dezembro 2007. Disponível em: <<ftp://ftp.cemig.com.br/licitaserv/530-R00022/DOC%20TEC/Construcao/ND-4.64>>. Acesso em: 20 Julho 2017.
- CHONG, C.; KUMAR, S. Sensor Networks: Evolution, Opportunities and Challenges. Proceedings of the IEEE, v. 91, n. 8, p. 1247-1256, 2003.
- CRAIDE, S. Maioria das Linhas de Transmissão Brasileiras tem mais de 15 anos, 2012. Disponível em: <<http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2012-11-04/maioria-das-linhas-de-transmissao-brasileiras-tem-mais-de-15-anos>>. Acesso em: 17 Março 2016.
- DIGI INTERNATIONAL. Xbee Characteristics, 2017. Disponível em: <<http://www.digi.com>>. Acesso em: 4 abril 2017.
- DUPRAS, J. et al. Management of Vegetation Under Eletreic Distribution Lines will Affect the Supply of Multiple Ecosystem Services. Land Use Policy, v. 51, p. 66-75, Novembro 2016.
- ELEKTRO. Norma ND.67 - Ocupação de Faixa de Passagem de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica. [S.I.]. 2013.
- ENERGISA. Serviços de Inspeção. Energisa, 2013. Disponível em: <<http://solucoes.grupoenergisa.com.br/paginas/nossos-servicos/servicos-inspecao-termografica-aerea-terrestre.aspx#>>. Acesso em: 13 Julho 2017.
- GUO, Y. J.; BARTON, S. K. Fresnel Zone Antennas. [S.I.]: Springer Science+Business Media Dordrecht, v. 1, 2002. ISBN 978-1-4757-3611-3.
- GUSTRAU, F. RF and Microwave Engineering: Fundamentals of Wireless Communications. [S.I.]: Wiley, v. 1, 2012. ISBN 1119951712.
- HOOPER, B.; BAILEY, T. Aerial Surveys Calculate Vegetation Growth. Transmission & Distribution World, Outubro 2004.
- INTER ACADEMY COUNCIL. Lighting the way: Toward a sustainable energy future, 2007. ISSN 978-90-6984-531-9. Disponível em: <<http://www.interacademycouncil.net/File.aspx?id=24548>>. Acesso em: 2 Junho 2016.
- International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.526-7 - Propagation by Diffraction. [S.I.]. 2001.
- JARDINI, J. A. et al. Information System for the Vegetation Control of Transmission Lines Right-of-Way. IEEE Power Tech , 2007. 28-33.

- JÚNIOR, C. A. S. Localização e Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando o Método dos Mínimos Quadrados e Inteligência Computacional. Dissertação: Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.
- LEE, W. C. Mobile Design Fundamentals. New York: John Wiley, 1993.
- LOUIT, D.; PASCUAL, R.; BANJEVIC, D. Optimal Interval for Major Maintenance Actions in Electricity Distribution Networks. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 31, p. 396-401, Setembro 2009.
- MENEZES, V. P. Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos Técnicos, Orçamentários e Construtivos. Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.
- MESTRE, P. et al. Vegetation Growth Detection Using Wireless Sensor Networks. World Congress on Engineering, London, 30 Junho 2010.
- MILLS, S. J. et al. Evaluation of Aerial Remote Sensing Techniques for Vegetation Management in Power-Line Corridors. IEEE Transactions on Geo-Science and Remote Sensing, v. 48, p. 3379-3390, 2010.
- ONS. Dados relevantes 2015, Dezembro 2015. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/DADOS_2015/html/7-2.html>. Acesso em: 13 Julho 2017.
- PUC-RIO. Mecanismos e Efeitos de Propagação em VHF e UHF, 2014. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4207/4207_4.PDF>. Acesso em: 8 Junho 2017.
- QAYYUM, A.; MALIK, A. S.; NAUFAL, M. Designing of Disparity Map Based on Hierarchical Dynamic Programming Using Satellite Stereo Imagery. 2015 IEEE Student Symposium in Biomedical Engineering & Sciences (ISSBES), Shah Alam, 4 Novembro 2015.
- QAYYUM, A.; MALIK, A.; SAAD, M. N. M. Monitoring of Vegetation Near Power Lines Based on Dynamic Programming Using Satellite Stereo Images. 2014 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA), Kuala Lumpur, 25 Novembro 2014.
- RAPPAPORT, T. S. Comunicações sem Fio: princípios e práticas. 2^a. ed. [S.I.]: Pearson Education, 2009.

- SABBAN, A. Electromagnetic Wave Propagation and Applications in Wideband RF Technologies and Antennas in Microwave Frequencies. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., v. 1, 2016.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. Fault Location on Power Networks. Springer-Verlag, 2010.
- SELEZOV, I. T.; KRYVONOS, Y. G.; GANDZHA, I. S. Wave Propagation and Diffraction. [S.I.]: Springer Singapore, v. 1, 2018. ISBN 978-981-10-4923-1.
- SEYBOLD, J. S. Introduction to RF Propagation. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2005. ISBN 13 978-0-471-65596-1.
- SILVA, M. S. T.; BRITO, S. O. Impactos Ambientais Associados à Construção de Empreendimentos Elétricos no Setor de Distribuição de Energia. I Encontro de Ciência e Tecnologia, Ananindeua, 10 Novembro 2016.
- SONG, H.; KEZUNOVIC, M. A New Analysis Method for Early Detection and Prevention of Cascading Events. Electric Power Systems Research, v. 77, p. 1132–1142, 2007.
- SOUZA, C. P.; RODRIGUEZ, U. P. M.; CARVALHO, F. P. S. Cabo de Energia Instrumentado. BR102014167013A2, 16 Junho 2014.
- SOUZA, P.; MOREIRA, J.; RODRIGUEZ, Y. A Novel Nanocrystalline-Based Current Transformer Working on Saturated Region, Turin, 2017. pp. 1-4.
- TODOROV, M. H.; NIKOLOVA, B. M.; NIKOLOV, G. T. Cloud-Managed Zigbee Sensor Networks. Proc XXV International Scientific Conference Eletronics, 10 Setembro 2016. 2-14.
- YANG, Y. et al. Design and Implementation of Power Line Sensornet for Overhead Transmission Lines. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2009. 1-2.

