

**Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica**

UFCG

Dissertação de Mestrado

**Modelagem de Propagação para Redes de
Sensores sem Fio Aplicadas à Viticultura**

Felipe Pinheiro Correia

SUPRA OMNES LUX LUCES

Campina Grande – PB

Março – 2014

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Modelagem de Propagação para Redes de Sensores sem Fio Aplicadas à Viticultura

Felipe Pinheiro Correia

Orientador: Marcelo Sampaio de Alencar

Co-orientador: Waslon Terlizzie Araújo Lopes

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como requisito necessário para obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Comunicações

Campina Grande – PB, Paraíba, Brasil

2014



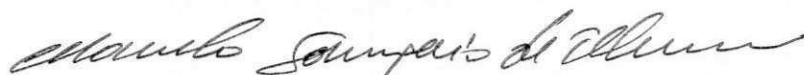
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- C824m Correia, Felipe Pinheiro.
Modelagem de propagação para redes de sensores sem fio aplicadas à viticultura / Felipe Pinheiro Correia. – Campina Grande, 2014.
96 f. : il.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2014.
- "Orientação: Prof. Dr. Marcelo Sampaio de Alencar, Walson Terllizzie Araújo Lopes".
Referências.
1. Redes de Sensores. 2. Agricultura. 3. Propagação I. Alencar, Marcelo Sampaio de. II. Lopes, Walson Terllizzie Araújo III. Título.
- CDU 621.3:634.8(043)

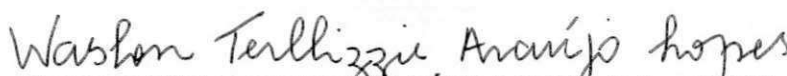
**"MODELAGEM DE PROPAGAÇÃO EM REDES DE SENSORES SEM FIO APLICADAS À
VITICULTURA"**

FELIPE PINHEIRO CORREIA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 18/03/2014



MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, Ph.D., UFCG
Orientador(a)



WASLON TERLIZZIE ARAÚJO LOPES, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



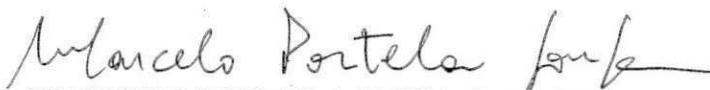
BRAULIRO GONÇALVES LEAL, Dr., UNIVASF
Examinador(a)



JOSÉ EWERTON POMBO DE FARIAS, Dr., UFCG
Examinador(a)



MAURO SOARES DE ASSIS, Notório Saber, União Internacional de Radiociência
Examinador(a)



MARCELO PORTELA SOUSA, D.Sc., IFPB
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pela possibilidade de existir e ao livre arbítrio dado por Ele, que nos proporciona a chance de escolha de nossos caminhos.

A minha mãe pela educação, orientação, amor, paciência, zelo e apoio em todos os momentos.

A meu pai pela educação, orientação, amor, paciência, zelo e apoio em todos os momentos, e por ter me ajudado a realizar os experimentos.

A minha esposa Sara pelo incentivo, apoio, cumplicidade e por ter me ajudado a realizar os experimentos.

A meu orientador, Marcelo Sampaio de Alencar, pela paciência e orientação dadas ao longo da pesquisa.

Ao meu co-orientador, Waslon Lopes, pelas sugestões e orientação.

A todos os amigos que contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial a Mauro Assis, Fabrício Braga, Brauliro Leal, Eziom Alves e Fábio Nelson.

Aos amigos do Iecom, Daniel Martins, Danilo Regis, Évio Rocha, Paulo Ribeiro, Rafael Lopes, Raissa Rocha, Raphael Alencar e Ísis Andrade.

Aos colegas de disciplina Camila Lopes, Ítalo Soares e André Dieb.

Resumo

As tecnologias da Agricultura de Precisão permitem gerenciar recursos naturais para o desenvolvimento sustentável da agricultura, como também diminuir os custos e aumentar o lucro da produção. Nesse contexto, as redes de sensores sem fio são apresentadas como solução para realizar a coleta de informações do solo, do ambiente e de grandes áreas distribuídas. A região do Vale do São Francisco no nordeste do Brasil tem como principal atividade econômica a fruticultura irrigada, sendo uma das principais regiões agrícolas do país com relação a contribuição para o adicionado bruto da agropecuária. As plantações de uva recebem maior investimento e proporcionam maior retorno financeiro. No entanto, a região ainda não conta com sistemas de sensoriamento local que permitam extrair mais informação das plantações. Considerando esses fatos, esta dissertação apresenta um estudo da perda de percurso em plantações de uva para frequência de operação 2,4 GHz. Para determinar o posicionamento dos nós sensores, vários fatores do ambiente que influenciam a intensidade do sinal percebida no receptor devem ser considerados. A análise do canal de comunicações apresentada nesta dissertação fornece subsídio para que o projetista da rede determine em quais posições os sensores devem ser colocados para obter maior área de cobertura. Os fenômenos de propagação são identificados e interpretados para o ambiente estudado, assim como são realizados ajustes dos parâmetros dos modelos de propagação apresentados na literatura. Os dispositivos XBee-PRO ZB S2B foram utilizados para medição da intensidade do sinal.

Abstract

The technologies of precision agriculture permit the management of natural resources for a sustainable development of the environment, as well as the reduction of costs and an increase in the production margin of profit. In this context the wireless sensor networks are presented as a solution to gather soil and environment information, in large distributed areas. The São Francisco Valley region in the Northeast of Brazil has as main economic activity the irrigated fruit production, and is one of the major agricultural regions of the Country. Grape plantations receive large investments and provide good financial return. However, the region still lacks electronic sensing systems to extract adequate information from plantations. Considering these facts, this dissertation presents a study of path loss in grape plantations for a 2.4 GHz operating frequency. In order to determine the position of the sensor nodes, various environmental factors, that influence the intensity of the received signal by a transceiver, must be considered. The analysis of the communication channel presented in this dissertation provides subsidy for the network designer to determine the optimal positions to place the sensors to achieve greater coverage area. The main propagation phenomena were identified and interpreted for the studied environment. Also, the parameter adjustment of the propagation models from the literature was performed. XBee-PRO ZB S2B devices were used to measure the signal intensity.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contexto e Motivação	1
1.2	Problema Abordado e Justificativa	2
1.3	Objetivos	3
1.4	Estrutura da Dissertação	3
2	Redes de Sensores Sem Fio	5
2.1	Principais Componentes de uma Rede de Sensores Sem Fio	6
2.2	Fatores de Projeto	8
2.3	A tecnologia ZigBee/IEEE 802.15.4	11
2.4	Conclusões	16
3	Agricultura de Precisão	18
3.1	Tecnologias da Agricultura de Precisão	19
3.2	RSSF e Agricultura	20
3.3	RSSF e Viticultura	22
3.4	Conclusões	24
4	Modelos de Propagação	25
4.1	Modelagem de Propagação	27
4.2	Modelos de Propagação	39
4.3	Conclusões	43
5	Ambientes de Propagação Estudados	45
5.1	Características da Plantação	45
5.2	Metodologia	49
5.3	Corredor do Tipo A	51
5.4	Corredor do Tipo B	53
5.5	Diagonais	54
5.6	Transmissor Acima do Parreiral	54
6	Interpretação Física das Medidas	58
6.1	Corredor do Tipo A	59
6.2	Corredor do Tipo B	62
6.3	Diagonal	66
6.4	Transmissor Acima da Plantação	73
6.5	Conclusões	73
7	Considerações Finais e Trabalhos Futuros	81

7.1 Artigos Publicados	82
Apêndice A	83
Referências Bibliográficas	96

Lista de Figuras

2.1	Diagrama de um nó sensor.	6
2.2	Representação de uma RSSF.	7
2.3	Representação de sensores espalhados no ambiente monitorado.	9
2.4	Diagrama representativo de uma rede ZigBee.	12
2.5	Principais módulos XBee.	12
2.6	Diagrama que ilustra os <i>bits</i> de sincronização.	14
2.7	Diagrama que ilustra um quadro da camada de enlace.	14
2.8	Diagrama da pilha de protocolos ZigBee.	15
2.9	Topologia estrela.	16
2.10	Topologia em árvore.	16
2.11	Topologia <i>mesh</i>	17
3.1	Esboço do perfil de umidade de um pasto	21
3.2	Sensor de umidade do solo Watermark, modelo 200SS.	23
3.3	Diagrama que ilustra o esquema de camadas de uma RSSF aplicada à viticultura.	23
4.1	Modelo simplificado de canal com desvanecimento.	26
4.2	Esboço do comportamento do sinal com desvanecimento em larga escala e pequena escala somados	26
4.3	Diagrama de uma onda eletromagnética incidente em um material.	31
4.4	Diagrama de uma onda eletromagnética incidente sobre um obstáculo com dimensões de ordem igual ou inferior ao comprimento de onda.	32
4.5	Modelo geométrico utilizado na abordagem estocástica.	33
4.6	Diagrama que ilustra o fenômeno de difração.	34
4.7	Diagrama de fronteiras de sombra em difração causada por semi-plano condutivo infinito.	35
4.8	Diagrama da geometria considerada para difração por superfície cilíndrica.	35
4.9	Diagrama do modelo de difração proposto por Deygout.	36
4.10	Diagrama do modelo de difração proposto por Giovanelli.	37
4.11	Diagrama das zonas de Fresnel entre os terminais.	38
4.12	Diagrama da região na primeira zona de Fresnel que deve ser mantida livre de obstáculos.	38
4.13	Diagrama do modelo de terra plana.	40
4.14	Diagrama de um guia de ondas formado por duas placas paralelas.	41
4.15	Diagrama que ilustra a propagação de uma onda TEM em uma guia de onda.	41
5.1	Foto de um parreiral na Fazenda Minuano, na cidade de Vermelhos, em Pernambuco.	45
5.2	(a) Vista superior de uma plantação de uvas e (b) vista lateral.	46

5.3	Fotos da vegetação no corredor do tipo B, na fazenda Minuano localizada no município de Vermelhos, em Pernambuco.	48
5.4	Foto das uvas no caminho de propagação no corredor do tipo B.	48
5.5	Foto dos obstáculos no parreiral.	49
5.6	Foto superior da plantação retirada do Google Maps.	49
5.7	Foto da plantação em regiões sem cobertura da vegetação.	50
5.8	XBee-PRO ZB S2B com conector RPSMA.	51
5.9	Foto do nó coordenador conectado ao <i>notebook</i>	52
5.10	Captura de telas do programa utilizado para coleta de dados.	52
5.11	Vista superior da plantação com as linhas utilizadas para guiar as medições na diagonal.	56
5.12	Esboço das medições com o coordenador acima da cobertura vegetal.	56
6.1	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana para o corredor do tipo A (escala linear para a distância).	60
6.2	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana para o corredor do tipo A (escala logarítmica para a distância).	60
6.3	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana com o expoente ajustado no corredor do tipo A (escala linear para a distância).	61
6.4	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis de terra plana com o expoente ajustado no corredor do tipo A (escala logarítmica para a distância).	61
6.5	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana (escala linear para a distância).	63
6.6	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana (escala logarítmica para a distância).	64
6.7	Potência recebida (dBm) em função da distância e equação de ajuste logarítmica (escala linear para a distância).	64
6.8	Potência recebida (dBm) em função da distância e equação de ajuste logarítmica (escala logarítmica para a distância).	65
6.9	Comportamento do termo que leva em consideração a altura, $f(h_r)$	67
6.10	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelo que incorpora a altura (escala linear para a distância).	67
6.11	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelo que incorpora a altura (escala logarítmica para a distância).	68
6.12	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de Weissberger e da ITU-R (escala linear para a distância).	69
6.13	Potência recebida (dBm) em função da distância e Modelos de Weissberger e da ITU-R (escala logarítmica para a distância).	69
6.14	Potência recebida (dBm) em função da distância e equações de ajuste para diagonal (escala linear para a distância).	70
6.15	Potência recebida (dBm) em função da distância e equações de ajuste para diagonal (escala logarítmica para a distância).	70
6.16	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos lineares para cada ângulo.	71
6.17	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos logarítmicos para cada ângulo.	72

6.18	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos lineares para cada ângulo (escala logarítmica para a distância).	74
6.19	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos logarítmicos para cada ângulo (escala logarítmica para a distância).	74
6.20	Diagrama da simplificação realizada para estimação do número de obstáculos entre os nós.	75
6.21	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana para o caso dos dois nós acima da plantação (escala logarítmica para a distância).	76
6.22	Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana para o caso dos dois nós acima da plantação (escala logarítmica para a distância).	77
6.23	Potência recebida (dBm) em função da distância e equações de ajuste linear e logarítmico o caso do receptor abaixo da plantação no corredor (escala linear para a distância).	78
6.24	Potência recebida (dBm) em função da distância e equações de ajuste linear e logarítmico o caso do receptor abaixo da plantação no corredor (escala logarítmica para a distância).	78
6.25	Potência recebida (dBm) em função da distância e equações de ajuste linear e logarítmico o caso do receptor abaixo da plantação - 45° (escala linear para a distância).	79
6.26	Potência recebida (dBm) em função da distância e equações de ajuste linear e logarítmico o caso do receptor abaixo da plantação - 45° (escala logarítmica para a distância).	79
A.1	Potência do sinal recebido em função da distância no corredor do tipo A: dados experimentais e regressões.	84
A.2	Potência do sinal recebido em função da distância na diagonal: dados experimentais e regressões.	85
A.3	Potência do sinal recebido em função da distância: dados experimentais e regressões.	86
A.4	Potência do sinal recebido em função da distância: dados experimentais e regressões.	87
A.5	Comparação das curvas dos corredores de 0° e 90°.	88
A.6	Potência do sinal recebido em função da distância: dados experimentais e regressões.	89
A.7	Potência do sinal recebido em função da distância: dados experimentais e regressões.	90
A.8	Comparação das curvas obtidas para os ângulos 0°, 15°, 30°, 45° e 90°.	90

Lista de Tabelas

5.1	Potência média (em dBm) para diferentes alturas do coordenador e distâncias no corredor do tipo A.	53
5.2	Desvio padrão (em dBm) da potência medida no corredor do tipo A.	53
5.3	Potência média (em dBm) para diferentes alturas do receptor e distâncias no corredor do tipo B.	54
5.4	Desvio padrão (em dBm) da potência medida no corredor do tipo B.	54
5.5	Potência média (em dBm) para diferentes alturas do receptor e distâncias na diagonal.	55
5.6	Desvio padrão (em dBm) da potência medida na diagonal.	55
5.7	Medições com os dois nós acima da plantação, no corredor do tipo A.	57
5.8	Medições com o coordenador acima da plantação no corredor do tipo A.	57
5.9	Medições com o coordenador acima da plantação e o receptor abaixo da plantação formando um ângulo de 45° com o corredor do tipo A.	57
6.1	RMSE para os modelos de espaço livre de Friis e para o modelo de terra plana referentes ao corredor do tipo A.	59
6.2	RMSE para os modelos de espaço livre de Friis e de terra plana com expoentes ajustados referentes ao corredor do tipo A.	62
6.3	RMSE para os modelos de espaço livre de Friis e de terra plana no corredor do tipo B.	62
6.4	RMSE e R^2 para a equação de ajuste com altura incorporada.	66
6.5	RMSE para os modelos de Weissberger e da ITU-R.	68
6.6	Parâmetros, valores de RMSE e R^2 para as equações de Weissberger, logarítmica e linear.	71
6.7	Ajustes linear e logarítmico para propagação em diagonal em função do ângulo.	71
6.8	Número de obstáculos para cada ângulo.	72
6.9	Valores de n , RMSE e R^2 para o caso do nó fixo acima e o receptor abaixo da plantação.	76
6.10	Resumo dos melhores ajustes obtidos com relação ao RMSE e o R^2	76
A.1	Estatísticas da regressão não-linear aplicada sobre os dados experimentais na propagação no corredor do tipo A.	84
A.2	Estatísticas da regressão não-linear aplicada sobre os dados experimentais em diagonal.	85
A.3	Estatísticas da regressão não-linear aplicada sobre os dados experimentais (45°).	86
A.4	Estatísticas da regressão não-linear aplicada sobre os dados experimentais (30°).	86
A.5	Estatísticas da regressão não-linear aplicada sobre os dados experimentais (30°).	87
A.6	Estatísticas da regressão não-linear aplicada sobre os dados experimentais (15°).	88
A.7	Estatísticas da regressão não-linear aplicada sobre os dados experimentais (30°).	89

1.1 – Contexto e Motivação

A coleta de informações do solo, do ambiente e de grandes áreas distribuídas é um requisito a ser atendido no processo de produção agrícola. Diversas condições afetam diretamente a tomada de decisão sobre as atividades a serem realizadas nas plantações. Para isso, é necessário o investimento em técnicas científicas de produção, colheita e pós-colheita.

O termo Agricultura de Precisão (AP) se refere a um conjunto de tecnologias utilizadas para entender as mudanças que ocorrem em plantações [1]. Essas ferramentas devem permitir melhor acompanhamento das etapas da produção agrícola. Nesse contexto, as Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) têm sido apresentadas [2, 3, 4] como a principal solução para realização desse acompanhamento. O surgimento de protocolos e dispositivos de baixo custo viabilizam a implantação da tecnologia nesses ambientes, principalmente, por permitirem o monitoramento de grandes áreas.

As RSSFs são geralmente utilizadas em aplicações em que é necessário coletar dados do ambiente, como, por exemplo, temperatura, umidade, pressão e vibrações. Aplicações nas áreas militar, ambiental, médica, comercial e industrial vêm sendo desenvolvidas [5]. Na área industrial, as aplicações envolvem o controle e monitoramento de equipamentos, e a segurança do ambiente industrial. Em aplicações ambientais, tem-se o monitoramento de áreas agrícolas no controle de pragas e na economia de recursos, como água e eletricidade [2]. Explora-se também aplicações em hospitais, incluindo a reabilitação de pacientes, em catástrofes e atendimento hospitalar de emergência. As RSSFs podem ser utilizadas na detecção de ataques químicos, biológicos e nucleares, em aplicações militares [5].

Em aplicações de engenharia agrícola um estudo do ambiente de propagação deve ser realizado, pois as posições dos nós devem ser definidas na etapa de planejamento [3]. Dessa forma, é possível determinar as posições ótimas para obter a cobertura de toda a área de interesse, otimizar a quantidade de dispositivos e atender os requisitos impostos pelo ambiente e à restrição de baixo consumo de energia por nó sensor. O problema de posicionamento de nós é tratado na literatura [6, 7]. Investiga-se, também, a influência de áreas de cobertura irregulares nas estratégias de otimização [8].

Para determinar o posicionamento dos nós, vários fatores do ambiente que influenciam

a intensidade do sinal percebida no receptor devem ser considerados. As interferências causadas pelo sombreamento, difração, reflexões e múltiplos percursos são, geralmente, incorporadas ao modelo que descreve o canal. No entanto, há poucos estudos sobre o modelamento do canal em ambientes agrícolas com vegetação. Foi feito um estudo da propagação em plantações de milho em [9]. Resultados de medições utilizando métricas RSSI (*Radio Signal Strength Indicator*) e PLR (*Packet Loss Rate*) com nós IRIS da Crossbow Inc. foram apresentados. Um estudo da propagação em florestas utilizando a tecnologia ZigBee também foi realizado [10]. Experimentos foram realizados para determinar um modelo para esse tipo de rede e uma avaliação de desempenho foi feita com nós implantados em campo.

1.2 – Problema Abordado e Justificativa

A região do Vale do São Francisco no nordeste do Brasil tem como principal atividade econômica a fruticultura irrigada que atua de forma competitiva em nível internacional. A produção da região atinge o mercado externo, principalmente a Europa, onde as exigências sanitárias e de qualidade são elevadas [11]. Assim, as plantações de uva foram escolhidas por serem as que recebem maior investimento e proporcionam maior retorno financeiro. A cidade de Petrolina, em Pernambuco, por exemplo, possui o terceiro maior PIB (Produto Interno Bruto) da agropecuária do país com contribuição de R\$ 658.796.000,00. A cidade de Juazeiro-BA ocupa a quinquagésima nona posição com uma contribuição de R\$ 200.937.000,00 [12].

As Redes de Sensores sem Fio são candidatas para melhorar o processo produtivo nessa região, pois fornecem novas formas de gerenciamento das áreas de cultivo e por serem mais baratas que as redes cabeadas. No entanto, antes da implantação de um sistema de comunicações, é importante conhecer a perda de percurso que ocorre, por exemplo, devido às diferentes configurações de altura das antenas e à presença de obstáculos. Fatores como a potência de transmissão, densidade da vegetação e ocorrência de visada direta também influenciam o projeto [13, 14].

Devido à falta de modelos específicos para este tipo de aplicação, este trabalho apresenta um estudo experimental da perda de percurso em plantações de uva realizado com base em valores de potência obtidos *in loco*. Foram escolhidos modelos clássicos da literatura para ajustes nos parâmetros de maneira empírica e, a partir dos valores obtidos, foi realizada a interpretação física dos resultados. Com base nos ajustes obtidos, é possível prever a potência do sinal em função da distância e estimar o alcance dos nós XBee[®] Pro ZB S2B.

1.3 – Objetivos

1.3.1 – Objetivo Geral

O objetivo do trabalho é analisar o canal de comunicações em plantações de uva, no Vale do São Francisco, a fim de prever a perda de percurso e avaliar os efeitos dos fenômenos de propagação na intensidade do sinal.

1.3.2 – Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- realizar medições da potência do sinal em plantações de uva, no Vale do São Francisco, com nós XBee[®] Pro ZB S2B, que operam na frequência de 2,4 GHz;
- estudar os modelos teóricos e empíricos que possam ser aplicados para os casos estudados;
- analisar os principais mecanismos de propagação que justifiquem os valores obtidos nas medições;
- interpretar as medições com base em ajustes realizados nos modelos teóricos e empíricos.

1.4 – Estrutura da Dissertação

Partindo do problema abordado e dos objetivos levantados, esta dissertação encontra-se organizada da maneira descrita a seguir:

- Capítulo 2: os principais conceitos de RSSFs são apresentados, os principais componentes, os fatores que devem ser levados em consideração na fase de projeto e a tecnologia ZigBee;
- Capítulo 3: as características da AP são discutidos, as principais tecnologias adotadas e como as RSSFs se relacionam com a agricultura e a viticultura;
- Capítulo 4: a metodologia adotada é discutida para a realização das medições e é apresentada a divisão da plantação em regiões com mecanismos de propagação dominantes diferentes;
- Capítulo 5: com base nos resultados obtidos por ambientes, os mecanismos de propagação foram estudados e modelos da literatura que servem como base para justificar os valores de potência obtidos, que são apresentados neste capítulo;
- Capítulo 6: os ajustes são apresentados, bem com as justificativas levando em consideração os conceitos discutidos no Capítulo 5;

-
- Capítulo 7: apresenta as considerações finais e contribuições, limitações do estudo e algumas sugestões de como este trabalho pode ser melhorado e continuado.

Redes de Sensores Sem Fio

As RSSFs são uma evolução das redes de sensores tradicionais cabeadas. Estas redes surgiram devido ao alto custo de implantação e da dificuldade em instalar redes com fios. Algumas características das RSSFs propiciam o surgimento de novas aplicações para o sensoriamento remoto, tais como flexibilidade, baixo custo e implantação rápida [5, 15].

Uma RSSF consiste em um conjunto de nós sensores inseridos em um ambiente de interesse tanto para coleta de informações quanto para atuação de maneira distribuída [16]. As RSSFs são consideradas uma subclasse das redes *ad-hoc* pela descentralização no envio e recepção de dados. Os nós sensores são formados por uma unidade de sensoriamento, uma unidade de processamento de dados e por componentes de comunicações. Os nós devem ser programados para realizar cálculos simples e transmitir apenas dados necessários. Sugere-se que as redes tenham capacidade de auto-organização para que seja possível implantá-las em vários tipos de ambientes [15]. A auto-organização é a capacidade da rede realizar mudanças estruturais, ou seja, mudanças na topologia, nas rotas utilizadas, ou em outras configurações da rede, sem a intervenção humana de maneira que a RSSF se adapte às características dinâmicas do ambiente e da própria rede [17].

As principais diferenças entre as RSSFs e as redes tradicionais são que nas RSSFs o número de nós sensores pode ser muito maior que nas redes de sensores tradicionais, a possibilidade de mudança frequente de topologia e os nós sensores possuem, geralmente, limitação de energia, capacidade de processamento e memória [16]. Além de serem mais baratas e de terem o processo de implantação facilitado se comparado com as redes de sensores tradicionais, as RSSFs permitem que os nós sensores realizem tarefas mais complexas devido a propriedade de cooperação.

Os nós sensores se comunicam por meio de ondas de rádio ou infravermelho. Para comunicações com sinais de radiofrequência (RF), módulos de baixo consumo de energia devem ser utilizados, visto que pode haver aplicações em que a substituição das baterias é inviável. Os protocolos utilizados devem ser robustos e, também, eficientes em energia [18].

Nas próximas seções, são apresentados os principais componentes de uma RSSF, os fatores que devem ser considerados na fase de projeto e a tecnologia ZigBee.

2.1 – Principais Componentes de uma Rede de Sensores Sem Fio

Há quatro componentes principais em uma RSSF [5, 17]: nós sensores, um sistema de comunicação sem fio, um (ou vários) nó de interface com outras redes e um servidor de aplicação para tratar dos dados coletados, eventos, geração de relatórios, e permitir o envio de comandos de atuação para os nós da rede. Estes componentes são apresentados a seguir.

2.1.1 – Nó sensor

A tecnologia para sensoriamento e controle inclui sensores de campo eletromagnético, sensores ópticos e infravermelhos, radares, lasers, sensores de localização e navegação e sensores de parâmetros ambientais (velocidade do vento, umidade, temperatura) [5].

Um nó sensor, cuja organização é apresentada na Figura 2.1, geralmente possui um microcontrolador ou microprocessador para realizar o processamento local e fazer a interface entre os sensores e atuadores e o módulo de RF. Um ou mais sensores são conectados ao microcontrolador. Além disso, um nó possui um módulo de comunicação que permite a transmissão dos dados coletados dos sensores, o recebimento de comandos de atuação e a determinação de sua posição no ambiente monitorado pela aplicação [16].

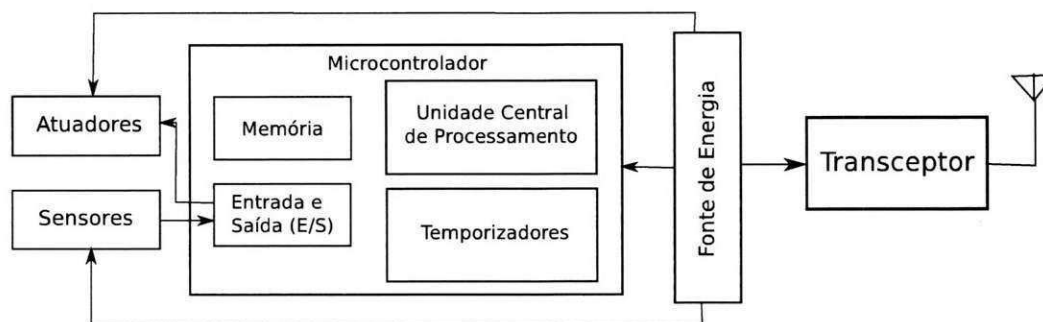


Figura 2.1 – Diagrama de um nó sensor.

Alguns nós sensores possuem um sistema operacional (SO) que utiliza uma arquitetura para tornar a implementação mais rápida e minimizar o tamanho do código, como no caso do sistema TinyOS. Um módulo de *software* é necessário para gerenciar funções de comunicação, como roteamento, gerenciamento de pacotes, manutenção de topologia e controle de acesso ao meio. Além disso, alguns módulos de codificação e de camada física gerenciam os detalhes do enlace, como a sincronização, codificação do sinal, recuperação de *bits* e modulação. Aplicações de tamanho reduzido podem ser desenvolvidas para processamento de dados. Esses aplicativos manipulam, armazenam sinais e aplicam funções numéricas sobre os dados. Eles são utilizados para o processamento dentro da rede [5].

2.1.2 – Sistema de Comunicação Sem Fio

A formação da rede implica a necessidade de suporte às conectividades lógica e física. Em RSSFs, a conectividade física é fornecida por enlaces de rádio (Figura 2.2) com distância de até milhares de metros. A conectividade lógica objetiva dar suporte às mudanças de topologia e ao roteamento por múltiplos saltos (*multihop*) [17].

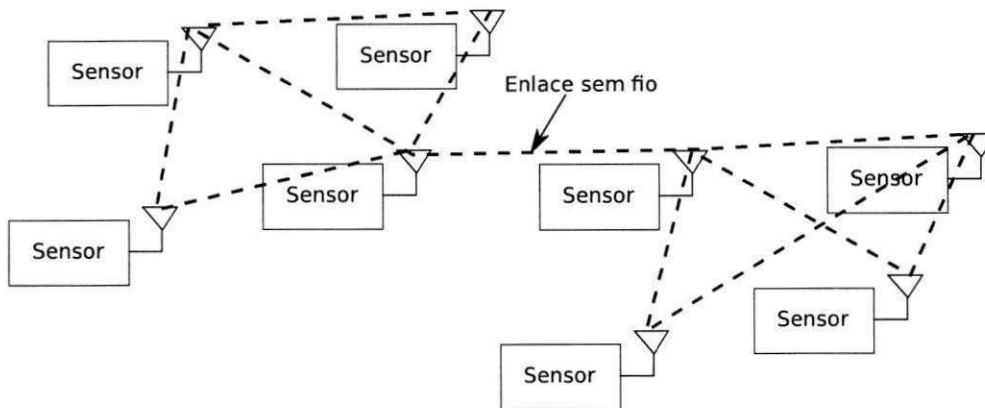


Figura 2.2 – Representação de uma RSSF.

As aplicações de RSSFs podem requerer o processamento colaborativo de dados. No processamento colaborativo de dados, a fusão dos dados é realizada a partir de vários nós sensores [5]. A aplicação deve permitir a consulta de dados de apenas um nó ou de informações de uma subrede. No segundo caso, pode não ser viável transmitir uma grande quantidade de dados pela rede, sendo necessária a instalação de nós sorvedouros (*sink nodes*) locais, que transmitem os dados comprimidos. Geralmente, uma camada de *software* intermediária (*middleware*) é necessária para facilitar o processo de consulta e permitir que as informações sejam organizadas de acordo com as necessidades da aplicação [19].

Em algumas aplicações é importante que a rede tenha capacidade de auto-organização [15]. Essa capacidade é necessária em aplicações com redes densas ou em locais de difícil acesso onde a configuração manual não é viável. Além disso, alguns nós podem falhar devido à necessidade de recarregar as baterias ou por motivo de destruição do *hardware*, e assim, novos nós devem se associar à rede, que deve ser capaz de se reconfigurar.

2.1.3 – Nós de Interface

É possível que uma RSSF se comunique com outras redes utilizando nós de interface chamados de sorvedouros (ou *gateways*) [17]. O sorvedouro encaminha os dados que chegam para um servidor de aplicação por meio de redes especializadas ou da Internet. No entanto, uma rede com apenas um *gateway* pode fazer com que esse nó fique sobrecarregado, principalmente em redes densas. Alguns protocolos foram desenvolvidos para gerenciar a formação de grupos (*clusters*), tais como o LEACH [18] e LF-Ant [20]. Protocolos baseados na formação de grupos são utilizados para minimizar o consumo de energia do nós da rede. Um líder é eleito em cada

grupo que é responsável por coletar, agregar e transmitir os dados dos nós pertencentes ao grupo ao sorvedouro.

2.1.4 – Supervisório

Para gerenciar uma RSSF é necessário ter um supervisório que provê funcionalidades ao usuário da rede. A aplicação deve ser desenvolvida de forma sistemática e utilizando técnicas de engenharia de *software* [17].

Dependendo da aplicação, o *software* do supervisório deve permitir ao usuário visualizar os nós que estão operando, o nível de energia de cada um deles e um mapa de energia da rede completa [17], a localização dos nós e os parâmetros em tempo real. Outra funcionalidade primordial é o envio de comandos de atuação para determinado nó com base nos relatórios apresentados pelo *software*.

Funcionalidades administrativas também podem ser desenvolvidas. Alguns parâmetros podem ser configurados a partir do supervisório, como o protocolo de acesso ao meio a ser utilizado, tipo de roteamento, ajuste da posição e topologia dos nós com base na área estimada de cobertura e no tráfego observado, entre outras funcionalidades [17].

2.2 – Fatores de Projeto

Uma RSSF pode conter uma grande quantidade de nós sensores, formando uma rede densa [21]. Os nós, nesse caso, são geralmente implantados de maneira aleatória. A manutenção e detecção de falhas é difícil, já que a densidade da rede é elevada. Em uma RSSF estruturada, os nós são implantados de maneira planejada. Com essa abordagem, tem-se uma quantidade menor de nós operando a fim de reduzir o custo total de implantação e manutenção. Os nós são posicionados de forma a obter uma cobertura ótima, ao contrário de redes não-estruturadas, que podem ter áreas sem cobertura. Em algumas aplicações, a localização [22] é importante, como na determinação da posição de focos de incêndio e na medição de temperatura da atmosfera em diferentes alturas. A escolha entre as abordagens se dá com base nos requisitos da aplicação.

Os nós são implantados no ambiente monitorado, como ilustra a Figura 2.3. Os nós possuem funcionalidades de coleta de dados e roteamento em direção ao sorvedouro. O sorvedouro pode se comunicar diretamente com o nó que realiza o gerenciamento de tarefas, ou utilizar a internet ou comunicação via satélite.

Quando as dimensões dos nós sensores são em escala nanométrica (e.g. *Nanoscale Electromechanical Systems* - NEMS) eles são considerados de tamanho pequeno, médios quando suas dimensões são em escala micrométrica (e.g. *Microscale Electromechanical Systems* - MEMS), e grandes quando suas dimensões são em escala de centímetros ou decímetros cúbicos (e.g. radares e satélites). Eles podem ser estacionários ou móveis [5].

Alguns fatores devem ser levados em consideração na etapa de projeto de RSSFs, como

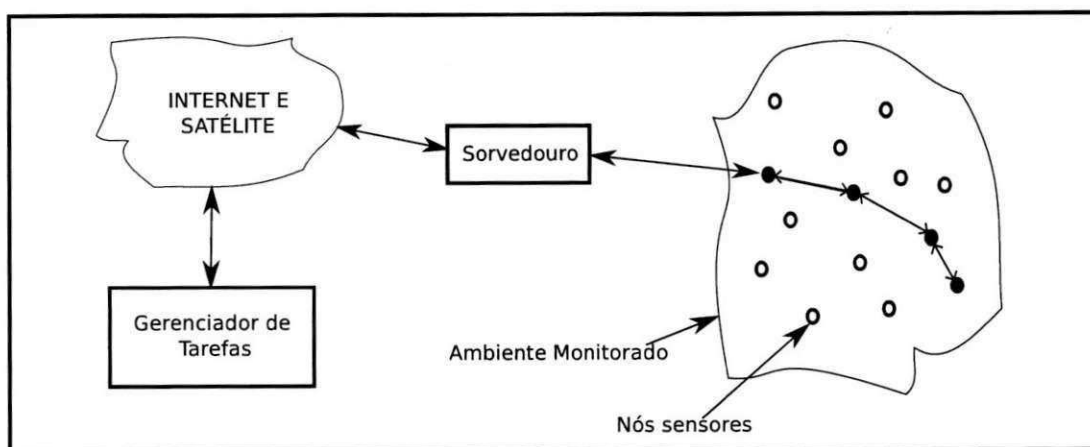


Figura 2.3 – Representação de sensores espalhados no ambiente monitorado [16].

apresentados a seguir.

2.2.1 – Requisitos da aplicação

As informações coletadas pelos nós sensores devem ser manipuladas e apresentadas ao usuário. Logo, aplicações devem ser desenvolvidas para permitir que o usuário gerencie a rede, envie comandos de atuação e consulte as informações do ambiente monitorado. Requisitos funcionais e não-funcionais devem ser previstos na fase de projeto.

2.2.2 – Ambiente de operação

O ambiente de operação influencia a escolha dos componentes de *software* e *hardware*. Em grandes áreas, o monitoramento é feito de forma distribuída, como é o caso de aplicações ambientais. Dependendo do ambiente da implantação, a rede pode ser estruturada, como é o caso de redes industriais, ou não-estruturadas, como no monitoramento de campos de batalha. O ambiente pode requerer que a rede seja homogênea (sensores do mesmo tipo) ou heterogênea (sensores de tipos diferentes) [5].

Regiões mais abertas permitem que os nós se comuniquem com maior alcance. Por outro lado, em regiões com muitos obstáculos, como ambientes interiores ou com vegetação densa, a transmissão têm menor alcance.

2.2.3 – Escalabilidade

RSSFs contendo milhares de sensores são previstas para aplicações ambientais como monitoramento em oceanos e florestas [17]. Neste tipo de rede, deve-se levar em consideração o fluxo elevado de dados, alta probabilidade de falha dos nós e alta probabilidade de falha dos enlaces devido a interferência [15].

2.2.4 – Topologia

Topologia é um arranjo de vários elementos em uma rede. A topologia pode representar tanto o fluxo físico dos dados quanto o fluxo lógico. As topologias geralmente utilizadas em RSSFs são a ponto-a-ponto, estrela e árvore [23].

A mudança de topologia deve ser considerada uma vez que, dependendo da aplicação, a rede tem alta probabilidade de crescer ou de nós falharem. Mudanças no ambiente de operação devem ser percebidas pela rede de forma que ela reorganize a topologia à medida que os obstáculos surgem, se movem, ou saem do ambiente, ao longo do tempo.

2.2.5 – Tolerância a falhas

A falha em alguns nós não deve afetar a tarefa global da RSSF [16]. A rede deve estar preparada para se reorganizar de forma a manter a qualidade das tarefas acima de determinado patamar. Em aplicações em que a rede é autônoma, principalmente em ambientes inóspitos como incêndios e locais de conflito, a tolerância a falhas deve ser elevada.

2.2.6 – Consumo de energia

Os nós sensores devem ser leves e pequenos para facilitar a implantação. Além disso, devem consumir pouca energia [18, 16], pois a troca de baterias pode ser inviável ou aumentar o custo unitário por nó. Em redes de múltiplos saltos, os nós possuem duas funcionalidades, a de coleta de dados e de roteamento de dados. Portanto, o consumo de energia de um nó é calculado em função das tarefas de sensoriamento, comunicação e processamento de dados.

2.2.7 – Restrições de *hardware*

Na etapa de projeto, a plataforma de *hardware* que atende aos requisitos da aplicação e do ambiente deve ser escolhida. Em algumas aplicações, é necessário desenvolver circuitos digitais e *front-ends* de RF. O *hardware* deve ter uma unidade de processamento e um transceptor de baixa potência.

2.2.8 – Aspectos da rede

A formação da RSSF deve ser realizada em função das limitações de *hardware*, do ambiente físico e dos requisitos da camada de aplicação. Os algoritmos e protocolos devem ser projetados para fornecer um mecanismo de comunicação robusto e eficiente. Em alguns casos, pode ser necessário realizar ou modificar o projeto da camada física. Esquemas de modulação e codificação de fonte e canal, bem como métodos de acesso ao canal, roteamento e gerenciamento de mobilidade podem ser desenvolvidos [20] ou alterados.

Os nós sensores podem realizar o processamento dos dados localmente, como, por exemplo, a tradução de dados coletados pelos sensores. Os nós podem, também, realizar tarefas

de correlação de dados, como fusão e agregação.

2.3 – A tecnologia ZigBee/IEEE 802.15.4

A tecnologia ZigBee tem o propósito de fornecer baixas taxas de transmissão, baixo consumo de energia e baixo custo, baseada no padrão IEEE 802.15.4. O padrão ZigBee define as camadas acima das camadas MAC e PHY do padrão IEEE 802.15.4 [24, 23].

A pilha de protocolos ZigBee consiste em cinco camadas: física (PHY), de acesso ao meio (MAC), de rede (NWK - *Network Layer*), APS (*Application Support Sublayer* - Subcamada de Suporte à Aplicação) e ZDO (*ZigBee Device Objects*). A camada PHY define a operação física do dispositivo incluindo a potência de saída, modulação e taxa de transmissão. A maioria dos dispositivos ZigBee operam em 2,4 GHz ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) com taxa de dados de 250 kbps. A camada MAC gerencia a troca de dados ponto a ponto, incluindo serviços como tentativas de transmissão, confirmação e técnicas de tratamento de colisões como o CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). A camada de rede possui funções que permitem estabelecer rotas com múltiplos saltos, ou seja, os pacotes de dados passam por vários dispositivos antes de chegar no seu destino. A camada de aplicação APS define objetos de endereçamento incluindo perfis, *clusters* e dispositivos finais. Por fim, a camada de aplicação ZDO provê a descoberta de serviços e dispositivos, e funcionalidades de gerenciamento de rede avançadas.

2.3.1 – Dispositivos

O padrão ZigBee define três tipos diferentes de dispositivos: coordenador, roteador e dispositivo final (*end-device*) [23].

O coordenador seleciona um canal e uma identificação para a rede (PAN ID - *Personal Area Network Identification*). O coordenador também tem a função de permitir que roteadores e dispositivos se associem à rede, participem do roteamento, habilitem o modo de repouso (*sleep mode*) e possam armazenar dados no buffer para que os end-devices possam entrar no modo de repouso.

Um roteador gerencia a associação de outros roteadores e dispositivos finais na rede, depois de terem sido admitidos em uma PAN ZigBee. O roteador também participa do roteamento de pacotes e nunca entra no modo repouso. Além disso, o roteador pode armazenar dados no *buffer* para que os dispositivos finais possam habilitar o modo repouso.

Um dispositivo final deve realizar o processo de associação em uma rede ZigBee antes de transmitir e receber pacotes. Não pode participar do roteamento e deve sempre transmitir e receber dados por meio do nó pai (nó coordenador ou roteador). Pode habilitar modos de operação de baixa potência e é, geralmente, alimentado com baterias. Um diagrama de rede ZigBee é apresentado na Figura 2.4.

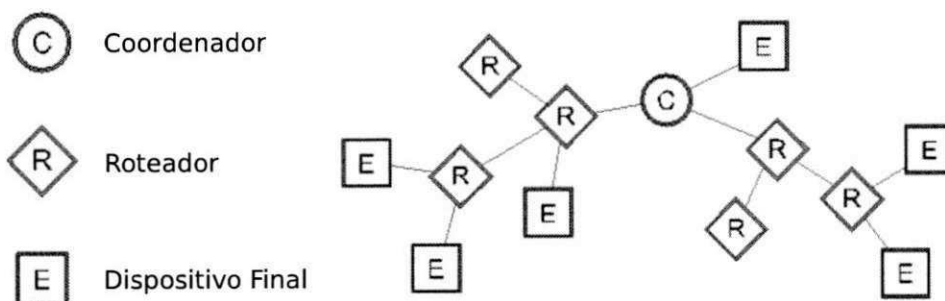


Figura 2.4 – Diagrama representativo de uma rede ZigBee (Adaptado de [24]).

2.3.2 – Dispositivos XBee Comerciais

Vários dispositivos que suportam a tecnologia ZigBee estão disponíveis no mercado [24], dentre eles os módulos XBee[®] são amplamente utilizados e são fabricados pela Digi International. Os módulos estão disponíveis com vários modelos de antena, frequência de operação e encapsulamento. Os principais modelos são apresentados na Figura 2.5.

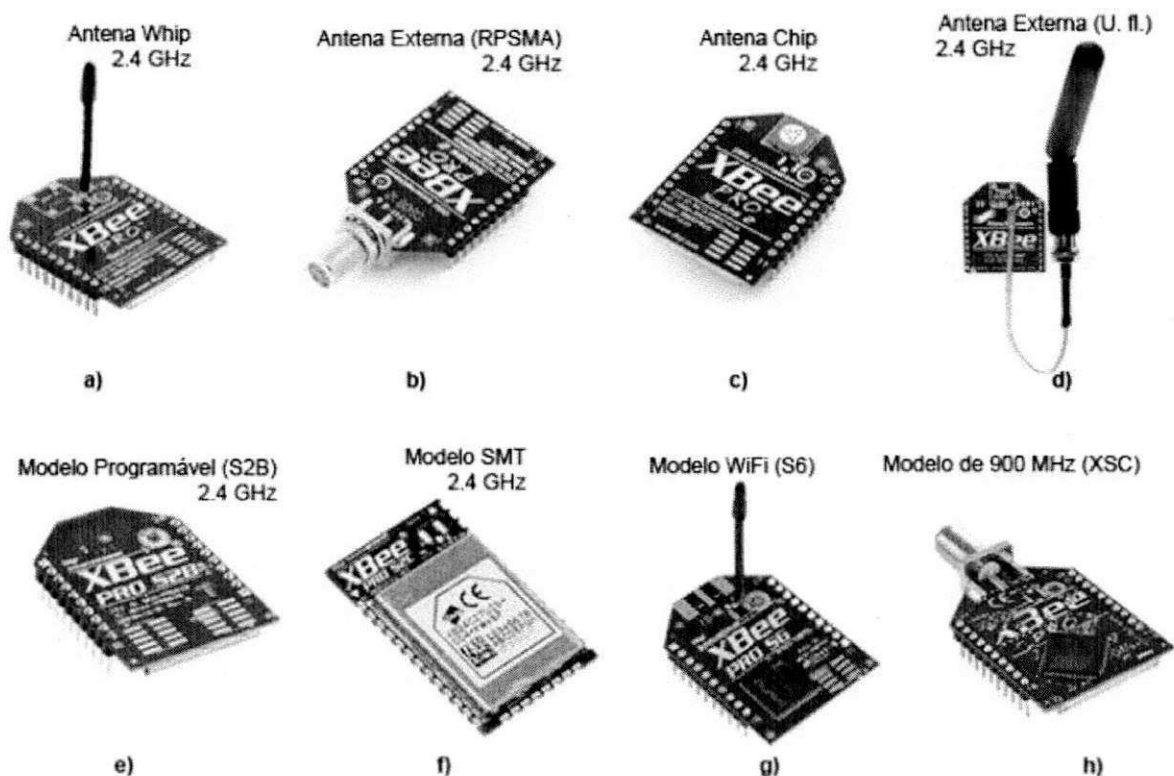


Figura 2.5 – Principais módulos XBee [25].

Os módulos podem operar no modo transparente (AT) e no modo de interação com aplicação API (*Application Programming Interface*) [24]. No modo AT, o dispositivo transmite os dados recebidos por RS232 para o módulo destino. Os dados que são recebido por RF são direcionados ao pino de saída (DOUT).

O modo API permite que a aplicação interaja com a camada de rede. Nesse sentido, os dados são organizados em pacotes que definem operações ou eventos a serem realizados no módulo.

Os dispositivos XBee[®] Pro ZB S2B são interessantes para aplicações em agricultura de precisão, principalmente, devido ao alcance em linha de visada proposto pelo fabricante que é de 3,2 km para ambientes externos. As antenas com conectores são resistentes se comparadas com as dos outros modelos. Além disso, um dispositivo XBee[®] Pro ZB S2B custa em torno de US\$ 45,00 e possuem quatro entradas analógicas. A Figura ?? apresenta o dispositivo XBee[®] Pro ZB S2B e suas características mecânicas

2.3.3 – Padrão IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 [26] faz parte de um conjunto de padrões responsáveis por regulamentar a implantação de redes pessoais sem fio ou WPANs (*Wireless Personal Area Networks*). O padrão define a camada física (PHY) e de enlace com o protocolo MAC (*Medium Access Control*), estabelecendo comunicação confiável, com detecção de erros, confirmação de recebimento de mensagem e retransmissões.

Camada Física - PHY

A camada física inclui as frequências de 868 MHz, 915 MHz e 2,4 GHz. Na frequência de 2,4 GHz, são especificados dezesseis canais separados a intervalos de 5 MHz, a partir de 2,405 GHz a 2,480 GHz. As transmissões são feitas utilizando DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), a taxa de modulação é 62500 bauds, em que cada símbolo corresponde a um conjunto de quatro *bits*. A largura de banda efetiva é de 2 MHz [23].

Para determinar o melhor canal a ser utilizado, o protocolo PHY avalia o nível do sinal com os procedimentos de detecção de energia (*Energy Detection* - ED) e avaliação de disponibilidade do canal (*Clear Channel Assessment* - CCA). A detecção de energia é feita utilizando pacotes RSSI (*Received Signal Strength Indication*) e pode determinar se um canal está ocupado. O procedimento CCA tenta detectar se o canal está livre por meio de três métodos. O procedimento pode verificar se o nível de energia supera um limite pré determinado, ou, ainda, pode verificar se existem sinais compatíveis com o IEEE 802.15.4 (presença de portadora). Finalmente, pode-se verificar a presença de sinais compatíveis com o IEEE 802.15.4 com nível de energia suficiente [23].

Com o objetivo de permitir que os receptores detectem o início de uma transmissão e sincronizem seus temporizadores, envia-se um cabeçalho com trinta e dois zeros seguidos da sequência 10100111₂. A estrutura do quadro é apresentada na Figura 2.6 [23].

O cabeçalho SHR (*Synchronization Header*) é utilizado para sincronização, com o conjunto de bits SFD (*Start of Frame Delimiter*). O cabeçalho PHR (PHY Header) determina o tamanho do pacote. O campo *payload* se refere aos dados capturados pelos sensores ou que

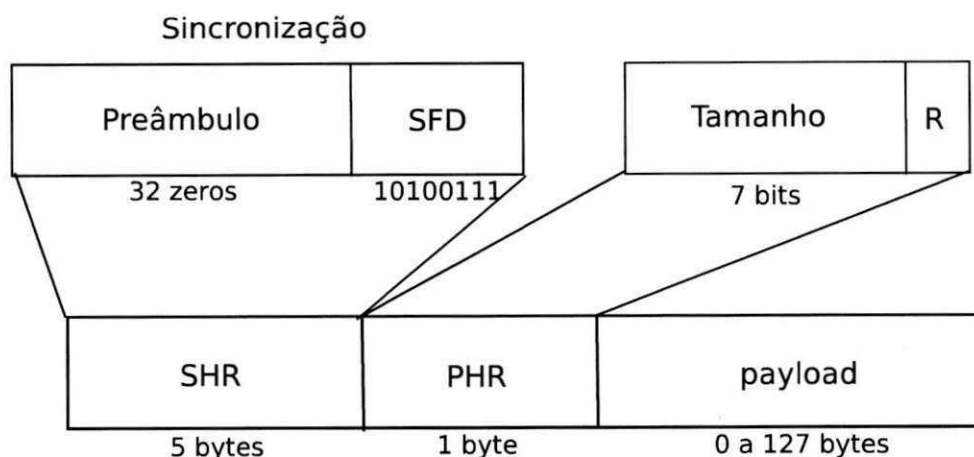


Figura 2.6 – Diagrama que ilustra os bits de sincronização.

são transmitidos pela aplicação para que os nós ativem os atuadores.

Camada de Enlace - MAC

A camada de enlace especifica apenas o protocolo MAC que garante que a informação chegue ao receptor com integridade. A informação é transmitida formando quadros (Figura 2.7) que possuem um cabeçalho e rodapé. O cabeçalho contém informações de controle, como o identificador do tipo de quadro, e o rodapé contém bits para controle de erro [23].

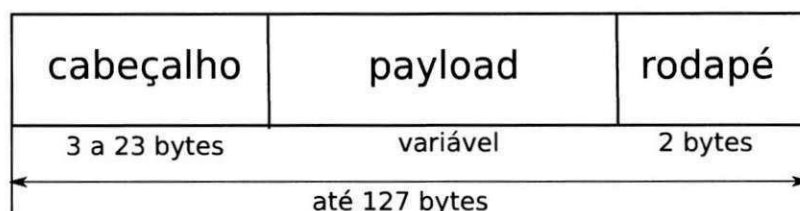


Figura 2.7 – Diagrama que ilustra um quadro da camada de enlace.

O padrão IEEE 802.15.4 especifica um esquema de acesso ao meio similar ao esquema utilizado pela Ethernet. O objetivo é minimizar as colisões e maximizar a utilização do meio. O método de acesso ao meio utilizado é o CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), que estabelece que antes do dispositivo acessar o meio, deve-se esperar durante um intervalo de tempo pseudoaleatório [23].

2.3.4 – ZigBee

A pilha de protocolos ZigBee [23] funciona seguindo o padrão IEEE 802.15.4 para as camadas inferiores (PHY e MAC). Além dos protocolos da camada de enlace e física, o padrão ZigBee possui uma camada de roteamento NWK e uma camada APS que permite a comunicação entre as aplicações.

A estrutura da pilha de protocolos ZigBee é apresentada na Figura 2.8. O protocolo NWK provê o roteamento. Os roteadores e coordenadores formam as rotas utilizando mensagens de

requisição de rota (*Route Request*) e resposta a requisição de rota (*Route Reply*).

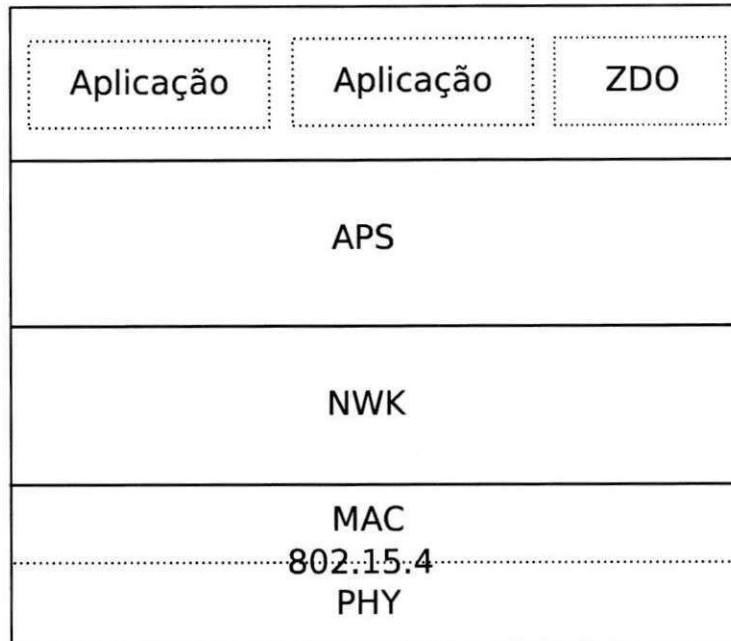


Figura 2.8 – Diagrama da pilha de protocolos ZigBee.

Os *end-devices* não possuem capacidade de roteamento, portanto, eles enviam as mensagens a um roteador ou ao coordenador da rede. O coordenador e o roteador também podem armazenar a mensagem até que os *end-devices* saiam do modo *sleep* para recebê-las.

A camada acima da NWK é a APS (*Application Support*), que provê os circuitos virtuais para comunicação entre aplicações. Cada aplicação possui um *endpoint* que a identifica. As mensagens são identificadas por um *cluster-ID*. O conjunto de mensagens que uma aplicação utiliza é denominada *profile-ID*.

Na camada de aplicação há a aplicação ZDO (*ZigBee Device Objects*) que permite realizar algumas configurações, como, por exemplo, a descoberta de qual dispositivo suporta qual *profile*. Com a aplicação ZDO é possível interagir com as camadas APS e NWK para controlar e consultar parâmetros de operação da rede e suporte a aplicação. É possível, por exemplo, solicitar que todos os elementos da rede mudem a frequência de operação.

Topologias

No padrão ZigBee, as topologias de rede definidas são a topologia estrela, árvore e *mesh*. Na topologia estrela, um único nó funciona como coordenador que, inicialmente, escolhe um identificador PAN. A comunicação, nesse caso, é centralizada, ou seja, os dispositivos enviam os dados para o coordenador que os retransmite para o nó sorvedouro. A Figura 2.9 apresenta a topologia estrela.

A topologia em árvore pode ser estabelecida utilizando as camadas mais altas do padrão ZigBee. A rede é formada por um coordenador, um nó principal do grupo e os outros dispositivos.

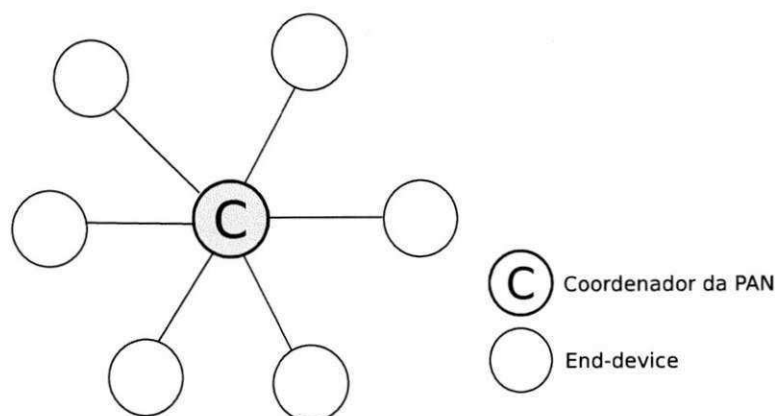


Figura 2.9 – Topologia estrela.

Dessa forma, é possível criar uma malha com vários grupos conectados a um mesmo coordenador, como mostra a Figura 2.10.

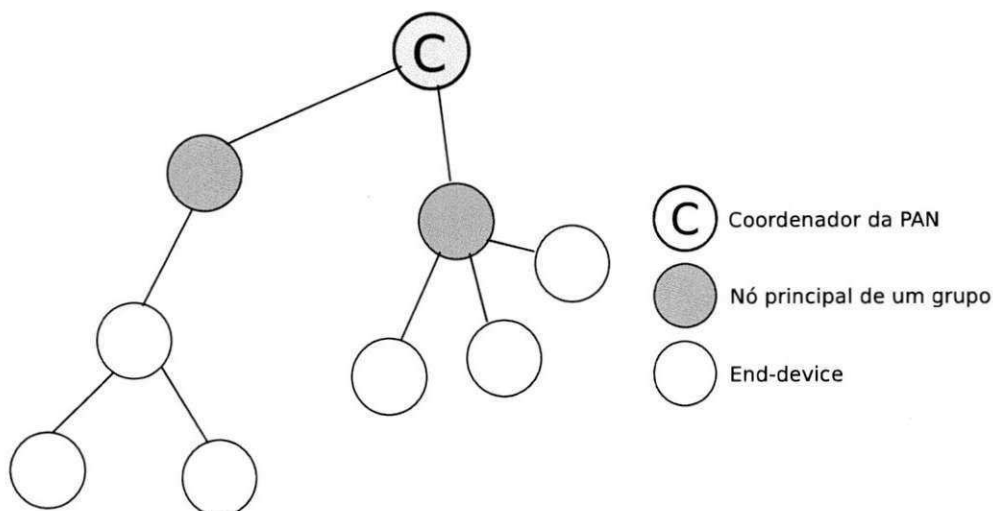


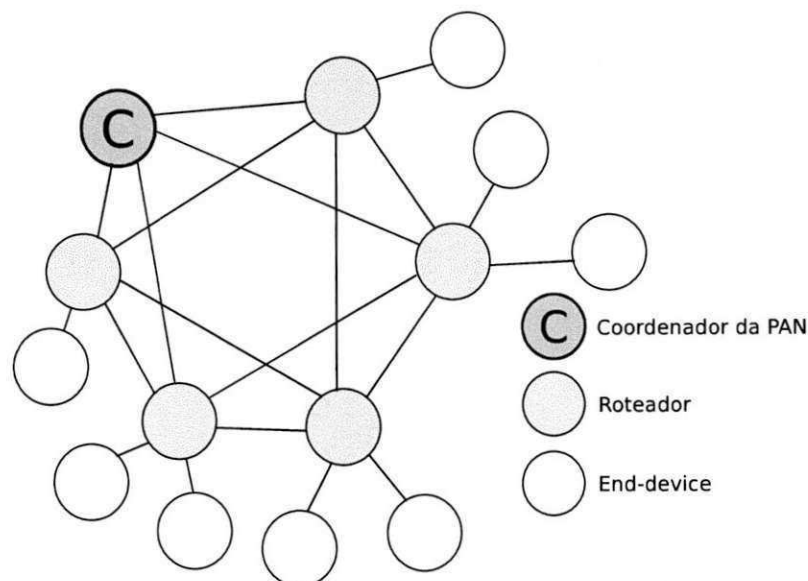
Figura 2.10 – Topologia em árvore.

Cada roteador pode ter um número limitado de filhos. Esse número é dividido entre um número máximo de roteadores e de *end-devices*. O tráfego deve passar obrigatoriamente pelo coordenador, que está no topo da hierarquia (raiz da árvore).

Na topologia *mesh*, os roteadores e coordenador entregam as mensagens aos roteadores mais próximos que repetem o mesmo procedimento até que a mensagem chegue ao destino. Os *end-devices* enviam as mensagens aos seus roteadores que possuem a tarefa de encontrar o roteador mais próximo. Na Figura 2.11, é apresentada a topologia *mesh* com vários dispositivos.

2.4 – Conclusões

As RSSFs podem reduzir o custo de sistemas de monitoramento e controle, facilitar o processo de implantação e instalação em lugares de difícil acesso. São consideradas uma



subclasse das redes *ad-hoc* pela descentralização no envio e recepção dos dados muito embora, em redes ZigBee, essas tarefas requerem a participação dos roteadores.

Sugere-se que os nós sejam programados para realizar apenas tarefas simples para economizar energia. Além disso, outras características dos nós devem ser levadas em consideração no desenvolvimento do *hardware* para se obter um baixo consumo. Os circuitos, protocolos, e o *firmware* devem ser desenvolvidos de forma a minimizar o consumo de energia.

O padrão ZigBee fornece baixas taxas de transmissão e baixo custo se comparado com outros padrões para transmissão sem fio como Bluetooth e Wi-Fi. Logo, vem sendo utilizadas para o desenvolvimento de RSSFs como apresentado na literatura. Os dispositivos XBee suportam a implementação do padrão ZigBee e foram desenvolvidos para operar especificamente com essa tecnologia. Esse fato favorece a padronização e a facilidade de implementação das redes, não sendo necessário o desenvolvimento de *hardware* específico para transmissão na maioria das aplicações. Os módulos já possuem antena e encapsulamento. No entanto, é necessário desenvolver circuitos de alimentação e pode ser preciso o uso de microcontroladores adicionais para permitir a integração com vários sensores. Para aplicações agrícolas, os nós XBee[®] Pro ZB S2B atendem os requisitos com base nas especificações do fabricante, principalmente, com relação ao alcance em linha de visada de 3,2 km.

Vários fatores de projeto devem ser analisados antes da implantação da rede. Os requisitos da aplicação devem ser atendidos de forma que a RSSF permita extrair informações sobre o ambiente para que o usuário aumente sua receita, tenha maior segurança, otimize ou reduza o impacto ambiental de suas atividades. Para isso, devem ser estudados o ambiente de operação, a topologia a ser utilizada, e os aspectos da rede.

Agricultura de Precisão

O termo Agricultura de Precisão (AP) é utilizado para designar os métodos de coleta e interpretação de dados usados para entender as mudanças que ocorrem em plantações. O conceito da AP é considerada uma ideia atrativa para gerenciar recursos naturais e realizar o desenvolvimento da agricultura sustentável [1]. Para países em desenvolvimento, a AP tem papel importante devido ao aumento da população, diminuição dos recursos naturais, e a degradação do ambiente causada pelas práticas agrícolas.

A AP ganhou visibilidade a partir de um sistema para mistura e distribuição de fertilizantes desenvolvido pela Soil Teq em 1988 nos Estados Unidos [27]. O sistema utilizava informação de fotografias aéreas e amostras do solo para gerar um mapa de fertilização. Posteriormente, a AP foi definida como a aplicação de tecnologias e princípios para gerenciar a variabilidade temporal e espacial associada com todos os aspectos da produção agrícola com o propósito de melhorar a qualidade e o desempenho do processo [27, 28]. Qualquer componente da produção agrícola que possui variabilidade pode ser incluído no domínio da AP. Os vários aspectos da AP incluem a variabilidade de propriedades do solo e do tempo, a genética das plantas, as variáveis biológicas e a produtividade. Além disso, a AP visa identificar as razões para a variabilidade da produção, tomar decisões de gerenciamento da produção e avaliar a eficiência de um tratamento na cultura [1]. Com relação aos fertilizantes, por exemplo, tem-se como objetivo diminuir a quantidade de fertilizante utilizada para uma quantidade produzida ou aumentar a quantidade produzida com a mesma quantidade de fertilizante [29].

A maioria das fazendas no Brasil, atualmente, utilizam informações de estações meteorológicas para obter dados do ambiente, como temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento, radiação solar e molhamento foliar. Por outro lado, vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos [3, 4, 30] na área de RSSFs para o monitoramento agrícola a fim de estudar melhor a variabilidade espacial e temporal dos componentes da agricultura. Pretende-se, com as RSSFs, obter mais informação da plantação levando em consideração que os sensores estão inseridos no ambiente de estudo, diferentemente das estações meteorológicas ou qualquer outra técnica de sensoriamento remoto [31]. Além disso, os dados históricos podem não ser suficientes [29] já que pode haver mudanças climáticas abruptas e técnicas de sensoriamento podem monitorar as condições de crescimento da plantação ao longo do tempo com maior precisão.

Os nós sensores são espalhados na área de plantio e capturam dados do solo e do

ambiente, utilizando as funcionalidades das RSSFs, como a colaboração entre os nós, fusão e agregação de dados, e utilizam os protocolos de forma a maximizar o tempo de vida da rede e aumentar o alcance de transmissão com múltiplos saltos.

As tecnologias da AP podem ser agrupadas em cinco categorias: computadores, *global position system* (GPS), *geographic information systems* (GIS), sensores e aplicação de controle. Com a integração dessas tecnologias, o tempo, a posição e variabilidade podem ser documentados com relação a todos os procedimentos da fazenda.

3.1 – Tecnologias da Agricultura de Precisão

A Agricultura de Precisão requer a aquisição, gerenciamento e análise de grandes quantidades de dados espaciais e temporais. Um conjunto de tecnologias são necessárias para manter a fertilidade do solo, economizar água e detectar pragas nas plantações e animais. Para atingir esses objetivos, várias ferramentas da Tecnologia da Informação (TI) devem ser utilizadas para aquisição, armazenamento e comunicação da informação [32].

Um fato que deve ser levado em consideração é que o uso de tecnologias da informação em ambientes agrícolas gera mais custos para os produtores [29]. O possível ganho com as tecnologias pode ser pequeno se as operações na fazenda vêm sendo desenvolvidas próximas da capacidade ótima sem as tecnologias. No entanto, pode haver ganhos em novas opções de gerenciamento da fazenda e redução do impacto ambiental das atividade agrícolas.

Uma das categorias de componentes utilizados na AP são os sistemas de informação geográficos (GIS), coleções de equipamentos de *hardware*, *software* e dados geográficos que são projetados para capturar, armazenar, atualizar, manipular, analisar, e apresentar, de forma eficiente, todas as formas de informação referenciadas geograficamente [33]. Uma característica que diferencia a tecnologia GIS de outras ferramentas é a capacidade de realizar operações espaciais sobre os dados coletados.

Informação sobre o posicionamento é essencial para AP para a avaliação de variáveis espaciais. No início dos anos 90, o GPS conhecido como NAVSTAR (*NAVigation System with Time And Ranging*) se tornou disponível para uso civil [28]. Os sistemas de posicionamento global são baseados em vários satélites que permitem determinar a latitude e a longitude de um determinado ponto na terra. Sistemas mais robustos, como DGPS (*Differential GPS*) fornecem maior precisão a partir da transmissão de uma correção diferencial, ou seja, a diferença entre a posição atual e a posição predita pelo receptor GPS. No entanto, esse sistema é mais caro já que são necessárias estações na terra para calcular o coeficiente de ajuste. Outra variação do GPS é o Kinematic GPS. Essa tecnologia determina a posição desejada a partir da medição diferença de fase do sinal da portadora entre transmissão e recepção, que fornece precisão na escala de centímetros.

Com os sensores integrados com GIS, GPS e sistemas computacionais, os dados de saída dos sensores podem ser mapeados em pequena escala. Além do sensoriamento feito

localmente, técnicas de sensoriamento [31] remoto são utilizados. O sensoriamento remoto começou a ser utilizado a partir de 1960 para monitoramento da biomassa e sensoriamento da umidade do solo e da plantação. Com a evolução dos sensores, atualmente, é possível obter informações detalhadas do espectro refletido das plantas. A tecnologia LIDAR (*Light Radar*) é utilizada para gerar mapas de alta resolução e opera com sensores multi-espectrais [32]. O radar também é capaz de estimular a fluorescência das plantas para monitorar sua saúde, além de monitorar a poluição do ar por meio de medidas espectrofotométricas. Algumas técnicas de sensoriamento com balões ou veículos aéreos não tripulados (VANTS) são utilizadas para coletar dados de imagem e multi-espectrais das plantações e do solo.

Algumas tecnologias de sensoriamento local são consideradas promissoras para extrair informação das plantações [27] como, por exemplo, sensores de refletância das plantas para o monitoramento do estado fisiológico das plantas, sensores ópticos para medição da fluorescência das folhas na determinação de áreas que estão sendo atacadas por doenças, sensores de pH para determinar o tratamento da água, e o sensoriamento da condutividade do solo para descobrir o tipo do solo e determinar a umidade. Além desses, radiômetros de infravermelho são utilizados para monitorar o estresse de água em plantas, ressonância magnética (MRI - *Magnetic Resonance Imaging*) para detectar defeitos internos em frutas e RFID (*Radio Frequency Identification*) para identificação de animais [32].

3.2 – RSSF e Agricultura

A necessidade de coletar informações do solo e do ambiente em grandes áreas distribuídas indicam as RSSFs como solução de baixo custo e com facilidade de implantação se comparadas com as redes tradicionais cabeadas [2, 3]. As condições do solo e do ambiente afetam diretamente a tomada de decisão levando em consideração as atividades que devem ser realizadas em toda a plantação.

Alguns trabalhos com RSSFs aplicadas à AP foram desenvolvidos. O sistema proposto em [4] foi desenvolvido para ambientes agrícolas de larga escala utilizando nós sensores estáticos com dois objetivos: coletar informações de animais recém nascidos e para medição da umidade do solo. Os nós de medição de umidade do solo utilizam sensores baseados em capacitância que medem a quantidade de água no solo. Esses sensores geralmente não necessitam de calibração e o erro relativo é de 2%. A rede automaticamente faz leitura, tipicamente em intervalos de um minuto, de cada nó. Os dados são agregados na base para gerar um perfil de umidade atualizado para o pasto inteiro (Figura 3.1).

Em [30], foram desenvolvidos o *software* e o *hardware* para implantação de uma RSSF no estado de Washington. Foram desenvolvidas duas redes, uma para medição de temperatura regional e outra para o monitoramento de congelamento de plantações. Na rede regional, um nó mestre é configurado com múltiplos repetidores para formar um *backbone*. Na rede para monitoramento de plantações, a topologia estrela é utilizada. Os maiores problemas encontrados foram

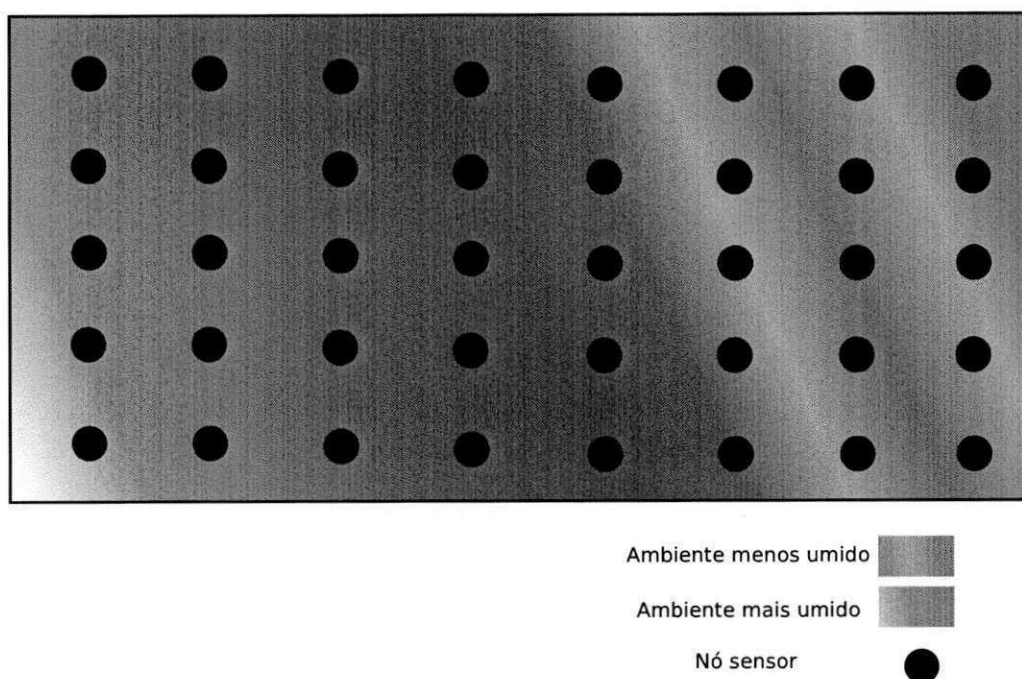


Figura 3.1 – Esboço do perfil de umidade de um pasto [Adaptado de [4]].

relacionados com o gerenciamento de energia, como a danificação nos *switches* de transmissão-recepção durante tempestades. O *software* possui funcionalidades de verificação do estado da rede, visualização da temperatura de determinado nó e dos gráficos de temperatura, intensidade de sinal de rádio, mapa das estações, entre outras. Segundo o autor do artigo [30], o sistema foi colocado disponível no mercado e vários fazendeiros adquiriram com interesses nas próximas versões.

O projeto Lofar Agro [34] vem sendo desenvolvido para monitorar micro-climas no campo de plantação. O objetivo do monitoramento é combater a *phytophthora* na plantação de batatas. O autor comenta que a umidade é um fator importante no desenvolvimento de doenças. Uma rede de sensores monitora, além da umidade, a temperatura e se as folhas estão ou não molhadas, que são os principais fatores de aparecimento da *phytophthora*. A rede funciona com uma estação meteorológica que mede luminosidade, pressão do ar, precipitação, força e direção do vento.

Estudos foram feitos em uma plantação de milho [9] para avaliar as características de propagação com nós IRIS da Crossbow Inc. Foi analisada a influência da altura da antena, diferentes direções dentro da área de plantação, duas condições do tempo, dia ensolarado e dia chuvoso, e potência transmitida. Todos os fatores foram avaliados para o pior caso: plantação com altura máxima, maior largura dos caules, e folhas longas e densas. Foi possível identificar condições para aumentar a área de cobertura dos nós sensores, para o caso de plantações de milho.

Uma RSSF foi implementada [35] para estimar a quantidade de água na plantação com base na atenuação observada no sinal. Os nós são implantados com o objetivo de coletar a intensidade do sinal. A partir do valor médio da potência medida nos nós sensores, a quantidade

de água é estimada com base no modelo de propagação proposto pelo autor. A vantagem desse método é que não são necessários sensores para obter os dados.

Alguns trabalhos utilizam ZigBee, como apresentado em [36, 37, 38]. Em [36] é apresentado um sistema de controle de irrigação de plantações, para utilizar água da melhor forma. No trabalho, é desenvolvido o *hardware* do sistema. No trabalho em [37], é proposto um *framework* para monitorar umidade, temperatura e iluminação para controle de água em áreas agrícolas. Uma RSSF foi desenvolvida [38] empregando duas modificações na topologia Grid para melhorar o desempenho da rede.

3.3 – RSSF e Viticultura

A uva é uma das frutas mais cultivadas no Brasil e no mundo. A partir da década de 1960, o cultivo da uva é realizado em diversas regiões do país, somando uma produção anual entre 1.300.000 e 1.400.000 toneladas. Os estados que mais se destacam por sua produção são Rio Grande do Sul, São Paulo, Pernambuco, Paraná, Bahia, Santa Catarina e Minas Gerais [39].

A cultura da uva é dividida em zonas de produção, que podem ser divididas em regiões de clima temperado, subtropical e tropical. A viticultura de clima temperado possui um ciclo anual, seguido por um período de dormência no inverno devido às baixas temperaturas. É a viticultura tradicional da região sul e em regiões de altitude do sudeste do Brasil. A viticultura subtropical é praticada no norte do Paraná e no leste de São Paulo e se caracteriza por ter um período de dormência em junho e julho, possuir invernos amenos e curtos, mas sujeito a geadas. Os principais pólos de viticultura tropical no Brasil são o Vale do São Francisco, o noroeste Paulista e o norte de Minas Gerais. Nessas regiões, não há período de dormência e com o uso de tecnologias apropriadas é possível obter duas ou mais colheitas por ano [39].

Entre os fatores meteorológicos que influenciam o aparecimento de doenças em plantações de uva, pode-se citar a temperatura do ar, a umidade do ar, o índice pluviométrico e o vento. A temperatura do ar determina a velocidade das reações metabólicas das plantas e pragas. A umidade do ar e o índice pluviométrico influenciam na penetração de fungos nas plantas. O vento é responsável pelo transporte de doenças para outras plantações [40].

Além de influenciar o aparecimento e disseminação de doenças, os fatores climáticos também influenciam a qualidade e produtividade das videiras. A radiação solar, por exemplo, influencia na quantidade de açúcares nas uvas. A forma como os parreirais são montados também influencia na quantidade de açúcares já que o espaçamento entre os troncos determina a quantidade de radiação solar nos folhas [41].

Com base nos fatores climáticos que influenciam na produção de uva, os principais tipos de sensores para o monitoramento desse tipo de plantação são: temperatura do ar, pluviométrico, molhamento foliar, radiação solar, velocidade e direção do vento e umidade do ar e do solo. A Figura 3.2 apresenta um sensor de umidade do solo da marca Watermark modelo 200SS, fabricado pela Irrrometer Company, Riverside, Califórnia.

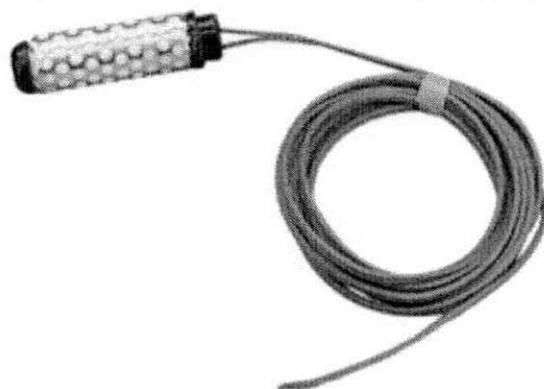


Figura 3.2 – Sensor de umidade do solo Watermark, modelo 200SS.

O trabalho em [42] consiste em projetar, desenvolver e implantar uma RSSF em larga escala na produção de uva. O sistema permite rastrear, com base na temperatura, frutas que devem ser colhidas e que estão estragando pela diminuição da temperatura. Em [43], é apresentado um estudo sobre a estrutura de plantações de uva para implantação posterior de uma RSSF. Em [44], é apresentada uma avaliação de uma RSSF aplicada para medições de umidade do solo. O principal fator que afeta a instabilidade da rede foi identificada. Foi possível concluir que, em períodos de chuva, os raios causam falhas temporárias em alguns nós, fazendo com que os nós fiquem inativos. A arquitetura, o *hardware*, e a plataforma de programação são desenvolvidos para implantação no cultivo de uva em [45]. Os nós foram desenvolvidos para operar utilizando a topologia *mesh* com o padrão ZigBee. Além disso, os dispositivos são capazes de coletar energia solar para prolongar o tempo de vida da rede e possuem encapsulamento a prova d'água. A Figura 3.3 ilustra os componentes de uma RSSF em uma plantação de uvas propostos em [46] e que são divididos em três camadas.

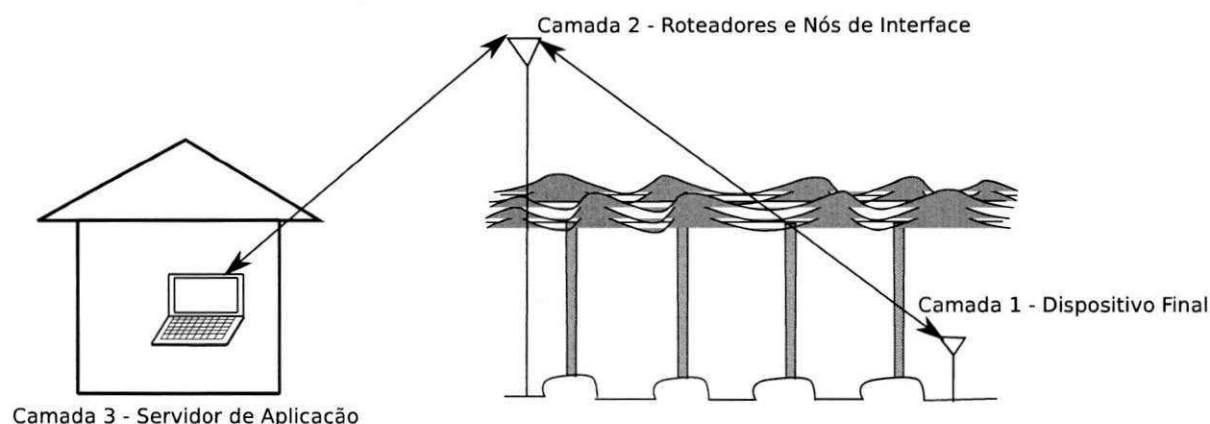


Figura 3.3 – Diagrama que ilustra o esquema de camadas de uma RSSF aplicada à viticultura proposto por [46].

O desenvolvimento e implantação de uma RSSF aplicada à viticultura foi realizado em [47]. A rede foi desenvolvida e a análise do seu desempenho feita para a medição de temperatura.

Os nós IRIS da Crossbow Inc. suportam quatro sensores e possuem circuito de alimentação a partir de um painel solar. Observou-se que as baterias alcalinas não funcionam bem com recarga, havendo vazamento. Em [48] é apresentado o projeto e o resultado de experimentos com uma RSSF para o monitoramento de períodos de seca em plantações de uva. O sistema coleta dados de temperatura, umidade e quantidade de água do solo e os transmite à estação base. O alcance dos nós chega a 150 m. A taxa de perda de pacote é reduzida à medida que a distância diminui. Uma solução foi implementada para o monitoramento de pragas e estudo da fisiologia também de plantações de uva [49]. Vários nós enviam os dados da plantação a intervalos de 15 minutos a um nó mestre que é conectado a um *gateway* GPRS. O *gateway* transmite os dados a um servidor remoto utilizando o protocolo TCP/IP. Isso permite que os usuários visualizem os dados em qualquer lugar do mundo com um *notebook* ou com um celular.

3.4 – Conclusões

Com o aumento da população mundial, a diminuição dos recursos naturais e a degradação do meio ambiente causada pelas práticas agrícolas, a AP é apresentada com solução para melhorar a gerencia dos recursos naturais, aumentar a produção e desenvolver a agricultura de maneira sustentável.

Várias tecnologias estão disponíveis para gerenciar a produção agrícola, analisar as propriedades do solo, estudar a variabilidade ao longo do tempo e a genética das plantas, detectar o aparecimento de doenças e pragas, e melhorar a qualidade das frutas e vegetais. As estações meteorológicas vêm sendo amplamente utilizadas para obter dados do ambiente e a utilização de computadores. Por outro lado, as tecnologias GPS, GIS, sensores e aplicações são pesquisadas para obter outras formas de gerenciamento e maior entendimento da variabilidade de todos os aspectos das práticas agrícolas.

As RSSFs são apresentadas, na literatura, como solução de baixo custo e de fácil implantação. Alguns trabalhos vem sendo desenvolvidos para ambientes agrícolas, como no monitoramento de animais e da umidade do solo, medição de temperatura e monitoração de congelamento das plantações, para combate de pragas, entre outras aplicações. Alguns desses trabalhos utilizam a tecnologia ZigBee como padrão.

A viticultura é uma das principais atividades agrícolas do Brasil. No entanto, pouco estudo tem sido feito com relação a aplicação de RSSFs para melhorar o gerenciamento das práticas agrícolas em parreirais, no Brasil e no mundo. O Vale do São Francisco é uma das regiões agrícolas do país que mais contribuem para o PIB nacional e que ainda não possui aplicações para melhorar o gerenciamento dos recursos. Dessa forma, as RSSFs podem contribuir para aumentar a produção e otimizar o uso de recursos naturais.

Modelos de Propagação

Sistemas de comunicações sofrem de várias formas de degradação no sinal transmitido. Em sistemas sem fio, o sinal é atenuado no trajeto entre o transmissor e receptor em função das características do ambiente em que a onda eletromagnética se propaga. Essas características incluem as deformações do terreno, os obstáculos entre as antenas e a densidade da vegetação. Além disso, diversos mecanismos de propagação influenciam na propagação do sinal, tais como, reflexão, espalhamento, refração e difração [50].

Os ambientes de propagação são classificados em: urbano, suburbano, ambientes no interior de edifícios (*indoor*) e rural. O modelo de ambiente urbano caracteriza cidades grandes com altos edifícios. O ambiente suburbano consiste em uma zona residencial com edifícios mais baixos. Ambientes *indoor* são ambientes no interior de edifícios, sendo caracterizados por muita reflexão, multipercurso e absorção. O ambiente rural, que é objeto de estudo desse trabalho, possui baixa densidade demográfica e presença de vegetação [13, 14].

Antes da implantação de um sistema de comunicações, é importante conhecer a perda de percurso causada pela dissipação da potência radiada pelo transmissor como também os efeitos do canal de comunicação. As perdas de percurso ocorrem, principalmente, devido à perda de potência entre o transmissor e o receptor em uma comunicação via rádio. Alguns fatores que influenciam a perda de percurso são a altura das antenas, a altura e volume dos obstáculos, a potência de transmissão, a densidade da vegetação e a ocorrência de visada direta. Os sinais podem sofrer também com fenômenos de natureza aleatória, principalmente causados pelo multipercurso. Ocorrem ainda mudanças rápidas na intensidade do sinal ao longo de pequenos deslocamentos ou em pequenos intervalos de tempo, variação da frequência devido ao efeito Doppler e a dispersão no tempo causada pelos atrasos dos sinais que chegam ao receptor seguindo diferentes percursos [51, 13, 14, 52].

O desvanecimento pode ser dividido em duas categorias: desvanecimento em larga escala e em pequena escala. O desvanecimento em larga escala é estudado a partir da variação da posição dos nós transmissor e receptor na ordem de centenas de comprimentos de onda do sinal. Por outro lado, o desvanecimento em pequena escala é a variação no sinal observada devido ao múltiplos percursos produzidos por reflexões, difração e espalhamento, e pela velocidade do terminal móvel (efeito Doppler) [52].

Um modelo mais simples utilizado para sistemas com desvanecimento é apresentado

na Figura 4.1, em que $\alpha(t)$ é um processo aleatório que caracteriza o desvanecimento como um efeito multiplicativo em relação ao sinal transmitido. A Figura 4.2 apresenta um esboço do comportamento do sinal com desvanecimento em larga escala e pequena escala somados [53]. O sinal recebido pode ser expressado por

$$r(t) = \alpha(t) * s(t) + n(t), \quad (4.1)$$

em que $r(t)$ é o sinal recebido, $s(t)$ é o sinal gerado pelo transmissor e $n(t)$ é o ruído aditivo gaussiano branco (AWGN). Na Figura 4.2, a linha tracejada representa a componente de desvanecimento em larga escala.

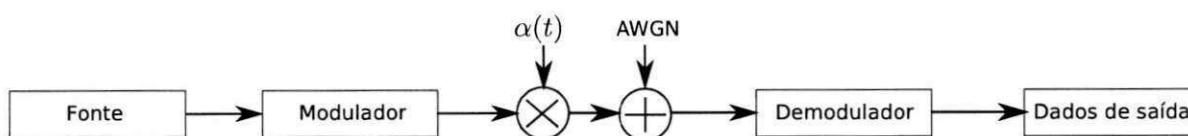


Figura 4.1 – Modelo simplificado de canal com desvanecimento.

Há duas formas de modelar o desvanecimento [54]: modelagem teórica, baseada em conhecimento *a priori*, e a modelagem empírica, feita a partir de medições realizadas no ambiente de interesse. Na modelagem teórica, as perdas são contabilizadas a partir da análise das características físicas do ambiente, levando em consideração os conceitos de eletromagnetismo. Na modelagem empírica, são obtidas equações de ajuste com base apenas nas medições. Exemplos de modelos *a priori* são o modelo de Friis [55] e o modelo de Terra Plana [56, 57]. Exemplos de modelos obtidos a partir de medições são o modelo de Oliveira [58] e o modelo de Weissberger [59].

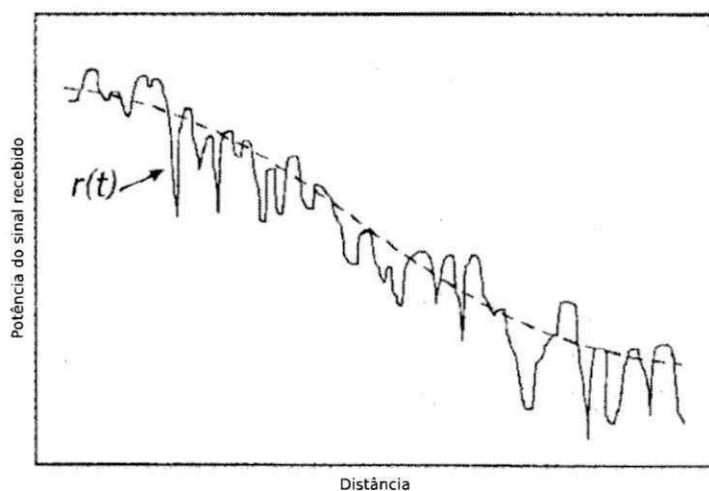


Figura 4.2 – Esboço do comportamento do sinal com desvanecimento em larga escala e pequena escala somados [Adaptado de [53]].

Nas próximas seções são discutidos os conceitos mais importantes para analisar a propagação em plantações de uva, no Vale do São Francisco. Na Seção 4.1, são discutidas as

características da modelagem de propagação e os modelos de propagação necessários para interpretação das medições são apresentados na Seção 4.2. Na Seção 4.3, são apresentadas as conclusões do capítulo.

4.1 – Modelagem de Propagação

Os sistemas de comunicações necessitam de planejamento adequado para reduzir os custos de implantação e operação, visto que os diversos dispositivos presentes na rede compartilham o espectro de radiofrequência e necessitam de potência suficiente para estabelecer uma comunicação com qualidade satisfatória. Para planejar um sistema de comunicações vários fatores devem ser levados em consideração, como o multipercurso, interferência cocanal e o posicionamento ótimo das antenas [14, 13].

Uma das etapas do planejamento é a aplicação de metodologias para predição de cobertura. Para isso, modelos de propagação são utilizados para prever a distribuição do campo eletromagnético irradiado na região de operação do sistema sem fio. Para caracterizar e analisar a propagação em sistemas sem fio, existem formas de modelar o canal de comunicações em termos do desvanecimento em larga escala.

O cálculo de enlace [50, 13] é utilizado para obter a intensidade do sinal percebida no receptor contabilizando todas as perdas no caminho entre o transmissor e o receptor. A potência recebida, contabilizando todas as perdas e ganhos, é dada por

$$P_r = P_t + G_t - L_p + G_r, \quad (4.2)$$

em que P_r é a potência recebida em dBm, P_t é a potência do transmissor em dBm, G_t é o ganho da antena transmissora em dB, L_p é a perda total de percurso e G_r é o ganho da antena receptora em dB. A perda por percurso inclui a perda de espaço livre, perdas devido à presença de obstáculos, irregularidades do terreno, múltiplos percursos do sinal transmitido, entre outros fatores que dependem da frequência e do ambiente. Um cálculo de enlace detalhado fornece a potência recebida a partir da soma da potência transmitida em dBm com todos os ganhos e perdas em dB.

Dessa forma, para estimar a região de cobertura de um nó sensor, pode-se escolher um modelo de predição que leve em consideração a potência mínima, ou sensibilidade do dispositivo, identificada por S . Quando a potência recebida é igual à sensibilidade, ou seja, $P_r = S$, a distância é igual ao raio da região de cobertura, se o meio for isotrópico.

Há diversos modelos empíricos e teóricos para aplicações em ambientes rurais e urbanos. As Subseções 4.1.1 e 4.1.2 apresentam as características desses tipos de modelos. A Subseções 4.1.3 apresenta o fenômeno de reflexão; a Subseções 4.1.4 apresenta o fenômeno de espalhamento; o fenômeno de difração é discutido na Subseções 4.1.5; as Zonas de Fresnel são apresentadas na Subseções 4.1.6.

4.1.1 – Modelagem Empírica

Os modelos de propagação empíricos são amplamente utilizados em ambientes que apresentam características que seguem alguns padrões, utilizados pelo projetista para modelar a perda de percurso. São estabelecidos alguns parâmetros que são ajustados de modo que o modelo apresente resultados satisfatórios para o cenário e tenha baixo custo computacional [60].

Os modelos são obtidos a partir de medições feitas no ambiente ou por meio de simulação com base em modelos determinísticos. Os valores obtidos com os experimentos são utilizados para construir o modelo. Algumas técnicas são utilizadas para realizar o ajuste de curvas, como, por exemplo, o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) e o Método do Menor Valor Absoluto Residual (*Least Absolute Residual (LAR) Method*) [61]. Nesta dissertação, o último método mencionado é chamada ao longo do texto de Método LAR.

Método dos Mínimos Quadrados

O MMQ é um método que busca os coeficientes que minimizam a soma dos quadrados dos erros de predição, ou seja, a diferença entre o valor medido e o valor previsto pelo modelo de regressão. Considere o modelo de regressão linear [61]

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^{p-1} \beta_j \cdot X_{ji} + \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.3)$$

Em que Y_i é a variável dependente, X_{ji} , $j = 1, \dots, p - 1$ são as variáveis independentes, β_j , $j = 1, \dots, p - 1$ são os parâmetros a serem estimados e ϵ_i são os erros; p é o número de parâmetros a serem estimados e n é o número de pontos considerados para se obter o modelo de regressão.

A estimação dos parâmetros consiste em minimizar a soma dos quadrados dos erros:

$$\min[f(\beta_0, \dots, \beta_{p-1})], \quad (4.4)$$

em que

$$f(\beta_0, \dots, \beta_{p-1}) = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left(Y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^{p-1} \beta_j \cdot X_{ji} \right)^2. \quad (4.5)$$

Para encontrar a estimativa dos parâmetros, igualam-se a zero as derivadas parciais com relação

a cada parâmetro, de maneira a obter um erro mínimo, ou seja,

$$\frac{\partial(\beta_0, \dots, \beta_{p-1})}{\partial \beta_0} = 0, \quad (4.6)$$

$$\vdots \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial(\beta_0, \dots, \beta_{p-1})}{\partial \beta_1} = 0, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial(\beta_0, \dots, \beta_{p-1})}{\partial \beta_{p-1}} = 0 \quad (4.9)$$

Resolvendo para o caso em que $p = 2$, vem que

$$\hat{\beta}_0 = \bar{Y} - \hat{\beta}_1 \cdot \bar{X} \text{ (coeficiente linear),} \quad (4.10)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \text{ (coeficiente angular),} \quad (4.11)$$

em que

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4.12)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}. \quad (4.13)$$

Para regressão não-linear utiliza-se um artifício para linearizar a expressão. Por exemplo, em uma regressão exponencial, a expressão é na forma

$$Y = ae^{bX}. \quad (4.14)$$

Aplicando o logaritmo neperiano, obtém-se

$$\ln Y = \ln a + bX, \quad (4.15)$$

que representa uma equação da reta, também conhecida como equação afim. Os coeficientes linear e angular são a e b , respectivamente.

Método LAR

O método LAR é uma alternativa ao MMQ. Em vez de minimizar a soma dos quadrados dos desvios, o método minimiza a soma dos módulos dos desvios. A vantagem do método é que ele é mais robusto quando a amostra possui valores atípicos (*outliers*) [61].

Para o caso unidimensional, o método consiste em estimar o parâmetro β_0 em

$$y_i = \beta_0 + \epsilon_i, \quad (4.16)$$

de forma que a soma dos erros em valor absoluto é minimizado

$$\min_{\beta_0} \sum_{i=1}^n |\epsilon_i| = \min_{\beta_0} \sum_{i=1}^n |y_i - \beta_0|. \quad (4.17)$$

O valor de β_0 que minimiza a soma é a mediana da amostra, o que justifica a diminuição da contribuição dos *outliers*. Na regressão linear,

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i \quad (4.18)$$

os parâmetros β_0 e β_1 são calculados utilizando programação linear [62] para minimizar

$$\sum_{i=1}^n |y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i|. \quad (4.19)$$

4.1.2 – Modelagem Teórica

Os modelos de predição teóricos se baseiam direta ou indiretamente nas Equações de Maxwell, que descrevem a propagação de ondas eletromagnéticas. Para determinar a perda de percurso, são usados métodos numéricos ou assintóticos [60].

Para usar esse tipo de modelo, é necessário conhecimento detalhado do ambiente, as dimensões dos obstáculos e os parâmetros constitutivos. Os modelos obtidos são geralmente complexos, tornando-os, em alguns casos, desvantajosos, considerando que o objetivo, no projeto de um sistema de comunicações, é determinar a área de cobertura de um terminal transmissor de maneira rápida e eficiente. Por outro lado, os modelos empíricos possuem algumas desvantagens [60]:

- só podem ser utilizados para a faixa de valores dos parâmetros obtidos a partir do conjunto original das medidas;
- os ambientes são classificados de acordo com critérios subjetivos, como, por exemplo, urbano, que possui significados diferentes em países diferentes; e
- não oferecem explicação física dos mecanismos de propagação presentes em cada caso.

Dessa forma, alguns fenômenos de propagação são importantes na análise das características físicas do ambiente, como reflexão, espalhamento e difração. Esses fenômenos são apresentados nas Subseções 4.1.3, 4.1.4 e 4.1.5. O conceito das Zonas de Fresnel, apresentado na Subseção 4.1.6, é importante para a análise teórica.

4.1.3 – Reflexão

Quando uma onda eletromagnética incide sobre uma superfície, uma parte da energia é refletida ou espalhada e a outra parte é absorvida. Da energia que incide sobre a superfície, a

parte absorvida se deve à condutividade do segundo meio e o restante é refratado [50].

Para determinar as parcelas de energia, deve-se levar em consideração as propriedades elétricas do meio, a polarização da onda, a frequência e o ângulo de incidência sobre a superfície de separação. No caso da reflexão, a superfície de separação deve ter dimensões muito maiores do que o comprimento de onda.

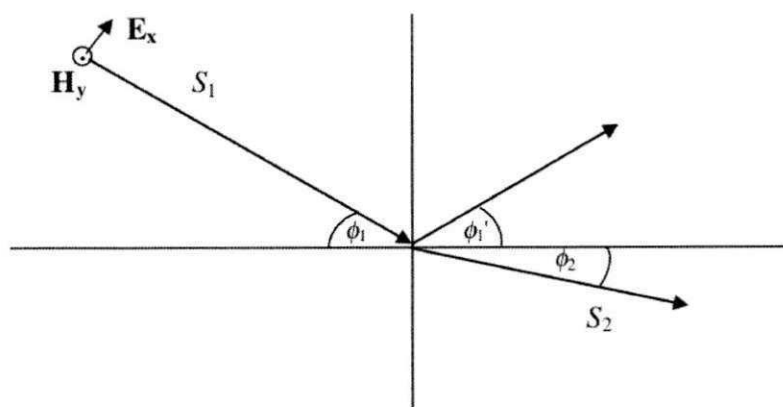


Figura 4.3 – Diagrama de uma onda eletromagnética incidente em um material [50].

A Figura 4.3 apresenta o diagrama de uma onda eletromagnética incidente em uma superfície de separação. O componente de campo elétrico de S_1 é designado pela seta pequena, e o campo magnético é perpendicular à página, e é representado pelo círculo com um ponto no centro. O vetor de campo elétrico pode apontar para qualquer direção perpendicular ao vetor de propagação.

Quando a onda incide sobre a superfície de separação dos meios, os vetores de Poynting, nomeado em homenagem ao seu descobridor John Henry Poynting, das novas ondas estão contidos no plano que contém o vetor da onda incidente e o vetor normal à superfície. Esse plano é chamado de plano de espalhamento (*scattering plane*). A onda que forma o ângulo ϕ_1' com a fronteira é chamada de onda refletida. A onda que forma o ângulo ϕ_2 é chamada de onda transmitida, resultante do mecanismo de refração [60].

As amplitudes das ondas transmitida e refletida são obtidas em função dos coeficientes de transmissão e reflexão de Fresnel. Os coeficientes são diferentes, dependendo da polarização da onda. Os coeficientes de reflexão e transmissão dependem da impedância do meio e dos

ângulos, e são dados por [60]

$$R_{\parallel} = \frac{E_{r\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{Z_1 \cos(\pi/2 - \phi_1) - Z_2 \cos(\pi/2 - \phi_2)}{Z_2 \cos(\pi/2 - \phi_2) + Z_1 \cos(\pi/2 - \phi_1)} \quad (4.20)$$

$$R_{\perp} = \frac{E_{r\perp}}{E_{i\perp}} = \frac{Z_2 \cos(\pi/2 - \phi_1) - Z_1 \cos(\pi/2 - \phi_2)}{Z_2 \cos(\pi/2 - \phi_1) + Z_1 \cos(\pi/2 - \phi_2)} \quad (4.21)$$

$$T_{\parallel} = \frac{E_{t\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{2Z_2 \cos(\pi/2 - \phi_1)}{Z_2 \cos(\pi/2 - \phi_2) + Z_1 \cos(\pi/2 - \phi_1)} \quad (4.22)$$

$$T_{\perp} = \frac{E_{t\perp}}{E_{i\perp}} = \frac{2Z_2 \cos(\pi/2 - \phi_1)}{Z_2 \cos(\pi/2 - \phi_1) + Z_1 \cos(\pi/2 - \phi_2)}, \quad (4.23)$$

em que R e T são os coeficientes de reflexão e transmissão, respectivamente, para polarização paralela \parallel e perpendicular \perp ; e Z_1 e Z_2 são as impedâncias dos meios.

4.1.4 – Espalhamento

O espalhamento é um fenômeno de propagação que ocorre quando o meio onde a energia se propaga possui obstáculos com dimensões de ordem igual ou inferior ao comprimento de onda [63]. Exemplos deste fenômeno são o espalhamento pela vegetação, por fios da rede elétrica, e pela chuva. Quando a onda é espalhada, ocorrem reflexões em diferentes direções [50] causadas por pequenas partículas e obstáculos com diferentes propriedades dielétricas [64].

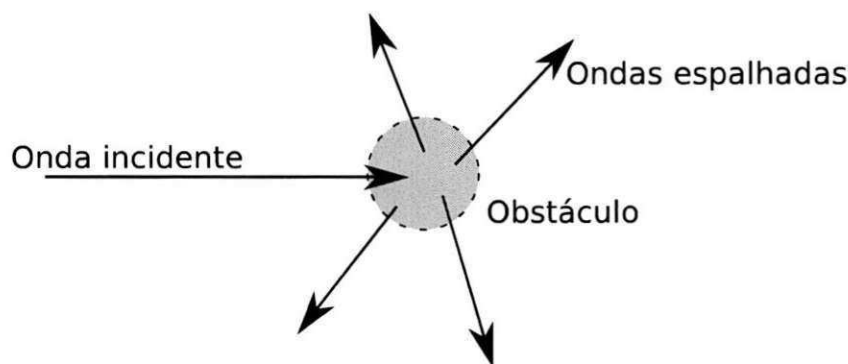


Figura 4.4 – Diagrama de uma onda eletromagnética incidente sobre um obstáculo com dimensões de ordem igual ou inferior ao comprimento de onda.

O espalhamento causado por uma superfície rugosa, por exemplo, depende do ângulo de incidência e da rugosidade da superfície. Se a superfície não possui rugosidade alguma, ou seja, é totalmente lisa, a onda refletida possui apenas uma diferença de fase com relação à onda incidente. Se existe uma diferença de altura entre dois pontos da superfície, as ondas refletidas possuem uma diferença de fase de [60]

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta h \cos\theta_i}{\lambda}. \quad (4.24)$$

Um critério adotado para considerar uma superfície lisa ou rugosa, é o critério de Ray-

leigh [60]

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i} \quad (4.25)$$

Quando a superfície é rugosa, a redução da amplitude da componente principal pode ser calculada utilizando um fator que depende do ângulo de incidência e no desvio padrão da altura de superfície. Uma fórmula desse fator é [60]

$$f(\sigma_s) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{4\pi\sigma_s \cos \theta}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (4.26)$$

Outra abordagem considera que N ondas planas chegam no receptor. A n -ésima onda possui amplitude C_n , fase ϕ_n , e ângulos de chegada α_n e β_n . Os parâmetros C_n , ϕ_n , α_n e β_n são aleatórios. Supõe-se que os ângulos de fase ϕ_n possuem distribuição uniforme. As funções de densidade de probabilidade de α_n e β_n variam. No receptor, o campo elétrico resultante é dado por [65]

$$E(t) = \sum_{n=1}^N E_n(t); \quad (4.27)$$

$E(t)$ é um processo estocástico e $E_n(t)$ é a n -ésima onda que chega ao receptor, que também é um processo estocástico. A Figura 4.5 apresenta o modelo geométrico utilizado em que o receptor está localizado na origem e o vetor $E_n(t)$ é a n -ésima onda que chega ao receptor.

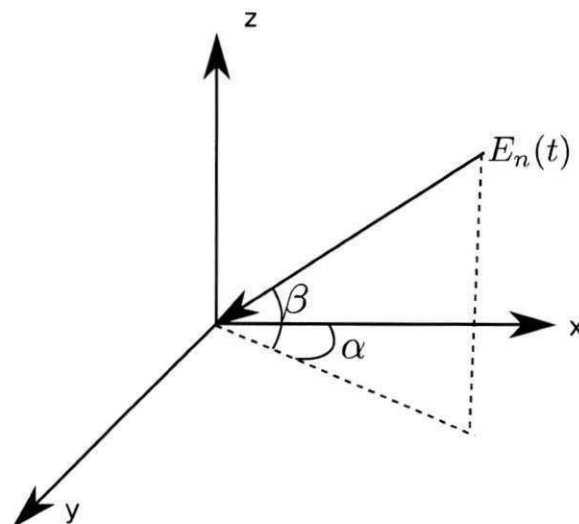


Figura 4.5 – Modelo geométrico utilizado na abordagem estocástica.

4.1.5 – Difração

A difração é um mecanismo importante para propagação de rádio quando não há visada direta. Sinais de rádio podem ser transmitidos por regiões com montanhas, prédios e árvores. A difração é o fenômeno que faz com que a energia contorne obstáculos, como visto na Figura 4.6, fazendo com que haja energia na região na qual não há visibilidade. Ocorre o espalhamento da onda no momento do contato com os obstáculos, de forma que parte da energia eletromagnética alcança o receptor na região sombreada [50, 64].

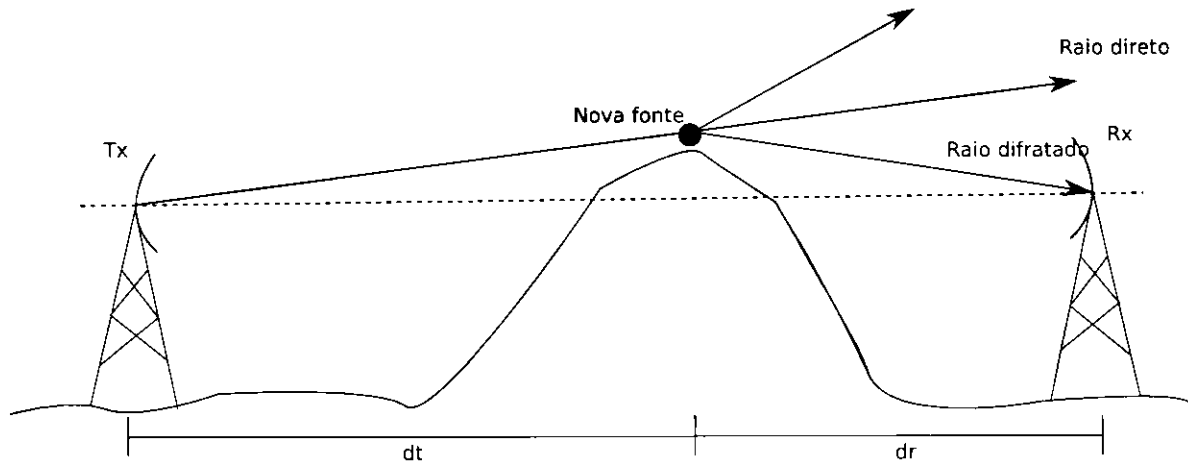


Figura 4.6 – Diagrama que ilustra o fenômeno de difração.

A intensidade do campo difratado sempre apresenta um valor inferior ao obtido em espaço livre [23]. A teoria de difração é baseada no Princípio de Huygens que afirma que "cada ponto em uma frente de onda primária é considerada uma nova fonte de uma onda esférica secundária" [64].

Uma geometria básica é o difrator gume de faca (*knife-edge diffractor*). O efeito da onda plana incidente em um obstáculo perpendicular é dividido em três regiões, como apresentado na Figura 4.7. A região I contém os raios direto e refletidos. A região II contém apenas os raios direto e difratados, e a região III contém apenas os raios difratados [66].

O campo elétrico é dado pela integral de difração [50]

$$E_d = F(\nu) = E_0 \frac{1+j}{2} \int_{\nu}^{\infty} e^{((-j\pi t^2)/2)} dt \quad (4.28)$$

em que E_0 é o campo elétrico no receptor baseado na perda por espaço livre; ν é o parâmetro de difração de Fresnel-Kirchhoff, que é dado por [50]

$$\nu = R \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}. \quad (4.29)$$

O valor de R é a menor distância do ponto de difração à linha de visada entre o transmissor o

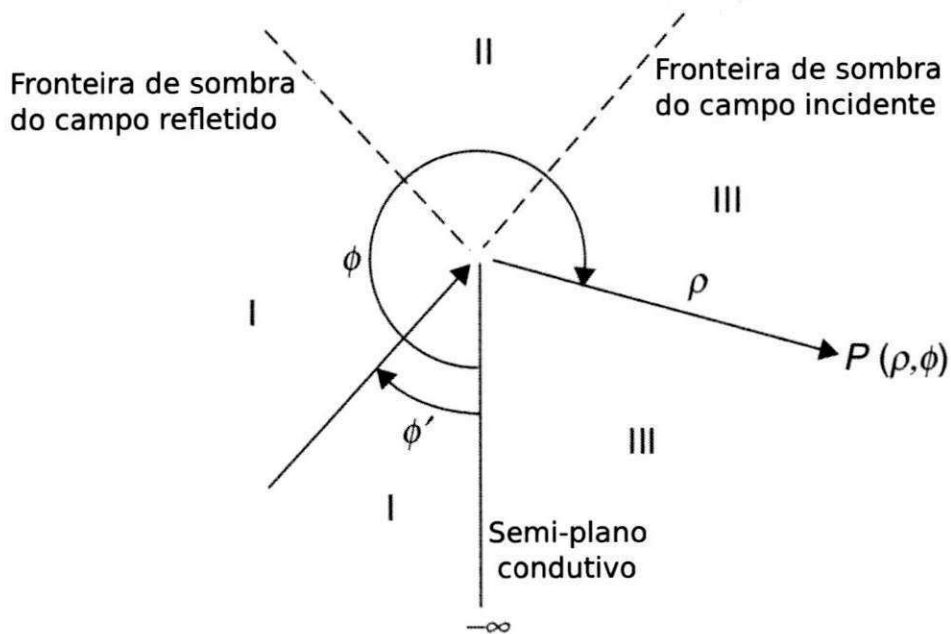


Figura 4.7 – Diagrama de fronteiras de sombra em difração causada por semi-plano condutivo infinito [Adaptado de [66]].

receptor (ver Figura 4.11 da Seção 4.1.6).

O modelo de gume de faca é considerado muito simples para as aplicações reais, em que diferentes geometrias aparecem. Dessa forma, o obstáculo difrator pode ser considerado um cilindro e a perda por difração pode ser calculada a partir das perdas por gume de faca para altura h equivalente e a perda pela superfície curva.

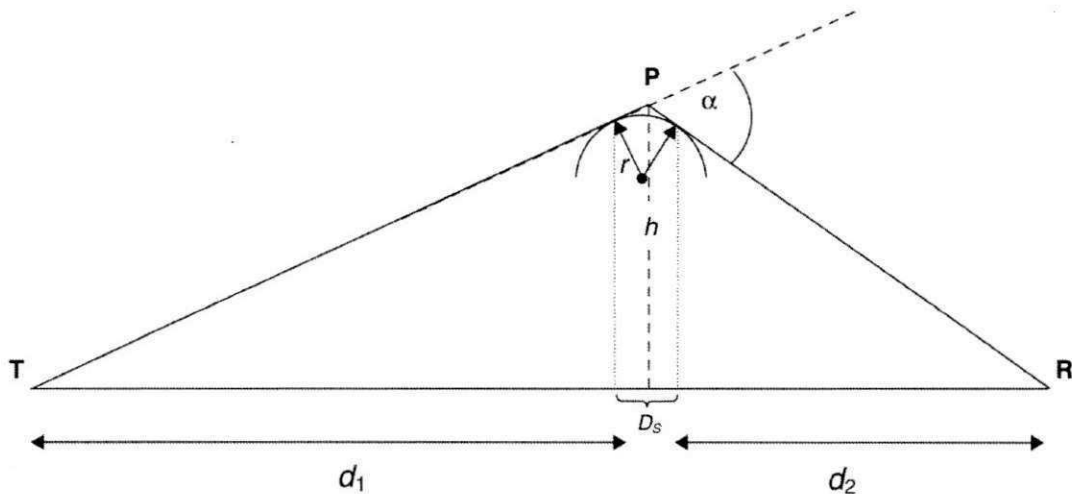


Figura 4.8 – Diagrama da geometria considerada para difração por superfície cilíndrica [65].

Com base no raio da superfície r , o valor de α e o comprimento de onda λ , é possível

calcular o excesso de perda por difração sobre uma superfície curva a partir de [65]

$$L_{ex} = -11,7\alpha\sqrt{\frac{\pi r}{\lambda}} \text{ dB.} \quad (4.30)$$

O valor de α é obtido com [65]

$$\alpha = \nu \left[\frac{\lambda(d_1 + d_2)}{2d_1d_2} \right]. \quad (4.31)$$

Múltiplas Difrações por Gume de Faca

A generalização da difração por único obstáculo gume de faca é a difração causada por múltiplos obstáculos deste tipo. Uma solução analítica foi obtida [67], que permite estimar a atenuação por difração de até 10 obstáculos.

O modelo utilizado por Deygout [68] é apresentado na Figura 4.9. Primeiramente, calcula-se o parâmetro ν para cada obstáculos separadamente, ou seja, para os caminhos T-01-R, T-02-R e T-03-R. O obstáculo com maior valor de ν é chamado de obstáculo principal e o cálculo é feito considerando a difração por apenas um gume de faca. Em seguida, as atenuações causadas por 01 e 03 são calculadas com relação à linha que liga o gume do obstáculo principal a T e a R. Esse método é compatível com a abordagem de Vogler [67], mas quando há muitos obstáculos ou quando estão muito próximos, o método superestima a perda [65].

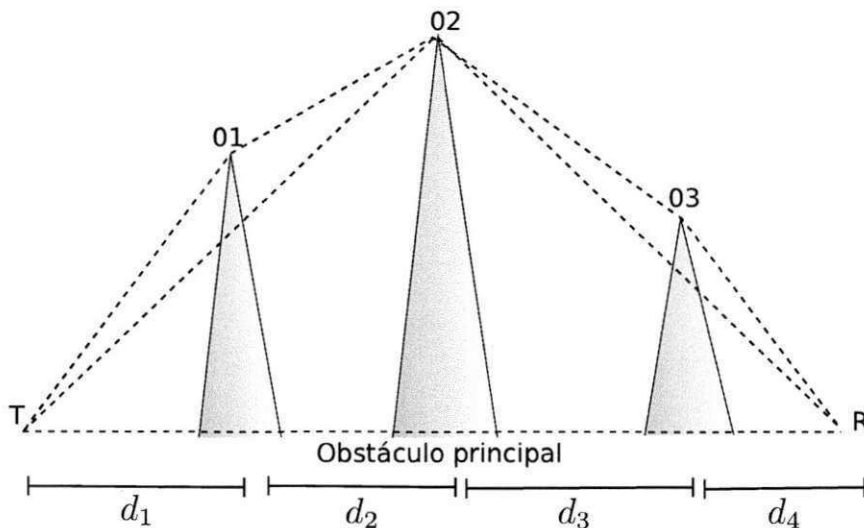


Figura 4.9 – Diagrama do modelo de difração proposto por Deygout [68].

Uma alternativa foi proposta por Giovaneli [69] para situações com muitos obstáculos. A geometria proposta é apresentada na Figura 4.10. Um plano passando pelo terminal R é considerado (RR'). A fonte é localizada em T e supõe-se que 01 é o obstáculo principal. Um raio a partir de T chega ao plano RR' após a difração com um ângulo α_1 . Para obter o parâmetro ν

para esse gume a altura h'_1 é calculada por

$$h'_1 = h_1 - \frac{d_1 H_1}{d_1 + d_2 + d_3}. \quad (4.32)$$

A perda causada por 02 é obtida considerando o caminho 01-02-R com um ângulo de difração α_2 e altura efetiva h_2 , dada por

$$h'_2 = h_2 - \frac{d_3 h_1}{d_2 + d_3}. \quad (4.33)$$

As perdas individuais são somadas para obter a perda total. Esse método funciona bem para vários obstáculos e é compatível com os resultados obtidos por Vogler [65].

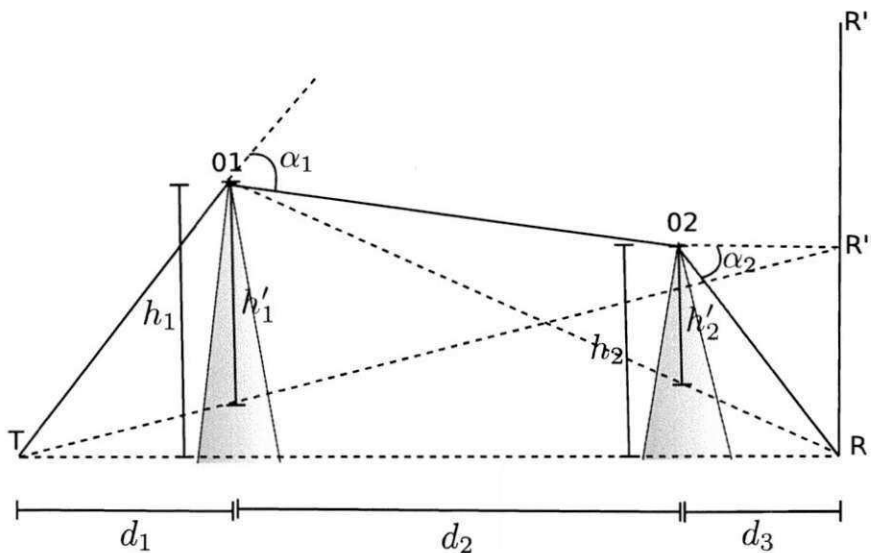


Figura 4.10 – Diagrama do modelo de difração proposto por Giovaneli [69].

4.1.6 – Zonas de Fresnel

As zonas de Fresnel correspondem às regiões limitadas por dois elipsóides de Fresnel consecutivos. Os elipsóides de Fresnel são "lugares geométricos dos pontos cuja soma das distâncias às antenas transmissora e receptora é constante e excede a distância em visada livre de um número inteiro de meios comprimentos de onda" [63].

Os pontos de difração destrutivos podem ser identificados a partir dos raios das zonas [50], em que

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}. \quad (4.34)$$

Os parâmetros da Equação 4.34 são:

- R_n é o raio da n -ésima zona de Fresnel;

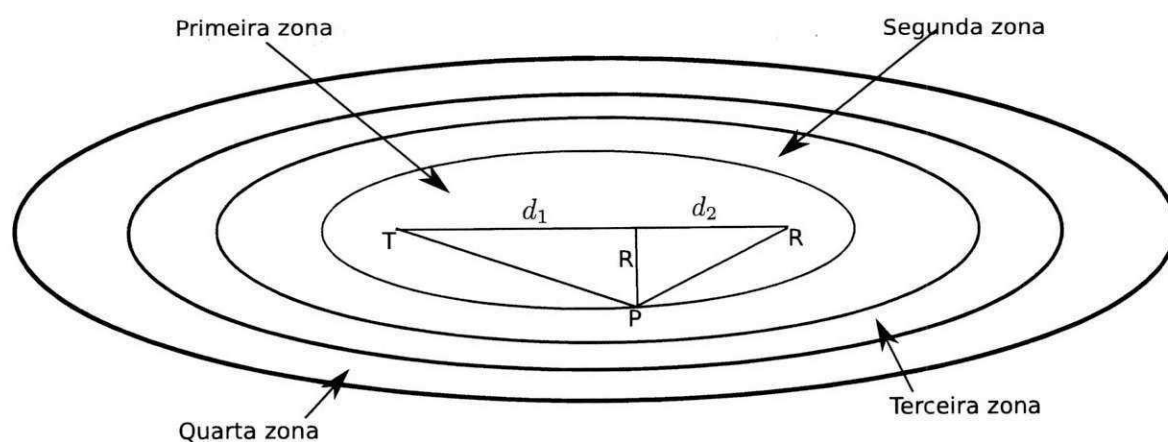


Figura 4.11 – Diagrama das zonas de Fresnel entre os terminais.

- d_1 é a menor distância do transmissor para plano perpendicular à superfície da terra que intercepta o elipsóide;
- d_2 é a menor distância entre o plano perpendicular à superfície da terra que intercepta o elipsóide e o receptor;
- n é o número da zona considerada.

Obstáculos nas zonas ímpares causam interferência destrutiva. Como a diferença entre os tamanhos dos caminhos $d_1 + d_2$ e $(\sqrt{d_1^2 + R_n^2} + \sqrt{d_2^2 + R_n^2})$ é da ordem de λ , o sinal chega no receptor com potência considerável, mas com diferença de fase, o que causa o cancelamento. Dessa forma, é recomendável que não haja obstáculos próximos das zonas ímpares e que a primeira zona esteja completamente livre de obstruções [50].

Um critério adotado para classificar se um objeto deve ser considerado um difrator significativo ou não é a posição do obstáculo dentro da primeira zona de Fresnel em termos de porcentagem. O elipsóide cujo raio é igual a $0,6R$ define duas regiões dentro da primeira zona. Neste ponto, o parâmetro v é aproximadamente $-0,8$ e a perda por obstrução é 0 dB. Caso a região sombreada na Figura 4.8 seja mantida livre de obstáculos, a atenuação é praticamente a mesma da situação em que não há obstáculos na primeira zona [60].

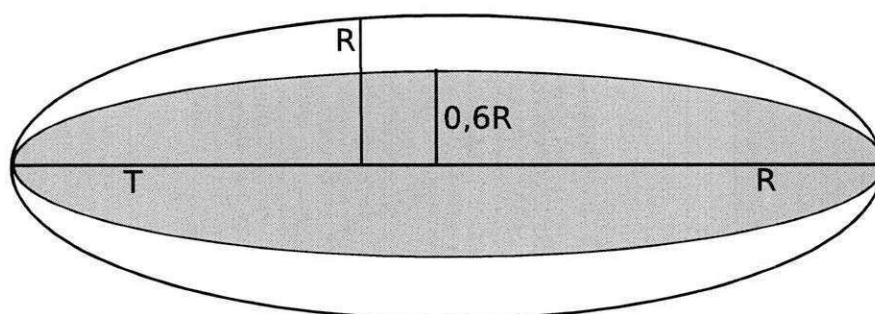


Figura 4.12 – Diagrama da região na primeira zona de Fresnel que deve ser mantida livre de obstáculos.

4.2 – Modelos de Propagação

4.2.1 – Propagação em espaço livre

O modelo de espaço livre a ser considerado foi proposto por Friis [55] para a propagação entre duas antenas isotrópicas quando não há obstáculos entre os terminais. Este tipo de comunicação ocorre, por exemplo, entre satélites ou qualquer comunicação via rádio estabelecida no espaço.

Friis levou em consideração que, para uma distância r de um ponto de referência, a energia total na superfície de uma esfera imaginária de raio r é a própria energia total radiada pela antena. Logo, a densidade superficial de potência é dada por

$$\mathcal{P}_s = \frac{G_t P_t}{4\pi r^2} \text{ [W/m}^2\text{]}, \quad (4.35)$$

em que G_t é o ganho da antena transmissora e P_t é a potência radiada. A abertura efetiva da antena receptora pode ser calculada por

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \text{ [m}^2\text{]}, \quad (4.36)$$

em que G_r é o ganho da antena receptora e λ é o comprimento de onda. Dessa forma, a potência recebida por uma antena receptora é dada por

$$P_r = \mathcal{P}_s \cdot A_e \text{ [W]}. \quad (4.37)$$

Partindo dessa formulação, para antenas isotrópicas ideais, a equação de Friis é dada por

$$P_r = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{16\pi^2 d^2 L} \right). \quad (4.38)$$

Os parâmetros da Equação 4.38 são:

- G_t e G_r são os ganhos do transmissor e do receptor respectivamente (em dBi);
- P_t é a potência do transmissor (em dBm);
- λ é o comprimento de onda da frequência de operação (metros);
- d é a distância entre o receptor e o transmissor (metros);
- L é o fator de perdas do sistema.

Aplicando o logaritmo, para converter as unidades para dBm, obtém-se a potência rece-

bida em função da distância e da frequência da portadora

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20 \log(\lambda) - 10 \log(16\pi^2) - 20 \log(d) - 10 \log(L). \quad (4.39)$$

Para ambientes em que não há linha de visada, utiliza-se uma extensão do modelo de Friis com um expoente α para a distância. Dessa forma, a potência recebida é dada por

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20 \log(\lambda) - 10 \log(16\pi^2) - 10\alpha \log(d) - 10 \log(L). \quad (4.40)$$

4.2.2 – Propagação sobre terra plana

O modelo de Terra Plana [56, 57], também conhecido como modelo de Lee, considera um raio direto e outro refletido no solo (Figura 4.13), e que não há obstáculos entre o transmissor e o receptor. A potência recebida é dada por

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \right), \quad (4.41)$$

em que h_t e h_r são as alturas do transmissor e do receptor respectivamente.

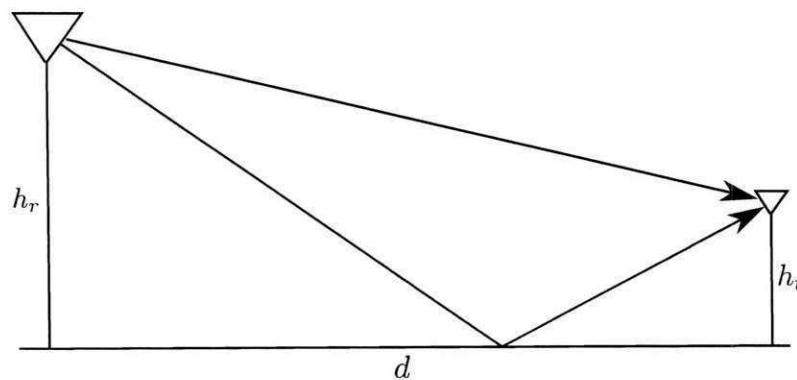


Figura 4.13 – Diagrama do modelo de terra plana.

A distância a partir da qual se deve considerar o raio refletido é obtida com a fórmula

$$d_c = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda}. \quad (4.42)$$

Até este ponto a propagação se dá em espaço livre, caso não haja obstáculos entre os transceptores, porque a folga do percurso é superior a $0,6R$, em que R é o raio da primeira zona de Fresnel. Do ponto de reflexão em diante o modelo de terra plana é adequado tendo em vista que parte da energia é refletida.

4.2.3 – Propagação entre duas placas paralelas

Os guias de ondas estão presentes em diversas aplicações e em diversas formas diferentes. Ambientes de propagação urbanos, suburbanos e *indoor* podem ser modelados dessa maneira se os objetos tiverem geometria semelhante a um guia e possuírem condutividade considerável. Uma das formas é o guia de placas paralelas mostrado na Figura 4.14. Os guias de placas paralelas são formados por duas placas metálicas na parte superior e inferior. No meio há um dielétrico de permissividade ϵ .

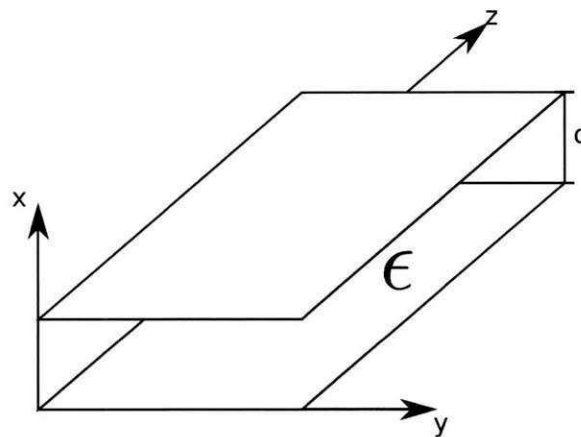


Figura 4.14 – Diagrama de um guia de ondas formado por duas placas paralelas.

A onda eletromagnética se propaga dentro do guia na direção z . Na análise feita, é considerada uma onda eletromagnética transversal (TEM), em que os campos elétrico e magnético são perpendiculares e não há nenhuma componente de campo elétrico ou magnético na direção da propagação. A Figura 4.15 ilustra esse comportamento, em que os campos elétrico e magnético formam uma onda plana TEM que se propaga pelo guia.

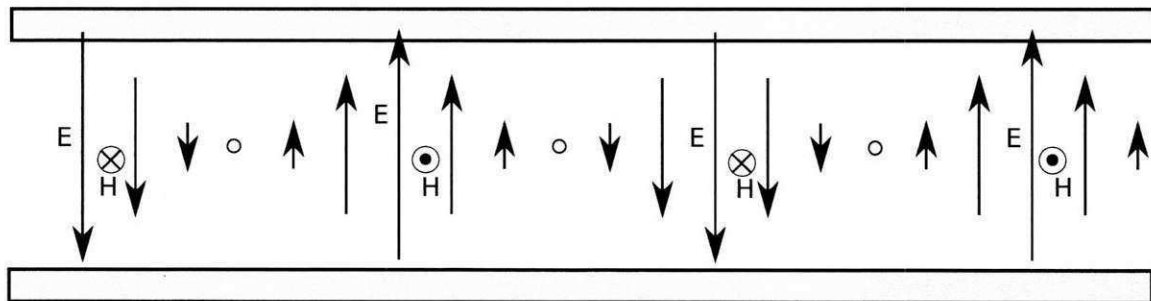


Figura 4.15 – Diagrama que ilustra a propagação de uma onda TEM em uma guia de onda.

Nesta seção, é feita uma análise simplificada de como o sinal eletromagnético é atenuado entre duas placas paralelas, por meio de uma comparação com as equações de onda no regime permanente no espaço livre. Partindo das equações de Maxwell é possível obter as expressões para o campo elétrico e magnético no regime permanente, para o espaço livre, considerando uma solução cosseno simples em que o campo elétrico não varia em função de x ou

de y [70],

$$E_x(z, t) = E_{x0} \cos(\omega t - k_0 z) \text{ e} \quad (4.43)$$

$$H_y(z, t) = E_{x0} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos(\omega t - k_0 z). \quad (4.44)$$

Em que E_{x0} é o valor de E_x em $z = 0$ e $t = 0$, ω é a frequência angular, t é o tempo e k_0 é o número de onda no espaço livre dado por $\omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$. Os parâmetros ϵ_0 e μ_0 são a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética no vácuo, respectivamente. A impedância intrínseca do espaço livre é dada por $\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$.

Na propagação entre placas paralelas, considerando que os planos são perfeitamente condutores e um dielétrico perfeito, os campos \vec{E} e \vec{H} são dados por [70]

$$E_x(z, t) = E_{x0} \cos(\omega t - k_0 z) \text{ e} \quad (4.45)$$

$$H_y(z, t) = \frac{E_{x0}}{\eta} \cos(\omega t - k_0 z). \quad (4.46)$$

Em que $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ é a impedância intrínseca do meio, ϵ é permissividade e μ é a permeabilidade do meio.

Como apresentado na Seção 4.2.1, em espaço livre, a potência decai com o quadrado da distância. Comparando as equações 4.43 e 4.45, percebe-se que possuem a mesma forma exceto pelo fato de que, no caso das placas, a permissividade e permeabilidade são do meio. Dependendo da impedância intrínseca do dielétrico, o decaimento da potência se dará como no espaço livre, ou seja, com d^2 .

4.2.4 – Modelo Log-distância

O modelo de log-distância tem o parâmetro de atenuação n obtido de maneira empírica. Ele é utilizado para ambientes com sombreamento e a potência recebida é dada por [71]

$$P_r = P(d_0) - 10n \log(d/d_0) + X \text{ (dB)}. \quad (4.47)$$

Em que $P(d_0)$ é potência medida a uma distância de referência, geralmente tomada a 1 metro, n é o expoente de perda com a distância e $X \sim N(\mu, \sigma)$; μ é a média, geralmente, considerada zero e σ é o desvio-padrão da distribuição.

4.2.5 – Propagação em ambientes com vegetação

Ambientes com vegetação influenciam a propagação do sinal devido à presença das folhas, troncos e galhos, que são responsáveis pelo espalhamento, difração e absorção da radiação. Esses mecanismos combinados resultam no excesso de atenuação. O excesso de atenuação é definido como a atenuação causada apenas pela vegetação, sem levar em consideração

os outros mecanismos [72].

Existem alguns modelos empíricos de predição de perdas em diferentes tipos de plantação e com diferentes frequências. O modelo de decaimento exponencial de Weissberger [59] é utilizado quando o caminho entre o transmissor e o receptor possui vegetação densa composta por árvores com pouca umidade, encontradas em climas temperados. A perda pela vegetação é dada por

$$L(\text{dB}) = \begin{cases} 1,33f^{0,284}d^{0,588}, & 14 \text{ m} < d \leq 400 \text{ m}, \\ 0,45f^{0,284}d, & 0 \text{ m} \leq d < 14 \text{ m} \end{cases} \quad (4.48)$$

em que f é a frequência em GHz e d é a distância em metros percorrida dentro da vegetação. A faixa de frequências dentro da qual o modelo é válido é de 230 MHz a 95 GHz.

A recomendação da ITU-R [72] foi desenvolvida a partir de medições feitas principalmente na faixa UHF. A distância entre o transmissor e o receptor deve ser menor que 400 m, de forma que o sinal se propaga, principalmente, por dentro da vegetação, sem a formação da onda lateral. A perda por vegetação é dada por

$$L(\text{dB}) = 0,2f^{0,3}d^{0,6}, \quad (4.49)$$

em que f é a frequência (entre 200 MHz e 95 GHz) e d é a distância.

De acordo com esses modelos, é possível verificar que a excesso de perda devido à vegetação pode ser representada pela expressão [73, 74]

$$L(\text{dB}) = Af^Bd^C. \quad (4.50)$$

A partir de medições realizadas no ambiente de interesse, os parâmetros são obtidos utilizando um método de ajuste curvas (e.g. MMQ ou LAR).

4.3 – Conclusões

Neste capítulo foram discutidos os fatores que influenciam a perda de propagação, principalmente, os conceitos que são utilizados para justificar as medições realizadas na fazenda Minuano, no município de Vermelhos, em Pernambuco. Fatores determinísticos como altura das antenas, obstáculos e ocorrência de visada direta foram discutidos. Fatores aleatórios como como multipercurso e efeito Doppler foram mencionados, mas não foram discutidos profundamente por não fazerem parte do escopo do trabalho. O próximo capítulo apresenta a análise feita do desvanecimento em larga escala.

Os conceitos de modelagem teórica e empírica foram apresentados, bem como, os modelos utilizados para análise das medições. O modelo empírico é obtido a partir das medições

feitas no local de implantação do sistema de comunicações. O ajuste das curvas pode ser feito com o MMQ ou o método LAR, por exemplo. O método LAR possui vantagem com relação ao MMQ por não ser tão sensível aos valores atípicos. Na modelagem teórica, as equações de Maxwell dão suporte à formulação do modelo, sendo necessário conhecimento detalhado do lugar, o que a torna geralmente complexa para maioria das aplicações, tanto em termos de custo computacional quanto com relação à dificuldade de obtenção das equações.

Modelos de propagação utilizados na interpretação física das medições foram apresentados. Os modelos foram escolhidos com base na divisão dos ambientes discutida no Capítulo 5 que consiste em um corredor do tipo A, um do tipo B, ambiente com sombreamento, chamado de diagonal, e região acima da plantação.

Ambientes de Propagação Estudados

A perda por propagação em plantações depende das características da vegetação [72]. À vista disso, este Capítulo apresenta as principais características da plantação estudada, a metodologia adotada para coletar os dados, bem como a divisão da plantação em ambientes com mecanismos de propagação predominantes diferentes.

5.1 – Características da Plantação

A plantação estudada cobre uma região de, aproximadamente, 10 hectares e sua altura média é 2 metros. Para obter essa estrutura, troncos de madeira e arames são utilizados para sustentar as folhas e uvas, a fim de manter a altura da plantação uniforme. Essa estrutura é chamada de parreiral, conforme pode ser visto na Figura 5.1.



Figura 5.1 – Foto de um parreiral na Fazenda Minuano, na cidade de Vermelhos, em Pernambuco.

Na Figura 5.2 (a) e 5.2 (b) são apresentadas as vistas superior e lateral ao parreiral,

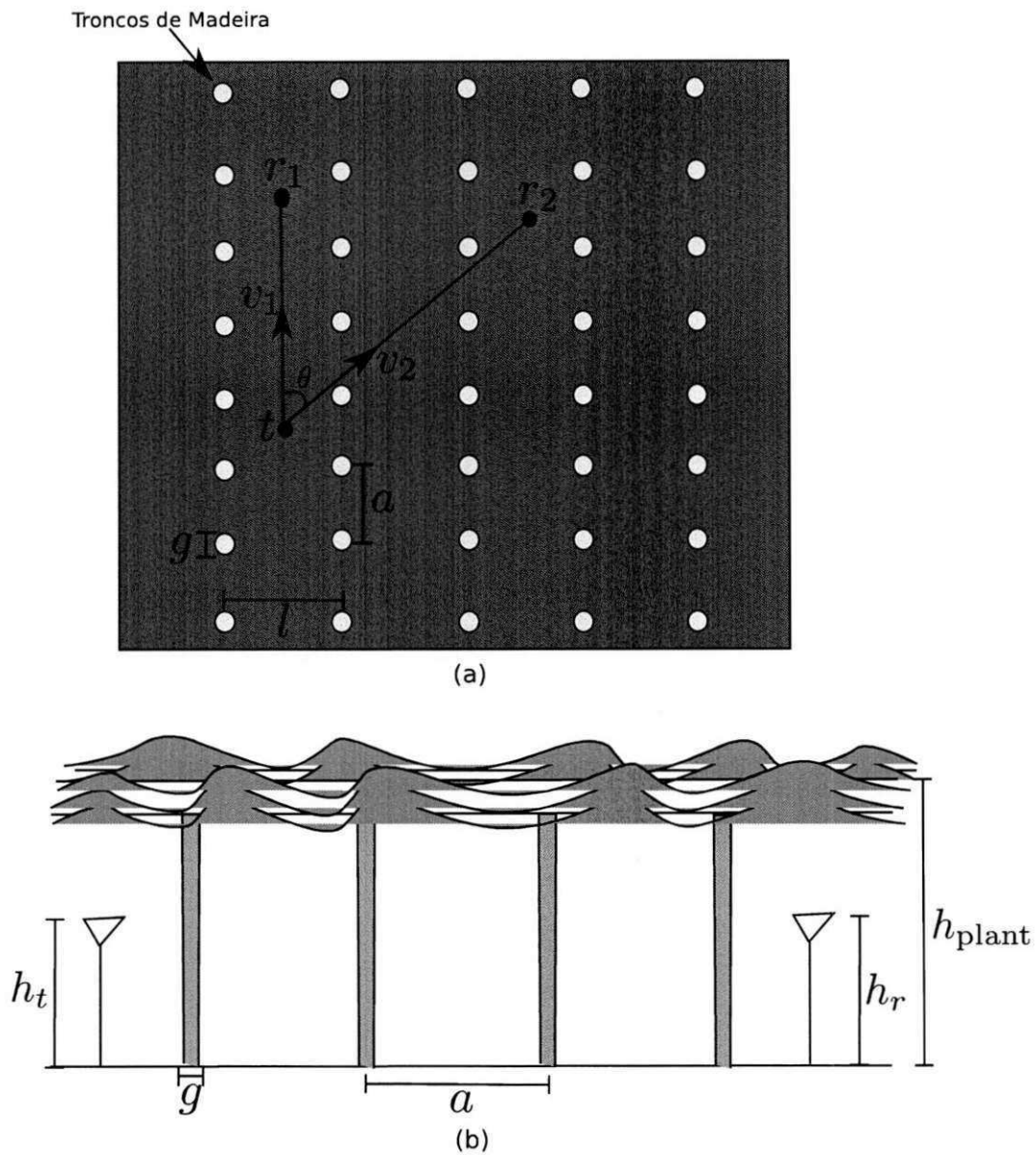


Figura 5.2 – (a) Vista superior de uma plantação de uvas e (b) vista lateral.

respectivamente. A distância média l entre corredores é 3,50 m e a distância média a entre videiras em um mesmo corredor é 3,00 m. Nesta dissertação, o corredor formado entre os troncos com distância l é chamado de corredor do tipo A, ao longo do texto. O corredor com distância entre os troncos a é chamado de corredor do tipo B. Além dessas, outras medidas são importantes para caracterização do ambiente:

- h_{plant} → altura da plantação em relação ao solo;
- g → diâmetro dos troncos de madeira;
- θ → ângulo entre o vetor v_1 e v_2 , como apresentado na Figura 5.2 (a).

O vetor v_1 é um vetor unitário que indica a direção de propagação ao longo do corredor do

tipo A. O vetor v_2 também é unitário e possui uma direção θ no intervalo $[0; 2\pi]$ que indica a propagação em um caminho que não seja o corredor do tipo A.

Os parâmetros h_{plant} , l , a e g são padronizados e variam pouco de uma fazenda para outra. O valor de h_{plant} é por volta de 2 m, os valores típicos de l , a e g são 3,50 m, 3,00 m e 43 cm, respectivamente. Existem, portanto, três graus de liberdade, h_t (altura do transmissor), h_r (altura do receptor) e θ .

Identificou-se cinco configurações de altura e posicionamento dos terminais dentro da plantação que resultam em mecanismos de propagação dominantes diferentes. O primeiro caso é quando os terminais estão abaixo da cobertura vegetal e posicionados no corredor do tipo A. O segundo caso ocorre quando os terminais estão sob a cobertura vegetal posicionados no corredor do tipo B. Quando os terminais estão sob a cobertura e há obstáculos entre o transmissor e o receptor, o terceiro caso se caracteriza. O quarto caso ocorre quando um dos terminais está acima da plantação e o outro abaixo. Finalmente, verifica-se o quinto caso quando os dois terminais estão acima da plantação. Todos os casos, como também os valores de potência medidos são apresentados nas próximas seções.

O corredor do tipo A é caracterizado, principalmente, pelos seguintes aspectos:

- o corredor é formador pelas videiras e estacas que são espaçadas igualmente dos dois lados;
- o corredor é quase totalmente coberto pelas folhas das videiras;
- a vegetação ao longo do corredor possui altura máxima de 40 cm;
- há regiões em que a vegetação é rasteira, por volta de 5 cm de altura;
- o terreno é plano e, no local das medições, não havia uvas nas estrutura do topo da plantação.

Na Figura 5.1, o corredor do tipo A é apresentado.

As diferenças entre o corredor do tipo A e o do tipo B são, de maneira geral, a distância entre as videiras que é em torno de 3 m, uma quantidade maior e de vegetação, já que nas filas das videiras cresce capim até uma altura de 90 cm, aproximadamente, e a existência de elevações do solo ao longo das filas. Além disso, existe uvas em grande parte do caminho entre os nós, como apresentado na Figura 5.4. Há regiões em que a vegetação é rasteira, por volta de 5 cm de altura.

O ambiente na diagonal é similar ao ambiente descrito para o corredor do tipo B, exceto pelos troncos posicionados entre os dois dispositivos. Há uma grande quantidade de vegetação, como observado na Figura 5.5, e existe elevações ao longo das filas. Há uvas em grande parte do caminho entre os nós e regiões em que a vegetação é rasteira, por volta de 5 cm de altura.

A vegetação do topo da plantação cobre praticamente toda a área de plantio e é sustentada por arames e pelos próprios troncos das videiras e por estacas de madeira. A Figura 5.6



(a)



(b)

Figura 5.3 – Fotos da vegetação no corredor do tipo B, na fazenda Minuano localizada no município de Vermeilhos, em Pernambuco.

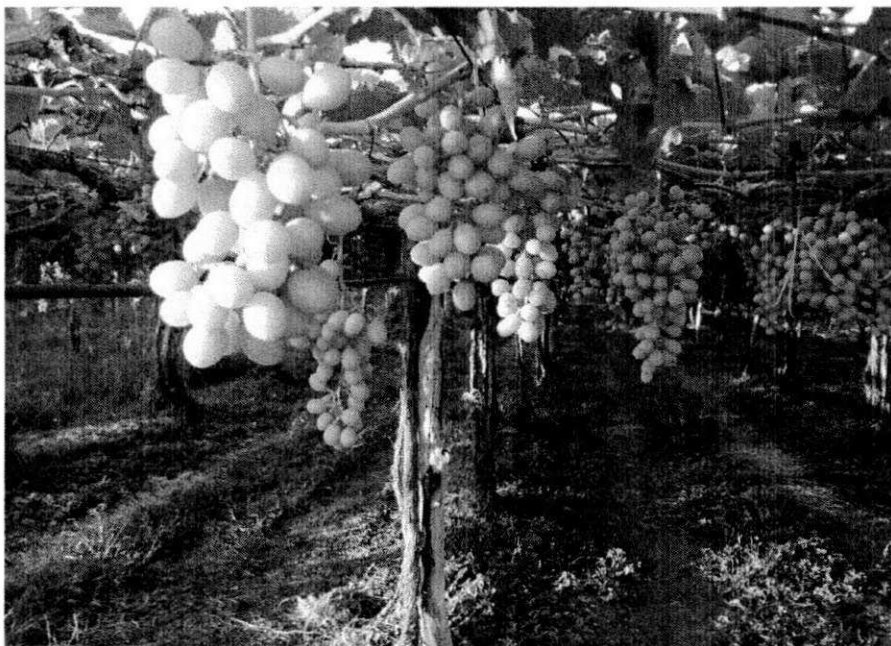


Figura 5.4 – Foto das uvas no caminho de propagação no corredor do tipo B.

apresenta a área onde foram realizadas as medições. Algumas áreas não possuem vegetação, como apresenta a Figura 5.7. As dimensões de uma célula da grade de arames são 0,30 m por 3,50 m.



Figura 5.5 – Foto dos obstáculos no parreiral.

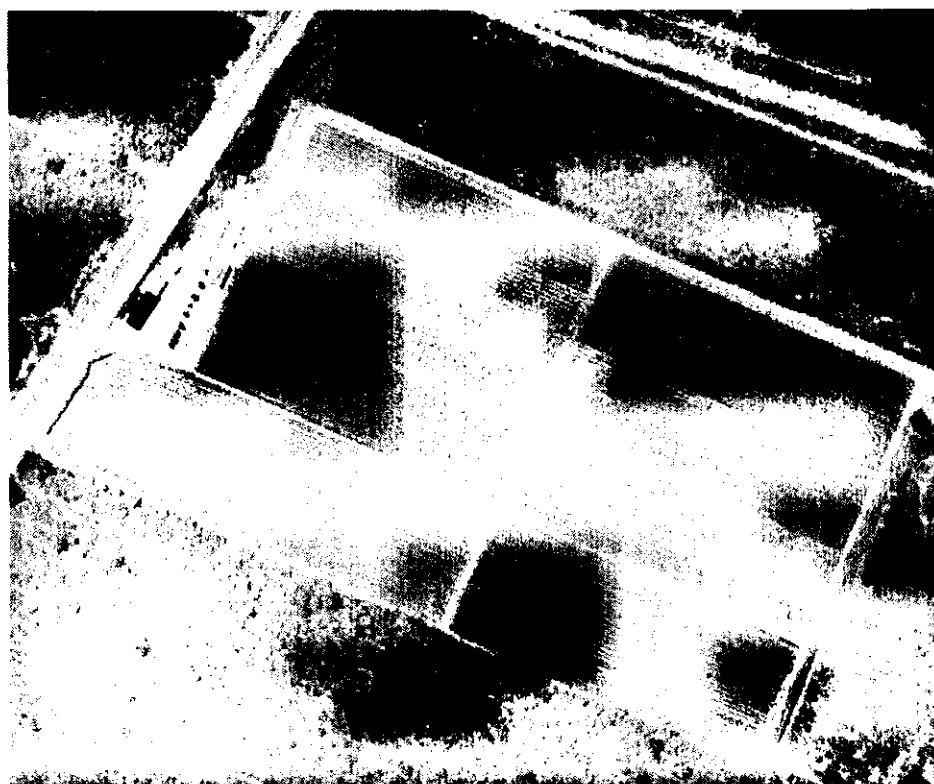


Figura 5.6 – Foto superior da plantação retirada do Google Maps.

5.2 – Metodologia

Primeiramente, experimentos experimento preliminares foram realizados em diferentes fazendas. Os resultados são exibidos no Apêndice A. A partir dos resultados obtidos, foi possível

identificar os ambientes de propagação a serem considerados no estudo.

Os experimentos descritos nesta Seção foram realizados na fazenda Minuano situada no município de Vermelhos a 70 km de Petrolina, localizada no estado de Pernambuco. O clima da região é classificado como tropical semiárido, com pouca chuva ao longo do ano, favorecendo a produção de uvas que é prejudicada pela chuva. Além de ser caracterizado pela escassez e irregularidade das precipitações, as chuvas ocorrem principalmente no verão e forte evaporação em consequência das altas temperaturas.

Um par de nós XBee Pro ZB S2B foi utilizado. Os dispositivos possuem potência de saída +18 dBm, sensibilidade especificada pelo fabricante -102 dBm, e frequência de operação 2,4 GHz. A antena é do tipo dipolo com conector RPSMA (Figura 5.8). Os dispositivos possuem as mesmas especificações exceto pelo fato de que um foi conectado a um *notebook* para que os dados sejam inseridos em uma base de dados. Este terminal é configurado como coordenador.

Um dos terminais foi mantido na mesma posição e o outro terminal (nó coordenador) foi posicionado estrategicamente ao longo da plantação. Em cada ponto, o nó coordenador requisita um pacote RSSI do terminal fixo e os dados são inseridos em uma base de dados. O procedimento utilizado para a medição é descrito a seguir:

- o coordenador (transmissor) é conectado a um *notebook* (com 3 Gbytes de memória RAM e processador de 2,4 GHz);
- dispositivo final (receptor) é posicionado a uma distância de 1 metro;
- o coordenador envia um pacote solicitando ao dispositivo final que calcule o valor do RSSI

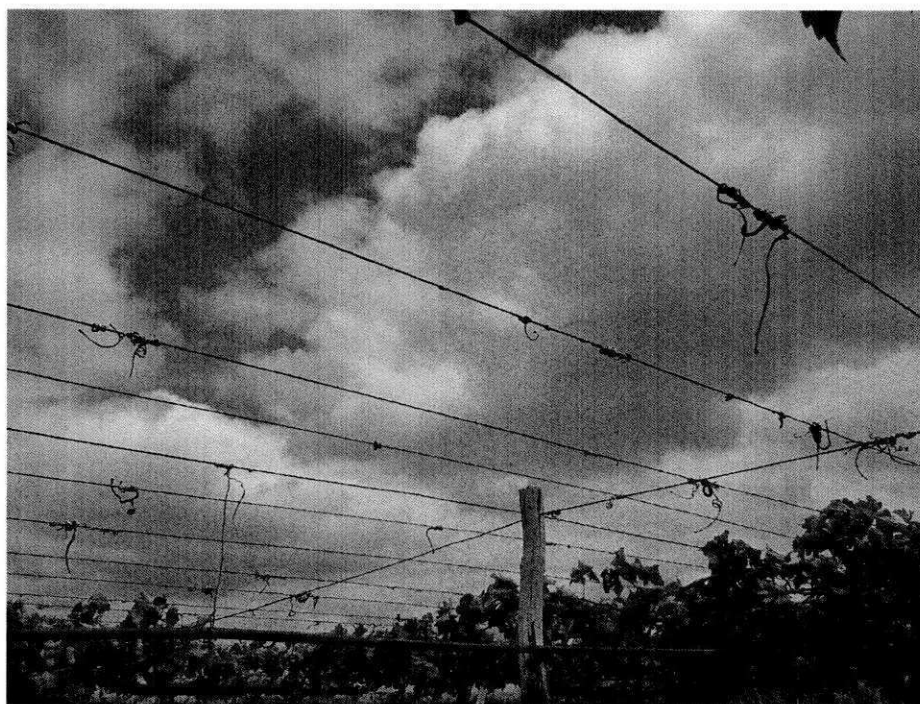


Figura 5.7 – Foto da plantação em regiões sem cobertura da vegetação.

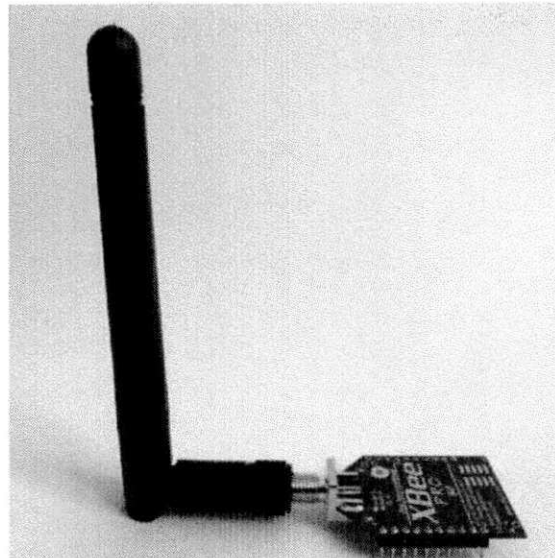


Figura 5.8 – XBee-PRO ZB S2B com conector RPSMA.

(Received Signal Strength Indication)

- o dispositivo final transmite o valor calculado;
- 100 medições de RSSI por posição são realizadas até a posição em que não haja potência suficiente para comunicação ou até que o fim da plantação seja alcançado;
- os dados são analisados utilizando as ferramentas Gnuplot e o Matlab;
- um modelo de propagação é escolhido e ajustado para cada caso.

Para realizar a comunicação do coordenador com o dispositivo final um programa em Java desenvolvido por [75]. A Figura 5.9 apresenta uma tela do programa utilizado. O coordenador foi conectado ao *notebook* por meio da porta serial. O dispositivo final utiliza uma bateria e trabalha de forma autônoma. Na Figura 5.10, são apresentadas duas telas do programa para coleta de dados.

5.3 – Corredor do Tipo A

As medições feitas no corredor tipo A foram realizadas com os nós posicionados no meio do corredor. O transmissor foi instalado com altura de 1 m. O receptor foi instalado, primeiramente, com altura de 20 cm do chão. Cem medições da intensidade do sinal foram feitas a intervalos de 50 metros. O experimento foi repetido com o receptor com altura de 40 cm, 60 cm e 1 m. Os valores de Potência Média (PM, em dBm) coletados e Desvio Padrão (DP) calculados são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente.

Na distância de 400 m, o fim da plantação foi alcançado. No entanto, comparando o valor de potência nessa distância com a sensibilidade especificada pelo fabricante, percebe-se que o



Figura 5.9 – Foto do nó coordenador conectado ao *notebook*.

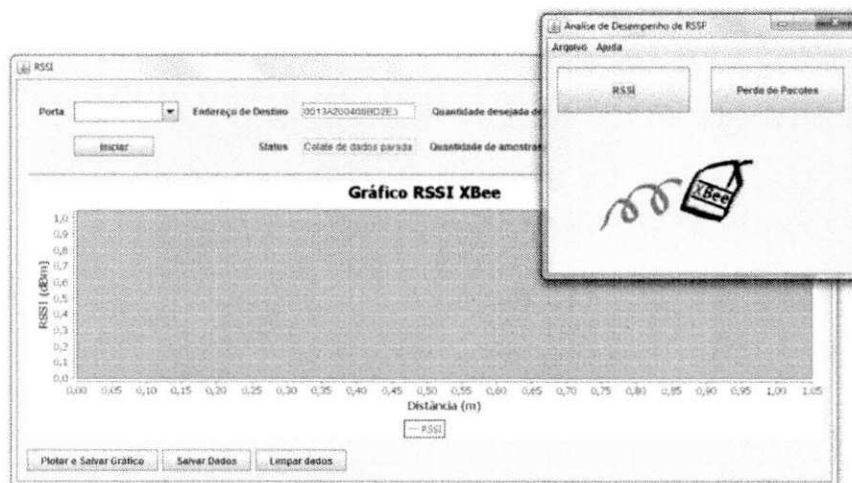


Figura 5.10 – Captura de telas do programa utilizado para coleta de dados.

alcance é maior do que 400 m. Não foi encontrado nenhum corredor do tipo A com comprimento suficiente para realizar as medições até não haver potência suficiente para comunicação.

Comparando os desvios padrão da Tabela 5.2 com a variação percebida nos experimentos preliminares (ver Apêndice A), percebe-se que a variabilidade é menor. A proximidade do operador com relação ao terminal aumenta consideravelmente a variação, sendo observada uma amplitude maior que 10 dB. Nesses experimentos, o operador ficou a uma distância maior que

Tabela 5.1 – Potência média (em dBm) para diferentes alturas do coordenador e distâncias no corredor do tipo A.

Distância (m)	PM (1 m)	PM (0,60 m)	PM (0,40 m)	PM (0,20 m)
1	-38,99	-39,33	-39,78	-40,99
50	-43,31	-51,40	-50,80	-51,34
100	-47,31	-47,06	-48,86	-53,00
150	-49,88	-53,03	-57,17	-60,38
200	-49,98	-55,43	-60,77	-70,80
250	-56,69	-58,18	-63,67	-66,03
300	-55,57	-62,17	-65,86	-70,07
350	-60,47	-66,03	-68,30	-75,50
400	-63,99	-70,96	-73,09	-77,14

Tabela 5.2 – Desvio padrão (em dBm) da potência medida no corredor do tipo A.

d (m)	DP (1 m)	DP (0,60 m)	DP (0,40 m)	DP (0,20 m)
1	0,0997	0,4726	0,4163	0,1000
50	1,7148	0,6964	0,6356	0,4761
100	1,8685	0,6000	0,4499	0,0000
150	1,9194	0,2642	1,0922	0,9187
200	1,9785	0,4976	0,5660	1,8641
250	4,6734	0,4115	0,6825	0,2642
300	1,9033	0,4034	0,7916	0,8319
350	2,1640	0,3881	1,0648	1,1326
400	1,3580	0,2598	0,2876	0,6371

cinco metros.

5.4 – Corredor do Tipo B

As medições foram realizadas com os nós posicionados no meio do corredor. O dispositivo final foi mantido em uma posição fixa com altura de 1 m. O receptor foi instalado com diferentes alturas, assim como no corredor do tipo A, 20 cm, 40 cm, 60 cm e 1 m. Como foi verificado nos experimentos preliminares que o alcance, neste caso, é em torno de 390 m, foram realizadas com medições da intensidade do sinal a intervalos de 25 metros, em vez de 50 m, para observar melhor o comportamento do decaimento do sinal.

Os dados foram coletados para diferentes alturas do receptor (1 metro, 60 cm, 40 cm e 20 cm). Os valores médios da potência recebida e seus respectivos desvios padrão são apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Assim como no corredor do tipo A, as medições foram limitadas devido às dimensões da plantação, dessa vez, à distância de 200 m. Comparando o valor da potência na distância de 200 m com a sensibilidade do dispositivo (-102 dBm), percebe-se que o alcance vai além dos 200 m. Não foi encontrado nenhum corredor do tipo B com comprimento suficiente para realizar as medições até não haver potência suficiente para comunicação.

Tabela 5.3 – Potência média (em dBm) para diferentes alturas do receptor e distâncias no corredor do tipo B.

d (m)	PM (1 m)	PM (0,60 m)	PM (0,40 m)	PM (0,20 m)
1	-39,00	39,00	-39,78	-40,99
25	-46,06	-46,96	-54,13	-58,91
50	-51,57	-50,71	-58,01	-56,79
75	-53,00	-60,95	-62,93	-72,95
100	-65,38	-59,81	-67,76	-68,93
125	-63,54	-67,82	-72,94	-73,90
150	-71,96	-74,12	-76,13	-80,28
175	-74,43	-79,16	-79,12	-81,24
200	-84,00	-84,93	-86,19	-90,14

Tabela 5.4 – Desvio padrão (em dBm) da potência medida no corredor do tipo B.

d (m)	DP (1 m)	DP (0,60 m)	DP (0,40 m)	DP (0,20 m)
1	0,0000	0,0000	0,4163	0,1000
25	0,2387	0,4000	0,3380	0,7398
50	0,4976	0,4560	0,9587	0,4094
75	0,0000	0,2642	0,2564	1,3734
100	0,5081	0,3943	1,5642	0,2932
125	0,5009	0,4353	0,3429	0,3333
150	0,1969	0,3266	0,3932	0,4513
175	0,4976	0,3949	0,3266	0,4292
200	0,6195	0,5730	0,4426	0,5689

5.5 – Diagonais

As medições feitas na diagonal foram realizadas como ilustra a Figura 5.11. O coordenador foi mantido em uma posição fixa com altura de 1 m. O receptor foi instalado, primeiramente, com altura de 20 cm do chão. Cem medições da intensidade do sinal foram feitas seguindo as linhas tracejadas que formam ângulos de 15°, 30°, 45° e 75° (linhas 1, 2, 3 e 4 da Figura 5.11, respectivamente) com o eixo de referência. O experimento foi repetido com o receptor com altura de 40 cm, 60 cm e 1 m. Os valores de potência média e seus desvios padrão são apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6, respectivamente.

Em algumas posições, quando a intensidade do sinal estava por volta de -97 dBm, a comunicação não foi estabelecida, sendo necessário realizar várias tentativas até que fosse possível coletar os dados. Além disso, neste caso, o alcance é menor que no corredor do tipo A e do tipo B. Isso é um resultado esperado, pois existem alguns obstáculos entre o transmissor e o receptor.

5.6 – Transmissor Acima do Parreiral

As medições feitas com o coordenador acima da plantação foram realizadas como ilustra a Figura 5.12. O coordenador foi instalado com altura de 3 m, posicionado no meio do corredor. Primeiramente, o receptor foi deslocado ao longo do corredor do tipo A com altura de 20 cm e

Tabela 5.5 – Potência média (em dBm) para diferentes alturas do receptor e distâncias na diagonal.

Altura (m)	d (m)	PM (15°)	d (m)	PM (30°)	d (m)	PM (45°)	d (m)	PM (75°)
1,00	1,00	-39,00	1,00	-39,00	1,00	-39,00	1,00	-39,00
1,00	25,88	-44,24	28,87	-52,05	35,35	-53,85	25,88	-63,09
1,00	51,76	-53,70	57,73	-72,46	70,71	-56,81	51,76	-69,07
1,00	77,64	-64,42	86,60	-66,83	106,06	-74,35	77,64	-74,14
1,00	103,52	-75,16	115,47	-76,33	141,42	-84,65	103,53	-80,20
1,00	129,41	-79,04	144,34	-98,19	176,77	-99,65	129,41	-86,35
0,60	1,00	-39,00	1,00	-39,00	1,00	-39,00	1,00	-39,00
0,60	25,88	-44,00	28,87	-53,9	35,35	-50,98	25,88	-68,10
0,60	51,76	-57,58	57,73	-67,79	70,71	-67,79	51,76	-64,02
0,60	77,64	-64,72	86,6	-66,16	106,06	-79,00	77,64	-80,38
0,60	103,52	-77,69	115,47	-77,27	141,42	-83,50	103,53	-78,82
0,60	129,41	-80,24	144,34	-89,98	176,77	-99,84	129,41	-90,00
0,40	1,00	-39,00	1,00	-39,00	1,00	-39,00	1,00	-39,00
0,40	25,88	-44,99	28,87	-44,99	35,35	-49,02	25,88	-70,56
0,40	51,76	-63,61	57,73	-63,61	70,71	-57,60	51,76	-65,13
0,40	77,64	-64,71	86,60	-64,71	106,06	-89,24	77,64	-83,10
0,40	103,52	-80,06	115,47	-80,06	141,42	-84,45	103,53	-86,72
0,40	129,41	-81,58	144,34	-81,58	176,77	-99,92	129,41	-92,45
0,20	1,00	-39,00	1,00	-39,00	1,00	-39,00	1,00	-39,00
0,20	25,88	-46,62	28,87	-49,02	35,35	-50,36	25,88	-64,53
0,20	51,76	-63,63	57,73	-76,14	70,71	-62,96	51,76	-65,84
0,20	77,64	-66,77	86,60	-67,53	106,06	-95,43	77,64	-84,98
0,20	103,52	-88,78	115,47	-93,93	141,42	-89,48	103,53	-85,13
0,20	129,41	-81,15	144,34	-94,51	176,77	-98,27	129,41	-97,18

Tabela 5.6 – Desvio padrão (em dBm) da potência medida na diagonal.

Altura (m)	d (m)	DP (15°)	d (m)	DP (30°)	d (m)	DP (45°)	d (m)	DP (75°)
1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
1,00	25,88	0,42	28,87	0,55	35,35	0,41	25,88	1,30
1,00	51,76	0,46	57,73	1,25	70,71	0,39	51,76	1,32
1,00	77,64	0,57	86,60	0,49	106,06	0,53	77,64	0,75
1,00	103,52	0,58	115,47	0,56	141,42	0,59	103,53	0,56
1,00	129,41	0,34	144,34	1,18	176,77	0,57	129,41	0,78
0,60	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
0,60	25,88	0,00	28,87	0,38	35,35	0,2	25,88	1,39
0,60	51,76	0,55	57,73	0,71	70,71	0,71	51,76	0,53
0,60	77,64	0,45	86,6	0,39	106,06	0,72	77,64	1,58
0,60	103,52	0,73	115,47	0,44	141,42	0,55	103,53	0,60
0,60	129,41	0,51	144,34	0,63	176,77	0,48	129,41	1,06
0,40	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
0,40	25,88	0,10	28,87	0,10	35,35	0,14	25,88	4,11
0,40	51,76	0,77	57,73	0,77	70,71	0,49	51,76	0,69
0,40	77,64	0,51	86,60	0,51	106,06	1,72	77,64	1,77
0,40	103,52	0,93	115,47	0,93	141,42	0,75	103,53	1,68
0,40	129,41	0,49	144,34	0,49	176,77	0,56	129,41	1,21
0,20	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
0,20	25,88	0,50	28,87	0,14	35,35	0,48	25,88	1,57
0,20	51,76	0,58	57,73	1,93	70,71	0,19	51,76	0,73
0,20	77,64	0,44	86,60	0,55	106,06	2,15	77,64	1,86
0,20	103,52	1,20	115,47	1,57	141,42	3,10	103,53	0,84
0,20	129,41	0,38	144,34	0,83	176,77	4,08	129,41	0,88

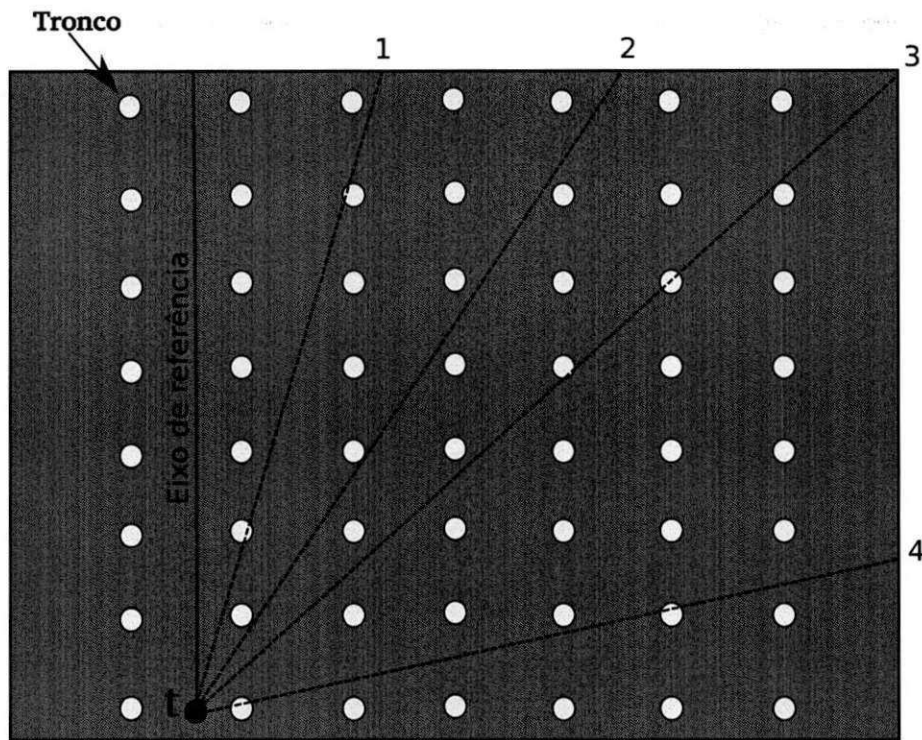


Figura 5.11 – Vista superior da plantação com as linhas utilizadas para guiar as medições na diagonal.

40 cm. Cem medições da intensidade do sinal foram feitas a intervalos de 25 metros. Em seguida, o receptor foi posicionado acima da plantação com altura de 3 m. Finalmente, também com o receptor acima da plantação, as medições foram realizadas na diagonal, formando um ângulo de 45° com o corredor do tipo A. Os valores médios da potência recebida e seus respectivos desvios padrão são apresentados nas Tabelas 5.8, 5.7 e 5.9 .

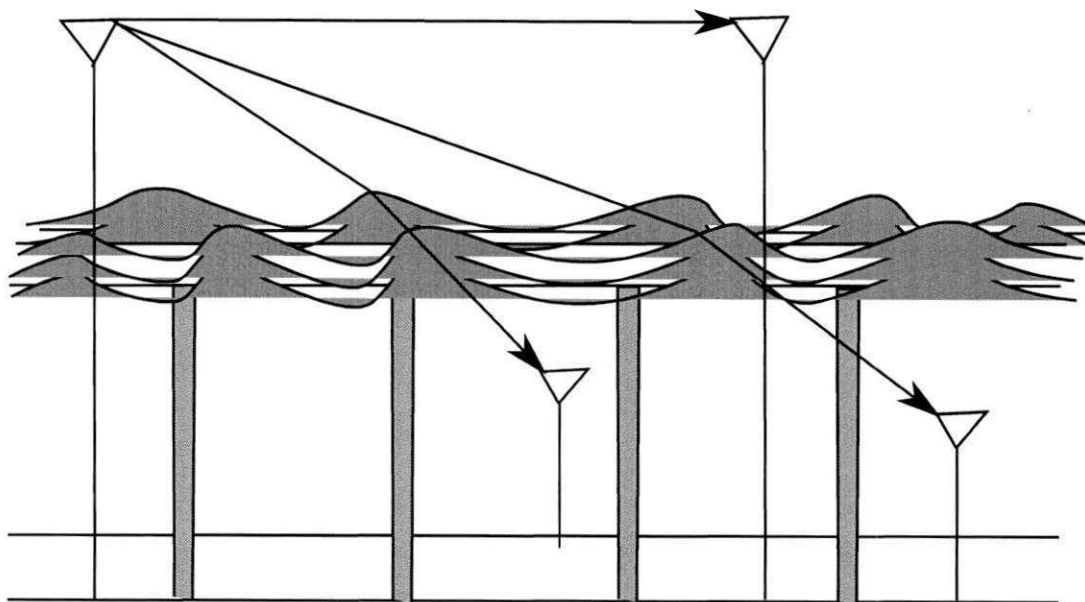


Figura 5.12 – Esboço das medições com o coordenador acima da cobertura vegetal.

Tabela 5.7 – Medições com os dois nós acima da plantação, no corredor do tipo A.

Altura do transmissor (m)	d (m)	PM	Desvio Padrão
3	1	-39,00	0,0000
3	50	-53,19	0,5448
3	100	-61,16	0,5811
3	150	-65,21	0,4560
3	200	-71,18	0,3861
3	250	-74,35	0,5924
3	300	-75,64	0,7463
3	350	-80,54	0,5206
3	400	-82,25	0,6415
3	450	-83,92	0,6768
3	500	-83,81	0,9177

Tabela 5.8 – Medições com o coordenador acima da plantação no corredor do tipo A.

Altura do transmissor (m)	d (m)	PM	Desvio Padrão
0,20	1	-52,24	0,8179
0,20	50	-76,72	0,8418
0,20	75	-75,01	0,1000
0,20	100	-84,13	0,7338
0,20	125	-90,18	0,7834
0,20	150	-98,27	1,3870
0,40	1	-52,24	0,8179
0,40	50	-69,52	0,8418
0,40	75	-80,79	0,1000
0,40	100	-84,71	0,7338
0,40	125	-82,02	0,7834
0,40	150	-90,01	1,3870

Tabela 5.9 – Medições com o coordenador acima da plantação e o receptor abaixo da plantação formando um ângulo de 45° com o corredor do tipo A.

Altura do transmissor (m)	d (m)	PM	Desvio Padrão
0,40	1	-52,24	0,8179
0,40	50	-67,86	1,8313
0,40	75	-73,91	0,8887
0,40	100	-82,76	0,5340
0,40	125	-92,59	0,8420

Para o caso com os dois nós acima da plantação, é possível notar que o decaimento da potência do sinal é mais rápido do que o caso em que os dois nós estão abaixo da plantação no corredor do tipo A. Para o caso em que o transmissor está acima e o receptor abaixo, a atenuação é maior do que todas as outras situações. No Capítulo 6, todas as situações são discutidas em detalhe.

Interpretação Física das Medidas

No Capítulo 5, a metodologia utilizada para realizar as medições foi apresentada, bem como os ambientes de propagação, que foram divididos em quatro regiões: corredor do tipo A, corredor do tipo B, propagação na diagonal e coordenador acima da plantação. Neste capítulo, uma análise é realizada com base nas medições e os modelos mais adequados para cada caso são apresentados com seus respectivos ajustes. Os modelos ajustados permitem a predição de perda de percurso, que podem ser usados pelo projetista da RSSF para determinar a posição dos dispositivos na plantação. A interpretação das medidas é feita com base nos conceitos apresentados no Capítulo 4.

A raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE - *Root Mean Square Error*) é utilizada como medida de ajuste de cada modelo e é dado por [61]

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2)}{N}}, \quad (6.1)$$

em que N é o número de pontos na amostra, e x_i e \hat{x}_i são os valores medidos e previstos, respectivamente.

O coeficiente de determinação R^2 também é utilizado como medida nos estudos de regressão e é dado por [76]

$$R^2 = \frac{\text{Variação Explicada}}{\text{Variação Total}} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (\hat{x}_i - \bar{x})^2} \quad (6.2)$$

A variação total é a soma dos quadrados das diferenças entre o valor medido e a média dos valores medidos. A variação explicada é a soma dos quadrados das diferenças entre cada valor previsto e a média dos valores medidos. Essa medida indica quão boa é uma regressão, ou seja, o quanto uma linha de regressão se aproxima dos dados coletados. R^2 está no intervalo $[0, 1]$. Quanto mais próximo de 1, melhor a linha de regressão descreve o comportamento dos dados.

Na Seção 6.1 é apresentada a análise para o corredor do tipo A; na Seção 6.2 discute-se a propagação no corredor do tipo B. A propagação na diagonal é analisada na Seção 6.3 e a propagação com o terminal fixo acima da plantação é analisada na Seção 6.4. As conclusões do capítulo são apresentadas na Seção 6.5.

6.1 – Corredor do Tipo A

As Figuras 6.1 e 6.2 apresentam as medições coletadas no corredor do tipo A, bem como, os modelos de espaço livre de Friis e o modelo de terra plana sem fatores de correção. O eixo vertical representa a potência média recebida em dBm e o eixo horizontal representa a distância das medições.

Os modelos foram escolhidos para a primeira análise, pelo fato de não haver obstáculos entre os terminais. Observa-se, no entanto, que o decaimento da potência do sinal não segue o modelo de terra plana. Pode-se verificar esta afirmação calculando a média das diferenças entre o valor previsto pelo modelo de terra plana e o valor medido. Dessa forma, o ganho médio é igual a 7,87 dB. A Tabela 6.1 apresenta os valores do RMSE.

Tabela 6.1 – RMSE para os modelos de espaço livre de Friis e para o modelo de terra plana referentes ao corredor do tipo A.

Modelo - Altura	RMSE (dBm)
Friis	9,7914
Terra Plana - 1 metro	25,6181
Terra Plana - 60 cm	21,1751
Terra Plana - 40 cm	23,6352
Terra Plana - 20 cm	28,8378

A partir dos gráficos das figuras e dos valores de RMSE, é possível concluir que a geometria da plantação favorece a propagação da onda como em um guia de ondas. Este fato é comprovado, principalmente, pelo valor de RMSE para espaço livre que é bem menor do que para o modelo de terra plana. Graficamente, também é possível notar esse comportamento. No entanto, identifica-se uma dependência com a altura que é causada pelo raio refletido a partir da distância $d_c = 100$ m. Tendo isso em vista, foram feitos dois ajustes dos modelos teóricos utilizando o método LAR no Matlab. Ajustou-se o expoente da distância tanto para espaço livre quanto para o modelo de terra plana a fim de minimizar o RMSE. Alterando o modelo de terra plana, pois o decaimento não é proporcional a d^{-4} , pode-se escrever

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20 \log(h_t) + 20 \log(h_r) - 10n \log(d), \quad (6.3)$$

em que n é o expoente ajustado da distância. Os valores obtidos para os expoentes são apresentados na Tabela 6.2, assim como, os valores de RMSE para cada caso. Os valores de P_t , G_t e G_r utilizados são os fornecidos pelo fabricante dos nós XBee e são iguais a 18 dBm, 2,1 dB e 2,1 dB.

É possível observar, a partir da Tabela 6.2, que o modelo de Friis, com o expoente ajustado, possui um expoente próximo de dois com pouca melhora com relação ao RMSE. Para o modelo de terra plana, percebe-se que o RMSE diminui, indicando um melhor ajuste, como também, que o decaimento não é com a quarta potência da distância. A Figura 6.3 e a Figura 6.4 apresentam os gráficos das curvas com o expoente ajustado.

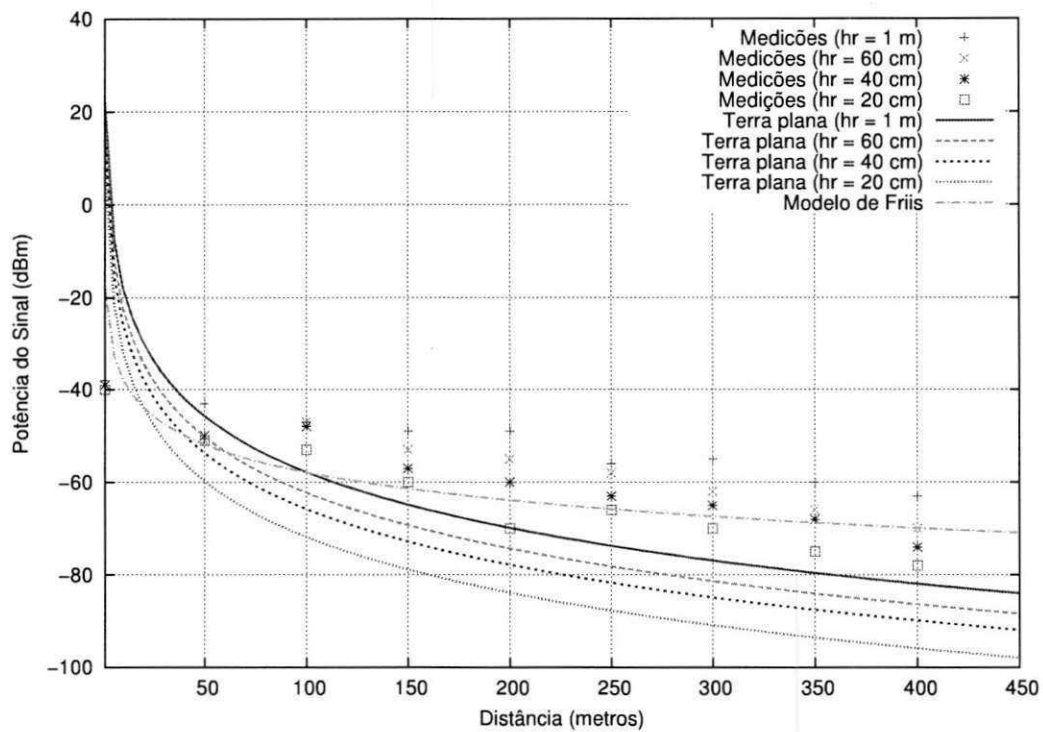


Figura 6.1 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana para o corredor do tipo A (escala linear para a distância).

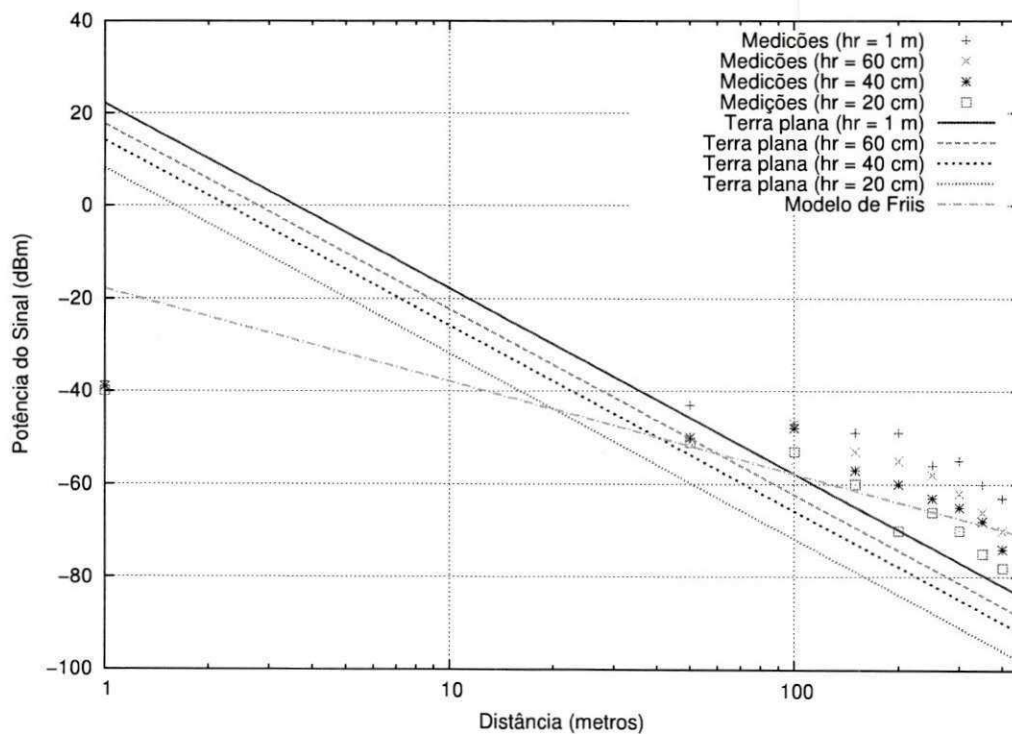


Figura 6.2 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana para o corredor do tipo A (escala logarítmica para a distância).

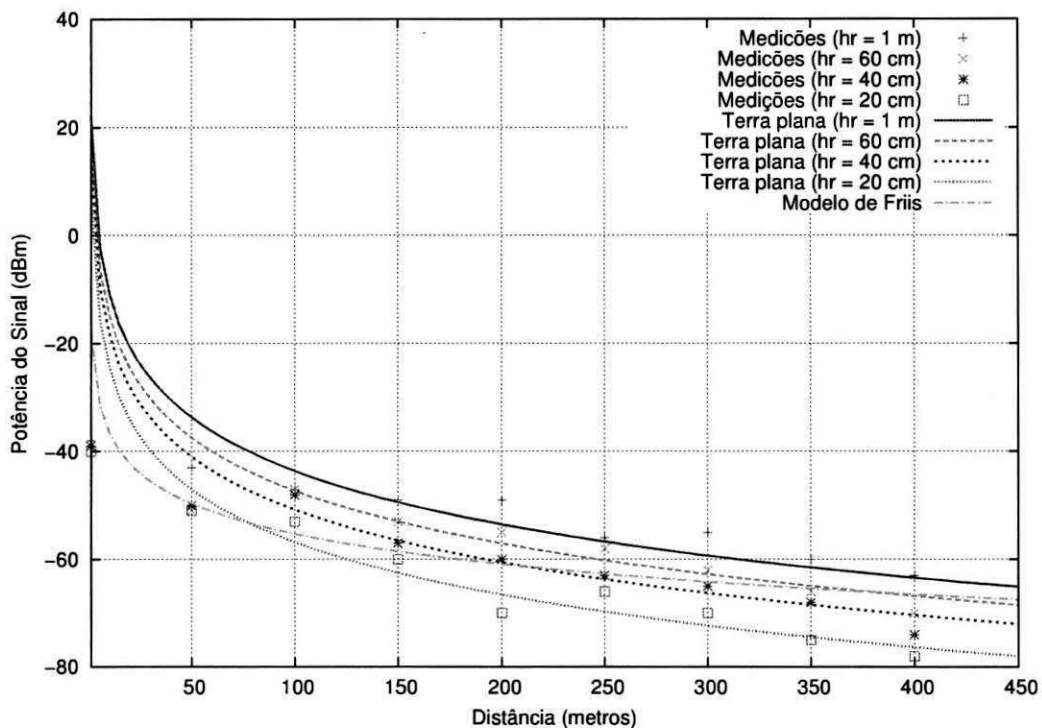


Figura 6.3 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana com o expoente ajustado no corredor do tipo A (escala linear para a distância).

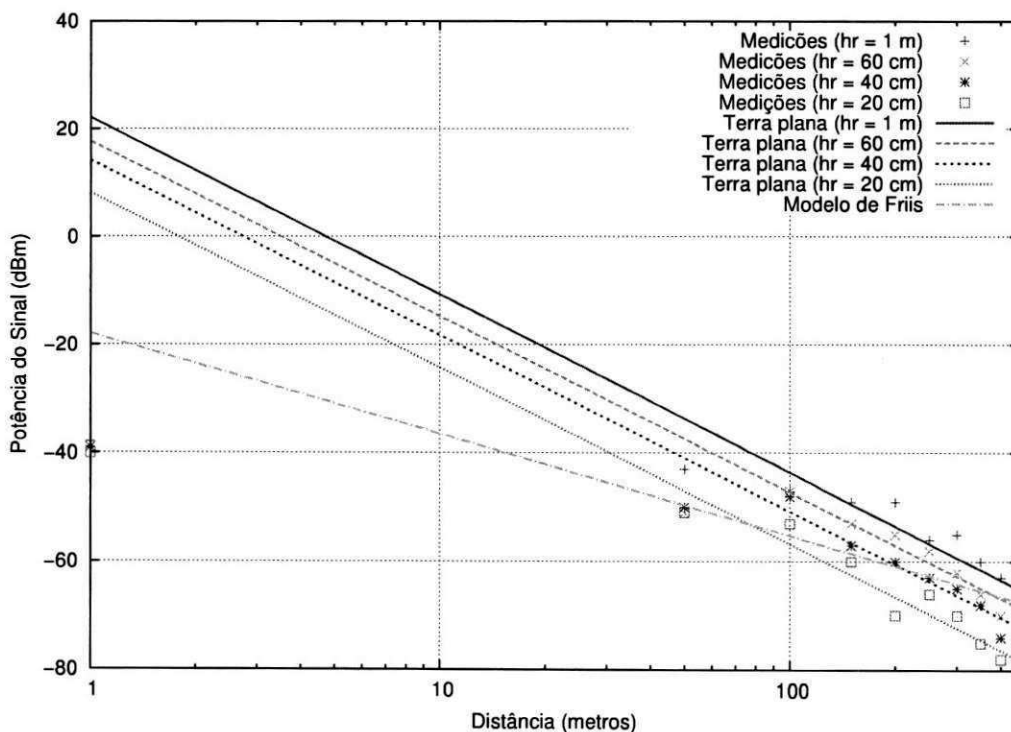


Figura 6.4 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis de terra plana com o expoente ajustado no corredor do tipo A (escala logarítmica para a distância).

Tabela 6.2 – RMSE para os modelos de espaço livre de Friis e de terra plana com expoentes ajustados referentes ao corredor do tipo A.

Modelo - Altura	Expoente (n)	RMSE (dBm)	R^2
Friis	1,87	9,35	0,95
Terra Plana - 1 metro	3,29	6,96	0,98
Terra Plana - 60 cm	3,25	6,95	0,99
Terra Plana - 40 cm	3,25	6,28	0,96
Terra Plana - 20 cm	3,25	6,68	0,94

6.2 – Corredor do Tipo B

As Figuras 6.5 e 6.6 apresentam as medições coletadas no corredor do tipo B, bem como os modelos de espaço livre de Friis e o modelo de terra plana sem fatores de correção. O eixo vertical representa a potência média recebida em dBm e o eixo horizontal representa a distância das medições.

Como o corredor do tipo B tem como característica maior densidade de vegetação, o espalhamento e absorção ocasionam perdas que cancelam o efeito da canalização obtida pela geometria da plantação. É possível perceber que as medições não seguem os modelos apresentados nas figuras tanto graficamente quanto com base nos valores de RMSE apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – RMSE para os modelos de espaço livre de Friis e de terra plana no corredor do tipo B.

Modelo - Altura	RMSE
Friis	14,2055
Terra Plana - 1 metro	21,8361
Terra Plana - 60 cm	19,7517
Terra Plana - 40 cm	18,8743
Terra Plana - 20 cm	17,1512

Em vista dos valores de RMSE encontrados, foi necessário diminuir o erro por meio da determinação de uma expressão obtida de maneira empírica em função apenas da distância. Assim como no comportamento da propagação no corredor do tipo A, observa-se um decaimento acentuado para distâncias pequenas e à medida que o receptor se afasta do transmissor, a potência decai de forma mais lenta, indicando um comportamento logarítmico. Logo, a equação do modelo log-distância foi utilizada com algumas modificações. Partindo da Equação 4.47, atenuação é dada por [71]

$$A = 10n \log(d/d_0) + X, \quad (6.4)$$

em que d é a distância, d_0 é a distância de referência tomada como 1 metro, e n é obtido com o método LAR; X é uma variável aleatória gaussiana com média zero. Uma modificação feita no

modelo, é a substituição de $P(d_0)$ por $P_t + G_t + G_r$, dessa maneira,

$$A = P_t + G_t + G_r - P_r = C - P_r \quad (6.5)$$

em que a constante C é dada por

$$C = P_t + G_t + G_r = 22,2 \text{ dBm}. \quad (6.6)$$

Como este trabalho não analisa o desvanecimento em pequena escala, o termo X da Equação 4.47 não aparece nos ajustes realizados no restante do texto. Portanto, a potência recebida é dada por

$$P_r = P_t + G_t + G_r - 10n \log(d) \text{ dBm}. \quad (6.7)$$

O valor de n obtido com o auxílio do método LAR fornecido pelo Matlab é igual a 4,537. O RMSE obtido é igual a 3,567 e o R^2 é igual a 0,9399. A curva obtida é apresentada na Figura 6.7 com escala linear para distância. Na Figura 6.8, é apresentado o gráfico com escala logarítmica para a distância.

Uma equação linear também foi considerada para tentar diminuir o RMSE e aumentar o

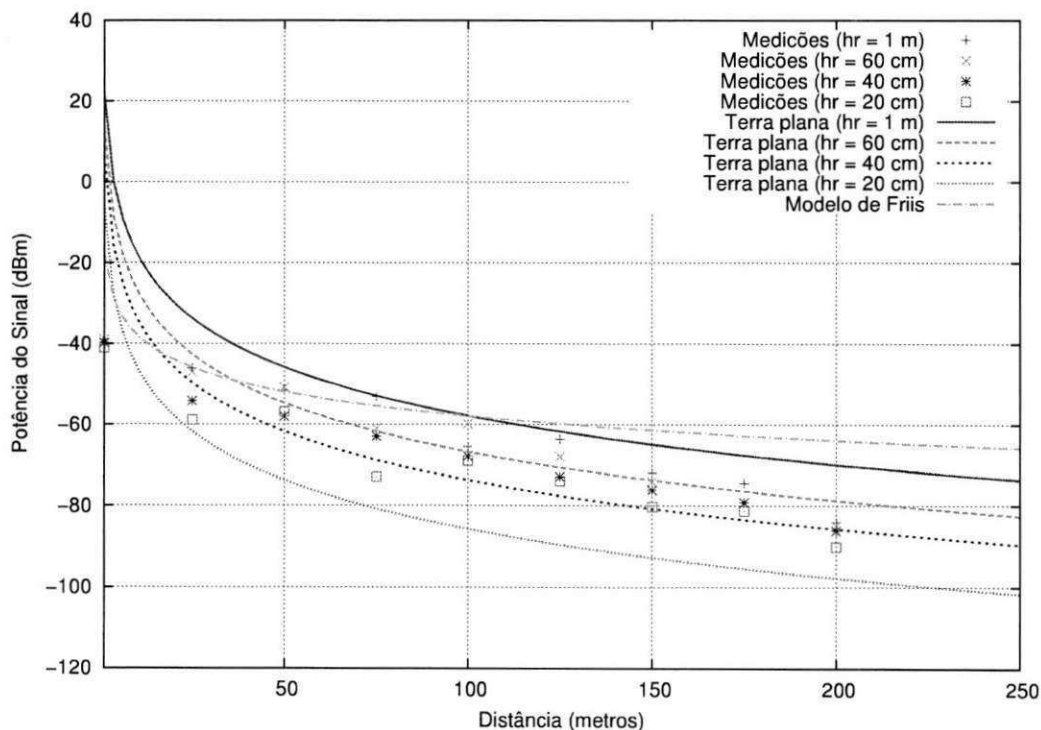


Figura 6.5 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana (escala linear para a distância).

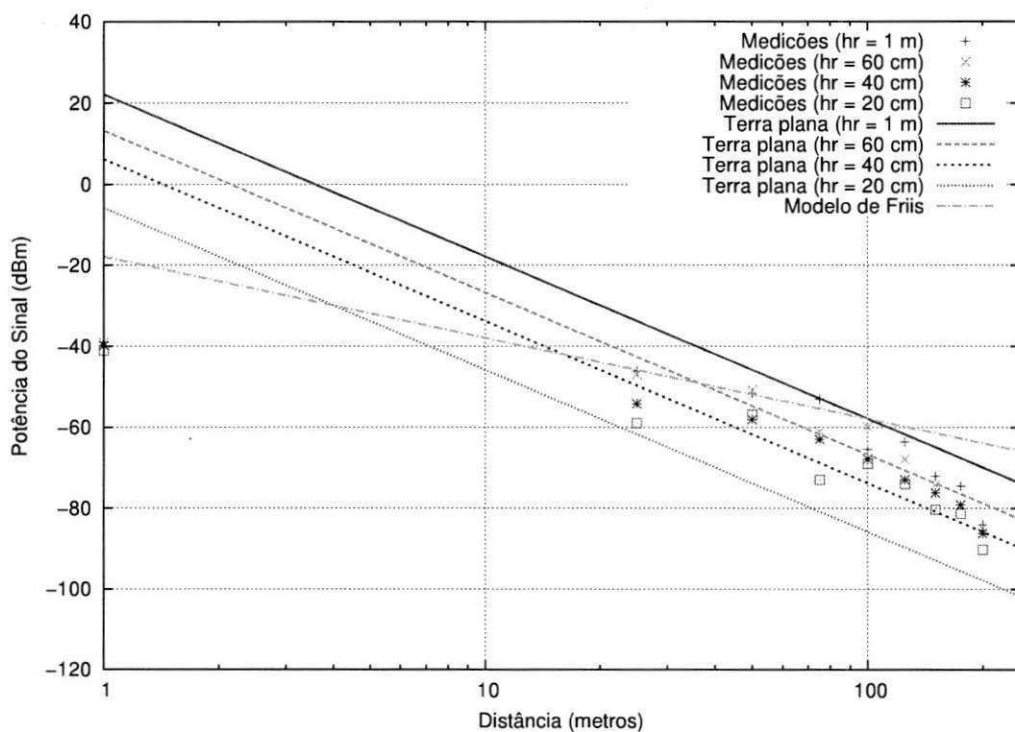


Figura 6.6 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana (escala logarítmica para a distância).

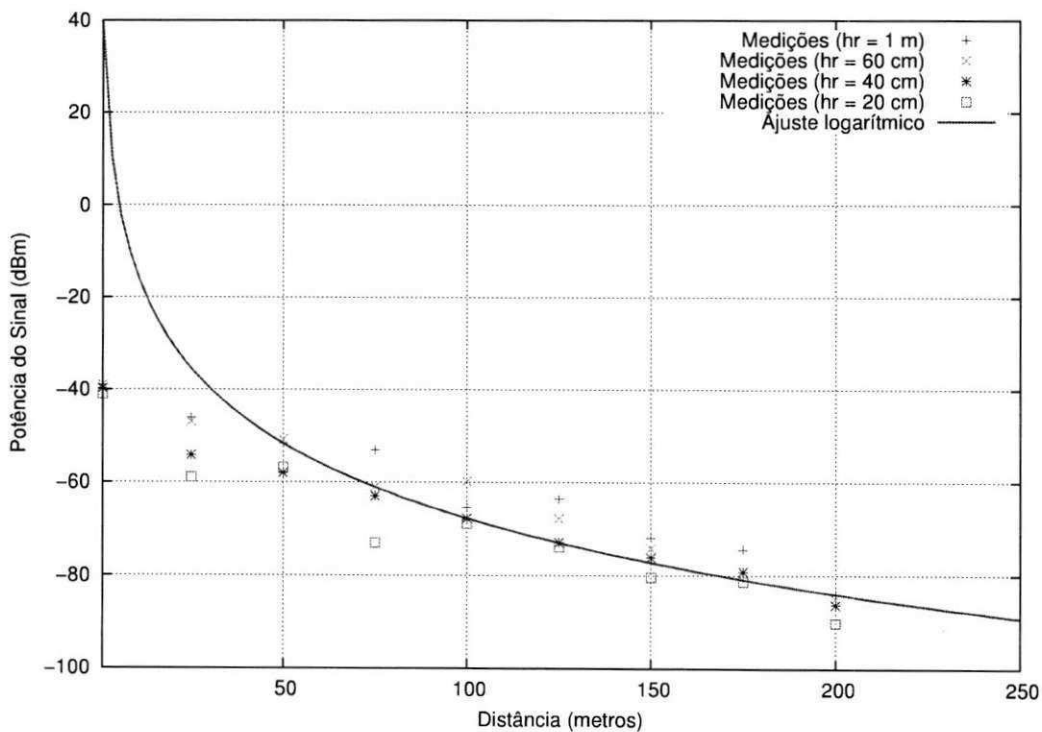


Figura 6.7 – Potência recebida (dBm) em função da distância e equação de ajuste logarítmico (escala linear para a distância).

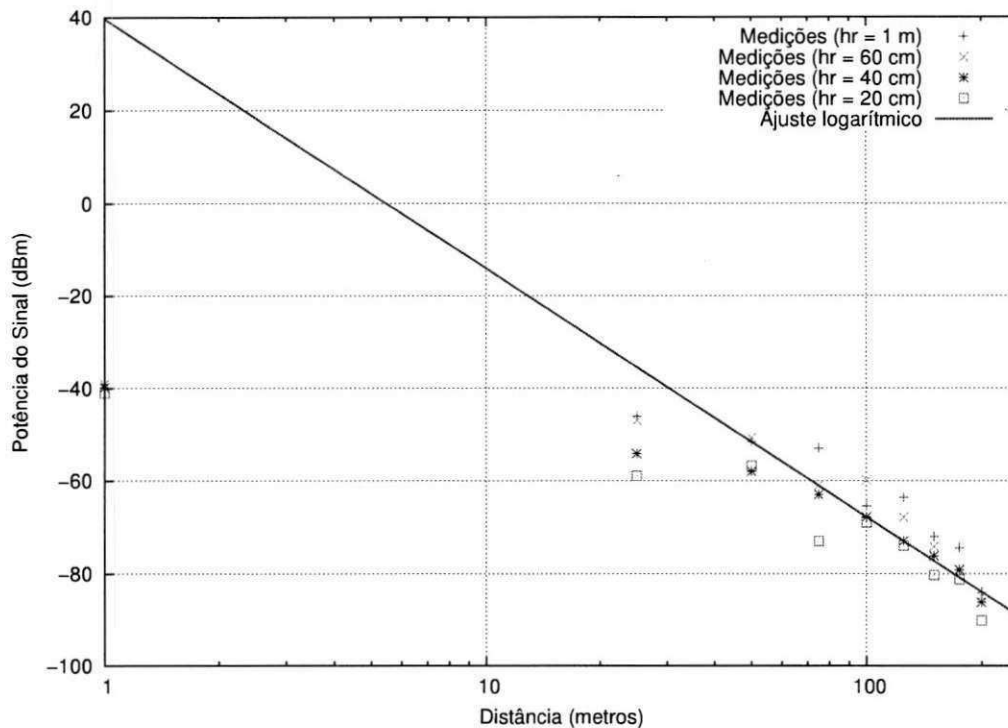


Figura 6.8 – Potência recebida (dBm) em função da distância e equação de ajuste logarítmica (escala logarítmica para a distância).

R^2 , da seguinte forma

$$P_r = P(d_0) - nd = -39 - nd. \quad (6.8)$$

O valor de $P(d_0)$ é igual a potência na distância de referência, tomada como 1 metro. O valor de n encontrado foi 0,236, o $RMSE = 5,275$ e $R^2 = 0,8687$. No entanto, a equação logarítmica se ajusta melhor aos dados, ao se comparar os valores de $RMSE$ e R^2 .

Outra opção é utilizar uma equação que inclua a altura para que o modelo tenha mais parâmetros de ajustes e diminua o $RMSE$. Partindo da seguinte expressão

$$P_r = (P(d_0) + f(h_r)) - nd, \quad (6.9)$$

em que $P(d_0)$ é a potência na distância de referência (1 metro), $f(h_r)$ é uma expressão em função da altura do receptor, n é uma constante e d é a distância. O valor de $f(h_r) + P(d_0)$ e n são obtidos com o método LAR. Considerando $h_r = 1$ m a altura de referência, é possível obter a seguinte equação para $h_r = 1$,

$$P_r = -39,82 - 0,2115d. \quad (6.10)$$

Dessa forma, $P(d_0) + f(h_r) = -39,82$. Repetindo para as outras altura, obtém-se

$$P(d_0) + f(h_r) = -41,43, \text{ para } h_r = 0,60 \quad (6.11)$$

$$P(d_0) + f(h_r) = -45,16, \text{ para } h_r = 0,40 \quad (6.12)$$

$$P(d_0) + f(h_r) = -48,17, \text{ para } h_r = 0,20. \quad (6.13)$$

A equação de ajuste para $f(h_r)$ escolhida a partir do do gráfico da Figura 6.9 é

$$f(h_r) = ae^{bh_r}, \quad (6.14)$$

em que a e b são obtidos com o método LAR e são iguais a $-12,07$ e $-2,41$, respectivamente. Foi possível chegar a uma equação final, dada por

$$P_r = \overline{P(d_0)} - nd + f(h_r) \quad (6.15)$$

$$P_r = -39,69 - 0,2115d - 12,07e^{-2,41h_r}, \quad (6.16)$$

em que $\overline{P(d_0)}$ é a média das potências recebidas na distância de referência. Os gráficos com escala linear e logarítmica para distância são apresentados nas Figuras 6.10 e 6.11, respectivamente. A Figura 6.9 apresenta o comportamento do termo que leva em consideração a altura. Pode ser visto, nas Figuras 6.10 e 6.11, a potência recebida em função da distância e modelo que incorpora a altura, nas escalas linear e logarítmica, respectivamente. A Tabela 6.4 apresenta os valores de RMSE e R^2 .

Tabela 6.4 – RMSE e R^2 para a equação de ajuste com altura incorporada.

Altura do receptor	RMSE (dBm)	R^2
$h_r = 1 \text{ m}$	2,43	0,97
$h_r = 0.60 \text{ cm}$	2,20	0,98
$h_r = 0.40 \text{ cm}$	2,90	0,96
$h_r = 0.20 \text{ cm}$	4,64	0,90

Percebe-se uma dependência em relação à altura que foi verificada com a equação de ajuste ao incorporar a altura do receptor na expressão. Os valores RMSE e R^2 encontrados indicam um bom ajuste ficando, a cargo do projetista da rede escolher entre a equação logarítmica ou a equação com a altura incorporada.

6.3 – Diagonal

Primeiramente, foi realizada uma comparação entre o modelo de Weissberger [59] e a recomendação da ITU-R para a faixa UHF [72] levando em consideração todas as medições feitas na diagonal. As equações consideradas, incluindo o excesso de perda pela vegetação, são as

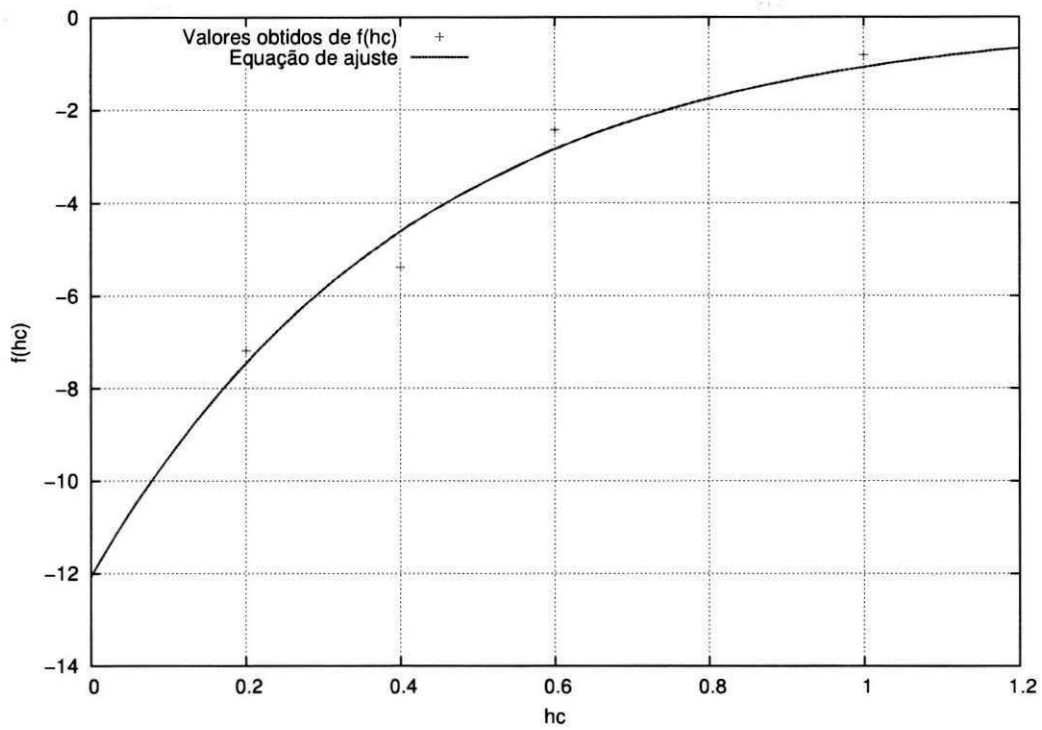


Figura 6.9 – Comportamento do termo que leva em consideração a altura, $f(h_r)$.

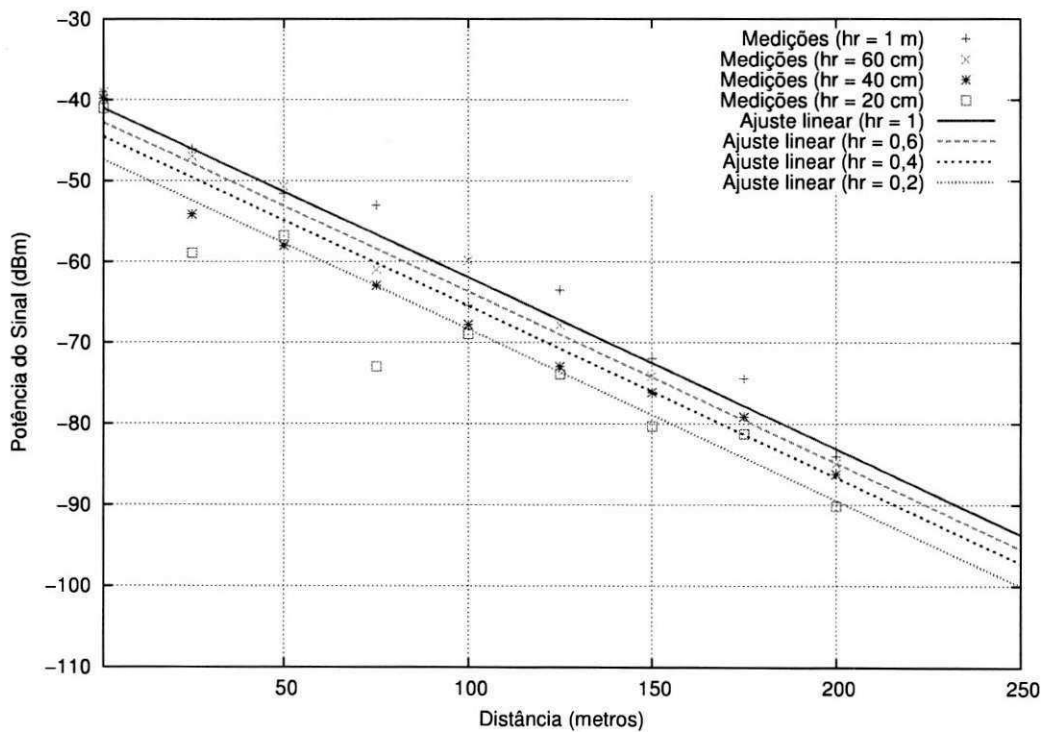


Figura 6.10 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelo que incorpora a altura (escala linear para a distância).

seguintes

$$P_r = A_{el} - 1,33f^{0,284}d^{0,588} \tag{6.17}$$

$$P_r = A_{el} - 0,2f^{0,3}d^{0,6}, \tag{6.18}$$

em que A_{el} é a atenuação em espaço livre, f é a frequência e d a distância. Os gráficos com as medições e os modelos são apresentados na Figura 6.12 e na Figura 6.13.

Apesar das medições realizadas por Weissberger terem sido feitas em ambientes diferentes, a equação proposta por ele tem um ajuste razoável em termos de RMSE, como também, verificado graficamente. Dessa forma, como em [73], foi realizado o ajuste dos parâmetros A , B e C do termo de excesso de atenuação pela vegetação são obtidos com otimização. Além disso, propõe-se a determinação do expoente do modelo Log-distância, da maneira feita para o corredor do tipo B, como na Equação 6.4, Equação 6.5 e 6.6, e um ajuste linear como na Equação 6.8. As curvas referentes às equações ajustadas são apresentadas nas Figuras 6.14 e 6.15. A Tabela 6.6 apresenta os expoentes e os valores de RMSE e R^2 obtidos.

Tabela 6.5 – RMSE para os modelos de Weissberger e da ITU-R.

Altura	RMSE (dBm)
Weissberger	11,33
ITU-R	18,31

A partir dos ajustes realizados, percebe-se que não há ganho significativo com a otimização dos parâmetros A , B e C em termos de RMSE. Constata-se, também, que há um aumento no expoente do ajuste logarítmico de 0,523 e de 0,124 no parâmetro n do ajuste linear comparando com os valores obtidos para o corredor do tipo B. Esse fato é justificado pelas múltiplas difrações que ocorrem ao longo do trajeto entre os terminais.

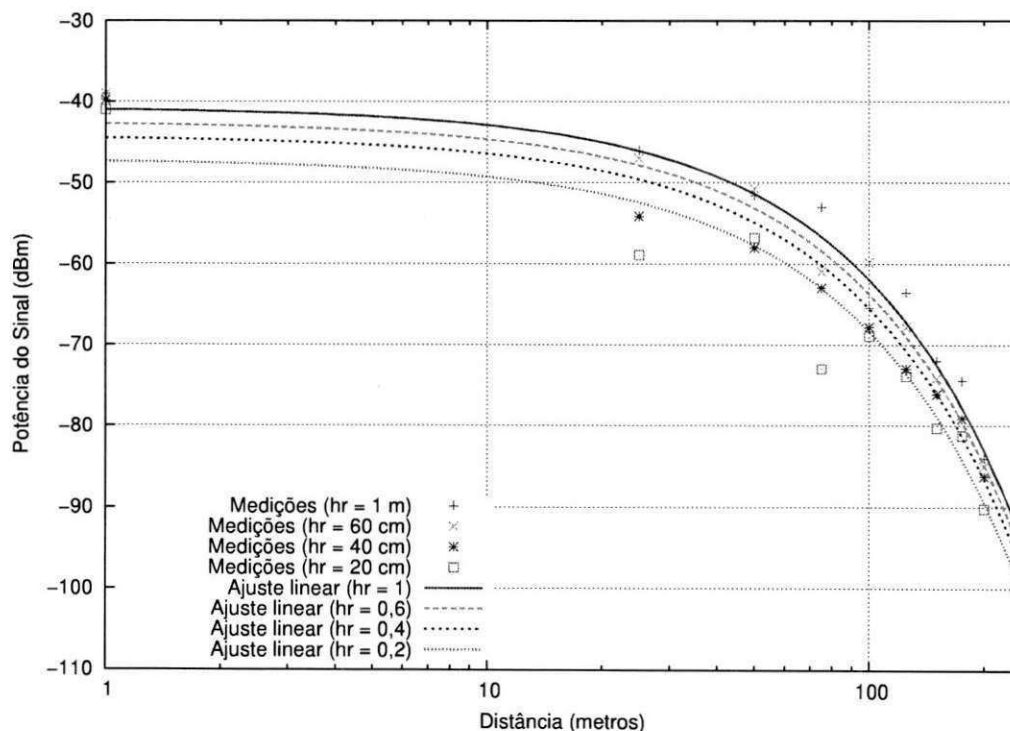


Figura 6.11 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelo que incorpora a altura (escala logarítmica para a distância).

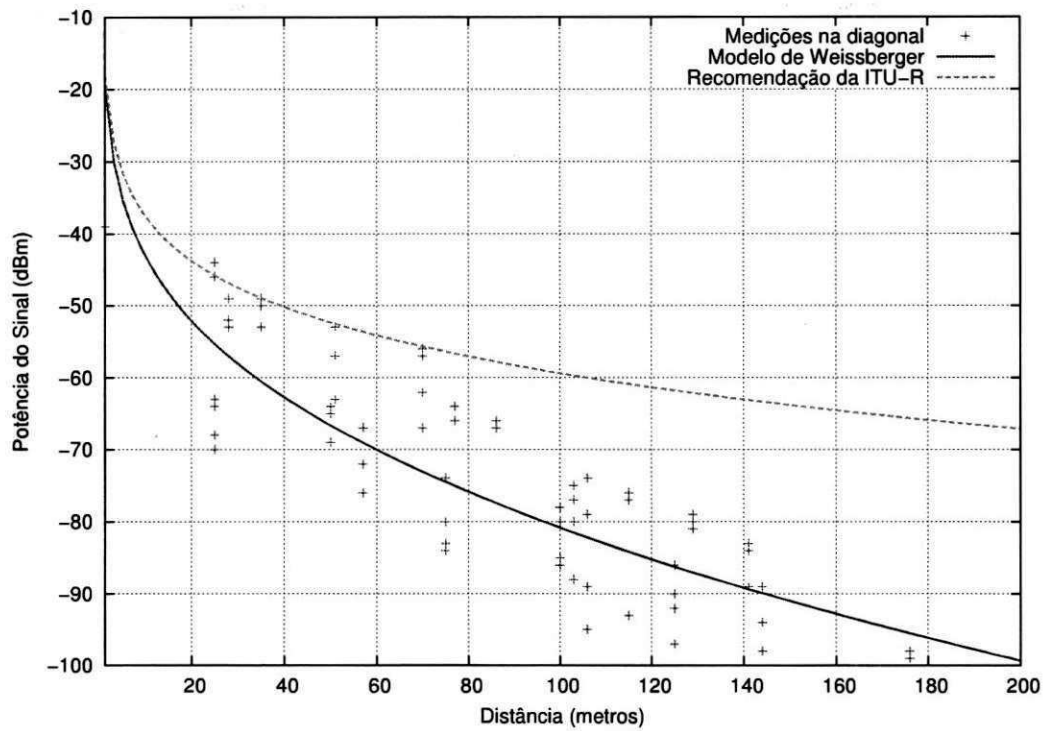


Figura 6.12 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de Weissberger e da ITU-R (escala linear para a distância).

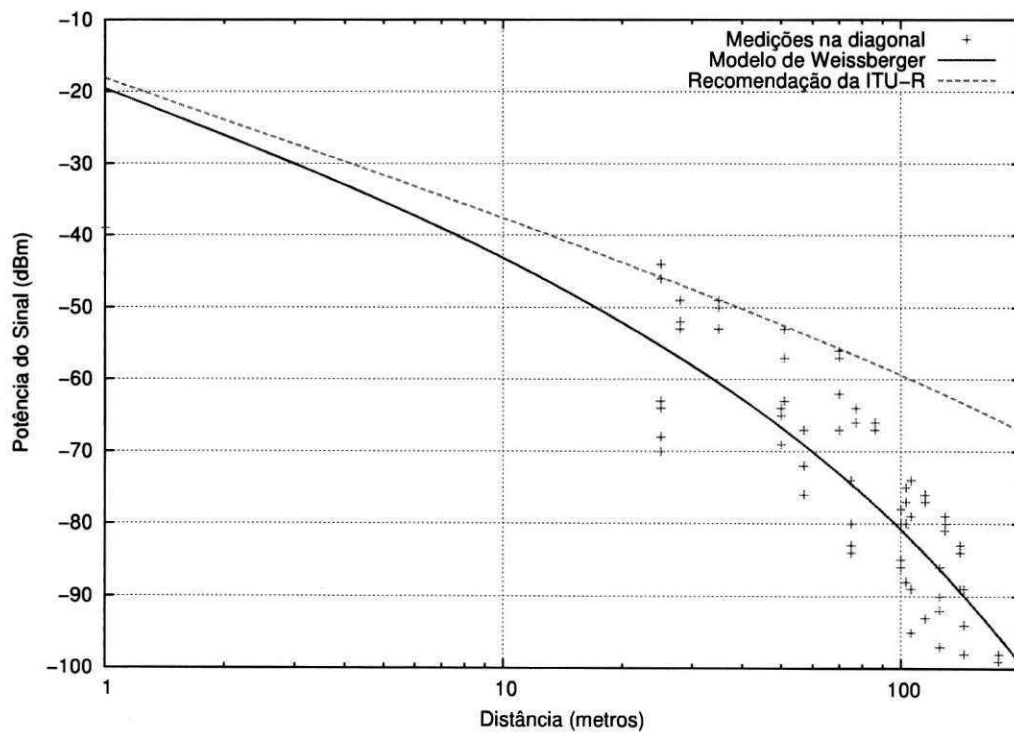


Figura 6.13 – Potência recebida (dBm) em função da distância e Modelos de Weissberger e da ITU-R (escala logarítmica para a distância).

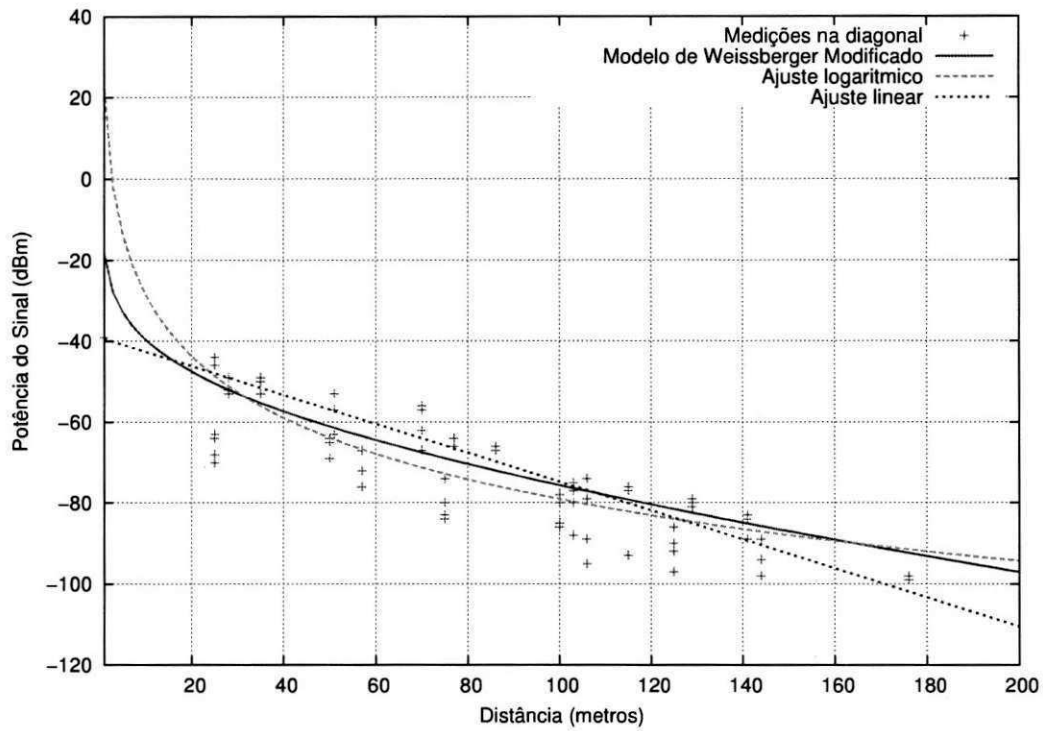


Figura 6.14 – Potência recebida (dBm) em função da distância e equações de ajuste para diagonal (escala linear para a distância).

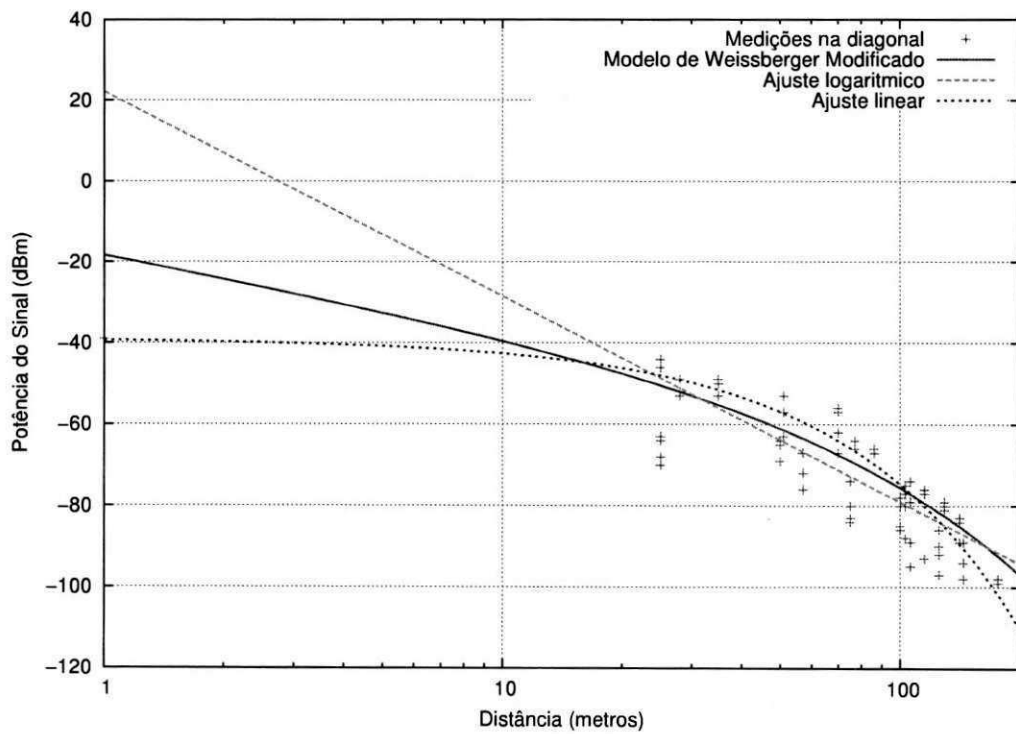


Figura 6.15 – Potência recebida (dBm) em função da distância e equações de ajuste para diagonal (escala logarítmica para a distância).

Tabela 6.6 – Parâmetros, valores de RMSE e R^2 para as equações de Weissberger, logarítmica e linear.

Modelo	Parâmetros	RMSE (dBm)	R^2
Weissberger Modificado	$A = 0,08$ $B = 1,96$ $C = 0,83$	10,98	0,67
Logarítmico	$n = 5,06$	2,69	0,98
Linear	$n = 0,36$	7,64	0,83

A fim de avaliar a relação do ângulo com a atenuação sofrida pelo sinal, o conjunto de dados foi dividido em quatro grupos, que correspondem às medições feitas seguindo cada ângulo. Os valores de n , R^2 e do RMSE são apresentados na Tabela 6.7 para a equação de ajuste linear e para a equação de ajuste logarítmica. As Figuras 6.16, 6.17, 6.18 e 6.19 apresentam as curvas obtidas para os valores de n encontrados.

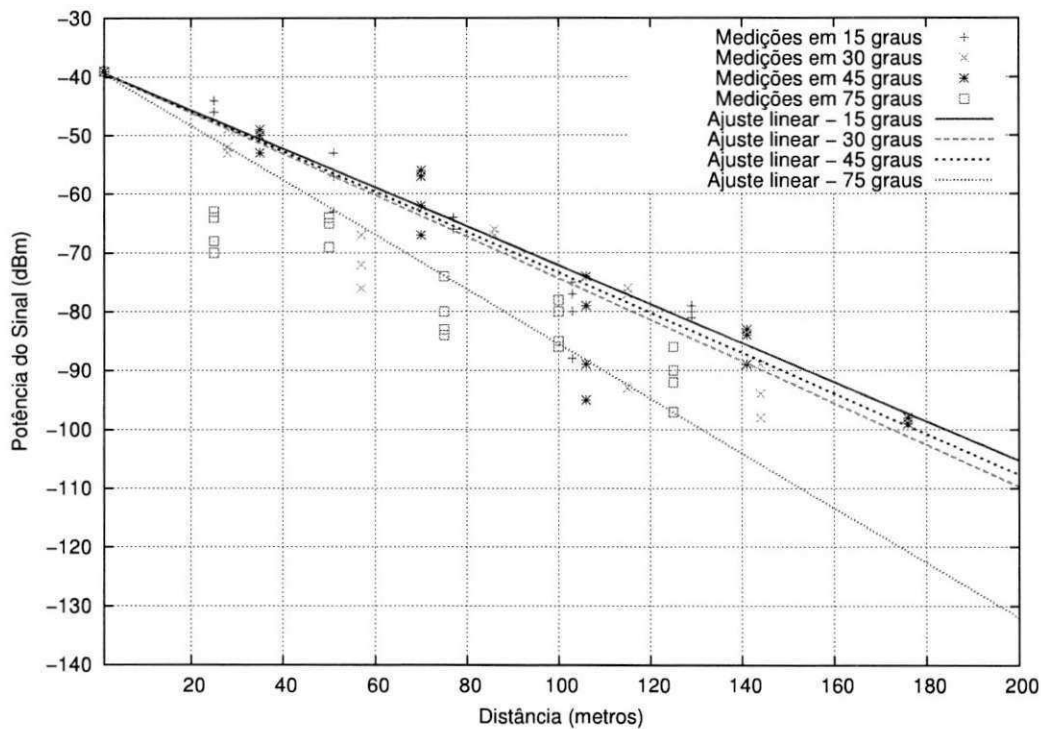


Figura 6.16 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos lineares para cada ângulo.

Tabela 6.7 – Ajustes linear e logarítmico para propagação em diagonal em função do ângulo.

Ângulo (°)	n (linear)	RMSE (dBm)	R^2	n (logarítmico)	RMSE (dBm)	R^2
15	0,3311	0,8563	0,9973	4,832	5,168	0,9017
30	0,3532	7,066	0,8641	5,109	5,276	0,9242
45	0,3431	1,135	0,9974	4,959	5,31	0,9423
75	0,4647	8,284	0,7776	5,326	5,269	0,91

Com base nos valores obtidos para cada parâmetro, não é possível determinar uma relação entre os ângulos e os valores do parâmetro n de forma a prever a atenuação em função

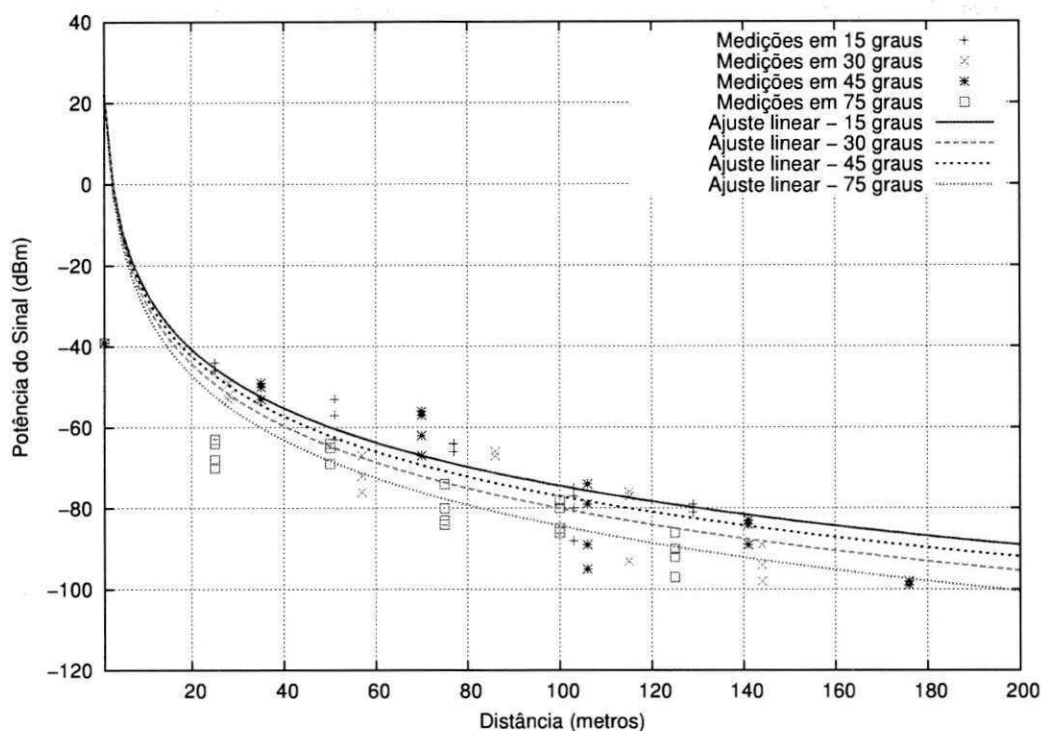


Figura 6.17 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos logarítmicos para cada ângulo.

do ângulo. Conforme discutido na Seção 4.1.5, no Capítulo 4, a atenuação causada pela difração depende do ângulo formado entre a fronteira de campo incidente e o raio difratado. No entanto, o ambiente é caracterizado por múltiplos obstáculos entre o transmissor e receptor. Tendo isso em vista, investigou-se a relação entre o número de obstáculos e a atenuação sofrida pelo sinal ao longo do caminho com sombreamento. Foi realizada uma simplificação para estimar o número de obstáculos que consistiu em assumir que a plantação está organizada como uma grade formada pelos troncos e estacas de madeira, como ilustra a Figura 6.20. O Algoritmo 1 foi utilizado para realizar o cálculo. A Tabela 6.8 apresenta o número de obstáculos no percurso para cada ângulo, obtidos com o Algoritmo 1.

Tabela 6.8 – Número de obstáculos para cada ângulo.

Distância (eixo de referência)	15°	30°	45°	75°
1	0	0	0	0
25	2	0	1	2
50	2	0	3	2
75	3	0	4	3
100	4	2	5	4
125	4	4	6	4

A partir dos dados da Tabela 6.8, como para a avaliação feita para os ângulos, não é possível prever a atenuação em função do número de obstáculos entre os terminais. Como existem múltiplas difrações, o ângulo formado entre a fronteira de campo incidente e o campo difratado em um obstáculo determina o ângulo formado entre a fronteira de campo incidente e o

campo difratado no obstáculo seguinte. Portanto, é necessário realizar um estudo analítico, que foge do escopo deste trabalho. Outra observação é que não há dependência entre a altura dos nós e a atenuação, devido ao fenômeno das múltiplas difrações.

6.4 – Transmissor Acima da Plantação

Para o caso em que os dois terminais estão acima da plantação, o campo eletromagnético é refletido na estrutura do topo da plantação, formada pelas folhas e arames. Portanto, o modelo de terra plana é utilizado considerando as alturas dos nós iguais a 1 m em vez de 3 m (3 metros da altura total em relação ao solo menos 2 metros da altura das estacas). Nesta situação, até a distância 100 metros, a propagação se dá em espaço livre, pois a folga do percurso é superior a $0,6R$, em que R é o raio da 1ª zona de Fresnel. Para 100 metros, a folga em relação à estrutura do topo é de aproximadamente $0,6R$, ou seja, espaço livre e terra plana levam ao mesmo valor da atenuação. A partir deste ponto, para distâncias maiores, o mecanismo é o de terra plana com o raio refletido no topo da plantação. O RMSE para o modelo de terra plana com o expoente ajustado é igual a 5,64. O valor do expoente é igual a 4,017. Os gráficos das Figuras 6.21 e 6.22 apresentam as medições coletadas com os terminais acima da plantação seguindo o corredor do tipo A, e os modelos de Friis e de terra plana.

Para as medições com o receptor abaixo, parte do campo é refletido pelo topo e absorvido pelas folhas e arames que possuem condutividade. Logo, percebe-se uma maior atenuação e menor alcance com relação aos outros casos. Foram ajustadas as equações linear e logarítmica. A Tabela 6.9 apresenta os valores de n , RMSE e R^2 .

Quando um terminal está acima da estrutura e o outro abaixo o ângulo de incidência na estrutura é muito pequeno e a vegetação no topo e a rede de fios afetam a propagação de uma forma difícil de estabelecer em função dos dados existentes. É necessário realizar um maior número de medidas para que se possa fixar o comportamento da atenuação. De qualquer forma, os valores de n encontrados são maiores do que os outros casos, que pode ser explicado pela atenuação causada pelas folhas e, no caso de 45° , soma-se o mecanismo de difração pelos obstáculos. Os melhores ajustes com relação ao RMSE e o R^2 são apresentados na Tabela 6.10.

6.5 – Conclusões

Neste capítulo foram apresentados ajustes para os modelos existentes na literatura e interpretações para os resultados obtidos com base nos conceitos de propagação discutidos no Capítulo 4.

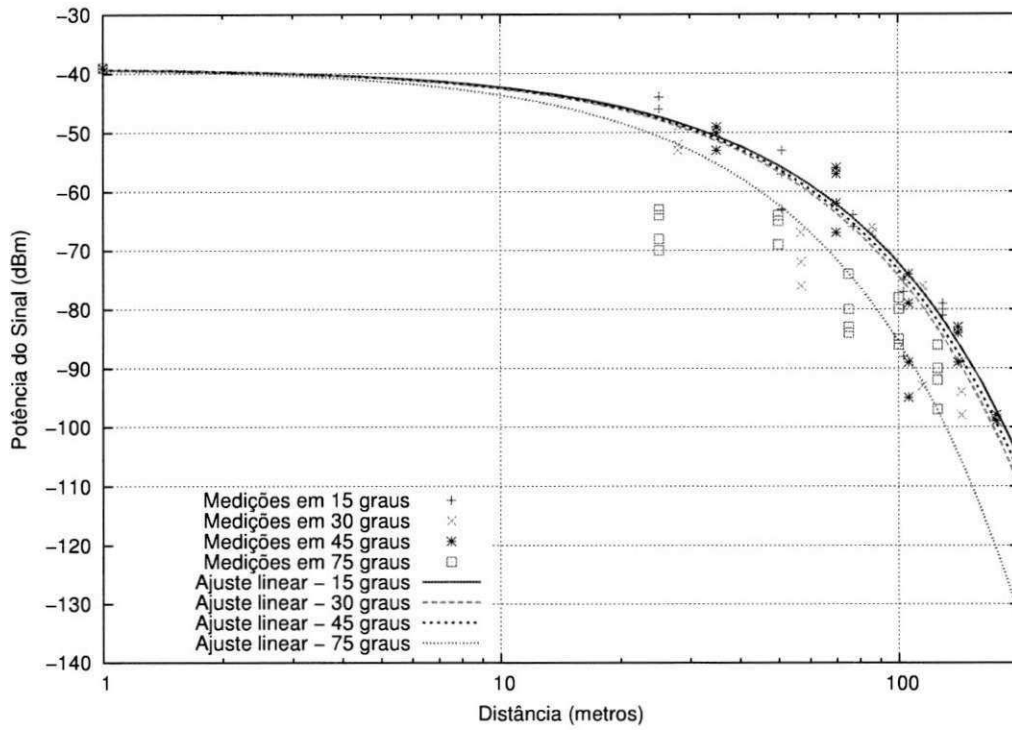


Figura 6.18 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos lineares para cada ângulo (escala logarítmica para a distância).

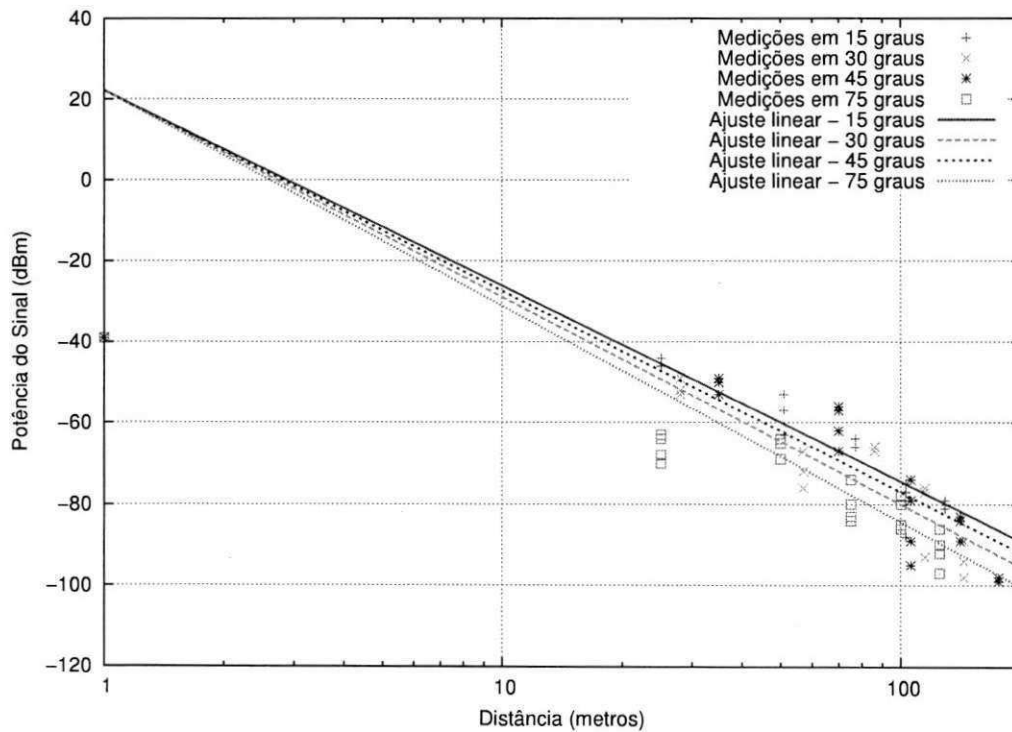


Figura 6.19 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos logarítmicos para cada ângulo (escala logarítmica para a distância).

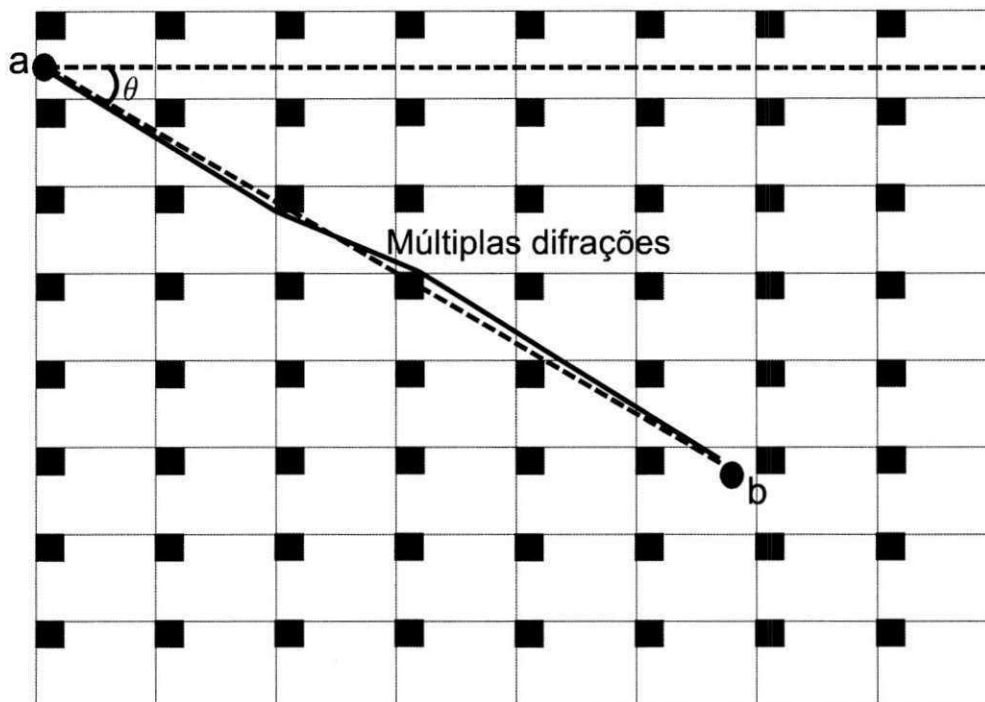


Figura 6.20 – Diagrama da simplificação realizada para estimativa do número de obstáculos entre os nós.

Entrada: Ângulo θ

Saída: Vetor com o número de obstáculos entre os nós em cada ponto de medição

// x é o incremento para distância percorrida ao longo do eixo de referência

// x_{max} é a distância máxima alcançada no eixo de referência

enquanto $x \leq x_{max}$ **faça**

 // la é a largura do corredor do tipo A

enquanto $i \leq x/la$ **faça**

$i++$;

 // calcula o comprimento do cateto oposto a θ

 // pos é a distância do nó fixo do eixo de referência

$dist = la * i * \tan(\theta) + pos$;

 // calcula o número de corredores do tipo B

 // ao longo do cateto oposto a θ

$numero = \lfloor dist/lb \rfloor$;

 // se a componente principal toca no obstáculo

 // incremente o número de obstáculos

se $(dist - numero * lb \leq dt)$ **então**

$n++$;

fim

$numero_de_obstaculos[j] = n$;

$j++$;

$x = x + 25$;

fim

fim

Algoritmo 1: Algoritmo para cálculo do número de obstáculos entre o transmissor e o receptor.

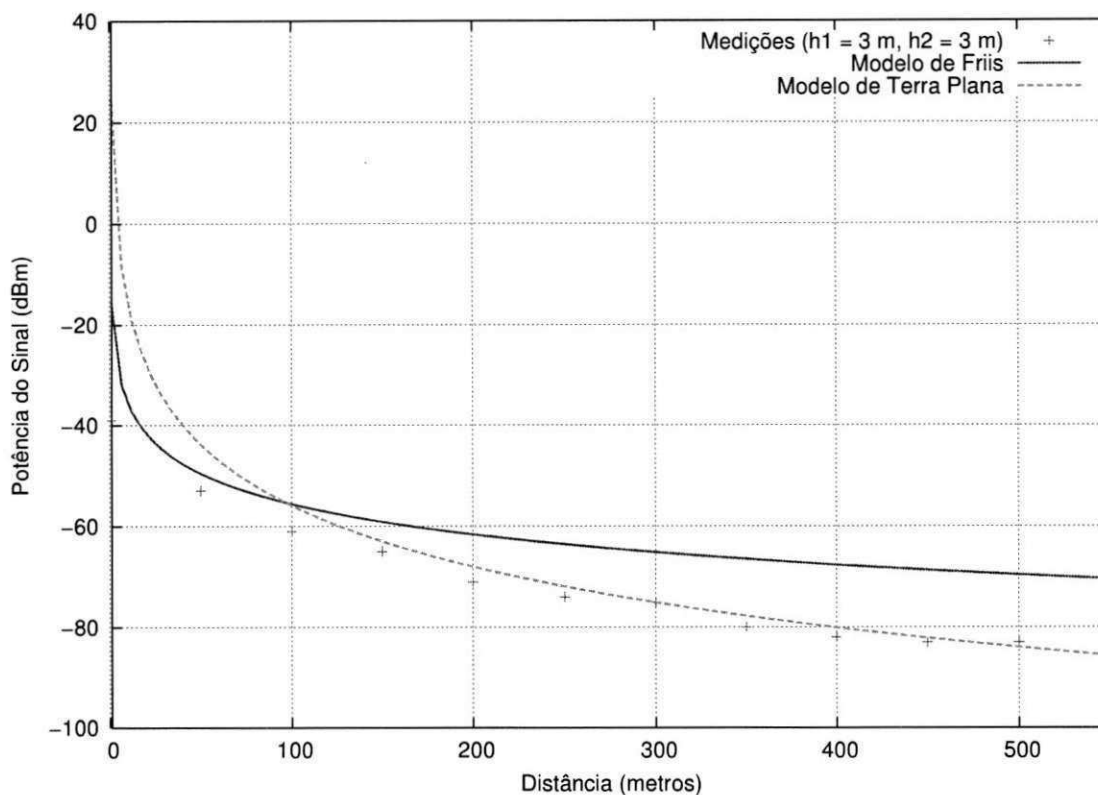


Figura 6.21 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana para o caso dos dois nós acima da plantação (escala logarítmica para a distância).

Tabela 6.9 – Valores de n , RMSE e R^2 para o caso do nó fixo acima e o receptor abaixo da plantação.

Ângulo	Ajuste	n	RMSE (dBm)	R^2
0°	linear	0,3035	7,622	0,7039
0°	logarítmico	5,345	6,805	0,764
45°	linear	0,4035	3,294	0,9618
45°	logarítmico	5,736	12,7	0,4328

Tabela 6.10 – Resumo dos melhores ajustes obtidos com relação ao RMSE e o R^2 .

Ambiente	Modelo/Ajuste	Expoente	RMSE (dBm)	R^2	Alcance Estimado (m)
Corredor A	Terra plana (1 m)	3,29	6,96	-	4198,56
	Terra plana (0,6 m)	3,25	6,95	-	3397,58
	Terra plana (0,4 m)	3,25	6,28	-	2647,32
	Terra plana (0,2 m)	3,25	6,68	-	1728,05
Corredor B	Log-distância	4,54	3,57	0,94	422,23
Diagonal	Log-distância	5,06	2,69	0,98	226,85
Dois Terminais Acima	Terra plana (1 m)	4,02	5,64	-	922,94
Um Terminal Acima	Log-distância (0°)	5,34	6,81	0,76	170,69
	Linear (45°)	0,4	3,29	0,96	120

Com relação ao corredor do tipo A, a plantação forma um guia de ondas em que as placas paralelas são formadas pela parte superior da plantação e pelo solo. Percebeu-se, também, uma dependência com a altura que foi comprovada pelo ajuste do modelo de terra plana com

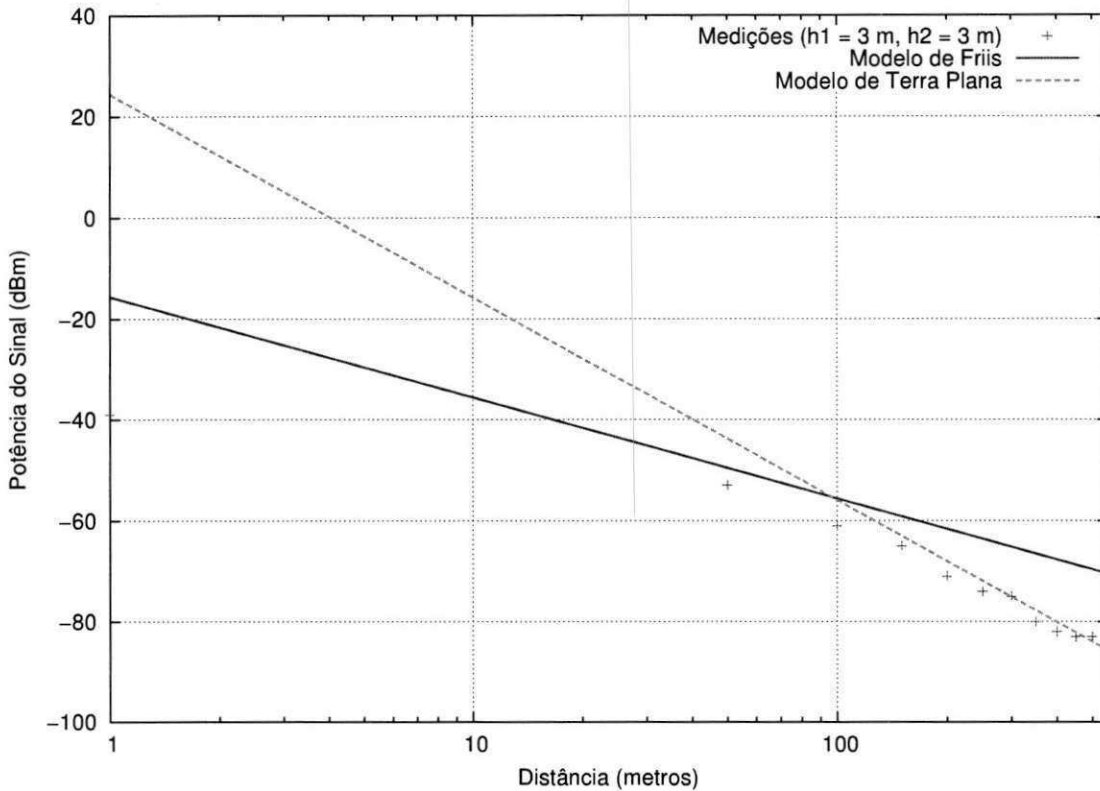


Figura 6.22 – Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana para o caso dos dois nós acima da plantação (escala logarítmica para a distância).

um fator de correção para o expoente. Com a aplicação do método LAR, foi constatado que o decaimento não é proporcional ao inverso da quarta potência da distância.

Tendo em consideração o corredor do tipo B, os principais fatores de atenuação são o espalhamento e a absorção pela vegetação. Foram avaliados os ajustes logarítmico e linear considerando as medições feitas em todas as alturas. Também foi realizado um ajuste em função da altura em que a dependência com a altura é exponencial.

Para a diagonal, foram avaliados o modelo de Weissberger modificado, o ajuste do modelo log-distância e um ajuste linear levando em consideração todas as medições feitas na diagonal. Comparando os expoentes com os obtidos para o corredor do tipo B, verifica-se que o decaimento é mais rápido devido às múltiplas difrações que ocorrem no caminho entre os terminais. A partir dos experimentos feitos até o momento, não foi possível constatar uma maneira de relacionar, empiricamente, o ângulo e o número de obstáculos com o expoente da distância. Mais experimentos devem ser elaborados, como também deve ser realizado um estudo analítico com o objetivo de produzir uma equação satisfatória.

No que concerne às medições feitas com o terminal fixo acima da plantação, constatou-se que o modelo de terra plana é adequado já que a energia é refletida no topo da plantação assim como acontece no solo. Para a propagação de cima para baixo da plantação, não foi possível obter um ajuste adequado visto que as equações escolhidas obtiveram baixo R^2 . Neste caso, o

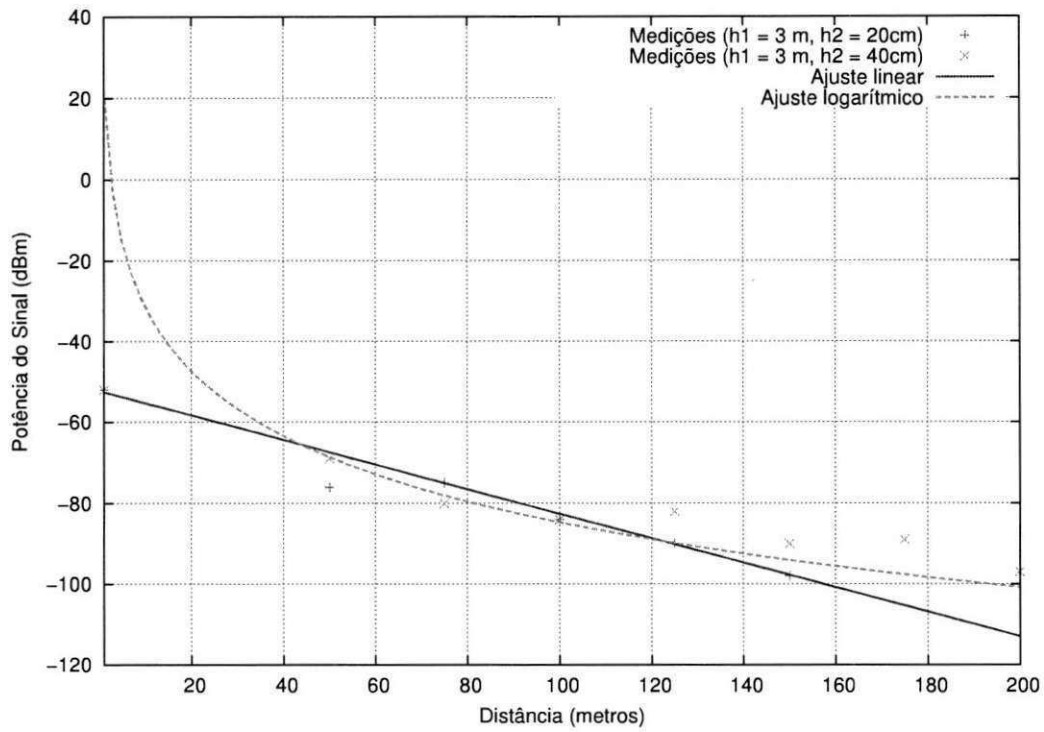


Figura 6.23 – Potência recebida (dBm) em função da distância e equações de ajuste linear e logarítmico o caso do receptor abaixo da planta no corredor (escala linear para a distância).

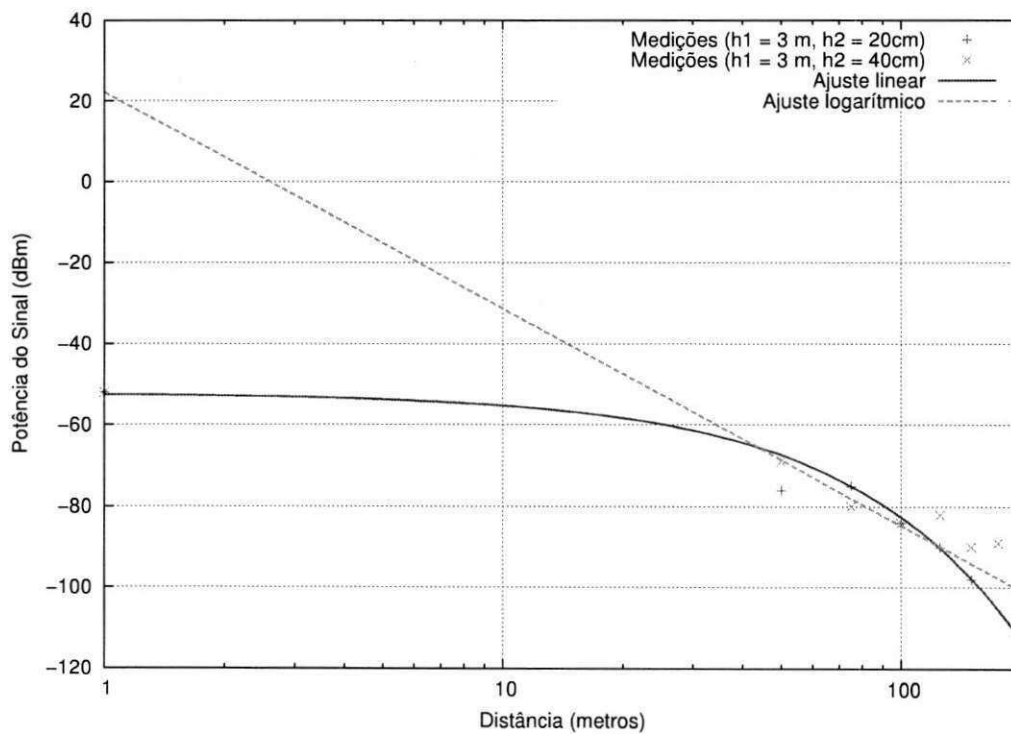


Figura 6.24 – Potência recebida (dBm) em função da distância e equações de ajuste linear e logarítmico o caso do receptor abaixo da planta no corredor (escala logarítmica para a distância).

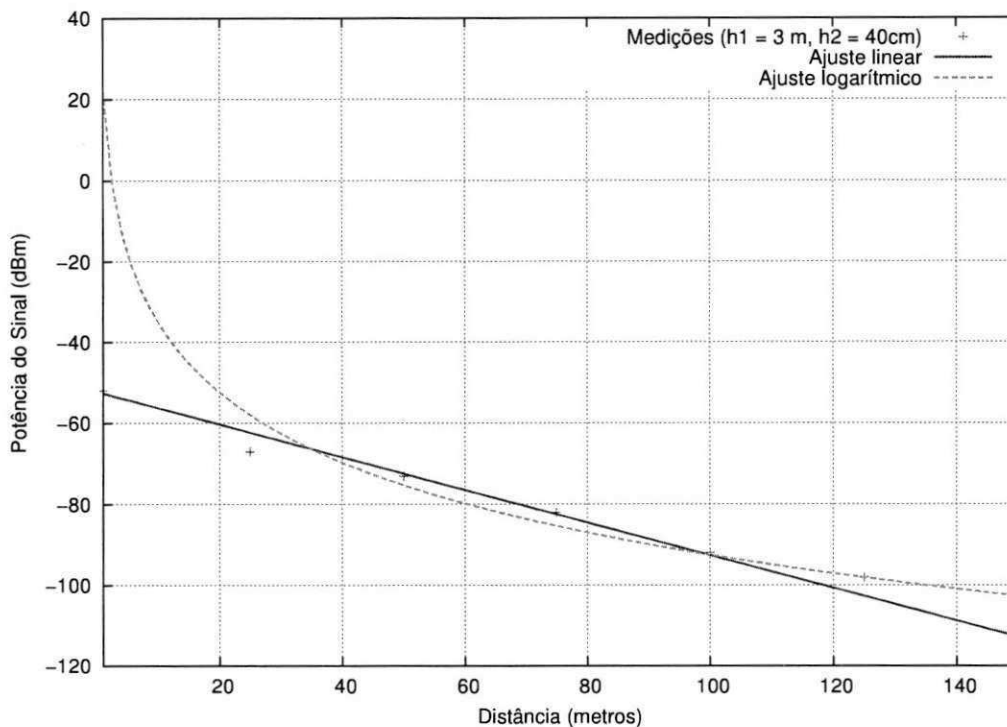


Figura 6.25 – Potência recebida (dBm) em função da distância e equações de ajuste linear e logarítmico o caso do receptor abaixo da plantação - 45° (escala linear para a distância).

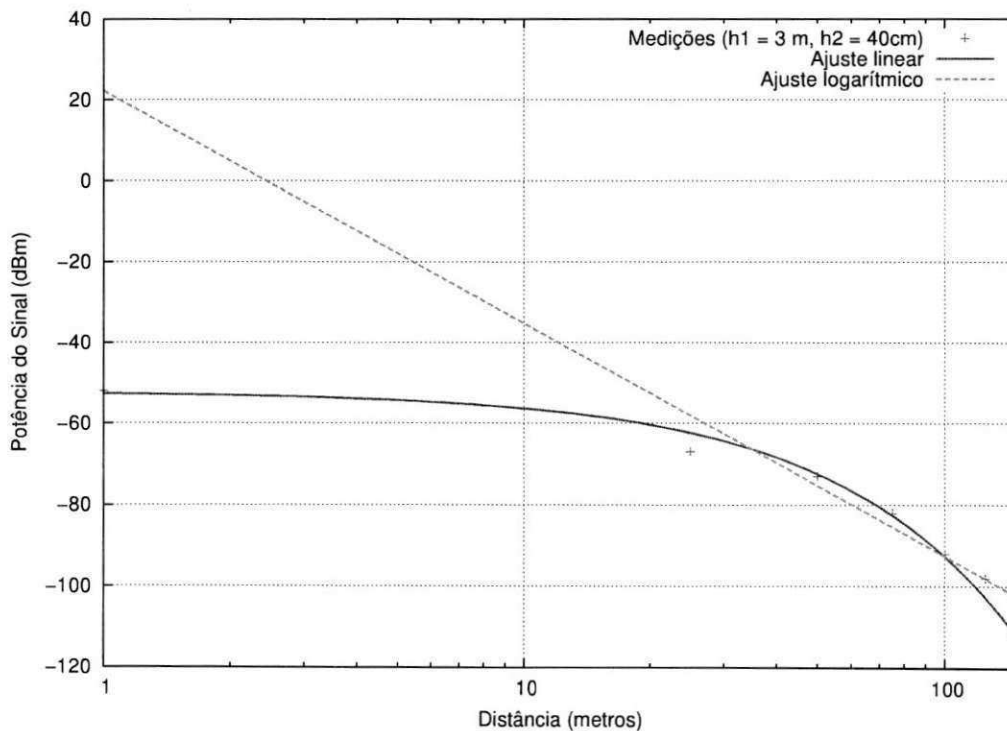


Figura 6.26 – Potência recebida (dBm) em função da distância e equações de ajuste linear e logarítmico o caso do receptor abaixo da plantação - 45° (escala logarítmica para a distância).

ângulo de incidência na estrutura é muito pequeno e a vegetação no topo e a rede de fios afetam a propagação de uma forma difícil de estabelecer em função dos dados existentes.

Considerações Finais e Trabalhos Futuros

As redes de sensores sem fio vêm sendo pesquisadas como solução para monitoramento de ambientes agrícolas, com o objetivo de extrair informação que permita economizar recursos, tornando as práticas agrícolas sustentáveis. Além disso, a aplicação das tecnologias de sensoriamento podem aumentar o lucro dos fazendeiros, determinando o tempo certo de colheita e atuando na detecção de pragas. Portanto, é fundamental que o processo de implantação dos sensores seja barato, bem como a manutenção da rede. Como discutido na literatura, os protocolos devem ser desenvolvidos de forma a maximizar o tempo de vida da rede e estratégias devem ser adotadas para que o canal de comunicações tenha boa qualidade.

Duas abordagens são utilizadas para a implantação de RSSFs. Na primeira, os nós sensores são colocados no ambiente de maneira aleatória para reduzir o tempo de implantação. Na segunda abordagem, estuda-se o ambiente de propagação de maneira a levantar os custos e otimizar a quantidade de dispositivos utilizados. Em aplicações agrícolas, a localização dos dispositivos é importante de maneira a preservá-los no caso de ambientes hostis para os nós sensores. Por outro lado, a área de cobertura fornece mais informação para o projetista otimizar a rede, com a utilização correta de protocolos de roteamento eficientes.

Esta dissertação apresenta um estudo sobre a propagação em plantações de uva na região do Vale do São Francisco. As principais contribuições são a identificação e interpretação dos fenômenos de propagação no ambiente estudado, assim como a metodologia adotada para a obtenção dos parâmetros dos modelos da literatura. O ambiente pesquisado possui características que favorecem alguns mecanismos de propagação dependendo da situação.

A região foi dividida em cinco áreas, caracterizadas por mecanismos de propagação dominantes diferentes. O corredor do tipo A é livre de obstáculos e forma uma estrutura que favorece a propagação como em um guia de placas paralelas, muito embora exista uma dependência com a altura verificada. No corredor do tipo B, o espalhamento e absorção causados pela vegetação, que é mais densa, aumenta a atenuação do sinal comparando com a propagação no corredor do tipo A. A propagação na diagonal é afetada pelas múltiplas difrações ao redor dos troncos das videiras que eleva o expoente da distância. Quando os dois transmissores estão acima da plantação, considera-se a estrutura do topo como sendo o solo na propagação por terra plana. No caso em que há um terminal acima e outro abaixo, o expoente do modelo matemático aumenta diminuindo, o alcance consideravelmente. A interpretação do que ocorre com relação à

propagação neste caso não foi feita, por se tratar de uma geometria mais complexa.

Pretende-se, como trabalhos futuros,

- obter um modelo matemático para a propagação em ambientes com vegetação em situações em que ocorra canalização, tendo como parâmetros, por exemplo, a altura da cobertura, a impedância intrínseca do ambiente e os parâmetros constitutivos da vegetação e do solo;
- desenvolver um modelo matemático para a propagação em ambientes agrícolas com obstáculos, tendo como parâmetros, por exemplo, o raio dos troncos das árvores e a disposição delas na plantação;
- realizar um estudo mais profundo sobre a propagação a partir de um ponto acima da copa das plantas, em plantações que possuam características similares às plantações de uva;
- realizar testes com vários nós XBee em ambientes de agricultura de precisão, para a verificar interferência, desempenho da rede e tempo de vida dos nós;
- avaliar a relação entre a potência recebida por um nó e a perda de pacotes;
- desenvolver uma aplicação que permita gerenciar todos os aspectos de uma rede de sensores sem fio, bem como apresentar as informações de maneira clara e eficiente para o usuário;
- desenvolver uma aplicação que permita, com base nos dados do ambiente, otimizar a quantidade de nós sensores com o objetivo de minimizar os custos de implantação e de manutenção da rede.

7.1 – Artigos Publicados

Os seguintes artigos foram publicados:

1. CORREIA, F. P.;ALENCAR, M. S.;SOARES, F. B.;LEAL, B.; LOPES, W. T. A.. Propagation Analysis in Precision Agriculture Environment using XBee Devices. In: International Microwave and Optoelectronics Conference, 2013, Rio de Janeiro. 2013 SBMO | IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, 2013;
2. BACURAU, R. M.; LEAL, B. G.;CARVALHO, F. B. S.; CORREIA, F. P.;SOARE, S. A. F.. Sistema Web de Gestão de Estações Elevatórias de Água. *Evolvere Scientia*, v. 2, p. 95-110, 2013;
3. PEREIRA D. M. G.;CORREIA F. P.. Sistema Web para Gerenciamento de uma Rede de Sensores Sem Fio aplicada à Agricultura de Precisão. In: VI Congresso Tecnológico TI & Telecom InfoBrasil, 2013, Fortaleza.

Apêndice A

A.1 – Materiais e Métodos

A metodologia adotada para realizar as medições apresentada no Capítulo 5, na Seção 5.1, foi utilizada para realizar os experimentos preliminares que permitiram identificar os mecanismos de propagação para as regiões da plantação. As próximas seções apresentam os resultados preliminares obtidos.

A.2 – Experimento 1

As medições deste experimento foram realizadas em uma fazenda de produção uva na região do Vale do São Francisco localizada no projeto de irrigação Nilo Coelho.

A.2.1 – Propagação do sinal no corredor do tipo A

As funções escolhidas, inicialmente, para serem ajustadas aos dados experimentais utilizando o método LAR foram:

- função exponencial $\rightarrow p_r = ae^{bd}$;
- função geométrica $\rightarrow p_r = ad^b + c$; e
- função polinomial $\rightarrow p_r = a_1x^{n-1} + a_2x^{n-2} + \dots + a_{n-1}x + a_nx^0$.

Com o auxílio do Matlab, foi possível obter os parâmetros das funções. A partir do ajuste das funções na ferramenta, obteve-se

- para regressão exponencial, $p_r = 40,39e^{0,001151d}$;
- para regressão geométrica $p_r = 0,1251d^{0,8782} + 38,87$; e
- para regressão polinomial $p_r = 0,000000511x^3 - 0,0003164x^2 + 0,1067x + 38,89$.

Na Tabela A.1, são apresentadas as estatísticas obtidas a partir da ferramenta. A Figura A.1 apresenta potência recebida em função da distância utilizando funções mencionadas, como também as curvas obtidas.

Tabela A.1 – Estatísticas da regressão não-linear aplicada sobre os dados experimentais na propagação no corredor do tipo A.

Estatística	Exponencial	Geométrica	Polinomial
R^2	0,9997	0,9995	0,9991
RMSE (<i>Root Mean Square Error</i>)	0,13	0,1834	0,238

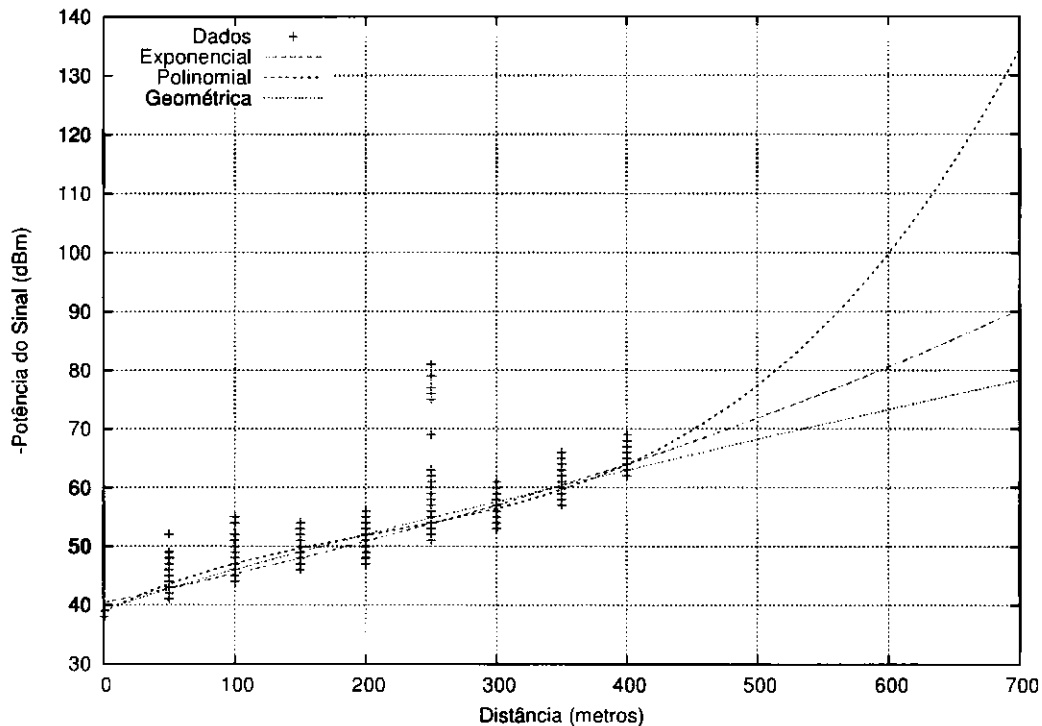


Figura A.1 – Potência do sinal recebido em função da distância no corredor do tipo A: dados experimentais e regressões.

A.2.2 – Propagação do sinal na diagonal - 45°

Utilizando o mesmo procedimento para ajuste das curvas na propagação ao longo do corredor do tipo A, obteve-se

- para regressão exponencial, $p_r = 45,85e^{0,003191d} - 7,317e^{-0,04475d}$;
- para regressão geométrica $p_r = 0,3536d^{0,9282} + 38,65$; e
- para regressão polinomial $p_r = -0,0000219x^2 + 0,246x + 38,75$.

Na Tabela A.2, são apresentadas as estatísticas obtidas a partir da ferramenta. A Figura A.2 apresenta as curvas da potência recebida em função da distância utilizando funções mencionadas.

Tabela A.2 – Estatísticas da regressão não-linear aplicada sobre os dados experimentais em diagonal.

Estatística	Exponencial	Geométrica	Polinomial
R^2	0,9998	0,9999	0,9852
RMSE (<i>Root Mean Square Error</i>)	0,2579	0,1948	0,1948

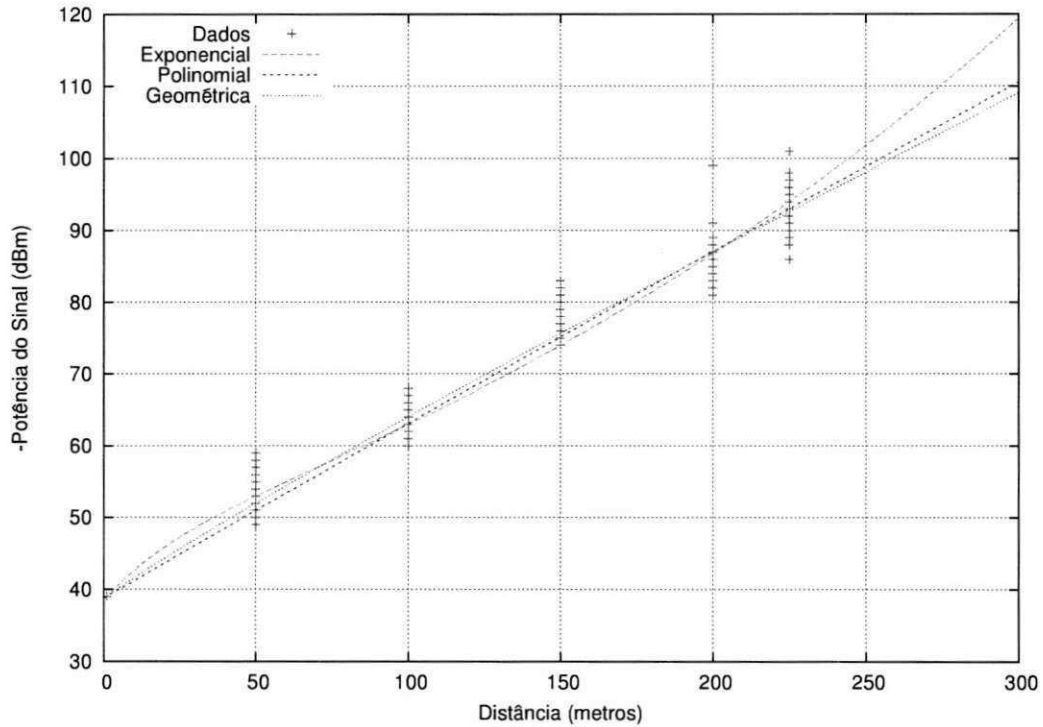


Figura A.2 – Potência do sinal recebido em função da distância na diagonal: dados experimentais e regressões.

A.3 – Experimento 2

As medições deste experimento foram realizadas em duas fazenda de produção uva, na região do Vale do São Francisco, em Petrolina. Uma das fazendas é localizada no projeto de irrigação C3, com área de cultivo de aproximadamente 4 hectares, e a outra no Vale das Uvas, com área de cultivo de aproximadamente 6 hectares.

A.3.1 – Medições em 45° - Fazenda no C3

As expressões obtidas foram

- para regressão polinomial $p_r = 0,000001538x^3 - 0,001057x^2 + 0,4375x + 38,56$, e
- para regressão geométrica $p_r = 1,035x^{0,7622} + 37,96$.

Na Tabela A.3, são apresentadas as estatísticas obtidas a partir da ferramenta. A Figura A.3 apresenta as curvas da potência recebida em função da distância.

Tabela A.3 – Estatísticas da regressão não-linear aplicada sobre os dados experimentais (45°).

Estatística	Polinomial	Geométrica
R^2	0,9995	0,9694
RMSE (Root Mean Square Error)	0,4106	3,175

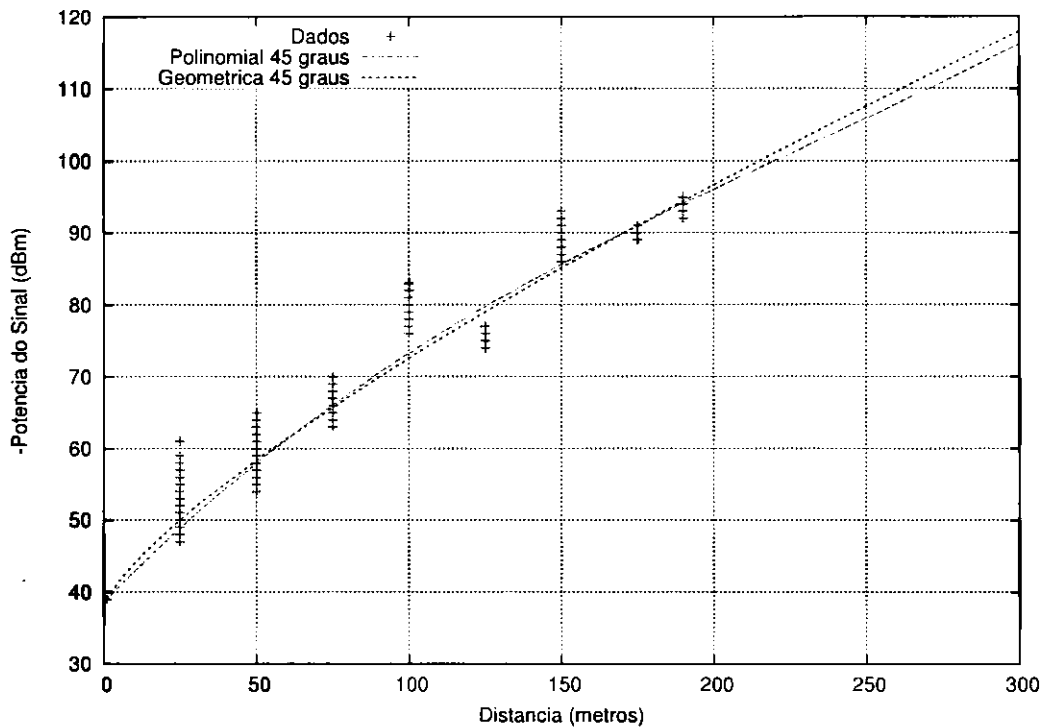


Figura A.3 – Potência do sinal recebido em função da distância: dados experimentais e regressões.

A.3.2 – Medições em 30° - Fazenda no C3

As funções escolhidas para serem ajustadas foram a exponencial, polinomial e geométrica. As expressões obtidas foram

- para a regressão exponencial $p_r = 53.05e^{0.003092x} - 14.81e^{-0.04098x}$;
- para regressão polinomial $p_r = 0.00001375x^3 - 0.004384x^2 + 0.6467x + 38.36$; e
- para regressão geométrica $p_r = 1.38x^{0.7057} + 37.62$;

Na Tabela A.4, são apresentadas as estatísticas obtidas a partir da ferramenta. A Figura A.4 apresenta as curvas da potência recebida em função da distância.

Tabela A.4 – Estatísticas da regressão não-linear aplicada sobre os dados experimentais (30°).

Estatística	Exponencial	Polinomial	Geométrica
R^2	0,9994	0,9995	0,9995
RMSE (Root Mean Square Error)	0,4347	0,3827	0,3732

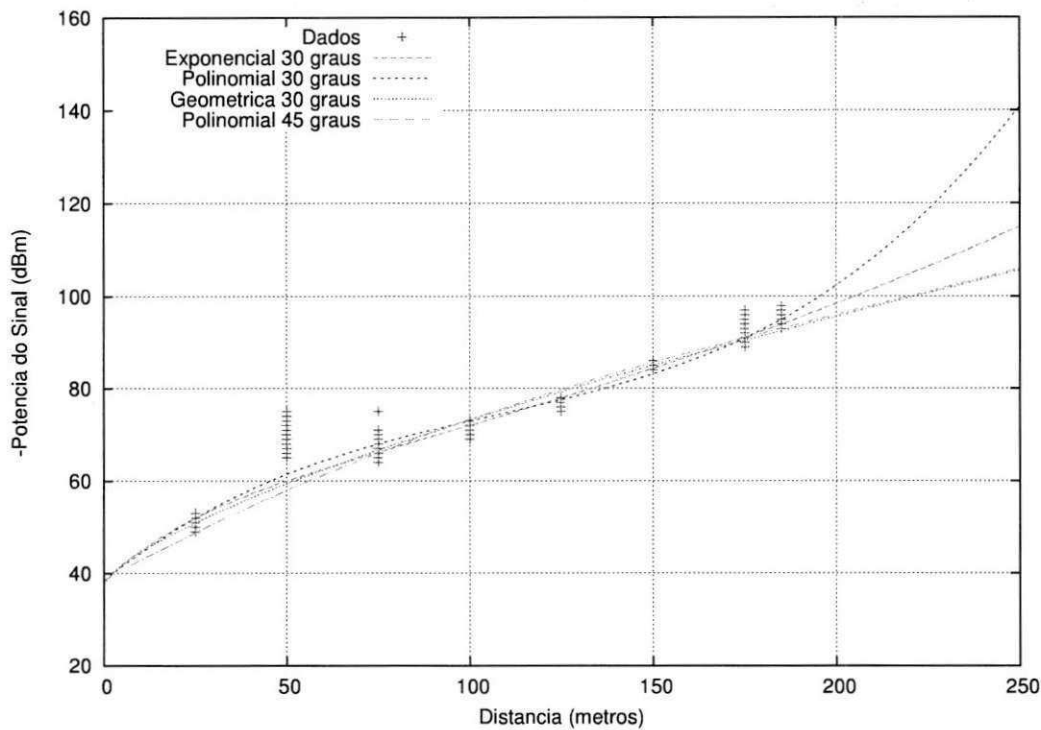


Figura A.4 – Potência do sinal recebido em função da distância: dados experimentais e regressões.

A.3.3 – Medições no Corredor de 90° - Fazenda no Vale das Uvas

As medições, nessa etapa, foram realizadas em uma fazenda no Vale das Uvas. Para a propagação no corredor de 90°, as funções escolhidas para serem ajustadas foram a exponencial, polinomial e geométrica. As expressões obtidas foram

- para a regressão exponencial $p_r = 44.55e^{0.002033x} - 5.984e^{-0.05847x}$;
- para regressão polinomial $p_r = 0.0000008635x^3 - 0.0004373x^2 + 0.1941x + 38.81$; e
- para regressão geométrica $p_r = 0.08043x^{1.106} + 38.92$;

Na Tabela A.5, são apresentadas as estatísticas obtidas a partir da ferramenta.

Tabela A.5 – Estatísticas da regressão não-linear aplicada sobre os dados experimentais (30°).

Estatística	Exponencial	Polinomial	Geométrica
R^2	0,9925	0,9906	0,9835
RMSE (<i>Root Mean Square Error</i>)	1,691	1,891	2,51

A.3.4 – Medições em 15° - Fazenda no Vale das Uvas

As funções escolhidas para serem ajustadas foram a exponencial, polinomial e geométrica, de forma a comparar com as funções obtidas nos outros casos, embora não tenha sido possível obter um bom ajuste da função exponencial. Logo, as expressões obtidas foram

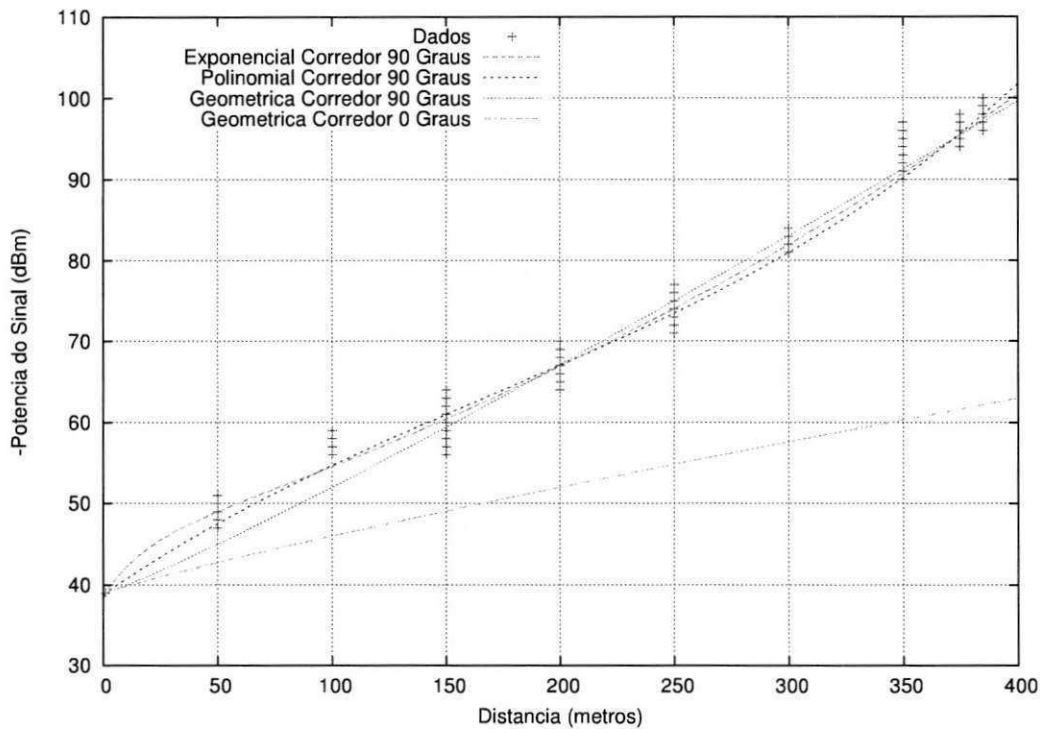


Figura A.5 – Comparação das curvas dos corredores de 0° e 90°.

- para regressão polinomial $p_r = 0,0000001662x^3 - 0,0006877x^2 + 0,3748x + 38,69$;
- e
- para regressão geométrica $p_r = 1,744x^{0,6329} + 37,26$;

Na Tabela A.6, são apresentadas as estatísticas obtidas a partir da ferramenta. A Figura A.6 apresenta as curvas da potência recebida em função da distância.

Tabela A.6 – Estatísticas da regressão não-linear aplicada sobre os dados experimentais (15°).

Estatística	Exponencial	Polinomial	Geométrica
R^2	-	0,9995	0,9998
RMSE (Root Mean Square Error)	-	0,3662	0,2529

A.3.5 – Medições em 30° - Fazenda no Vale das Uvas

As funções escolhidas para serem ajustadas foram a exponencial, polinomial e geométrica, de forma a comparar com as funções obtidas nos outros casos. As expressões obtidas foram

- para a regressão exponencial $p_r = 64,73e^{0,001612x} - 26,4e^{-0,02158x}$;
- para regressão polinomial $p_r = 0,000006052x^3 - 0,002859x^2 + 0,5794x + 38,42$; e
- para regressão geométrica $p_r = 2,999x^{0,542} + 36$;

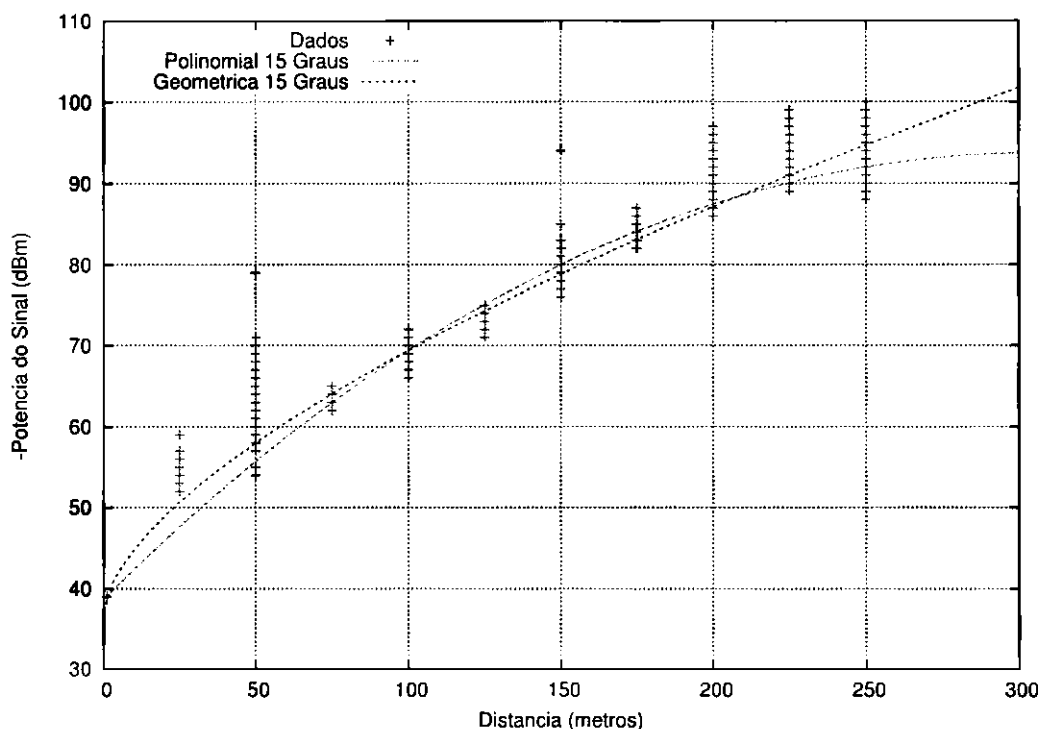


Figura A.6 – Potência do sinal recebido em função da distância: dados experimentais e regressões.

Na Tabela A.7, são apresentadas as estatísticas obtidas a partir da ferramenta. A Figura A.7 apresenta as curvas da potência recebida em função da distância.

Tabela A.7 – Estatísticas da regressão não-linear aplicada sobre os dados experimentais (30°).

Estatística	Exponencial	Polinomial	Geométrica
R^2	0,9994	0,9995	0,9996
RMSE (<i>Root Mean Square Error</i>)	0,3901	0,3797	0,3104

A Figura A.8 apresenta as curvas obtidas para os ângulos 0°, 15°, 30°, 45° e 90°, a partir da regressão geométrica.

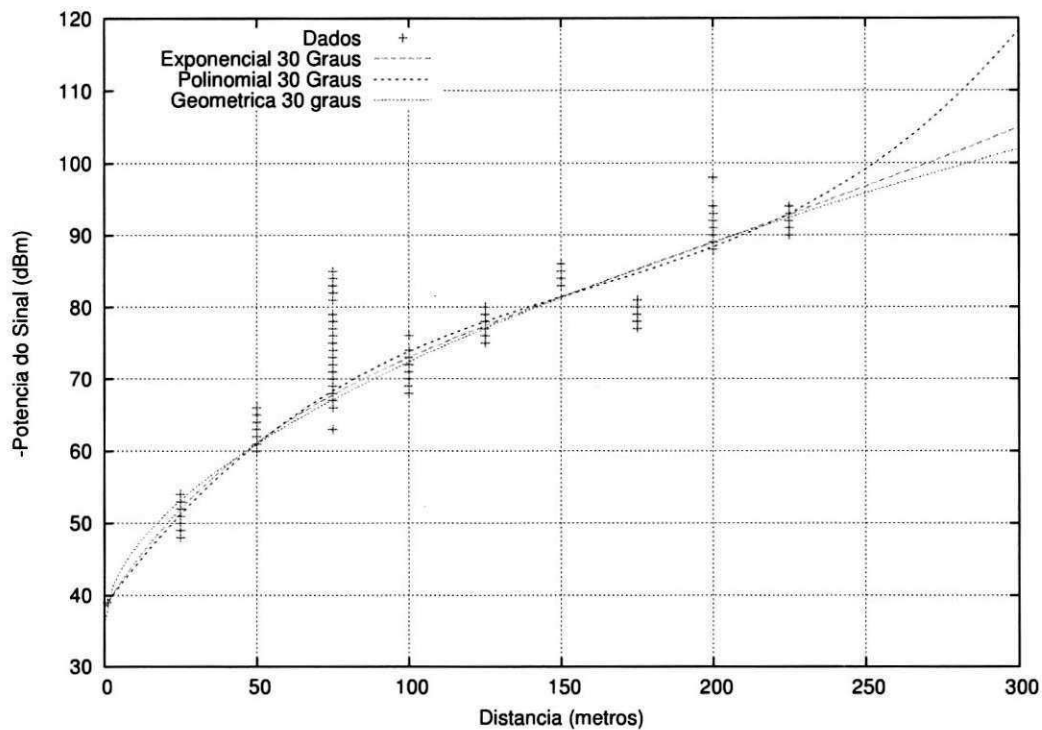


Figura A.7 – Potência do sinal recebido em função da distância: dados experimentais e regressões.

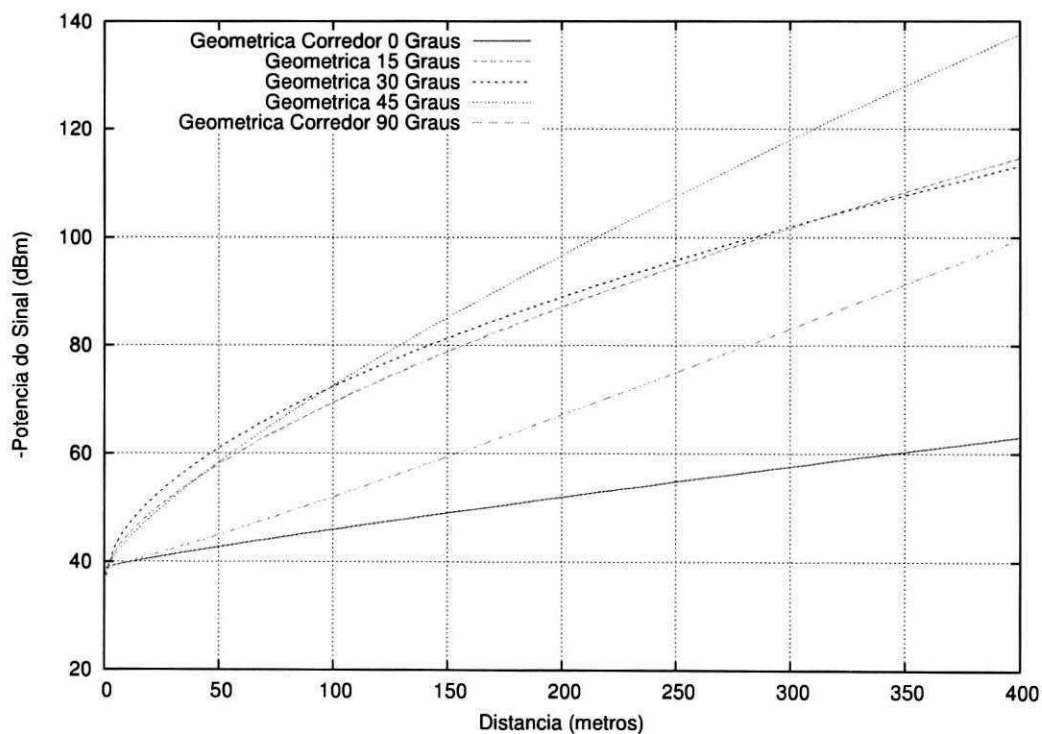


Figura A.8 – Comparação das curvas obtidas para os ângulos 0°, 15°, 30°, 45° e 90°.

Referências Bibliográficas

- [1] W. Maohua, "Possible adoption of precision agriculture for developing countries at the threshold of the new millennium," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 30, no. 1 - 3, pp. 45 – 50, 2001.
- [2] F. B. Carvalho et al, "Aplicacoes ambientais de redes de sensores sem fio," *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, vol. 2, no. 1, 2012.
- [3] Aqeel-ur-Rehman et al., "A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture," *Comput. Stand. Interfaces*, 2011.
- [4] T. Wark et al., "Transforming agriculture through pervasive wireless sensor networks," *Pervasive Computing - IEEE Computer Society*, 2007.
- [5] K. Sohraby et al, *Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications*. Wiley, 2007.
- [6] R. Liu et al, "Relay node placement for wireless sensor networks deployed in tunnels," *IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, 2010.
- [7] J. Tang et al, "Relay node placement in large scale wireless sensor networks," *Computer Communications*, vol. 29, 2006.
- [8] R. Bellazreg et al, "Coverage control and irregular radio propagation in wireless sensor networks," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, 2009.
- [9] S. Li e H. Gao, "Propagation characteristics of 2.4 GHz wireless channel in cornfields," *IEEE 13th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 2011.
- [10] J. A. Gay-Fernández et al, "Propagation analysis and deployment of a wireless sensor network in a forest," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 106, pp. 121–145, 2010.
- [11] J. P. Lima e E. A. Miranda, "Fruticultura irrigada no vale do são francisco: incorporação tecnológica, competitividade e sustentabilidade," *Revista Econômica do Nordeste*, vol. 32, pp. 611–632, 2001.

- [12] IBGE, "Posição ocupada pelos 100 maiores municípios, em relação ao valor adicionado bruto da agropecuária e participações percentuais relativa e acumulada, segundo os municípios e as respectivas unidades da federação - 2010," 2010.
- [13] M. S. Alencar e V. C. da Rocha Jr., *Communication Systems*. Springer, 2005.
- [14] M. D. Yacoub, *Foundations of mobile radio engineering*. São Paulo: CRC Press, 1993.
- [15] K. Sohrabi et al., "Protocols for self-organization of a wireless sensor network," *IEEE Personal Communications*, 2000.
- [16] I. F. Akyildiz et al., "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, 2002.
- [17] A. A. F. Loureiro et al., "Rede de sensores sem fio," *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, pp. 179–226, 2003.
- [18] W. R. Heinzelman et al., "Energy efficient communication protocols for wireless microsensor networks," *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference Systems Sciences (HICSS'00)*, pp. 3005–3014, 2000.
- [19] C. Shen et al., "Sensor information networking architecture and applications," *IEEE Personal Communications*, 2001.
- [20] M. P. Portela et al., "If-ant: a bio-inspired cooperative cross-layer design for wireless sensor networks," *22^o IEEE Personal Indoor Mobile Radio Communications*, 2011.
- [21] M. Govindrajana e P. Balamurugam, "Wireless sensor networks: a survey," *IRACST - International Journal of Computer Networks and Wireless Communications (IJCNWC)*, vol. 2, no. 5, 2012.
- [22] J. M. Neto, "Sistema de localização baseado em redes de sensores sem fio," Master's thesis, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2010.
- [23] S. R. Caprile, *Desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos ZigBee y 802.15.4*. Gran Aldea Editores - GAE, 2009.
- [24] Digi International Inc., "XBee/XBee-Pro ZB RF modules," *XBee/XBee-Pro ZB RF Modules Datasheet*, 2012.
- [25] S. A. Soares, *Rede de sensores sem fio para localização e monitoramento de pequenos ruminantes*. UNIVASF: Trabalho de Conclusão de Curso, 2012.
- [26] IEEE, "IEEE standard for information technology-part 15.4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low rate wireless personal area networks (WPANs)," *IEEE Computer Society*, 2003.

- [27] J. V. Stafford, "Implementing precision agriculture in the 21st century," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 76, no. 3, pp. 267 – 275, 2000.
- [28] F. J. Pierce e P. Nowak, "Aspects of precision agriculture," vol. 67, pp. 1 – 85, 1999.
- [29] H. Auernhammer, "Precision farming - the environmental challenge," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 30, no. 1-3, pp. 31 – 43, 2001.
- [30] F.J. Pierce e T.V. Elliott, "Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in Eastern Washington," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 61, no. 1, pp. 32 – 43, 2008.
- [31] S. Liaghat e S. K. Balasundram, "A review: the role of remote sensing in precision agriculture," *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, vol. 5, no. 1, 2010.
- [32] S. Cox, "Information technology: the global key to precision agriculture and sustainability," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 36, no. 2 - 3, pp. 93 – 111, 2002.
- [33] Environmental Systems Research Institute (ESRI), *Understanding GIS: The ARC/INFO Method*. ESRI, Wiley, 1999.
- [34] A. Baggio, "Wireless sensor networks in precision agriculture,"
- [35] J. C. Giacomini et al, "Estimating vegetation water content with wireless sensor network communication signals," *Instrumentation and Measurement Technology Conference - IMTC*, 2007.
- [36] Aqeel-ur-Rehman et al., "Crop irrigation control using wireless sensor and actuator network (WSAN)," *International Conference on Information and Emerging Technologies (ICIET)*, 2010.
- [37] G. Ali et al., "A framework for development of cost-effective irrigation control system based on wireless sensor and actuator network (WSAN) for efficient water management," *International Conference on Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE)*, 2010.
- [38] M. Keshtgari e A. Deljoo, "A wireless sensor network solution for precision agriculture based on zigbee technology," *Wireless Sensor Network*, vol. 4, no. 1, pp. 25–30, 2012.
- [39] U. A. Camargo et al, "Progressos na viticultura brasileira," *Revista Brasileira de Fruticultura*, vol. Especial, pp. 144 – 149, 2011.
- [40] A. T. Gava et al, "Determinação de modelos de associação entre variáveis climáticas e ocorrência de oídio e míldio da videira no vale do são francisco," *Seminário Novas Perspectivas para cultivo da uva sem sementes da Embrapa*, 2004.

- [41] A. B. C. Czermainski e O. R. Sonego, "Influência das condições climáticas sobre a eficácia de fungicidas empregados para o controle do míldio em vitis vinífera," *Ciência Rural*, vol. 34, no. 1, pp. 5–11, 2004.
- [42] R. Bickwith et al, "Unwired wine: Sensor networks in vineyards," *Proceedings of IEEE Sensors*, 2004.
- [43] J. Burrell et al, "Vineyard computing: sensor networks in agricultural production," *IEEE Pervasive Computing*, 2004.
- [44] F. M. Weissberger, "Evaluation of a wireless sensor network applied to precision agriculture under adverse weather conditions," *Iberoamerican Journal of Applied Computing*, vol. 2, no. 1, 2012.
- [45] R. Morais et al, "A zigbee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 62, no. 2, pp. 94 – 106, 2008.
- [46] E. Peres et al, "An autonomous intelligent gateway infrastructure for in-field processing in precision viticulture," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 78, no. 2, pp. 176 – 187, 2011.
- [47] R. Liscano et al, "Network performance of a wireless sensor network for temperature monitoring in vineyards," in *Proceedings of the 8th ACM Symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, PE-WASUN '11, (New York, NY, USA), pp. 125–130, ACM, 2011.
- [48] F. Ye e W. Qi, "Design of wireless sensor node for drought monitoring in vineyards," in *Advanced Infocom Technology 2011 (ICAIT 2011), International Conference on*, pp. 1–4, 2011.
- [49] L. Bencini et al, "Agricultural monitoring based on wireless sensor network technology: real long life deployments for physiology and pathogens control," in *Third International Conference on Sensor Technologies and Applications – SENSORCOMM '09.*, pp. 372–377, 2009.
- [50] J. S. Seybold, *Introduction to RF propagation*. Wiley, 2005.
- [51] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [52] B. Sklar, "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems part I: characterization," *IEEE Communications Magazine*, vol. 34, pp. 90–100, 1997.
- [53] B. Sklar, *Digital communications: fundamentals and applications*. Englewood Cliffs, Nova Jersey: Prentice Hall, 1988.

- [54] C. Philips et al, "A survey of wireless path loss prediction and coverage mapping methods," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 15, pp. 255–270, 2013.
- [55] H. T. Friis, "A note on a simple transmission formula," *Proceedings of IRE*, pp. 254–256, 1946.
- [56] W. C. Y. Lee, *Mobile Communications Engineering*. New York: Mc Graw Hill, 1982.
- [57] W. C. Y. Lee, *Mobile Communications Design Fundamentals*. John Wiley & Sons, 1993.
- [58] J. N. C. Oliveira, "Estudo de modelos de predição para telefonia móvel celular," Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, Janeiro 2004.
- [59] M. A. Weissberger, "An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by foliage," *Electromagnetic Compatibility Analysis Center*, 1981.
- [60] S. R. Saunders e A. Aragón-Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. Wiley, 2ª ed., 2007.
- [61] Y. Dodge, *The concise encyclopedia of statistics*. Springer, 2008.
- [62] G. Lachtermacher, *Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões*. São Paulo: Pearson, 2009.
- [63] M. S. Assis, "Introdução à propagação das ondas radioelétricas," *Encontro anual em comunicações, redes e criptografia – ENCOM*, 2012.
- [64] Y. Huang e K. Boyle, *Antennas: from theory to practice*. Wiley, 2008.
- [65] J. D. Parsons, *The mobile radio propagation channel*. Wiley, 2ª ed., 1992.
- [66] W. L. Stutzman e G. A. Thiele, *Antenna theory and design*. Wiley, 2ª ed., 1998.
- [67] L. E. Vogler, "The attenuation of electromagnetic waves by multiple knife-edge diffraction," *NTIA Report*, 1981.
- [68] J. Deygolt, "Multiple knife-edge diffraction of microwaves," *IEEE Trans.*, vol. AP14, no. 4, 1966.
- [69] C. L. Giovaneli, "An analysis of simplified solutions for multiple knife-edge diffraction," *IEEE Trans.*, vol. AP32, no. 3, 1984.
- [70] W. H. Hayt e J. A. Buck, *Eletromagnetismo*. LTC, 6ª ed., 2003.
- [71] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 2ª ed., 2002.
- [72] ITU-R, *Attenuation in Vegetation*. Technical Report, 2005.

- [73] Y. S. Meng et al, "Empirical near ground path loss modeling in a forest at VHF and UHF bands," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 5, 2009.
- [74] Y. S. Meng et al, "Study of propagation loss prediction in forest environment," *Progress in Eletromagnetics Research B*, vol. 17, pp. 117–133, 2009.
- [75] E. A. de Oliveira, *Análise de Desempenho de Redes de Sensores sem Fio para o Monitoramento de Plantações Irrigadas*. Trabalho de Conclusão de Curso, UNIVASF, 2012.
- [76] R. Larson, *Estatística Aplicada*. Pearson, 2010.