

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
CENTRO TECNOLÓGICO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

BRUNO RICARDO SANTANA MELLO

MODELO DE PROPAGAÇÃO PARA AMBIENTE DE PARQUE URBANO

NITERÓI

2012

BRUNO RICARDO SANTANA MELLO

MODELO DE PROPAGAÇÃO PARA AMBIENTE DE PARQUE URBANO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a LENI JOAQUIM DE MATOS

NITERÓI

2012

BRUNO RICARDO SANTANA MELLO

MODELO DE PROPAGAÇÃO PARA AMBIENTE DE PARQUE URBANO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Aprovada em _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. LENI JOAQUIM DE MATOS - Orientadora
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. JULIO CESAR RODRIGUES DAL BELLO
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. EDUARDO RODRIGUES VALE
Universidade Federal Fluminense – UFF

Prof. Dr. GILSON ALVES DE ALECAR
Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET/RJ

Niterói
2012

Esta dissertação é dedicada primeiro a Deus, por minha vida tão repleta de felicidades e bênçãos. Aos meus sensacionais e queridos pais, por todo o amor e exemplo de vida. A minha irmã, pelo apoio e a minha noiva, pelo amor e companheirismo.

RESUMO

Os modelos de propagação servem como ferramenta de predição de cobertura de sinal rádio e são utilizados pelas empresas prestadoras de serviços de comunicações móveis. Sabendo que estes modelos perdem a precisão caso sejam utilizados em um ambiente diferente daquele para o qual os mesmos foram realizados, torna-se necessária a existência de uma variedade grande de modelos.

A vegetação é um fator importante na propagação do sinal, pois o atenua fortemente em comparação a outros ambientes. Vários são os modelos existentes para a determinação da atenuação de sinal em região de vegetação, mas têm aplicação restrita devido à grande variedade desses meios, incluindo fatores como densidade e tipo de vegetação e clima.

O aumento da consciência global sobre a preservação do ambiente fez com que aumentasse o número de parques ecológicos com o objetivo principal da preservação de espécies da flora. Assim, com o intuito de elaborar um modelo de propagação para um ambiente de parque urbano, foi realizada uma campanha de medição no Jardim Botânico de Niterói e, partindo do modelo simplificado de perda, busca-se chegar a um modelo de predição para a propagação nesses parques, dentro da faixa de 900-2400 MHz.

ABSTRACT

The propagation models are used as tools for prediction of radio signal coverage and are used by companies providing mobile communications services. Knowing that these models lose their accuracy if used in an environment different from that for which they were performed, it is necessary to have a large variety of designs.

The vegetation is an important factor in signal propagation, because through vegetation signal attenuates faster when compared to other environments. There are several existing models for the determination of signal attenuation in the forest environment, but have limited application due to the variety of environment, including such factors as density and type of vegetation and climate.

Increased global awareness about the preservation of forests has led to increase the number of ecological parks with the main objective of the preservation of species of flora. Thus, in order to develop a propagation model for an urban park environment, we performed a measurement campaign in Niteroi and Botanic Garden, based on the simplified model of loss, seeks to arrive at a prediction model for the propagation these parks, within the range of 900-2400 MHz

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço novamente àquele que tudo criou e permitiu alcançar a meus objetivos com saúde e tranquilidade: DEUS.

À Profª Dra. Leni Joaquim de Matos, pela sua dedicação na orientação e por ser em todos os momentos uma pessoa compreensível.

Agradecimentos especial ao Prof. Dr. Julio Cesar Dal Bello (UFF), pelos ensinamentos acadêmicos e extra-acadêmicos providos durante o pós-graduação.

A todos colegas, pelos longos anos de convívio, em especial ao Wilyam Meza, Walter Aliaga, Eduardo Leão, Leonardo Melo e André Luis.

A todos os professores e funcionários do Departamento e da PGSS em Engenharia de Telecomunicações, pelos ensinamentos e pela colaboração, respectivamente.

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
AGRADECIMENTOS	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
1 INTRODUÇÃO.	15
1.1 Histórico.	15
1.2 Objetivos da Dissertação.	18
1.3 Estrutura da Dissertação.	19
2 TEORIA DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.	20
2.1 Mecanismos de Propagação.	20
2.1.1 Visada direta.	21
2.1.2 Reflexão.	21
2.1.3 Difração.	21
2.1.4 Espalhamento.	23
2.1.5 Refração.	23
2.1.6 Absorção.	24
2.1.7 Despolarização.	24
2.2 Efeitos da Propagação.	24
2.2.1 Perda de Percurso.	27
2.2.2 Desvanecimento em Grande Escala.	28

2.2.3	Desvanecimento em Pequena Escala.	29
2.3	Modelos de Propagação.	31
2.3.1	Perda no Espaço Livre.	32
2.3.2	ITU-R.	32
2.3.3	FITU-R.	32
2.3.4	Decaimento Exponencial.	33
2.3.5	Decaimento Exponencial Modificado.	33
2.3.6	COST 235.	34
2.3.7	Al-Nuami.	34
3	CAMPANHA DE MEDIDAS.	36
3.1	Caracterização do Ambiente.	36
3.1.1	Rota 1.	38
3.1.2	Rota 2.	41
3.2	Planejamento das Medidas.	43
3.3	Equipamentos.	44
3.3.1	Sistema de Transmissão.	45
3.3.2	Sistema de Recepção.	51
3.4	Metodologia usada na obtenção dos Dados.	58
4	MODELO DE PROPAGAÇÃO PROPOSTO PARA AMBIENTE DE PARQUE URBANO.	60
4.1	Separação do Desvanecimento em Grande Escala do Desvanecimento em Pequena Escala.	60

4.2	Elaboração do Modelo de Propagação.	64
4.2.1	Determinação do Coeficiente de Atenuação.	65
4.2.2	Análise do Coeficientes de Atenuação Encontrados Para a Frequência de 900 MHz.	68
4.2.3	Análise do Coeficientes de Atenuação Encontrados para a Frequência de 2400 MHz.	69
4.3	Comparação entre os Dados Experimentais e os Modelos de Predição.	72
5	CONCLUSÕES	77
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

Lista de Figuras

Figura 1.1:	Crescimento do número de celulares.	15
Figura 2.1:	Reflexão e Difração	22
Figura 2.2:	Comportamento da onda segundo o princípio de Huygens.	22

Figura 2.3: Espalhamento do sinal.	23
Figura 2.4: Ilustração da refração que um sinal sofre ao mudar de meio.	24
Figura 2.5: (a) Sinal Real, (b) Desvanecimento Rápido, (c) Desvanecimento Lento e (d) Perda de Percurso.	26
Figura 2.6: Ilustração das interferências construtivas e destrutivas.	30
Figura 3.1: Visão aérea do Jardim Botânico de Niterói.	37
Figura 3.2: Visão aérea da Rota 1.	38
Figura 3.3: Foto do percurso da Rota 1.	39
Figura 3.4: Foto do percurso da Rota 1.	39
Figura 3.5: Visão aérea da Rota 2.	40
Figura 3.6: Foto do percurso da Rota 2.	41
Figura 3.7: Foto do percurso da Rota 2.	41
Figura 3.8: (a) Gerador de Sinais, Amplificador, Fonte de Tensão, No break e Cabos e (b) Mastro e Antena Transmissora.	43
Figura 3.9: Gerador de sinais: Rhode & Schwarz SM300.	44
Figura 3.10: Amplificador de Potência: Mini-circuits ZHL-16W-43+.	45
Figura 3.11: Curva do ganho do amplificador de acordo com a frequência de operação.	45
Figura 3.12: Fonte de tensão: ICEL PS5000.	46
Figura 3.13: Antena transmissora de 900 MHz.	47
Figura 3.14 VSWR da antena transmissora de 900 MHz.	47
Figura 3.15 Antena transmissora de 2400 MHz.	48
Figura 3.16: VSWR da antena transmissora de 2400 MHz.	49
Figura 3.17: No break: Micron Mr2 700 va Sw / Bs-Ti Trivolt.	50
Figura 3.18: (a) Analisador de espectro, Laptop, Placa de aquisição e (b) Antena receptora.	51
Figura 3.19: Analisador de espectro: HP8594E.	51
Figura 3.20: Placa de aquisição: DAQCARD-AL-16XE-50.	52
Figura 3.21: Uso da placa de aquisição.	52
Figura 3.22: Antena receptora de 900 MHz.	53

Figura 3.23: VSWR da antena receptora de 900 MHz.	54
Figura 3.24: Antena receptora de 2400 MHz.	54
Figura 3.25: VSWR da antena receptora de 2400 MHz.	55
Figura 3.26: Inversor de tensão.	56
Figura 3.27: Roda de medição.	57
Figura 4.1: Nível de sinal medido na Rota 1: 900 MHz e $H_t = 3$ m.	60
Figura 4.2: Nível de sinal medido na Rota 1: 900 MHz e $H_t = 5$ m.	60
Figura 4.3: Nível de sinal medido na Rota 1: 2400 MHz e $H_t = 3$ m.	61
Figura 4.4: Nível de sinal medido na Rota 1: 2400 MHz e $H_t = 5$ m.	61
Figura 4.5: Nível de sinal medido na Rota 2: 900 MHz e $H_t = 3$ m.	62
Figura 4.6: Nível de sinal medido na Rota 2: 900 MHz e $H_t = 5$ m.	62
Figura 4.7: Nível de sinal medido na Rota 2: 2400 MHz e $H_t = 3$ m.	63
Figura 4.8: Nível de sinal medido na Rota 2: 2400 MHz e $H_t = 5$ m.	63
Figura 4.9: Modelos de predição para Rota 1, Frequência = 900 MHz e $H_t = 3$ m.	71
Figura 4.10: Modelos de predição para Rota 1, Frequência = 900 MHz e $H_t = 5$ m.	72
Figura 4.11: Modelos de predição para Rota 1, Frequência = 2400 MHz e $H_t = 3$ m.	72
Figura 4.12: Modelos de predição para Rota 1, Frequência = 2400 MHz e $H_t = 5$ m.	73
Figura 4.13: Modelos de predição para Rota 2, Frequência = 900 MHz e $H_t = 3$ m.	73
Figura 4.14: Modelos de predição para Rota 2, Frequência = 900 MHz e $H_t = 5$ m.	74
Figura 4.15: Modelos de predição para Rota 2, Frequência = 2400 MHz e $H_t = 3$ m.	74
Figura 4.16: Modelos de predição para Rota 2, Frequência = 2400 MHz e $H_t = 5$ m.	75

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Distâncias referente a cada medição realizada na Rota 1.	40
Tabela 3.2: Distâncias referente a cada medição realizada na Rota 2.	42
Tabela 4.1: Coeficiente de atenuação.	67
Tabela 4.2: Coeficientes de atenuação para a frequência de 900 MHz.	68
Tabela 4.3: Coeficientes de atenuação para a frequência de 2400 MHz.	68
Tabela 4.4: Potência recebida na distância de referência.	69
Tabela 4.5: Resultados do calculo do Erro Médio Quadrático.	75
Tabela 4.6: Resultados do calculo da Média.	76
Tabela 4.7: Resultados do calculo do Desvio Padrão.	76

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentado um histórico das tecnologias de comunicação sem fio, desde o seu início com o italiano Guglielmo Marconi e o padre brasileiro Roberto Landell, até as tecnologias mais modernas. Dando continuidade à introdução, serão apresentados o objetivo a ser alcançado e a estrutura da dissertação.

1.1 Histórico

Nas últimas três décadas, o desenvolvimento dos sistemas de comunicação móvel sofreu um crescimento exponencial. As novas tecnologias fizeram com que a qualidade da prestação dos serviços de telecomunicações melhorasse e, ao mesmo tempo, diminuíssem os custos, tanto para clientes quanto para os fornecedores dos serviços. Como resultado final, o número de assinantes de telefonia móvel continua crescendo com intensidade, o que pode ser comprovado pelo gráfico apresentado da Figura 1.1. De acordo com a Anatel, o Brasil terminou o ano de 2011 com 247,6 milhões de celulares.

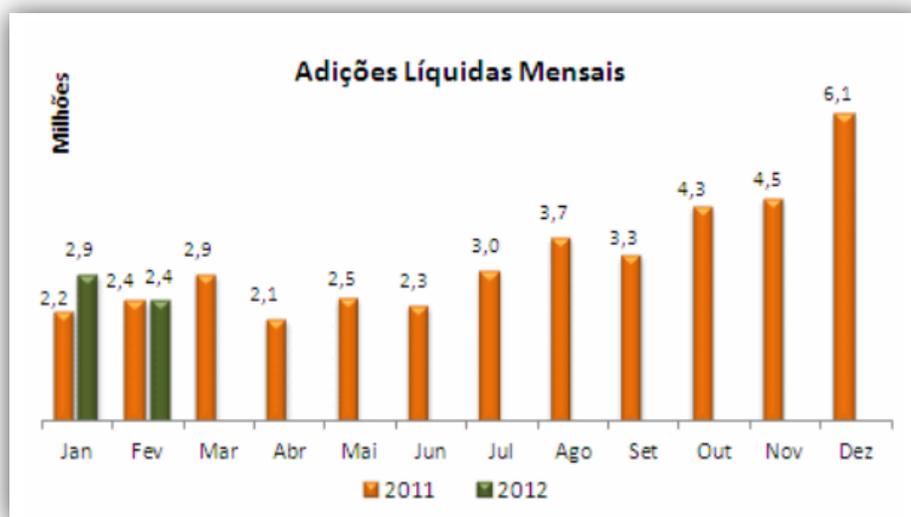


Figura 1.1: Crescimento do número de celulares.

Uma das primeiras aplicações práticas das equações de Maxwell foi realizada pelo italiano Guglielmo Marconi. Marconi é considerado o pai da Radiodifusão e inventor do primeiro transmissor de ondas eletromagnéticas, em 1895. Entretanto, segundo registros da imprensa da época, o crédito desta invenção deveria ser dado ao padre brasileiro Roberto Landell de Moura, que, um ano antes de Marconi, realizava as primeiras transmissões radiofônicas da história. Apresentado publicamente em 1894, o transmissor de ondas, criado pelo padre, cobria a distância de oito quilômetros, mais do que o dobro da distância alcançada pelo invento de Marconi. Além disto, trazia em seu sistema duas novidades: o microfone eletromecânico e o alto-falante telegráfico, que não constavam no sistema de Marconi.

Pensando em uma maneira de deixar as comunicações sem fio mais eficazes, grupos de cientistas, como: AT&T, *Bell Laboratories* e NTT desenvolveram o conceito de células e de reuso de frequências. Apesar dos conceitos serem bons, a tecnologia da época não ajudava. Entretanto, as idéias foram mantidas e diversos padrões para comunicações móveis foram colocados em prática a partir destes fundamentos.

Para facilitar a compreensão da evolução das tecnologias foi criada uma classificação por gerações. Essa classificação é baseada nas principais características do padrão, como por exemplo: modulação, serviços e capacidade do sistema.

A primeira geração, chamada de 1G, teve seu início em 1983, quando os primeiros celulares entraram em operação nos Estados Unidos. Seu principal objetivo era a transmissão de voz. Essa geração se caracteriza pelo uso da modulação analógica em frequência, acesso múltiplo FDMA, baixa capacidade de transmissão de voz, sendo o problema de linha cruzada bastante comum, baixo nível de segurança, alto consumo de bateria e grandes dimensões físicas tanto da bateria quanto das antenas, sendo comumente usados em automóveis. Alguns padrões pertencentes a esta geração são: AMPS, TACS, PDC e NMC.

A segunda geração, conhecida por 2G, teve seu início em 1989, quando surgiu o primeiro padrão digital norte americano. Essa geração tem como características principais o uso das técnicas de acesso múltiplo TDMA/FDMA e CDMA. Essas técnicas propiciavam maior capacidade de transmissão, uso de serviços básicos de dados, como SMS e *e-mail*, maior

facilidade de *roaming* e transmissão de sinais de controle. Como exemplos desta geração estão os padrões D-AMPS, IS-95 e o GSM.

A geração 2,5G foi desenvolvida com a intenção de permitir serviços de dados por pacote, sendo vista como um complemento da segunda geração. São exemplos desta geração intermediária: o GPRS, HSCSD, EDGE e o CDMA2000 1x EV-DO.

A terceira geração, conhecida por 3G, teve seu início em meados de 1990 e foi criada com o objetivo de permitir a transmissão em pacotes e comutação de circuitos, flexibilidade da introdução de novos serviços e capacidade de executar *roaming* global, garantir a coexistência com os sistemas 2G, 2,5G e entre os modos TDD e o FDD, utilizando uma só conexão para serviços de diferentes limiares de qualidade, suporte a tráfego assimétrico de informações tanto nos enlaces de subida quanto nos de descida, oferecimento de banda sobre demanda e suporte a perfis diferentes de usuários. São exemplos da terceira geração: EDGE UWC-136 HS, CDMA 2000 3x e o WCDMA. O WCDMA teve maior aceitação no mercado e acabou sendo adotado como padrão na Europa, para as interfaces aéreas do UMTS.

Pesquisas que visavam suprir a crescente exigência por maiores taxas de transmissão de dados introduziram o HSDPA, que é um serviço de transmissão de pacotes operando dentro do WCDMA, no enlace de descida, e propicia taxas de transmissão de dados de até 14,4 Mbits/s em uma banda de 5 MHz. O aumento de velocidade no enlace de descida é complementado por um aumento da velocidade no enlace de subida através do HSUPA, onde a velocidade da transmissão de dados pode chegar até 5,76 Mbits/s. O aumento da taxa de transferência, tanto no enlace de descida, quanto no enlace de subida, foi possível graças à implementação de algumas características de transmissão. O HSPA proporciona uma série de novos serviços ao usuário, como: navegação na *internet*, descarga de jogos e músicas, IP Tv, compartilhamento de vídeo em tempo real e acesso à banda larga.

O sistema mais moderno de comunicação sem fio apresentado pelo 3GPP é a tecnologia LTE. Pesquisas que tinham como objetivo diminuir os atrasos nos enlaces diretos e reversos do padrão WCDMA, deram origem ao que vem a ser a quarta geração dos sistemas móveis. As principais metas para a evolução do LTE são: aumentar a taxa de transmissão de dados; tornar o uso do espectro mais eficiente; melhorar a área de cobertura e diminuir a latência. Esse conjunto

de características resulta em uma melhoria significativa do serviço e reduzirá o custo de operação. Tudo isso é possível, em boa parte, pelo uso da modulação OFDM e das novas soluções em antenas.

A crescente preocupação com as mudanças climáticas aumentaram a necessidade da criação de parques ambientais em áreas urbanas. Estes parques têm a intenção de preservar espécies da fauna e flora, melhorar a condição de vida da população que está ao seu redor, tornar a temperatura mais amena e a umidade relativa do ar controlada, além de propiciar a prática de esportes e lazer, porém, estes ambientes causam um grande problema para operadoras de sistemas de comunicação móvel, uma vez que a vegetação influencia fortemente na propagação do sinal rádio móvel.

Em ambientes vegetados, a modelagem do canal é uma tarefa extremamente complexa. Esta complexidade deve-se ao fato da onda eletromagnética sofrer diversos mecanismos de propagação, tais como: atenuação, reflexão, difração, espalhamento, absorção e despolarização. Estes mecanismos dependem de muitos parâmetros, dentre os mais importantes, podem ser citados: frequência de operação do sistema; altura das antenas transmissora e receptora; altura, forma, densidade da floresta; distribuição das árvores e distribuição angular das folhas e dos galhos. Outras variáveis sazonais podem ser consideradas para que o modelo se torne mais preciso, como é o caso da quantidade de folhas nas árvores, a umidade relativa do ar e a força dos ventos, que variam conforme a estação do ano.

1.2 Objetivos

Existe uma variedade de modelos de propagação baseados em dados estatísticos e/ou teóricos, porém, sabe-se que estes modelos têm suas eficiências reduzidas quando são aplicados em ambientes com características distintas das quais os mesmos se fundamentam. O objetivo desta dissertação de mestrado é a elaboração de um modelo empírico de predição para parques urbanos. Após determinar o modelo de propagação, é feita uma comparação, qualitativa e quantitativa entre o modelo de predição proposto e alguns modelos consagrados, aplicados em meios de vegetação.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, que estão organizados da seguinte forma:

O Capítulo 1 é introdutório e descreve um breve histórico das comunicações móveis, mostrando a evolução das diversas gerações, também expõe o objetivo desta dissertação e a estrutura geral do trabalho.

O Capítulo 2 aborda a teoria de propagação no canal rádio móvel, tratando dos conceitos fundamentais e dando ênfase aos parâmetros úteis para que o objetivo da dissertação seja atingido.

O Capítulo 3 relata a técnica de sondagem faixa estreita do canal e aborda a campanha de medição descrevendo, detalhadamente o Jardim Botânico de Niterói, ambiente no qual foram realizadas as medições, bem como o planejamento das medições e os equipamentos utilizados nos sistemas de transmissão e recepção.

O Capítulo 4 versa sobre o modelo empírico de propagação proposto para o ambiente de parque urbano, dando ênfase ao seu processo de elaboração, os resultados obtidos e a comparação com outros modelos de predição para meios com vegetação.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e a proposta de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

TEORIA DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

O sinal rádio móvel, ao longo do percurso entre transmissor e receptor, sofre a influência do meio pelo qual se propaga, por isso é extremamente importante compreender as características do ambiente, para que seja possível entender a influência sofrida pelo sinal de rádio ao se propagar por tal ambiente.

O canal de rádio propagação, pela sua natureza aleatória e dependente da frequência do sistema, necessita de uma série de estudos teóricos e levantamento de dados estatísticos para sua caracterização. Os três modos básicos de propagação, são: ondas ionosféricas, ondas troposféricas e ondas terrestres. Para o sistema de comunicação celular, o modo mais importante é o de ondas terrestres. Dependendo do ambiente que se deseja realizar o estudo e a faixa de frequência utilizada, alguns mecanismos de propagação terão maior influência no sinal que chega ao receptor.

As frequências de sondagem do canal vegetado nesta dissertação, são as de 900 MHz e 2400 MHz. Para as frequências UHF, os mecanismos de propagação predominantes são normalmente: a propagação em visibilidade, a reflexão e a difração. As implicações causadas pelo terreno, vão da obstrução total, passando pela difração e a refração.

Os mecanismos e os efeitos mais importantes que as ondas eletromagnéticas estão sujeitas no ambiente de parque urbano serão discutidos a seguir. Alguns dos principais modelos de predição para ambientes vegetados também serão descritos resumidamente neste capítulo, e, posteriormente, estes modelos servirão como patamares de comparação com o modelo proposto neste trabalho.

2.1 Mecanismos de propagação

Os mecanismos de propagação definem a perda de propagação no enlace e, por consequência, o valor médio do sinal no receptor. O entendimento destes mecanismos é fundamental para o cálculo do raio de cobertura máximo de uma célula.

2.1.1 Visada direta

Um enlace está em visada direta quando a reta entre o transmissor e o receptor está livre de obstáculos. A propagação em condição de visada direta se dá principalmente em ambientes rurais e suburbanos, onde a presença de obstáculos é inferior aquelas dos ambientes densamente urbanos. O comportamento da propagação das ondas eletromagnéticas nesta situação, pode ser descrito pelo modelo de dois raios. Este modelo prevê duas regiões distintas, sendo uma próxima à estação transmissora, na qual as componentes apresentam comportamento de interferência, e a outra região aparece após o ponto de quebra, onde o comportamento que prevalece é o da difração, com a potência decaindo teoricamente na proporção de R^{-4} , sendo R a distância entre o transmissor e o receptor. O ponto de quebra é usualmente determinado em função do limite de desobstrução do elipsoide correspondente à primeira Zona de Fresnel.

2.1.2 Reflexão

A reflexão ocorre quando as ondas eletromagnéticas encontram obstáculos com dimensões muito superiores ao seu comprimento de onda. Em ambiente interno, estes obstáculos podem ser: móveis, paredes, portas, dentre outros, e no caso de ambientes externos podem ser: edificações, carros, montanhas, árvores e outros. A ocorrência de tal mecanismo faz com que uma variedade de sinais chegue ao receptor com diferentes atrasos, com isso, ao se compor o sinal recebido, verifica-se uma atenuação que pode variar de pequena, até a anulação total do campo resultante. A reflexão depende diretamente da superfície refletora e da frequência na qual o sinal se propaga, porém, outros fatores também influenciam na atenuação das ondas refletidas, como por exemplo: o ângulo de incidência no terreno e a polarização da onda. A Figura 2.1 mostra a ocorrência de reflexão, neste caso, ocasionada pelo solo.

2.1.3 Difração

A difração acontece quando um artefato opaco obstrui a passagem do sinal. Ele não atenua a onda completamente, pois a onda ultrapassa este obstáculo e continua a se propagar, deixando uma região de sombra atrás do obstáculo, este mecanismo é função da frequência do sinal incidente. Segundo o princípio de Huygens, cada ponto em uma frente de onda se comporta como uma fonte isolada, gerando ondas secundárias atrás do artefato, o que explica como dois

usuários podem se comunicar, mesmo que não haja uma linha de visada. A Figura 2.1 mostra o caso em que a difração é ocasionada pela borda de uma edificação e a Figura 2.2 mostra como a onda se comporta, de acordo com o princípio de Huygens.



Figura 2.1: Reflexão e difração.

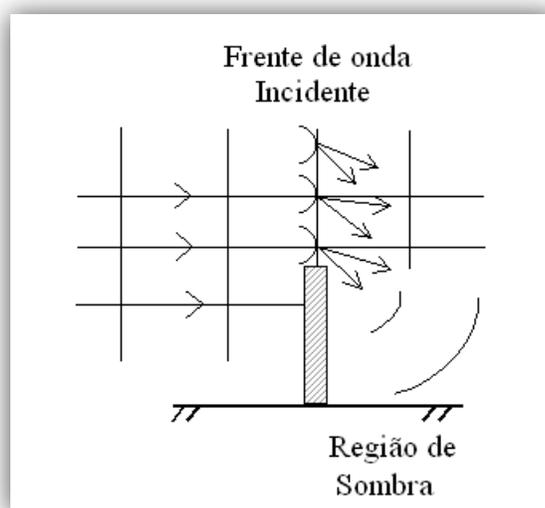


Figura 2.2: Comportamento da onda segundo o princípio de Huygens.

2.1.4 Espalhamento

O espalhamento existe quando as ondas eletromagnéticas se deparam com obstáculos de mesma ordem ou de dimensões inferiores ao comprimento de onda. O espalhamento ocorre em várias direções, podendo ser causado por pequenas irregularidades no percurso do sinal. A Figura 2.3 mostra o que acontece com o sinal quando é espalhado.

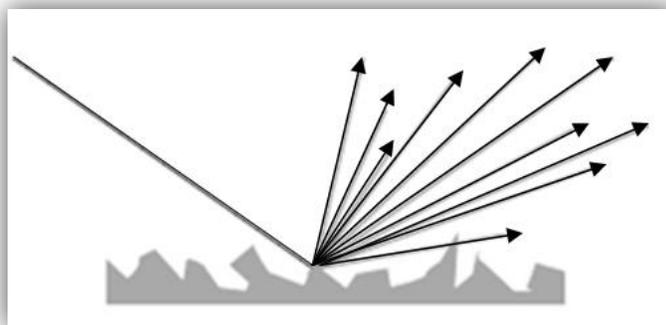


Figura 2.3: Espalhamento do sinal.

2.1.5 Refração

A refração é o mecanismo de propagação que uma onda eletromagnética sofre ao passar por um meio que tenha índice de refração diferente do qual esta onda estava originalmente. Esta ação pode ocasionar problemas em enlaces de RF, pois como a atmosfera está sujeita a variações, a refração pode causar um desvio, fazendo com que o sinal não chegue ao receptor. A Figura 2.4 mostra uma situação onde uma onda sofre refração e reflexão, neste caso, o meio “A” menos denso que o meio “B”.

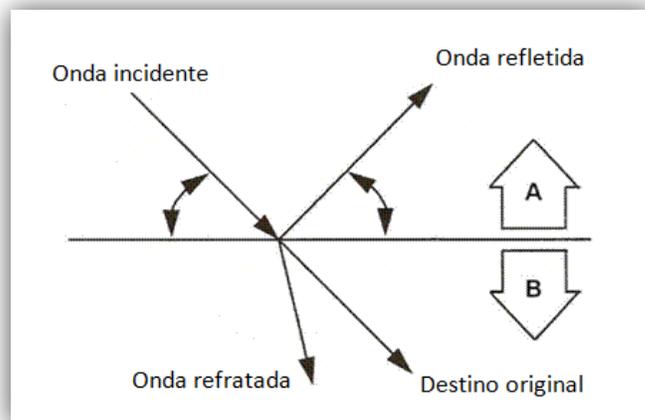


Figura 2.4: Ilustração da refração que um sinal sofre ao mudar de meio.

2.1.6 Absorção

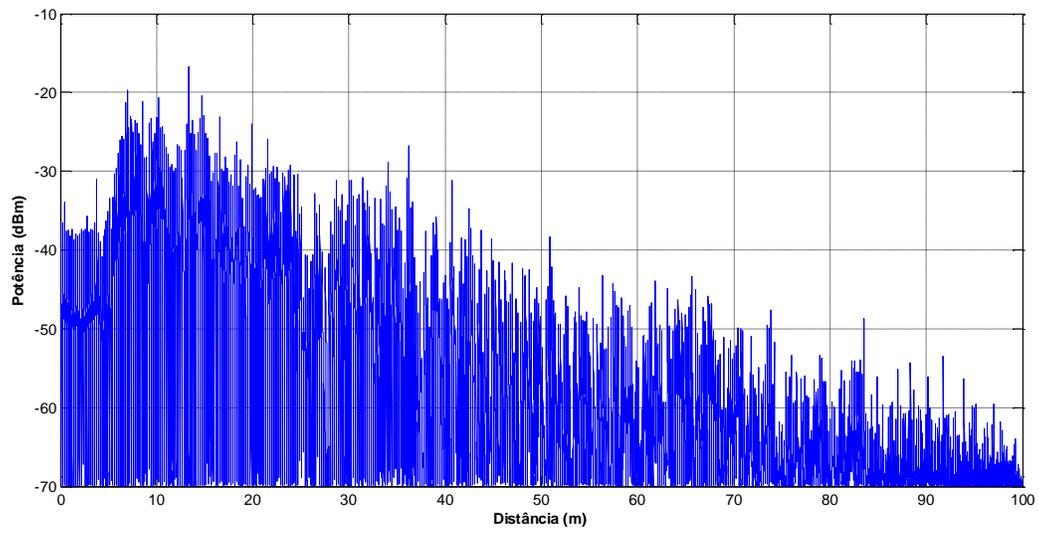
A absorção é o mecanismo que reduz a amplitude de um vetor campo elétrico da onda eletromagnética. Este mecanismo é causado pela conversão irreversível da energia da onda. A vegetação tem características que propiciam a absorção da onda eletromagnética nela incidente, o que leva a uma forte atenuação do sinal que por ela se propaga.

2.1.7 Despolarização

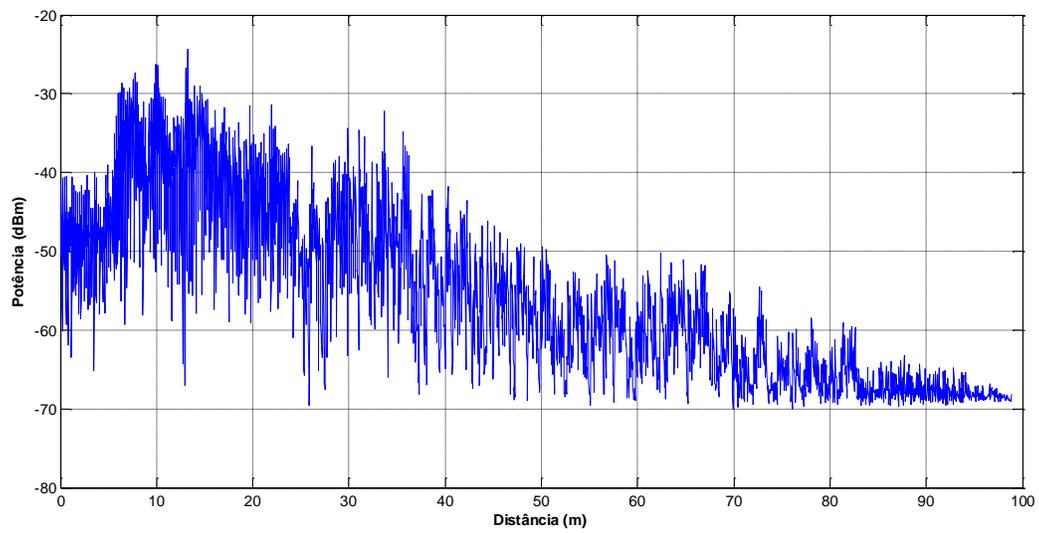
A despolarização é o mecanismo no qual a polarização da onda eletromagnética é alterada. Este mecanismo depende fortemente do comprimento de onda e da estrutura da vegetação, a chuva e a neve também são causadores da despolarização.

2.2 Efeitos de Propagação

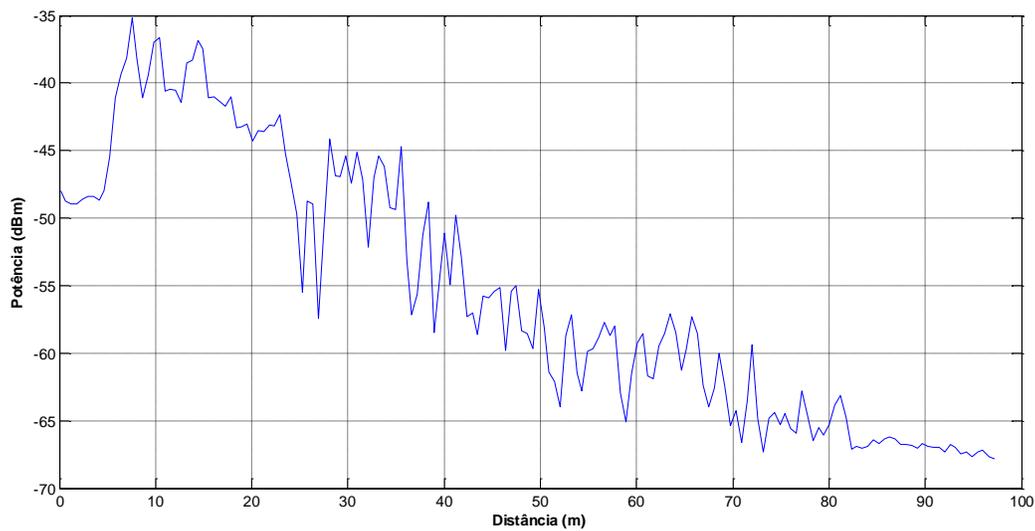
O canal de propagação rádio móvel pode ser caracterizado, em faixa estreita, resultando em três fatores: a perda de percurso, o desvanecimento em grande escala e desvanecimento em pequena escala. Apesar do objetivo desta dissertação estar vinculado somente à análise do comportamento da atenuação média do sinal, é importante tecer alguns comentários sobre a variação da intensidade do sinal. A Figura 2.5 mostra o sinal medido e os três efeitos que caracterizam o sinal e, os itens a seguir explicam melhor estes parâmetros.



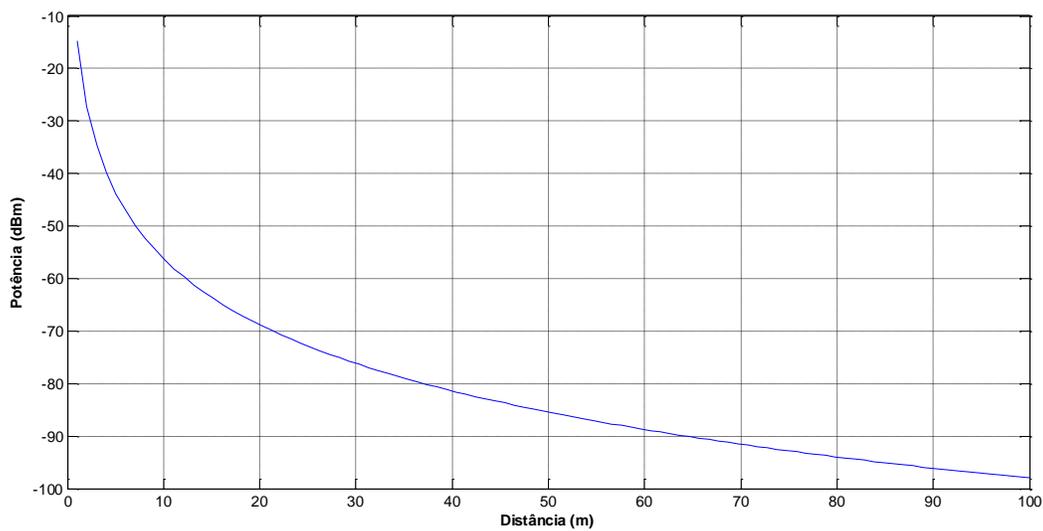
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.5: Exemplo de sinal faixa estreita: (a) Sinal Medido, (b) Desvanecimento em Pequena Escala mais a Perda de Propagação, (c) Desvanecimento em Grande Escala mais a Perda de Propagação e (d) Perda de Percurso.

2.2.1 Perda no Percurso

O cálculo da perda no percurso estima o valor médio da atenuação que o sinal sofre no trajeto entre o transmissor e o receptor. A perda no percurso depende da frequência do sinal, das alturas das antenas transmissora e receptora, da distância entre transmissor e receptor e das características do ambiente, isto é, se o ambiente contém obstáculos, como por exemplo: construções, tráfego de automóveis, vegetação, morros e rios.

Existem três técnicas para prever a perda de percurso. A técnica empírica, deriva da análise estatística de um grande número de medições realizadas em ambientes típicos, como: áreas urbanas, rurais e suburbanas. Os resultados destas análises são incorporados às tabelas de dados ou às fórmulas de melhor ajuste, com o objetivo de encontrar a perda de propagação, não requerendo maiores detalhes da morfologia. A técnica determinística aplica artifícios da propagação do sinal de rádio frequência, para caracterizar o ambiente e determinar a intensidade do sinal resultante de múltiplas reflexões e linha de visada. A técnica semi-estatística é baseada na combinação das técnicas estatística e determinística. Esta técnica necessita, comumente, de mais informações que a técnica estatística e menos dados que a técnica determinística. Neste trabalho será usada a técnica empírica.

O canal mais simples existente é o espaço livre. Para este canal, a perda de propagação pode ser calculada por:

$$P_r = P_t G_1 \left[\frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \quad (2.1)$$

onde:

P_t → Potência transmitida (dB);

G_1 → Produto dos ganhos das antenas transmissora e receptora (dBi);

d → Distância entre o transmissor e o receptor (m);

λ → Comprimento de onda.

A presença do solo causa algumas ondas refletidas que podem atingir o receptor. Essas ondas refletidas podem ter suas fases alteradas em 180° e, assim, reduzir a potência recebida. Um modelo de dois raios pode representar esta situação, da seguinte forma:

$$P_r = \frac{P_t(G_t G_r h_t^2 h_r^2)}{d^4} \quad (2.2)$$

onde:

G_t → Ganho da antena transmissora (dBi);

G_r → Ganho da antena receptora (dBi);

h_t → Altura da antena transmissora (m);

h_r → Altura da antena receptora (m);

d → Distância entre o transmissor e o receptor.

Partindo da Equação 2.1, aplicada em dois pontos distintos situados à d e d_0 metros da antena transmissora, supondo P_t , G_t , G_r e λ fixos, obtém-se a equação de perda no percurso, conhecida como modelo simplificado de perda:

$$P_r = P(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.3)$$

onde:

$P(d_0)$ → Potência na distância de referência (dBm);

n → Coeficiente de atenuação;

d_0 → Distância de referência próxima à antena transmissora (m);

d → Distância entre a antena transmissora e a antena receptora (m).

2.2.2 Desvanecimento em Grande Escala

O desvanecimento em grande escala acontece devido à maioria dos obstáculos refletores e difratores estarem distantes do receptor, se comparados ao comprimento de onda. O deslocamento do receptor em relação a esses objetos é relativamente pequeno, por consequência, as mudanças são sentidas lentamente. As variações estatísticas causadas pelas mudanças de

terreno, vegetação, construções, etc. são modeladas, em geral, como uma distribuição lognormal, representada pela Equação 2.4.

Quando a frequência utilizada está acima de 10 GHz, deve-se levar em consideração os efeitos da precipitação pluviométrica, pois, acima desta frequência a chuva exerce forte influência sobre as ondas eletromagnéticas. O desvanecimento em grande escala pode ser encontrado na literatura por outros nomes: desvanecimento lognormal ou sombreamento.

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.4)$$

onde:

$x \rightarrow$ Variável aleatória;

$\mu \rightarrow$ Média de x ;

$\sigma^2 \rightarrow$ Variância de x ;

$\sigma \rightarrow$ Desvio padrão de x .

2.2.3 Desvanecimento em Pequena Escala

O desvanecimento em pequena escala ocorre devido à variação rápida dos níveis de sinal, quando o receptor se move em distâncias curtas. Este desvanecimento é gerado pela reflexão, difração e espalhamento, ocasionado por certos objetos, e pela movimentação do receptor relativamente a estes objetos, ou seja, o sinal recebido é composto por um arranjo de sinais refletidos, refratados e difratados. A soma desses sinais pode ser construtiva ou destrutiva, de acordo com as fases dos sinais recebidos, como pode ser observado na Figura 2.6.

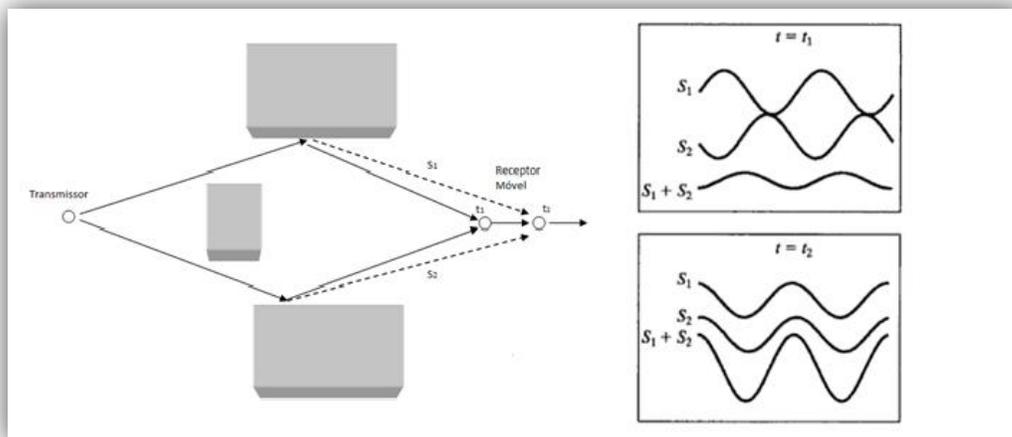


Figura 2.6: Ilustração das interferências construtivas e destrutivas.

Normalmente, as funções densidade de probabilidade que descrevem a envoltória desse sinal são as distribuições Rayleigh e Rice.

A distribuição Rayleigh usualmente se adapta bem em situações que existem apenas componentes de multipercurso, não havendo uma componente direta mais forte, e sua distribuição é representada pela Equação 2.5.

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.5)$$

onde:

$x \rightarrow$ Variável aleatória;

$\sigma^2 \rightarrow$ Variância de x .

No caso em que há uma ou mais componentes que se destaquem com relação às outras, a distribuição Rice, dada pela Equação 2.6, se ajusta melhor à amplitude do sinal.

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + v^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{xv}{\sigma^2}\right) \quad (2.6)$$

onde:

$x \rightarrow$ Variável aleatória;

$\sigma^2 \rightarrow$ Variância de x ;

$v^2/2 \rightarrow$ Potência recebida na componente dominante;

$I_0(\cdot) \rightarrow$ Função de Bessel modificada de ordem zero, dada por:

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(x \cos \theta) d\theta \quad (2.7)$$

Vale observar que a Rayleigh é um caso particular da Rice, quando a amplitude de visada v é nula.

2.3 Modelos de Propagação

A elaboração de um modelo de predição preciso para a propagação de microondas ou ondas milimétricas, através de um ambiente com vegetação, normalmente exige uma descrição eletromagnética aprofundada das árvores, folhas e galhos. No estudo da influência da vegetação na comunicação sem fio, encontram-se três categorias distintas de modelos. A primeira e a segunda categoria tratam, respectivamente, árvores isoladas e árvores em fileiras. O efeito da vegetação nesses dois grupos é comumente investigado através de formas geométricas específicas, como: cilindros, cones e esferas. Estes modelos teóricos usualmente exigem um grande rigor matemático. O terceiro grupo de modelos refere-se aos bosques e parques urbanos, onde a vegetação tem características de grande diversidade de espécie, variação de altura e densidade. Para este terceiro grupo, comumente adotam-se modelos baseados em medições, devido à complexidade dos processos físicos decorrentes dos modos de propagação envolvidos. Esses modelos de predição que fazem uma aproximação dos resultados são muito utilizados pelos projetistas de sistemas de rádio. Em sua forma básica, estes modelos empíricos fornecem a expressão da atenuação do ambiente de floresta, conhecida como perda em excesso, devendo ser somada à atenuação do espaço livre, para fornecer atenuação total no percurso.

A seguir, serão descritos alguns dos principais modelos que, posteriormente, terão os seus desempenhos comparados ao desempenho do modelo proposto neste trabalho e, também o modelo do espaço livre.

2.3.1 Perda no Espaço Livre

O modelo de predição de perda no espaço livre é uma ferramenta muito importante. Considerado um modelo básico, leva em consideração apenas a influência da distância percorrida pelo móvel com relação ao transmissor e a frequência que o sistema opera, sendo a sua equação descrita a seguir:

$$A_{el} = 32,44 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (2.8)$$

onde:

A_{el} → Atenuação segundo o modelo do Espaço Livre (dB);

d → Distância entre a antena transmissora e a antena receptora (Km);

f → Frequência de operação do sistema (MHz).

2.3.2 ITU-R

O modelo ITU-R serve como base para outros modelos. Este modelo tem validade para as frequências entre 200 MHz e 95 GHz e para distância entre antena transmissora e receptora inferior a 400 metros. A sua equação para o cálculo da perda em excesso, que deverá ser adicionada à perda no espaço livre, é dada por:

$$A_{ITU-R} = 0,2 f^{0,3} d^{0,6} \quad (2.9)$$

onde:

A_{ITU-R} → Atenuação em excesso segundo o modelo da ITU-R (dB);

d → Distância entre a antena transmissora e a antena receptora (m);

f → Frequência de operação do sistema (MHz).

2.3.3 FITU-R

O modelo FITU-R surgiu como um aprimoramento do modelo ITU-R. Nele apareceu o conceito de diferenciar as equações do modelo de predição, de acordo com a sazonalidade sofrida pela vegetação, por exemplo, no outono as árvores tendem a perder suas folhas. As

equações para o cálculo da perda em excesso, que deverá ser adicionada à perda no espaço livre, são as seguintes:

$$A_{\text{FITU-R com folhas}} = 0,37 f^{0,18} d^{0,59} \quad (2.10)$$

$$A_{\text{FITU-R sem folhas}} = 0,39 f^{0,39} d^{0,25} \quad (2.11)$$

onde:

$A_{\text{FITU-R}}$ → Atenuação em excesso segundo o modelo FITU-R (dB);

d → Distância entre a antena transmissora e a antena receptora (m);

f → Frequência de operação do sistema (MHz).

2.3.4 Decaimento Exponencial

O modelo de Decaimento Exponencial é simples, foi elaborado para utilização na faixa de frequência entre 0,1 GHz e 3,2 GHz, sendo a atenuação em excesso dada pela Equação 2.12

$$A_{\text{DE}} = 0,26 f^{0,77} d \quad (2.12)$$

onde:

A_{DE} → Atenuação em excesso segundo o modelo de Decaimento Exponencial (dB);

d → Distância entre a antena transmissora e a antena receptora (m);

f → Frequência de operação do sistema (MHz).

2.3.5 Decaimento Exponencial Modificado

Este modelo, como o próprio nome diz, é um modelo que surgiu como uma alternativa ao modelo de Decaimento Exponencial. O modelo de Decaimento Exponencial Modificado é válido para a faixa de frequência que vai de 230 MHz até 96 GHz e suas equações, para cálculo da perda em excesso, que deverá ser adicionada à perda no espaço livre, são as seguintes:

$$A_{\text{DEM}} = 0,45 f^{0,284} d, \quad 0m \leq d < 14m \quad (2.13)$$

$$A_{DEM} = 1,33f^{0,289}d^{0,588}, \quad 14m \leq d \leq 400m \quad (2.14)$$

onde:

A_{DEM} → Atenuação em excesso segundo o modelo de Decaimento Exponencial (dB);

d → Distância entre a antena transmissora e a antena receptora (m);

f → Frequência de operação do sistema (MHz).

2.3.6 Modelo COST-235

O modelo COST-235 faz a diferença entre o ambiente vegetado com a presença de folhas e sem a presença de folhas. Este modelo é indicado para sistemas que operam na faixa de frequência entre 9,6 GHz e 57,6 GHz e para distância entre o transmissor e o receptor inferior a 200 metros. As equações para o cálculo da perda em excesso à perda no espaço livre, são dadas por:

$$A_{COST\ 235\ com\ folhas} = 15,6 f^{-0,009}d^{0,26} \quad (2.15)$$

$$A_{COST\ 235\ sem\ folhas} = 26,6 f^{-0,2}d^{0,5} \quad (2.16)$$

onde:

$A_{COST\ 235}$ → Atenuação em excesso segundo o modelo COST-235 (dB);

d → Distância entre a antena transmissora e a antena receptora (Km);

f → Frequência de operação do sistema (MHz).

2.3.7 Al-Nuami

Este modelo foi elaborado com base em medições realizadas em um pomar de maçã, na frequência de 11,2 GHz. A atenuação para este modelo, em excesso à perda no espaço livre, é dada pela seguinte equação:

$$A_{Al\ Nuami} = 11,21d^{0,43} \quad (2.17)$$

onde:

$A_{\text{Al-Nuami}}$ → Atenuação em excesso segundo o modelo de Al-Nuami (dB)

d → Distância entre a antena transmissora e a antena receptora (m).

Capítulo 3

CAMPANHA DE MEDIÇÃO

Os modelos de propagação são elaborados visando obter a predição da propagação das ondas de rádio, para um determinado ambiente, com características particulares. Inicialmente, estes ambientes foram divididos em grandes grupos, como: urbano, suburbano e rural. Com o passar do tempo, surgiu a necessidade de aprimorar a precisão dos modelos. Sabendo que os modelos perdem a precisão ao serem usados em um local com características diferentes daquela para o qual ele foi elaborado, surgiram trabalhos em outros ambientes mais específicos, como por exemplo: área urbana densa, área de floresta e ambientes internos. Tendo ciência que as características do ambiente exercem forte influência no sinal de rádio, torna-se fundamental conhecê-lo a fundo.

O entendimento das funcionalidades dos equipamentos usados na realização da campanha de medição é essencial para que os resultados obtidos sejam confiáveis. Com este objetivo, este capítulo descreve o ambiente sondado e os equipamentos utilizados nas medições.

3.1 Caracterização do Ambiente

Em parques urbanos, normalmente são encontradas árvores de diversas espécies, muitas das quais são de grande porte. Estas árvores são dispostas aleatoriamente, fazendo com que existam áreas com clareiras e outras áreas com alta densidade de vegetação. Muitos parques contêm construções que servem como sede administrativa do local, museus e estufas. Não é raro encontrarmos pequenos lagos que deixam a temperatura mais amena e melhoram a estética do local. Geralmente, estes recintos são frequentados por pessoas que buscam alguma atividade física ou lazer.

No entorno destas "ilhas verdes" encontram-se grandes avenidas, onde, há trânsito de automóveis e pedestres, e grandes edificações. Para esta dissertação, a campanha de medição foi realizada no Jardim Botânico de Niterói, situado no bairro do Fonseca, cuja imagem de satélite é demonstrada na Figura 3.1

O Jardim Botânico de Niterói foi criado em 1906, com o objetivo de cultivar e distribuir sementes de árvores frutíferas e plantas medicinais aos lavradores, por isso existe uma enorme variedade de espécies, por exemplo: Sapotis, Jatobás, Jequitibás, Jacarandás, Jaqueiras, Mangueiras, Palmeiras, Eucaliptos, Castanheiras e Sapucaias. Com certa de 258 mil metros quadrados, recebe, aproximadamente, 300 visitantes por dia. As medições foram realizadas no outono de 2011, mas precisamente no dia 11 de Abril de 2011. Neste dia, as massas de ar quente e úmido eram dominantes e favoreciam o aumento da umidade relativa do ar e da temperatura. Apesar da estação do ano ser o outono, a maioria das árvores estava com muita folhagem, algumas chegavam a dar frutos.



Figura 3.1: Visão aérea do Jardim Botânico de Niterói.

Para a campanha de medição foram escolhidas duas rotas, apresentadas nas Figuras 3.2 e 3.5. Estas rotas foram selecionadas devido à facilidade de locomoção do automóvel, pelas características de vegetação e pela presença de construções. A localização da antena transmissora também está demonstrada nas Figuras 3.2 e 3.5, tendo sido escolhida devido a algumas

facilidades como: fornecimento de energia e segurança, oferecidas pela administração do parque. A seguir, serão descritas detalhadamente as características de cada rota.

3.1.1 Rota 1

A Rota 1, na medição que atingiu a maior distância, possui 40 metros de comprimento, conforme apresenta a Figura 3.2. Em média, ela tem 4,60 metros de largura e é inteiramente pavimentada com asfalto. Esta rota, em seu início, se caracteriza pela escassez de árvores e pela presença de algumas construções, como pode ser observado nas Figura 3.3 e 3.4. A partir de 24 metros passa a percorrer um ambiente de floresta densa, composto por vegetação rasteira e árvores que podem atingir até 15 metros de altura, como pode ser visto na Figura 3.4.

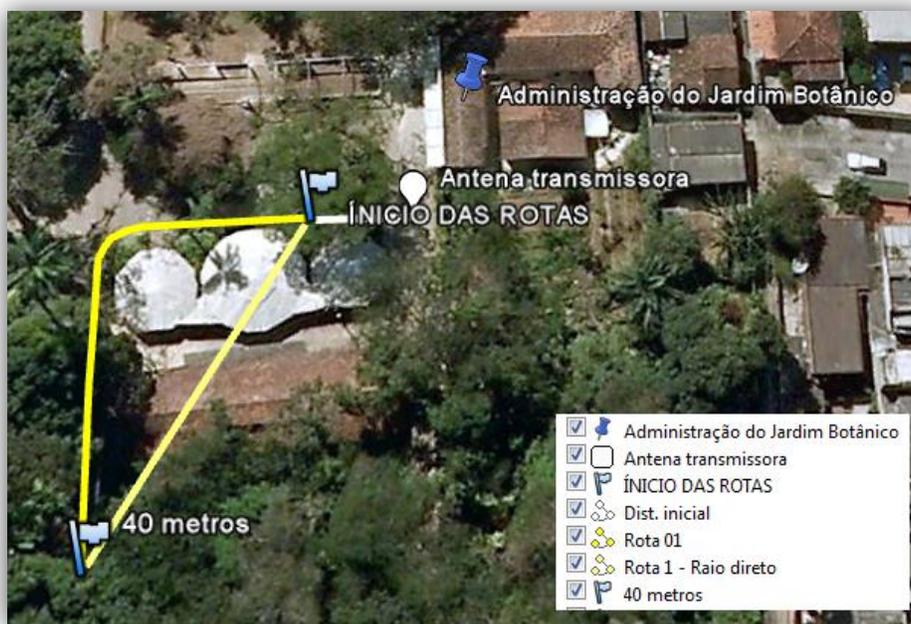


Figura 3.2: Visão aérea da Rota 1.

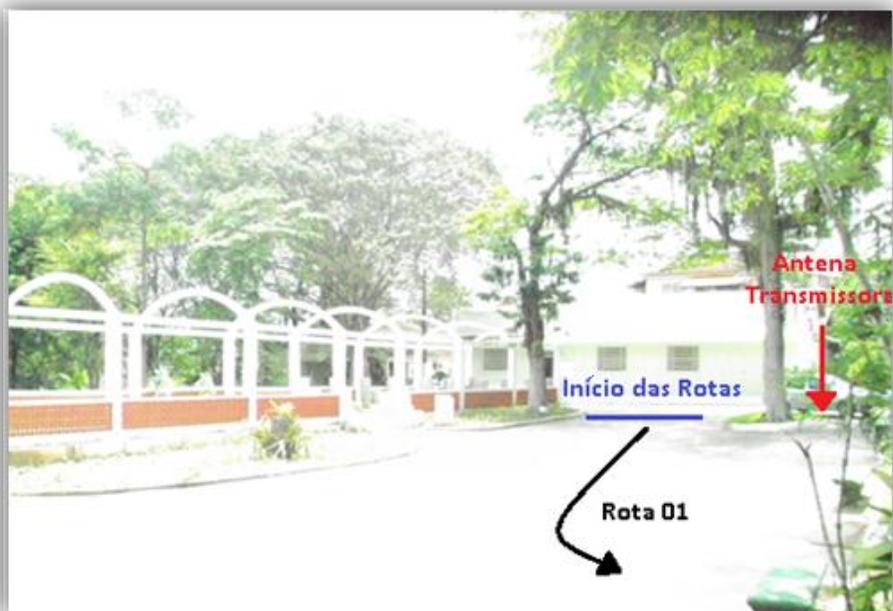


Figura 3.3: Foto do percurso da Rota 1.



Figura 3.4: Foto do percurso da Rota 1.

Os valores encontrados para as distâncias, com relação à Rota 1 estão na Tabela 3.1.

Rota	Altura (m)	Frequência (MHz)	Comprimento da Rota (m)	Comprimento do Raio Direto (m)
1	3	900	52	39
1	5	900	54	40
1	3	2400	46	34
1	5	2400	45	33

Tabela 3.1: Distâncias referente a cada medição realizada na Rota 1.

3.1.2 Rota 2

A Rota 2, na medição que percorreu a maior distância, tem 64 metros de comprimento, como é observado na Figura 3.5. Em média possui 8 metros de largura e o piso é composto de asfalto. A sua vegetação têm característica de uma floresta pouco densa, se comparada a Rota 1, a partir de 24 metros, como pode ser notado nas Figuras 3.8 e 3.9.

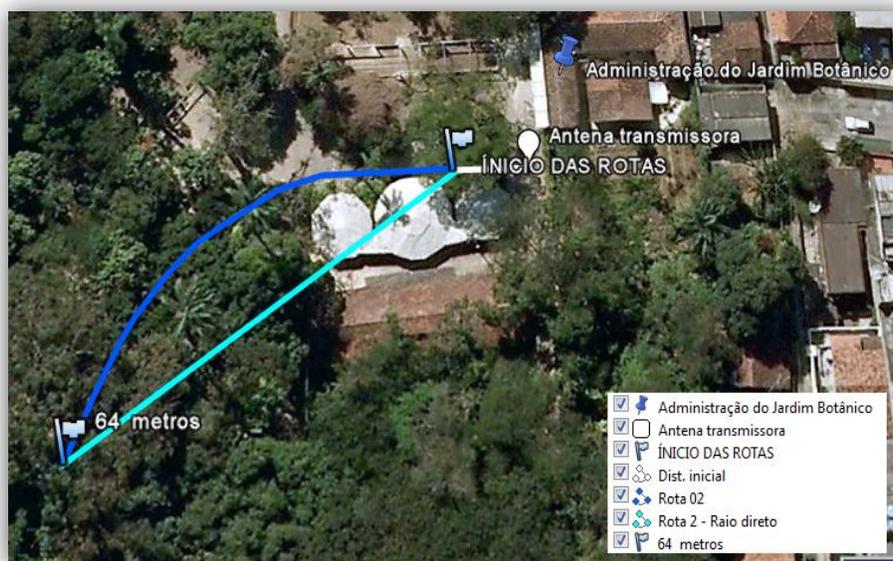


Figura 3.5: Visão aérea da Rota 2.



Figura 3.6: Foto do percurso da Rota 2.



Figura 3.7: Foto do percurso da Rota 2.

As medições realizadas na Rota 2 tiveram as distâncias percorridas conforme a Tabela 2.

Rota	Altura (m)	Frequência (MHz)	Comprimento da Rota (m)	Comprimento do Raio direto (m)
2	3	900	70	64
2	5	900	52	49
2	3	2400	39	38
2	5	2400	37	36

Tabela 3.2: Distâncias referente a cada medição realizada na Rota 2.

3.2 Planejamento das Medições

Para a realização da campanha de medição, foi necessário fazer um estudo prévio dos equipamentos e do ambiente no qual as medições seriam feitas. Realizou-se testes em laboratório, para que os equipamentos e programas fossem calibrados de acordo com as pretensões das medições. Necessitou-se fazer uma série de visitas ao Jardim Botânico de Niterói, com o objetivo de conhecer o ambiente em questão, selecionar as melhores rotas, segundo algumas características, como: possibilidade de trafegar com um automóvel; características da vegetação e das construções; e percorrer os tramites legais para obtenção da autorização da administração do parque para a realização da campanha de medição.

3.3 Equipamentos

Os sistemas de transmissão e recepção utilizados na realização das medidas são descritos de uma forma geral nos itens 3.3.1 e 3.3.2. Dentro destes tópicos, encontram-se subitens, onde serão descritos de forma mais detalhada os equipamentos utilizados neste trabalho.

3.3.1 Sistema de Transmissão

O sistema de transmissão empregado na realização das medidas é composto por um gerador de sinais Rhode & Schwarz SM300, um amplificador de potência Mini-circuits ZHL-16w-45+, duas antenas omnidirecionais, que operam nas frequências de 900 e 2400 MHz, dois mastros para fixar a antena, sendo um com 3 metros de altura e outro de 5 metros, uma fonte de

tensão ICEL PS5000, um estabilizador e os cabos e conectores necessários para conectar os equipamentos. O sistema de transmissão é apresentado na Figura 3.8.



(a)



(b)

Figura 3.8: (a) Gerador de Sinais, Amplificador, Fonte de Tensão, *No break* e Cabos (b) Mastro e Antena transmissora.

3.3.1.1 Gerador de Sinais

O gerador de sinais R&S SM300 oferece todas as características exigidas de um gerador de sinal, como por exemplo: ampla faixa de frequência, grande variedade de funções de modulação e alta confiabilidade. Cobre a faixa de frequência de 9 kHz a 3 GHz, sendo capaz de gerar sinais em modulação AM, FM, Pulso e I/Q. O gerador está demonstrado na Figura 3.9.



Figura 3.9: Gerador de sinais: Rhode & Schwarz SM300.

3.3.1.2 Amplificador de Potência

O amplificador de potência Mini-circuits ZHL-16W-43+ opera na faixa de frequência que vai de 1800 MHz até 4000 MHz, porém, como é observado na Figura 3.10, o amplificador oferece um bom ganho na frequência de 900 MHz e devido a este motivo é utilizado nesta dissertação. O ZHL-16W-43+ é ideal para realização de testes em laboratório e atividades que exigem alto grau de flexibilidade com relação à potência de saída, como é o caso do UMTS, LTE, WiMAX, radar e microondas. Com 1.3:1 de VSWR de saída, este amplificador foi desenvolvido para, com uma variedade de impedâncias e ainda fornece potência de saída de confiança. Este modelo inclui sensoriamento de temperatura, para desligamento automático após a temperatura da placa da base atingir 80°C e proteção de saída de carga.



Figura 3.10: Amplificador de Potência: Mini-circuits ZHL-16W-43+.

O gráfico da Figura 3.11 mostra o ganho do amplificador de potência na faixa de frequência de 100 MHz até 4 GHz. Neste gráfico, é possível observar que para as frequências de 900 e 2400 MHz os ganhos obtidos com este amplificador são respectivamente 37,27 e 39,76 dB.

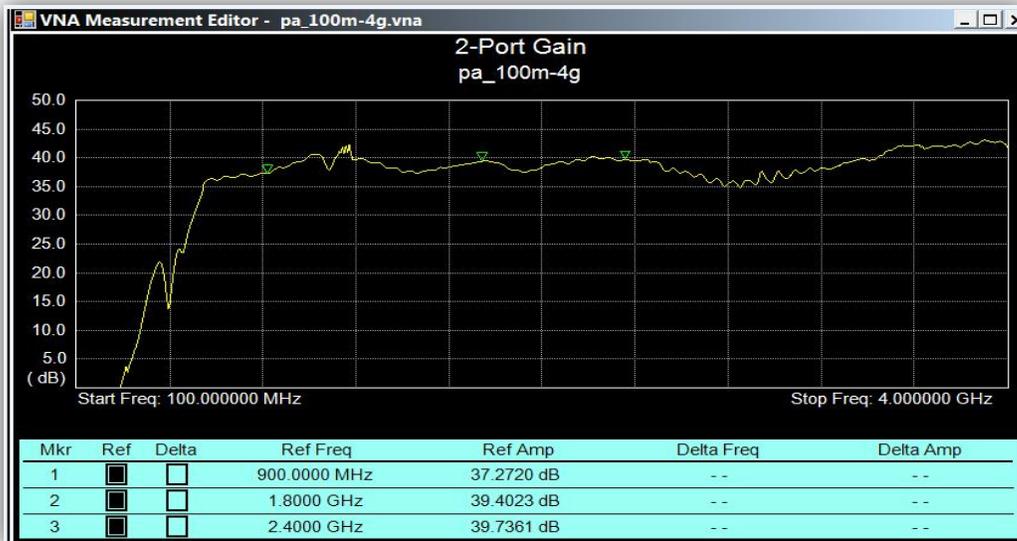


Figura 3.11: Curva do ganho do amplificador de acordo com a frequência de operação.

3.3.1.3 Fonte de Tensão

A fonte de Tensão ICEL PS-5000 tem a função de polarizar o amplificador de RF. Ela possui três fontes independentes em mesmo gabinete. Sendo uma fonte fixa de 5V com capacidade até 3A e duas fontes ajustáveis, de até 30V e capacidade até 3A cada. As duas fontes ajustáveis podem trabalhar em modo independente e em paralelo, permitindo dobrar a capacidade de corrente de saída. A imagem da fonte está na Figura 3.12.



Figura 3.12: Fonte de tensão: ICEL PS5000.

3.3.1.4 Antenas

Para a realização das medições, foram selecionadas antenas omnidirecionais, tanto para o *setup* de transmissão quanto para o de recepção. Isto se deve ao fato delas permitirem uma análise do ambiente por completo, podendo ser coletados multipercursos de todo ambiente.

3.3.1.4.1 Antena transmissora para frequência de 900 MHz

As Figuras 3.13 e 3.14 mostram respectivamente a antena transmissora de 900 MHz e a sua curva de taxa de onda estacionária, com valor de 1,19 para a frequência utilizada.



Figura 3.13: Antena transmissora de 900 MHz.

Fabricante: Artesanal;

Radiação: Omnidirecional;

Frequência de operação 850 MHz – 950 MHz;

Ganho: 12 dBi;

Polarização: Vertical;

Altura utilizada na campanha de medidas: 3 m e 5 m.

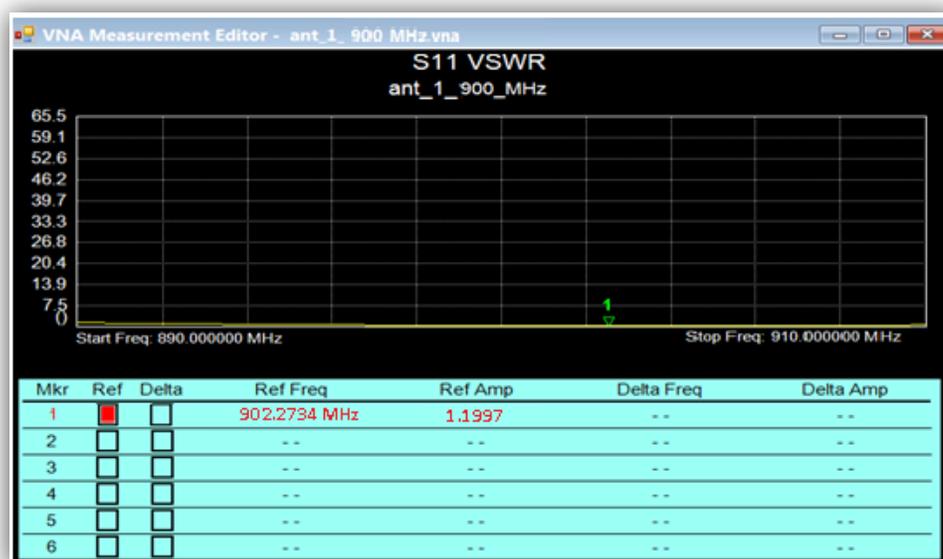


Figura 3.14: VSWR da antena transmissora de 900 MHz.

3.3.1.4.3 Antena transmissora para a frequência de 2400 MHz.

As Figuras 3.15 e 3.16 mostram respectivamente a antena receptora de 2400 MHz e a sua curva de taxa de onda estacionária, com valor de 1,85 para a frequência utilizada.



Figura 3.15: Antena transmissora de 2400 MHz.

Fabricante: Hypertec;

Radiação: Omnidirecional;

Ganho: 18 dBi;

Frequência de Operação: 2400 – 2500 MHz;

Polarização: Vertical;

Altura utilizada na campanha de medidas: 3 m e 5 m.

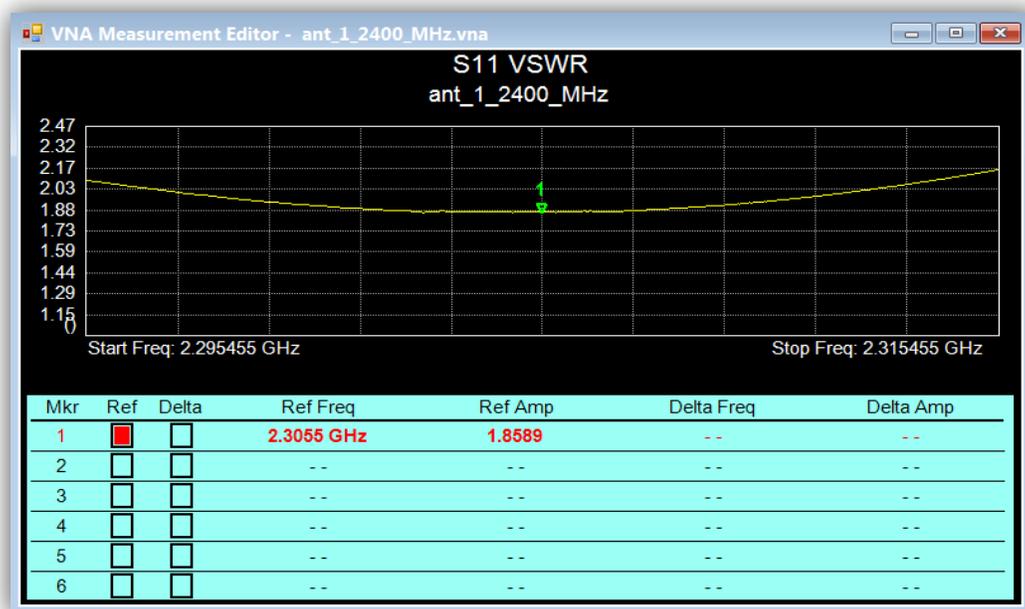


Figura 3.16: VSWR da antena transmissora de 2400 MHz.3.3.1.4 *No break*

Este equipamento, mostrado na Figura 3.17, tem função de estabilizador e filtro de linha, contra variações de energia. Através de seu estabilizador de quatro estágios garante ampla faixa de tensão de rede.

Recursos:

- Trivolt automático 115 V, 127 V e 220 V;
- Ampla faixa de entrada [80 V – 142 V] / [175 V – 284 V];
- Carrega as baterias mesmo com a chave desligada;
- Proteção conta sub e sobretensão;
- Proteção contra sobrecarga e curto-circuito;
- Proteção contra descarga total das baterias;
- Fusíveis e varistores de ação rápida;
- Potência nominal [VA]1: 700;
- Faixa de operação de entrada: 80 V até 142 V [175 V até 284 V];.



Figura 3.17: *No break: Micron Mr2 700 va Sw / Bs-Ti Trivolt.*

3.3.2 Sistema de Recepção

O sistema de recepção empregado nas medições utiliza um analisador de espectro HP 8594E, duas antenas omnidirecionais, que operam nas mesmas frequências das antenas transmissoras e ficam fixas no teto do automóvel a, aproximadamente, 1,5 metros do solo, um inversor de tensão, uma roda de medição de distância e os cabos e conectores necessários para conectar os equipamentos. A Figura 3.18 apresenta o sistema de recepção.



(a)



(b)

Figura 3.18: (a) Analisador de Espectro, *Laptop*, Placa de Aquisição (b) Antena Receptora.

3.3.2.1 Analisador de Espectro

O analisador de espectro utilizado na recepção do sinal foi o HP 8594E. Este analisador apresenta uma saída de vídeo na sua parte traseira, sendo capaz de fornecer uma saída analógica, em volts, de forma que seja possível digitalizar o sinal recebido na taxa desejada. A sua faixa de operação é de 9 kHz até 2,9 GHz, sendo sua precisão de frequência é igual a ± 210 Hz, impedância de entrada de 50 Ohms, faixa dinâmica de -127 dBm até + 30 dBm.



Figura 3.19: Analisador de espectro: HP8594E.

3.3.2.2 Placa de Aquisição

A placa de aquisição DAQCARD-AL-16XE-50 tem a função de coletar as amostras do sinal provindos do analisador de espectro e os pulsos transmitidos pelo sistema de medição de distância. Esta placa pode trabalhar com 8 canais analógicos distintos, com resolução de 200 KSPS/canal.



Figura 3.20: Placa de aquisição: DAQCARD-AL-16XE-50.

Para a utilização da placa DAQCARD-AL-16XE-50, é necessário um computador que tenha a entrada PC CARD tipo II, onde o cartão PCMCIA é inserido. Um cabo *flat* é o encarregado de conectar a placa de aquisição à interface responsável por captar os sinais do analisador de espectro e dos pulsos do sistema de medição, conforme demonstra a Figura 3.21.

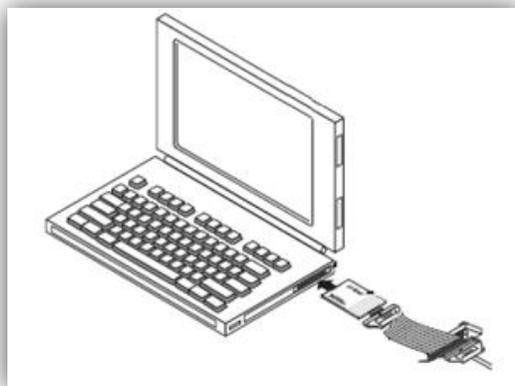


Figura 3.21: Uso da placa de aquisição.

3.3.2.3 Antenas

3.3.2.3.1 Antena Receptora para Frequência de 900 MHz

As Figuras 3.22 e 3.23 mostram respectivamente a antena receptora de 900 MHz e a sua curva de taxa de onda estacionária, com valor de 1,04 para a frequência utilizada.



Figura 3.22: Antena receptora 900 MHz.

Fabricante: Aquário;

Frequência de operação: 800 / 900 / 1800 / 2400 MHz;

Radiação: Omnidirecional;

Ganho: 3 / 7 / 3 / 3 dBi;

Polarização: Vertical;

Altura utilizada na campanha de medição: 1,5 m.

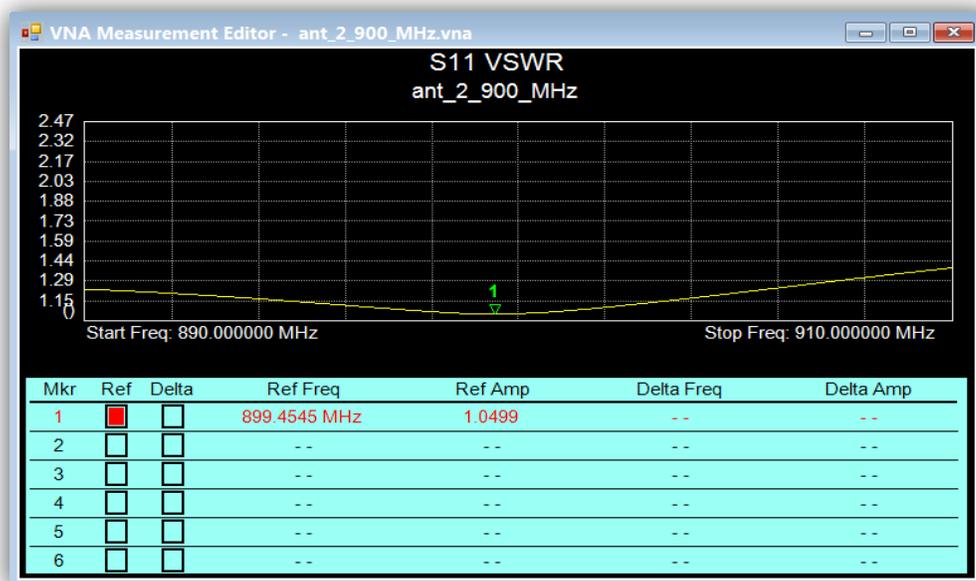


Figura 3.23: VSWR da antena receptora de 900 MHz.

3.3.2.3.3 Antena Receptora para Frequência de 2400 MHz

As Figuras 3.24 e 3.25 mostram, respectivamente, a antena receptora de 2400 MHz e sua curva de taxa de onda estacionária, com valor de 1,26, para a frequência utilizada.



Figura 3.24: Antena receptora de 2400 MHz.

Fabricante: TP-Link;
 Frequência de operação: 2400 – 2483,5 MHz;
 Radiação: Omnidirecional;
 Ganho: 5 dB;
 Polarização: Vertical;
 Altura utilizada na campanha de medição: 1,5 m.



Figura 3.25: VSWR da antena receptora de 2400 MHz.

3.3.2.3.4 Inversor de Tensão

Para a alimentação dos equipamentos localizados no terminal móvel, houve a necessidade do uso de um inversor de tensão, que utilizava a energia DC da bateria do automóvel (12 V) e a transformava em 110-127 V AC, com frequência de 60 Hz, potência nominal de saída de 450 W e potência de pico de saída: 900 W.



Figura 3.26: Inversor de tensão.

3.3.2.3.5 Sistema de Medição de Distância

O sistema de medição de distância é composto por uma roda de bicicleta com aro de quatorze polegadas, onde os raios foram cobertos por fita isolante, de maneira intercalada. Duas hastes de metal foram acopladas à roda e servem de suporte, facilitando o encaixe da roda ao automóvel. Foi instalado um par de sensores (fotoemissor/ fotorreceptor) que trabalha da seguinte forma: o sensor fotoemissor irradia uma luz infravermelha linear e o sensor fotorreceptor capta este sinal. Quando há comunicação entre os sensores, a corrente circula pelo fotorreceptor gerando uma saída baixa, representada pelo nível “0”. Isto ocorre nos espaços entre os raios da roda que não estão envolvidos por fita isolante. No caso em que há uma interrupção da luz, não circula corrente no fotorreceptor, sendo gerada saída alta, representada pelo nível “1” e isto acontece quando a luz infravermelha se depara com os espaçamentos envolvidos por fita isolante. À medida que o carro se desloca, a roda gira, é gerada uma série de pulsos “1,0,1,0...”. Esses pulsos são capturados e levados à interface de aquisição de forma que, pela contagem de zeros e uns, será possível saber a distância percorrida no deslocamento do móvel. A utilização deste equipamento para medir distância foi necessária, pois, dentro do ambiente de vegetação o equipamento de GPS não consegue captar o sinal do satélite.



Figura 3.27: Roda de medição.

3.4 Metodologia Usada na Obtenção dos Dados

Para a realização da campanha de medição, foi instalado um sistema de transmissão próximo ao prédio da administração do Jardim Botânico de Niterói. O posicionamento da antena em relação ao prédio está mostrado na Figura 3.2 e 3.5. O sistema de recepção foi instalado em um automóvel Celta, que se deslocou pelas rotas descritas no item 3.1, com velocidade de 10 Km/h. A antena receptora captava o sinal e o enviava ao analisador de espectro. Este, por sua vez, repassava o mesmo sinal ao computador portátil através de uma placa de aquisição. Esta placa também recebia os pulsos oriundos do sistema de medição de distância. No computador, um programa desenvolvido no *software* Matlab[®] era encarregado de armazenar os dados de potência recebida e dos pulsos emitidos pelo sistema de medição de distância. Estes dados foram salvos no formato “.txt” e, posteriormente, usados em um segundo programa, que tem as seguintes funções:

1. Separar o desvanecimento em pequena escala do desvanecimento em grande escala.
2. Ajudar na elaboração do novo modelo de predição através do cálculo do coeficiente de atenuação e da potência recebida na distância de referência;

3. Gerar os gráficos de perda de propagação para os vários modelos apresentados no Capítulo 2 e do novo modelo;
4. Realizar o cálculo do erro médio quadrático e do desvio padrão.

Para o seu funcionamento, o segundo programa precisa das seguintes informações de entrada: número de amostras, frequência de operação do sistema, intervalo de tempo de gravação.

A taxa de amostragem tem uma importância fundamental para que o decorrer da análise dos dados esteja correta. A taxa deve ser calculada cuidadosamente, obedecendo ao Teorema de Nyquist. Como somente a portadora é transmitida, o Efeito Doppler será responsável por alargar a banda do sinal devido ao deslocamento da frequência portadora com o movimento do receptor. Há, ainda, que se considerar o efeito do canal no sinal transmitido e, para que os *Fadings* mais profundos possam ser detetados, é necessário que uma taxa maior seja empregada na aquisição das amostras de sinal. Este cuidado é necessário para que se evitem possíveis problemas causados por excesso de amostras, como é o caso da aquisição de amostras correlatadas ou o carregamento desnecessário da memória do dispositivo de gravação. A aquisição de amostras em uma taxa inferior à necessária é igualmente danosa, pois, os *fades* profundos podem passar despercebidos. Dessa forma, a taxa de amostragem deve ser escolhida tal que: $F_s \geq 2B$, para satisfazer ao critério de Nyquist, onde B é a faixa do sinal transmitido. Como ocorre o Deslocamento Doppler, $B \approx 2 f_m$ é a faixa de deslocamento máximo possível, onde $f_m = v/\lambda$ (v é a velocidade relativa entre o transmissor e o receptor, e λ é o comprimento de onda da portadora transmitida). Assim, tem-se:

$$F_s \geq 4 f_m \rightarrow F_s \geq \frac{4v}{\lambda} \quad (3.1)$$

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE PROPAGAÇÃO PARA PARQUES URBANOS

Neste capítulo, partindo dos dados experimentais, é elaborado um modelo que leva em consideração as variáveis: distância entre a antena transmissora e a antena receptora, frequência de operação e a altura da antena transmissora, mantendo fixa a altura da antena receptora. Será descrito o método utilizado na elaboração do modelo e realizada a sua comparação aos modelos descritos no Capítulo 2.

4.1 SEPARAÇÃO DO DESVANECIMENTO EM GRANDE ESCALA DO DESVANECIMENTO EM PEQUENA ESCALA

Para dar início à elaboração de um novo modelo de propagação, partindo das medidas obtidas, é necessário separar o desvanecimento em grande escala do desvanecimento em pequena escala. Segundo Bertoni, o desvanecimento em pequena escala pode ser desassociado do desvanecimento em grande escala através de uma média deslizante em uma janela de tempo de 1 segundo. Como já foi citado no Capítulo 3, a velocidade em que o veículo se deslocou, enquanto fazia a aquisição dos dados, era de 10 km/h, e então, o intervalo de tempo de tempo de 1 segundo corresponde a 2,77 metros percorridos. Assim, foram obtidos os seguintes gráficos das Figuras 4.1 a 4.4 mostrando o desvanecimento em grande escala em comparação ao desvanecimento em pequena escala, para a frequência de 900 MHz, com variação da altura da antena transmissora e das rotas, o mesmo ocorrendo para nas Figuras 4.5 a 4.8, para a frequência de 2400 MHz. Em todas estas figuras citadas, a perda no percurso ainda não foi extraída, estando somada aos desvanecimentos.

A faixa dinâmica do analisador de espectro era de 68 dB. Com isso, foi possível medir o sinal até poucas dezenas de metros, fazendo com que a análise da área de cobertura propiciada pelo sistema de transmissão ficasse prejudicada, pois não foi possível observar a influência da vegetação em uma maior distância.

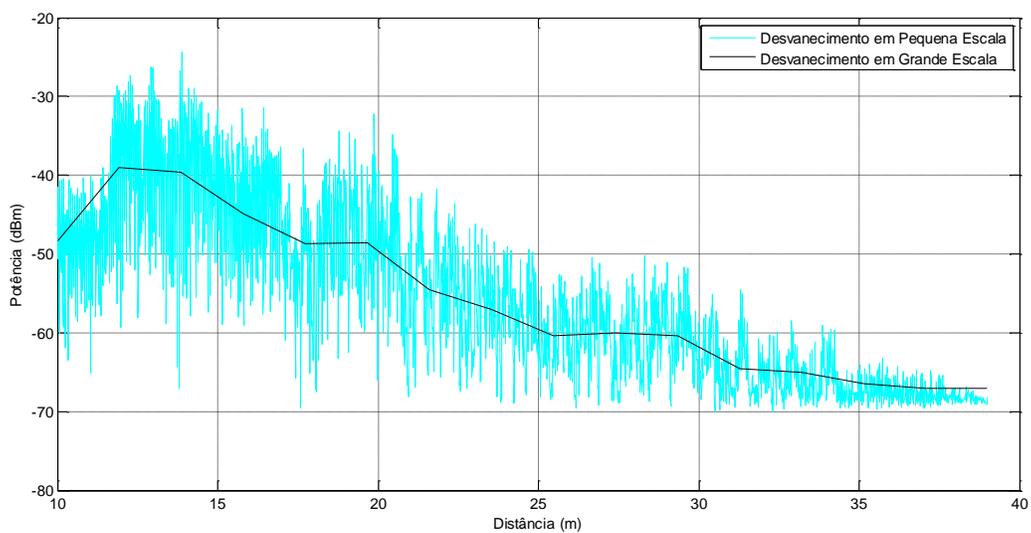


Figura 4.1: Nível de sinal medido na Rota 1: 900 MHz e $H_t = 3$ m.

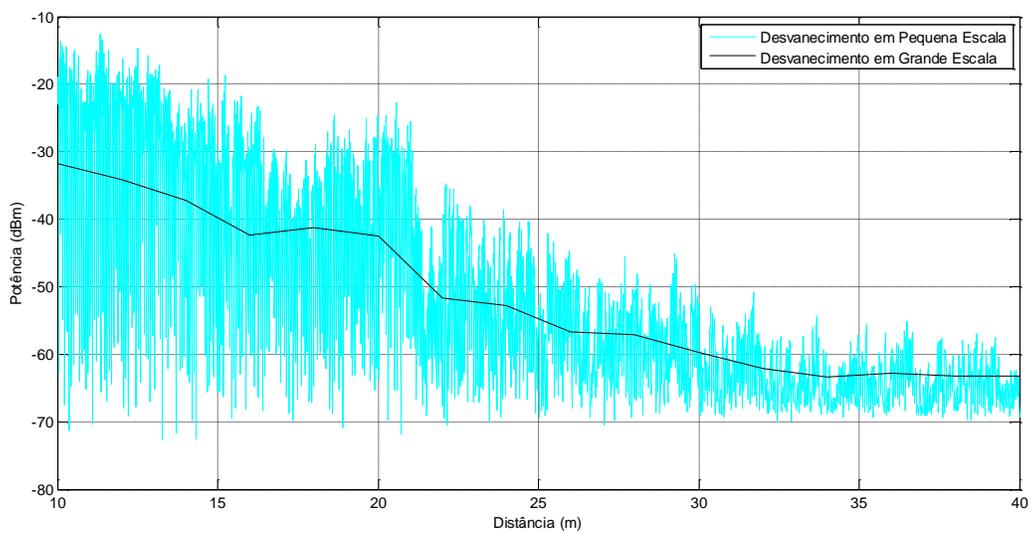


Figura 4.2: Nível de sinal medido na Rota 1: 900 MHz e $H_t = 5$ m.

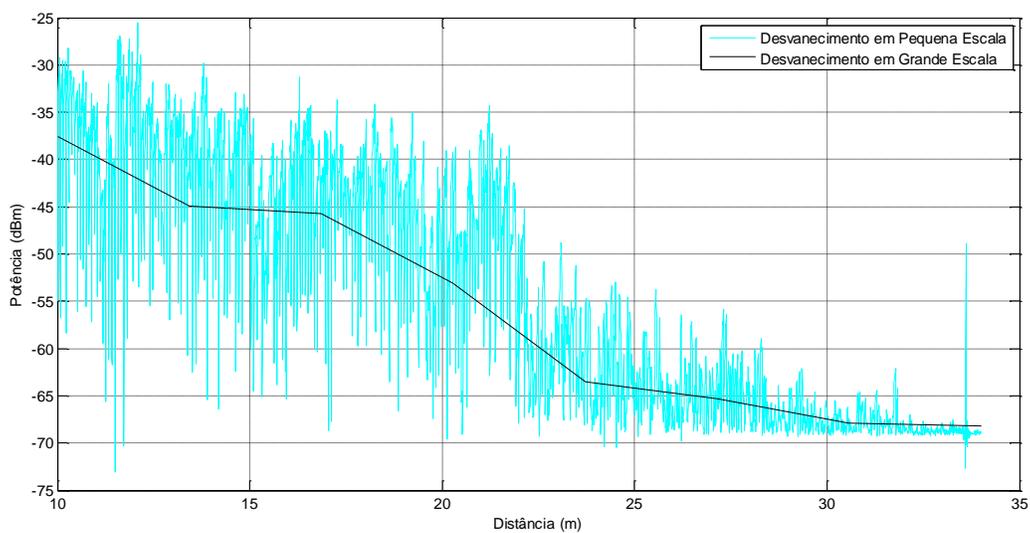


Figura 4.3: Nível de sinal medido na Rota 1: 2400 MHz e $H_t = 3$ m.

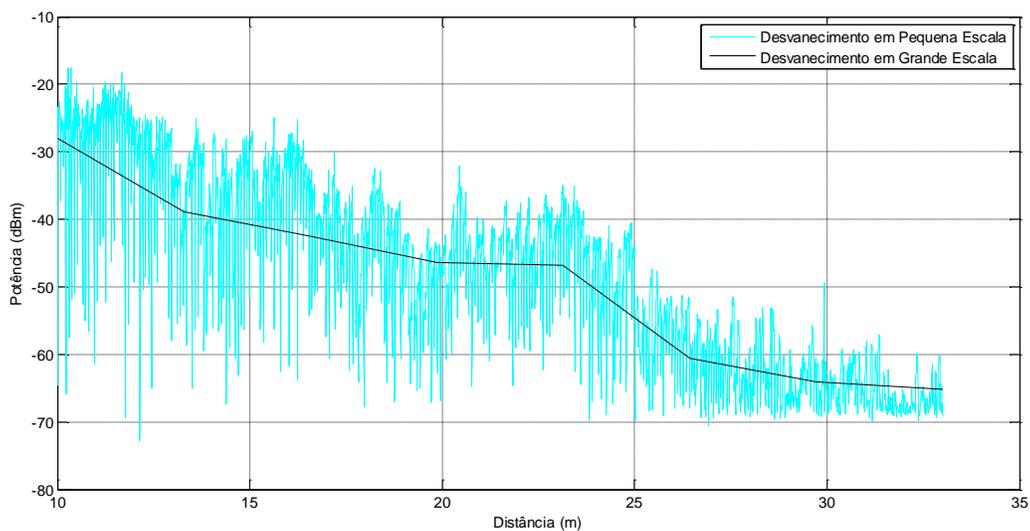


Figura 4.4: Nível de sinal medido na Rota 1: 2400 MHz e $H_t = 5$ m.

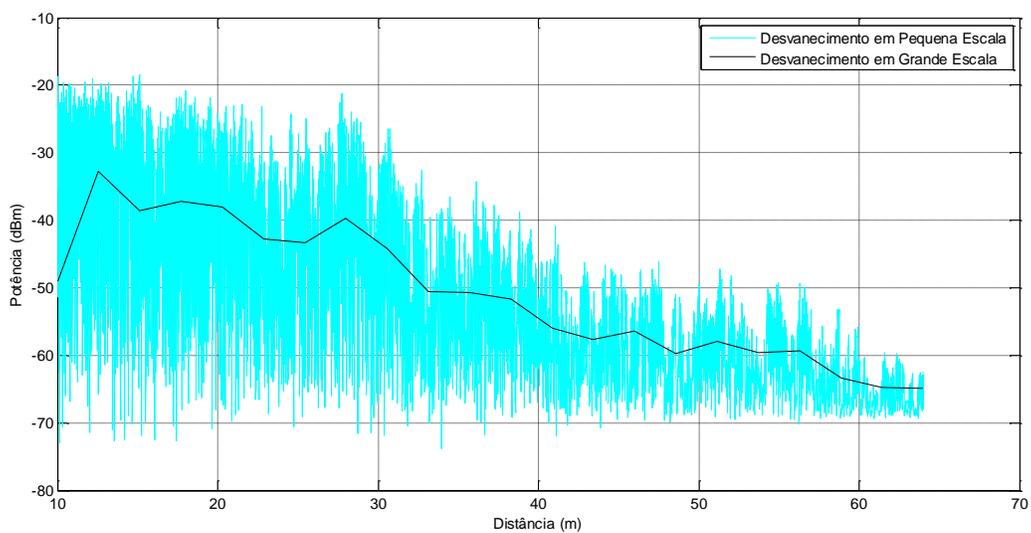


Figura 4.5: Nível de sinal medido na Rota 2: 900 MHz e $H_t = 3$ m.

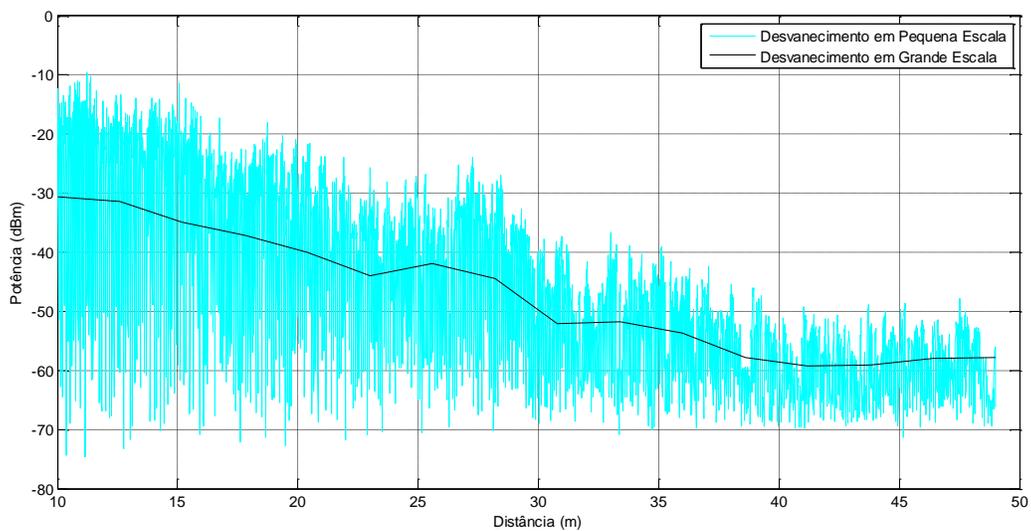


Figura 4.6: Nível de sinal medido na Rota 2: 900 MHz e $H_t = 5$ m.

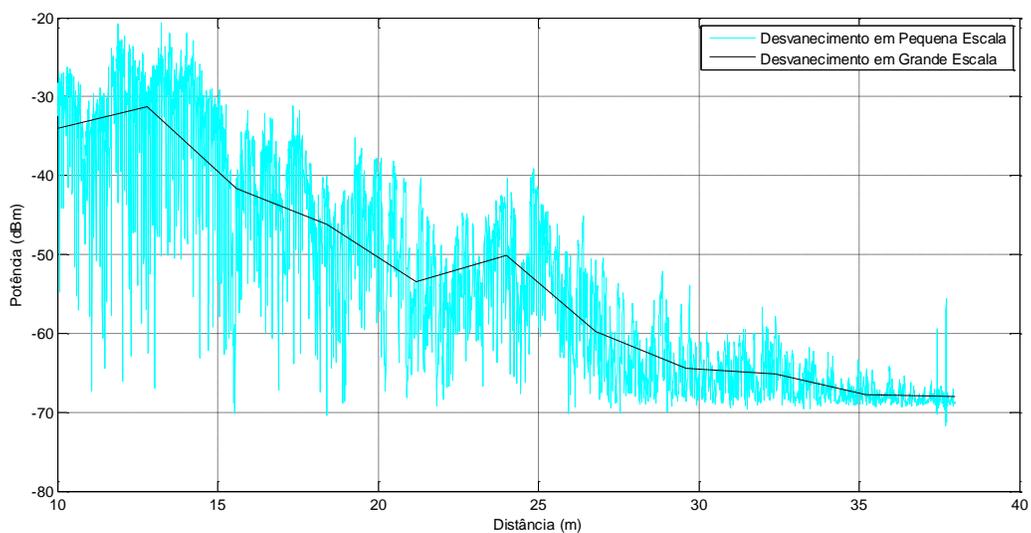


Figura 4.7: Nível de sinal medido na Rota 2: 2400 MHz e $H_t = 3$ m.

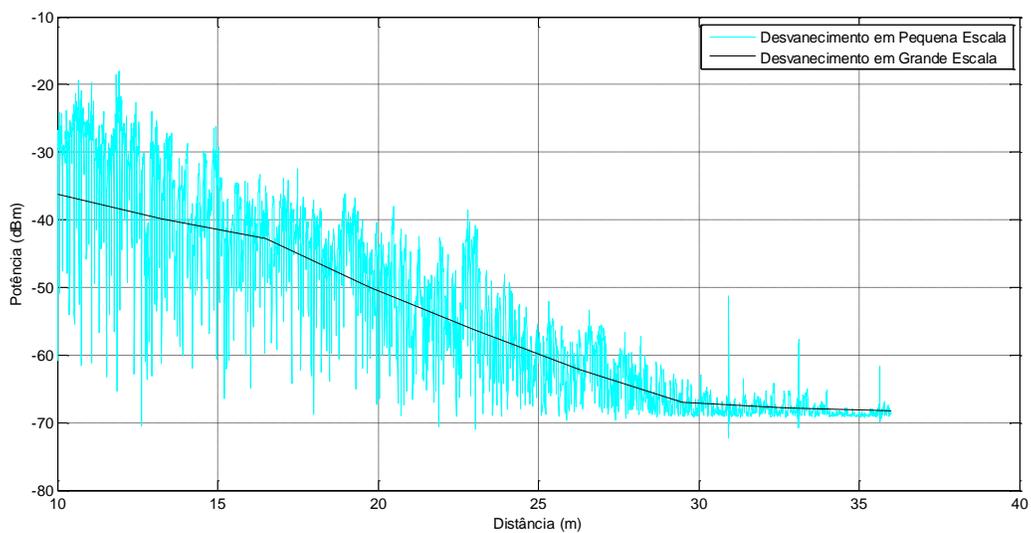


Figura 4.8: Nível de sinal medido na Rota 2: 2400 MHz e $H_t = 5$ m.

4.2 ELABORAÇÃO DO MODELO DE PROPAGAÇÃO

A potência média do sinal recebido é reduzida com o aumento da distância, tanto em ambientes internos quanto em ambientes externos. Como já descrito na Equação 2.3, para uma distância arbitrária entre a antena transmissora e receptora, tal potência pode ser encontrada por:

$$Pr = P(d_0) - 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (4.1)$$

onde:

Pr → Potência recebida a d metros da transmissora (dBm);

$P(d_0)$ → Potência recebida na distância de referência (dBm);

n → Coeficiente de atenuação;

d_0 → Distância de referência (m);

d → Distância entre a antena transmissora e antena receptora (m).

Este modelo pode ser usado em simulações computacionais para prever os níveis de sinais de potência recebida em localizações aleatórias, no desenvolvimento e análise de sistemas de comunicação. O modelo de propagação proposto nesta dissertação tem como base este modelo, que mostra que a potência recebida em cada ponto do percurso é linearmente proporcional ao logaritmo da distância deste ponto ao transmissor.

4.2.1 Determinação do Coeficiente de Atenuação

A determinação do coeficiente de atenuação é peça chave na elaboração do modelo de propagação. O valor do coeficiente n está ligado diretamente às características do ambiente em estudo. No espaço livre, o valor de n é 2 e aumenta proporcionalmente à quantidade de obstáculos encontrados no ambiente. O coeficiente n pode ser encontrado a partir das informações de potência recebida e distância. Nesta dissertação, foi utilizado o Método dos mínimos quadrados para a realização destes cálculos, pois, este método apresenta bons resultados e é bem simples.

O Método dos mínimos quadrados usa uma equação da reta para aproximar o conjunto de dados, $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, associados à distância e ao nível de potência medida nessa distância, onde $n \geq 2$. Assim, a reta de ajuste pode ser escrita como:

$$y = a + bx \quad (4.2)$$

Associando à Equação 4.1, tem-se que:

$$\left. \begin{aligned} y &\equiv P(d) \\ x &\equiv 10 \log_{10}(d/d_0) \\ a &\equiv P(d_0) \\ b &\equiv -n \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

A reta de melhor ajuste $f(x)$ é a que tem o menor erro quadrático, ou seja:

$$\Pi = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2 \Rightarrow \min \quad (4.4)$$

Observa-se que os coeficientes a e b são desconhecidos, enquanto que x_i e y_i são conhecidos. Para obter o menor erro quadrático, os coeficientes desconhecidos a e b devem produzir derivadas nulas.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial a} &= 2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)] = 0 \\ \frac{\partial \Pi}{\partial b} &= 2 \sum_{i=1}^n x_i [y_i - (a + bx_i)] = 0 \end{aligned} \right. \quad (4.5)$$

Expandindo o conjunto de Equações 4.5, obtém-se:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i = a \sum_{i=1}^n 1 + b \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i = a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{cases} \quad (4.6)$$

E, tirando o valor de a na primeira dessas equações, por substituição na segunda delas, calcula-se o valor de b , chegando-se ao conjunto de Equações 4.7:

$$\begin{cases} a = \frac{\sum(y) \sum(x^2) - \sum(x) \sum(xy)}{n \sum(x^2) - (\sum x)^2} \\ b = \frac{n \sum(xy) - \sum(x) \sum(y)}{n \sum(x^2) - (\sum x)^2} \end{cases} \quad (4.7)$$

Encontrados a e b e substituídos nas respectivas Equações 4.3, a reta de ajuste é obtida para cada situação de frequência/altura da antena transmissora/rota.

Utilizando a método descrito, foram encontrados os coeficientes de atenuação ($-b$) e a potência recebida na distância de referência d_0 (a), que neste trabalho é igual a 10 metros, conforme as Tabelas 4.1 e 4.4.

Rota	Frequência (MHz)	Altura da Antena Transmissora (m)	Coefficiente de Atenuação
1	900	3	4,97
1	900	5	6,37
1	2400	3	6,05
1	2400	5	7,14
2	900	3	3,64
2	900	5	6,91
2	2400	3	4,76
2	2400	5	6,64

Tabela 4.1: Coeficientes de Atenuação.

Observa-se que os coeficientes encontrados crescem com a frequência, como era de se esperar. Nos itens seguintes, foram separadas as medições, de acordo com a frequência de operação. Assim, é possível ter uma melhor visão sobre os resultados encontrados e analisar melhor estas informações.

4.2.2 Análise dos Coeficientes de Atenuação Encontrados para a Frequência de 900 MHz.

Como é observado na Tabela 4.1, a Rota 1 apresentou coeficientes de atenuação maiores que a Rota 2. Isto se deve ao fato da Rota 1 apresentar vegetação mais densa, como foi descrito no Capítulo 3. É possível notar na Tabela 4.2, que os coeficientes de atenuação encontrados para medições realizadas com a antena transmissora posicionada a cinco metros de altura, tiveram valores maiores que os resultados encontrados para as medições realizadas com a antena situada a três metros de altura. Isto pode ser justificado pela aproximação da antena transmissora à altura média da copa das árvores, onde a atenuação tende a ser maior devido ao maior número de obstáculos, tais como folhas e galhos.

Rota	Frequência (MHz)	Altura da antena Transmissora (m)	Coefficiente de Atenuação
1	900	3	4,97
1	900	5	6,05
2	900	3	3,64
2	900	5	4,76

Tabela 4.2: Coeficientes de atenuação para a frequência de 900 MHz.

4.2.3 Análise dos Coeficientes de Atenuação Encontrados para a Frequência de 2400 MHz.

Rota	Frequência (MHz)	Altura da antena Transmissora (m)	Coefficiente de Atenuação
1	2400	3	6,73
1	2400	5	7,14
2	2400	3	6,91
2	2400	5	6,64

Tabela 4.3: Coeficientes de atenuação para a frequência de 2400 MHz.

Ao analisar os coeficientes de atenuação encontrados para a frequência de 2400 MHz, é possível observar que os mesmos tiveram uma variação menor com a variação da altura transmissora, se comparados aos coeficientes encontrados para a frequência de 900 MHz. A limitação da faixa dinâmica do analisador de espectro acarretou em menores distâncias percorridas relativamente ao caso da frequência de 900 MHz, uma vez que a atenuação é mais forte para frequências maiores.

Os resultados encontrados para a potência recebida na distância de referência (10 m), assim como os resultados encontrados para os fatores de atenuação, foram coesos, de uma forma geral, como pode ser observado na Tabela 4.4. Vale lembrar que as antenas usadas para 900 MHz e 2400 MHz apresentavam ganho, respectivamente, iguais a 12 dBi e 18 dBi, para a transmissora, e 7 dBi e 5 dBi para a receptora.

Rota	Frequência (MHz)	Altura da Antena Transmissora (m)	Potência Recebida (dBm)
1	900	3	-38,00
1	900	5	-29,35
1	2400	3	-35,94
1	2400	5	-27,44
2	900	3	-32,01
2	900	5	-26,78
2	2400	3	-28,95
2	2400	5	-32,65

Tabela 4.4: Potência recebida na distância de referência.

A elaboração de um modelo de propagação que contivesse apenas uma equação para as duas rotas não seria ideal, pois as características dos ambientes da Rota 1 e da Rota 2 são muito diferentes. Desta forma, duas equações foram determinadas, uma para cada rota.

Para o desenvolvimento do modelo referente à Rota 1, os parâmetros alusivos à medição na frequência de 900 MHz, com a antena transmissora posicionada à altura de 3 metros, foram tomados como referência, assim, foi obtida a Equação 4.7 que calcula a potência recebida para uma determinada distância.

$$Pr = -38,00 - 10.4,97 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (4.8)$$

onde:

Pr → Potência recebida (dBm);

d → Distância percorrida (m);

d₀ → Distância de referência (= 10 m);

A Equação 4.8 é um modelo próprio para a medição na frequência, altura de antena transmissora e rota, usadas para sua elaboração. Isto faz com que este modelo se ajuste muito

bem aos dados desta medição, porém, deve ser ajustado para que possa ser útil em outros experimentos. Com o objetivo de deixar o modelo aplicável a outras frequências e alturas de antenas transmissoras, foram acrescentadas novas variáveis, referentes à altura da antena transmissora e à frequência de operação do sistema, da seguinte forma:

$$Pr = -38,00 - 10 \cdot 4,97 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) - 20 \log_{10} \left(\frac{f}{f_{\text{ref}}} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{h_t}{h_{t_{\text{ref}}}} \right) \quad (4.9)$$

onde:

Pr → Potência recebida (dBm);

d → Distância percorrida (m);

d_0 → Distância de referência (= 10 m);

f → Frequência de operação do sistema (GHz);

f_{ref} → Frequência de referência (= 0,9 GHz);

h_t → Altura da antena transmissora (m);

$h_{t_{\text{ref}}}$ → Altura de referência da antena transmissora (= 3 m).

A justificativa para inclusão do argumento que faz alusão à frequência é simples: o aumento da frequência de operação de um sistema, para um mesmo ambiente, faz com que o sinal sofra mais atenuação. Na Equação 4.9 a potência recebida cai com o aumento de f crescente, por isso que o termo $-20 \cdot \log_{10} \left(\frac{f}{f_{\text{ref}}} \right)$ aparece negativo. É importante observar que nos casos em que a frequência de operação do sistema é igual à frequência de referência, este resultado é nulo, não influenciando na atenuação da Equação 4.9 e, para frequências inferiores a 900 MHz, o termo fica positivo, crescendo a potência recebida a uma mesma distância. A inserção do argumento que leva em conta a altura da antena transmissora exige uma observação aprofundada sobre o ambiente em que o sinal se propaga. Como pode ser observado nas Figuras 3.3, 3.5 e 3.6, o sinal, na Rota 1, cruza uma edificação. A função deste argumento é dada por: $+20 \cdot \log_{10} \left(\frac{h_t}{h_{t_{\text{ref}}}} \right)$, pois, nota-se que para esta rota, o aumento da altura da antena transmissora proporciona um ganho na potência recebida, uma vez que livra, parcialmente, o sinal da influência da edificação.

Para a Rota 2, foi utilizada a mesma metodologia, e a equação resultante foi:

$$Pr = -32,01 - 10.3,64. \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) - 20 \log_{10} \left(\frac{f_{\text{GHz}}}{f_{\text{GHzref}}} \right) - 20 \log_{10} \left(\frac{h_{t_m}}{h_{t_{\text{ref}_m}}} \right) \quad (4.10)$$

onde:

Pr → Potência recebida (dBm);

d → Distância percorrida (m);

d_0 → Distância de referência (= 10 m);

f → Frequência de operação do sistema (GHz);

f_{ref} → Frequência de referência (= 0,9 GHz);

h_t → Altura da antena transmissora (m);

$h_{t_{\text{ref}}}$ → Altura de referência da antena transmissora (= 3 m).

A adição proporcionada pelo argumento que leva em conta a frequência, tem a mesma justificativa do modelo gerado para a Rota 1. Já o argumento que trata da altura da antena transmissora, tem um objetivo contrário daquele proposto para a Rota 1. Na Rota 2, o aumento da altura da antena transmissora, proporciona uma aumento da atenuação, pois, ao elevar a antena transmissora, esta se aproxima da altura média da copa das árvores, onde existe a tendência que o sinal sofra maior atenuação, devido à maior presença de obstáculos, no caso, as folhas e galhos.

4.3 Comparação entre os Dados Experimentais e os Modelos de Predição

A comparação dos modelos de predição com os dados experimentais é importante, pois permite chegar à conclusão quanto ao ajuste do modelo proposto. Essas comparações serão apresentadas em cinco formatos:

1. Representações gráficas dos dados medidos em conjunto com os valores encontrados através dos modelos de predição;
2. Tabela que mostra os resultados do cálculo do Erro Médio Quadrático. Este valor apresenta a diferença elevada ao quadrado, entre o valor estimado e o valor observado.

3. Tabela que mostra os resultados do cálculo das Médias. A média é o valor onde se concentra a maior parte dos dados de uma distribuição.
4. Tabela que mostra os resultados do cálculo do Desvio Padrão. O Desvio Padrão mostra a variabilidade dos dados em torno da média.

As Figuras 4.9 a 4.16 e as Tabelas 4.5 a 4.7 mostram os resultados dos tópicos 1 a 4.

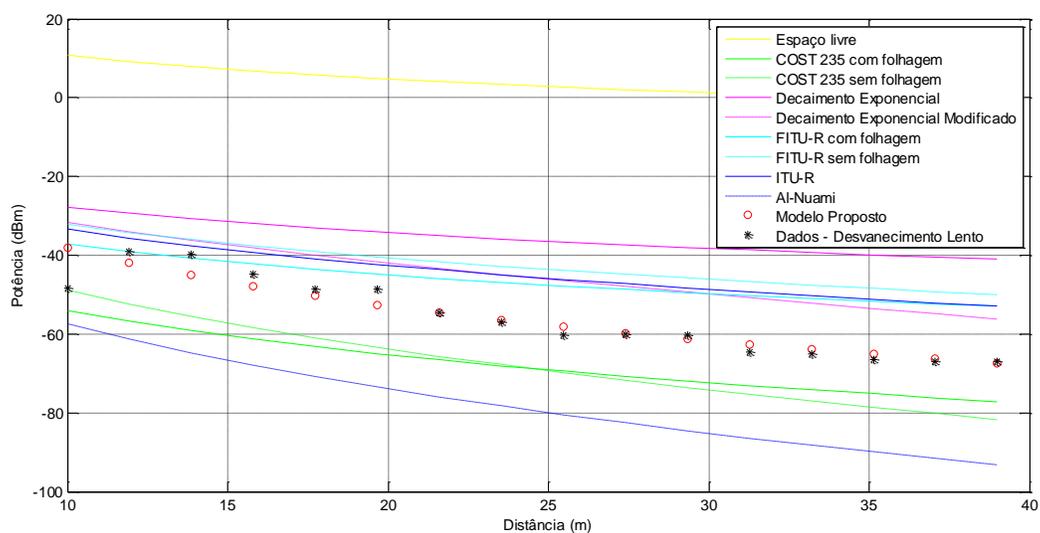


Figura 4.9: Dados da Rota 1, Frequência = 900 MHz e $H_t = 3$ m.

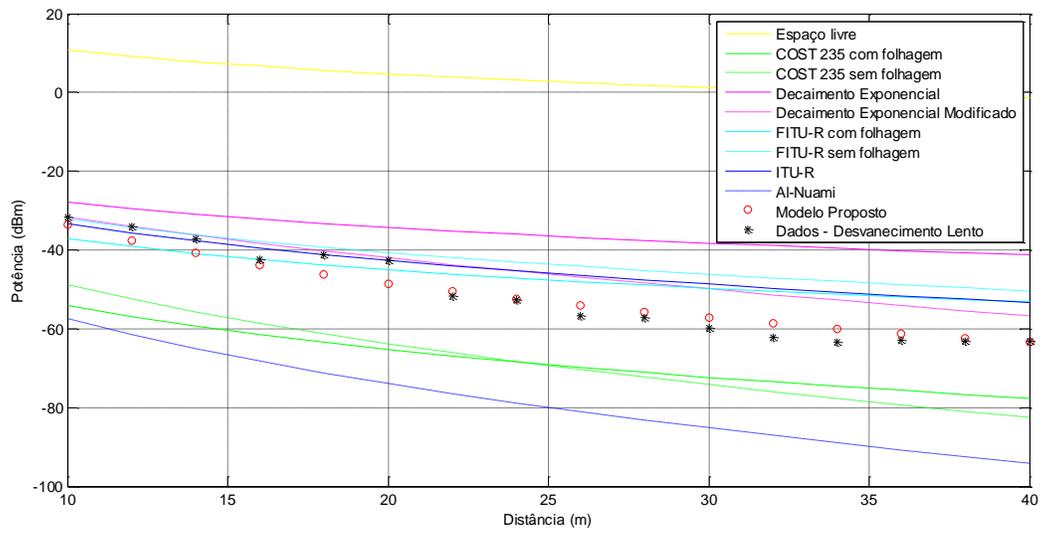


Figura 4.10: Dados da Rota 1, Frequência = 900 MHz e $H_t = 5$ m

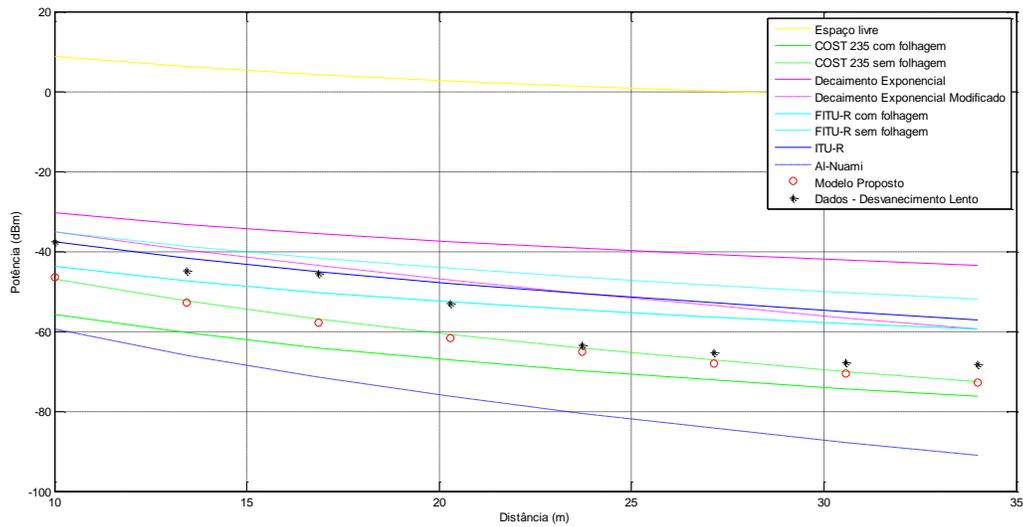


Figura 4.11: Dados da Rota 1, Frequência = 2400 MHz e $H_t = 3$ m.

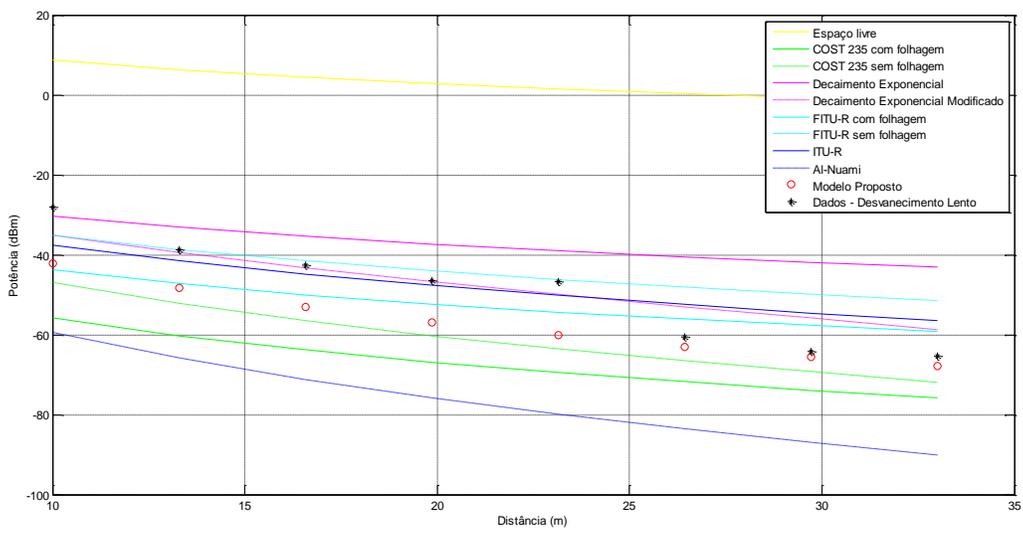


Figura 4.12: Dados da Rota 1, Frequência = 2400 MHz e $H_t = 5$ m.

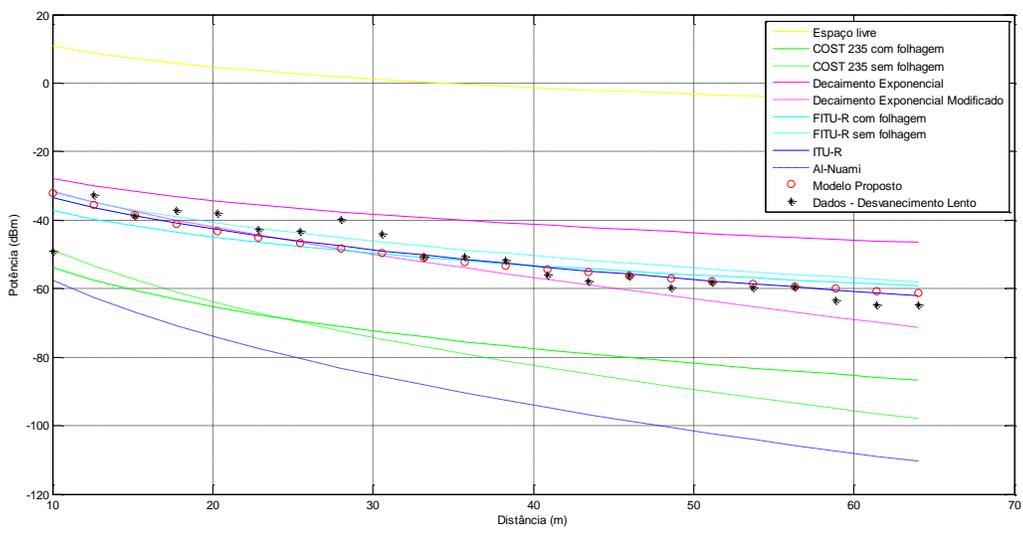


Figura 4.13: Dados da Rota 2, Frequência = 900 MHz e $H_t = 3$ m.

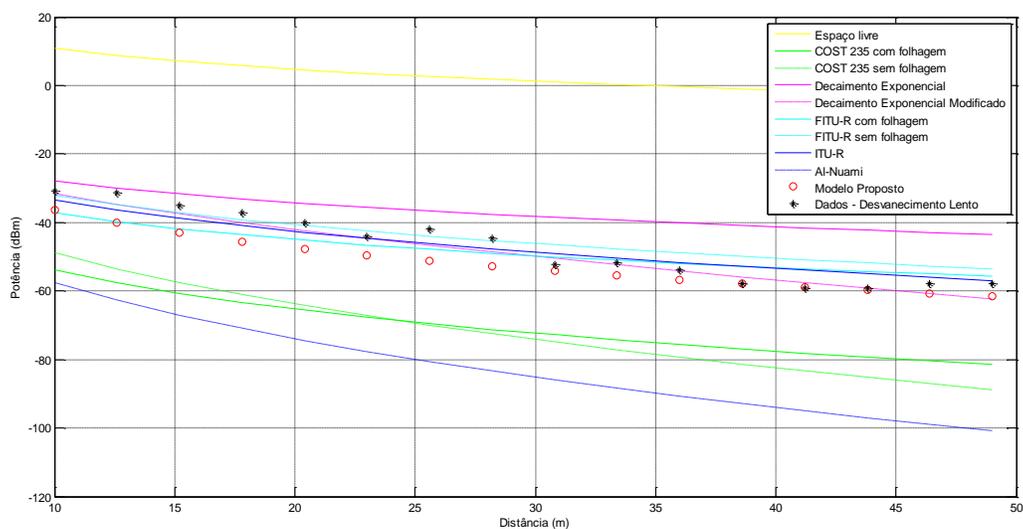


Figura 4.14: Dados da Rota 2, Frequência = 900 MHz e $H_t = 5$ m.

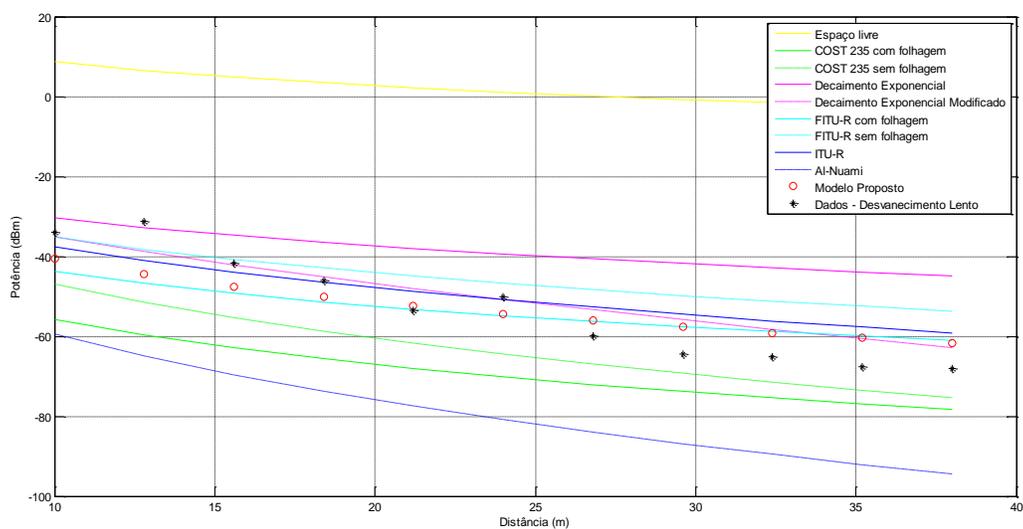


Figura 4.15: Dados da Rota 2, Frequência = 2400 MHz e $H_t = 3$ m.

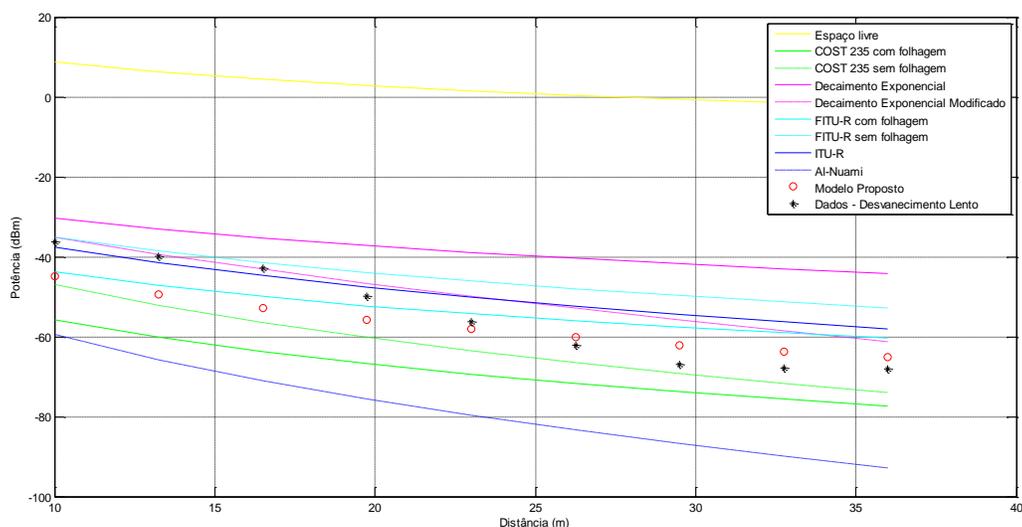


Figura 4.16: Dados da Rota 2, Frequência = 2400 MHz e $H_t = 5$ m.

Erro Médio Quadrático								
Rota	1	1	1	1	2	2	2	2
Frequência (MHz)	900	900	2400	2400	900	900	2400	2400
Altura da antena transmissora (m)	3	5	3	5	3	5	3	5
COST 235 com folhagem	0,00	0,13	0,00	0,40	0,07	0,34	0,13	0,01
COST 235 sem folhagem	0,00	0,12	0,00	0,39	0,07	0,34	0,13	0,01
Decaimento Exponencial	26,62	17,07	0,46	0,02	0,90	0,64	0,15	0,38
Decaimento Exponencial Modificado	0,13	0,00	0,00	0,20	0,00	0,05	0,04	0,00
FITU-R com folhagem	0,00	0,04	0,00	0,36	0,02	0,20	0,11	0,01
FITU-R sem folhagem	0,15	0,01	0,15	0,17	0,00	0,04	0,02	0,00
ITU-R	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,10	0,07	0,00
Al-Nuami	0,00	0,13	0,00	0,40	0,07	0,34	0,14	0,01
Modelo Proposto	0,24	0,02	0,00	0,36	0,52	0,22	0,10	0,13

Tabela 4.5: Resultados do cálculo do Erro Médio Quadrático.

Média								
Rota	1	1	1	1	2	2	2	2
Frequência (MHz)	900	900	2400	2400	900	900	2400	2400
Altura da antena transmissora (m)	3	5	3	5	3	5	3	5
COST 235 com folhagem	-67,60	-67,92	-67,55	-67,20	-74,25	-70,52	-68,95	-68,25
COST 235 sem folhagem	-67,54	-68,02	-61,35	-60,90	-77,91	-72,00	-63,17	-62,26
Decaimento Exponencial	-35,57	-35,75	-37,79	-37,57	-39,37	-37,23	-38,70	-38,25
Decaimento Exponencial Modificado	-45,07	-45,45	-48,19	-47,73	-53,72	-48,67	-50,05	-49,12
FITU-R com folhagem	-46,52	-46,73	-52,84	-52,58	-50,92	-48,46	-53,91	-53,38
FITU-R sem folhagem	-42,54	-42,79	-44,65	-44,36	-7,88	-44,86	-45,82	-45,24
ITU-R	-44,69	-44,96	-48,48	-48,14	-50,64	-47,26	-49,86	-49,17
Al-Nuami	-77,94	-78,45	-77,13	-76,58	-89,06	-82,74	-79,36	-79,25
Modelo Poposto	-55,70	-54,64	-61,97	-57,10	-50,77	-51,98	-53,13	-56,92
Dados Medidos	-55,72	-51,37	-55,78	-48,06	50,82	-47,12	-52,89	-54,48

Tabela 4.6: Resultados do cálculo da Média.

Desvio Padrão								
Rota	1	1	1	1	2	2	2	2
Frequência (MHz)	900	900	2400	2400	900	900	2400	2400
Altura da antena transmissora (m)	3	5	3	5	3	5	3	5
COST 235 com folhagem	47,52	66,20	33,28	51,31	109,87	93,57	53,26	41,32
COST 235 sem folhagem	47,28	66,59	15,76	33,49	127,08	99,50	34,09	23,36
Decaimento Exponencial	80,59	62,45	50,87	32,50	53,71	39,55	47,04	48,68
Decaimento Exponencial Modificado	42,59	23,68	21,45	37,51	13,58	62,00	94,08	46,05
FITU-R com folhagem	36,80	18,54	83,03	99,63	0,44	53,55	33,90	3,29
FITU-R sem folhagem	52,72	34,31	31,48	13,29	13,81	90,63	23,43	27,71
ITU-R	44,14	25,62	20,64	25,99	0,84	0,55	10,05	15,90
Al-Nuami	88,88	108,34	60,68	77,83	179,35	142,46	87,80	71,31
Modelo Poposto	0,09	11,09	17,50	22,75	0,25	19,44	0,78	7,34

Tabela 4.7: Resultados do cálculo do Desvio Padrão.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Nesta etapa final da dissertação é feita uma análise geral do trabalho realizado, dos resultados encontrados e são feitas propostas de trabalhos futuros.

O objetivo desta dissertação era a elaboração de um modelo de propagação para um ambiente de parque urbano, ou seja, um ambiente no qual a característica de floresta é predominante, porém, também são encontradas áreas de clareiras, pequenas construções, trânsito de pessoas e alguns automóveis.

Com a intenção de atingir os objetivos, foram realizados testes no Laboratório de Propagação da Universidade Federal Fluminense. Esses testes tiveram o intuito de acertar as configurações dos equipamentos e ter base do conhecimento prático que as medidas de campo exigem. Logo após esta fase, foi realizada uma campanha de medições no Jardim Botânico de Niterói. Esta campanha gerou dados de potência recebida e informação de distância percorrida. Ao processar estes dados, foram obtidos os níveis de potência recebida versus a distância percorrida, que por sua vez foram utilizados para calcular o coeficiente de atenuação do ambiente e a potência recebida na distância de referência.

Com os parâmetros citados anteriormente, foi possível elaborar um modelo de propagação, no qual são variáveis: a distância entre antena transmissora e receptora, frequência de operação do sistema e a altura da antena transmissora.

Ao analisar os resultados encontrados, notou-se que a perda de propagação foi, de forma geral, coerente com a teoria, pois nas situações em que o ambiente tinha maior número de obstáculos e a frequência era mais elevada, a potência decaiu de forma mais abrupta.

Para chegar a uma conclusão final sobre qual modelo tem melhor desempenho, faz-se necessário analisar, primeiramente, cada método de comparação.

No método do Erro Médio Quadrático, a maioria dos modelos apresentou desempenho aceitável, sendo o modelo FITU-R sem folhagem o que apresentou melhor resultado. O único modelo que não demonstrou uma boa qualidade, como era de se esperar, foi o Espaço Livre.

Os modelos nos quais as médias mais se aproximaram da Média dos valores encontrados para os dados medidos foram: Modelo Proposto, FITU-R com folhagem, e ITU-R. Já os modelos que apresentaram melhores resultados quando o método de comparação utilizado foi o Desvio Padrão, foram: Modelo Proposto, ITU-R, FITU-R com Folhagem, FITU-R sem folhagem.

Ao observar os resultados de maneira geral observamos que o Modelo Proposto, assim como: FITU-R com folhagem, FITU-R sem folhagem e ITU-R apresentam um bom desempenho para medidas realizadas em ambientes de parques urbanos, nas frequências de 900 MHz a 2400 MHz.

Para aprimorar o modelo proposto e torná-lo útil para uma variedade de ambientes, propõe-se para trabalhos futuros:

- Realizar campanhas de medições em outros parques urbanos, com características diferentes de vegetação;
- Realizar campanhas de medições em outras condições climáticas, como por exemplo: em um ambiente chuvoso.
- Realizar campanhas de medidas com maior número de altura da antena transmissora e mais frequências;

Com essas sugestões de trabalhos, será possível aprimorar a equação do modelo proposto, tomando-se cuidado para que o modelo não fique especialista demais, tirando a abrangência de sua aplicação.

CAPÍTULO 6

Bibliografia

Abate, Z., “**Wi-MAX RF Systems Engineering**”, Artech House, Norwood, 2009.

Al-Nuami, M., Hammoudeh, A., “**Measurements and predictions of attenuation and scatter of microwave signals by trees**”, IEEE Microwave Antennas Propagation, Volume: 141, April 1994.

ANATEL, “**Acesso**”, www.anatel.gov.br , 2012.

Azevedo, J., Santos, F., “**Propagação em ambientes florestais**”, Universidade da Madeira, Portugal, 2008.

Balannis, C., “**Advanced Engineering Electromagnetics**”, 1ª Edição, John Wiley, New York & Sons, 1989.

Balanis, C., “**Antenna Theory**”, 2ª Versão, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1997.

Bertoni, H. “**Radio Propagation for Mobile Wireless System**”, 1ª Edição , Prentice Hall, New Jersey, 2000.

Caldeirinha, R., Al-Nuami, M., Rischter, J., Savage, N., Seville, A. e Rogers, N., “**RET Input Parameter Estimation for a Generic Model of Propagation Through Vegetation Using Excess Attenuation and Phase Functions Measurements**”, IEEE: Antennas and Propagation, 2003.

Carr, J., “**Practical Antenna Handbook**”, EUA , McGraw-Hill, 2001.

Cavalcante, G., Sanches M., e Oliveira, R. “**Mobile Radio Propagation Along Mixed Paths in Forest Environment**”, Volume 1, Journal of Microwaves and Optoelectronics, 1999.

Cavalcante, G. e Giarola, A., “**Optimization of Radio-Communication in Three Layered Media**”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume: 31, 1983.

Cavalcante, G., Magno, F., Souza, F, e Valente, V., “**Estudo da Perda de Propagação Através de Ambientes de Floresta Usando um Modelo Híbrido com Equações Parabólicas**”, SBrT, 2008.

Collin, R., “**Antennas and Radio Propagation**”, 1ª Versão, McGraw-Hill, Singapura, 1985.

Dahlman, E., Parkvall, S., “**3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband**”, 1ª Edição, New York, Academic Press, 2007.

Dal Bello, J., “**Caracterização da Influência da Vegetação nos Sistemas de Comunicações Móveis Celulares em Áreas Urbanas**”, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

Dal Bello, J., Siqueira, G., “**Theoretical Analysis and Measurement Results of Vegetation Effects on Path Loss for Mobile Cellular Communication Systems**”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume:49, 2000.

Feher, K., “**Telecommunications: measurements, analysis, and instrumentation**”, Prentice-Hall, Englewood, 1987.

Freitas, A., Carvalho, G., Rodrigues, J., Fraiha, S., Cavalcante, G., “**Modelo de Canal de Propagação para o Planejamento de Redes Móveis em Ambientes Densamente Arborizados**”, MOMAG, 2006.

Fontán, F., Teschl, F. e Cerdeira, R., “**Attenuation of Spruce, Pine, and Deciduous Woodland at C-Band**”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011.

Haykin, S., Moher, M., “**Sistemas Modernos de Comunicações Wirelles**”, 1ª Edição, Bookman, São Paulo, 2008.

Helene, O., “**Método dos Mínimos quadrados**”, Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006.

Hines, W., Montgomery, D., Goldsman, D. e Borrer, C., “**Probabilidade e Estatística na Engenharia**”, 4ª Edição, 2006.

Holma, H., Toskala, A. “**HSDPA/HSUPA for UMTS**”, 1ª Edição, New Jersey, Jonh Wiley & Sons Inc, 2006.

Holma, H., Toskala, “**WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE**”, 4ª Edição, Jonh Wiley & Sons Inc, New Jersey, 2007.

ITU, “**Atenuación Debida a lá vegetación – Rec UIT-R P.833-6**”, ITU, 2006.

Meng, Y., Lee, Y., “**Study of Propagation Loss Prediction in Forest Environment**”, Progress In Eletctromagnetics Research, Volume: 17, 2009 .

Meng, Y., Lee, Y., “**Investigation of Rainfall Effect on Forested Radio Wave Propagation**”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Volume: 7, 2008.

Michel, Y., “**Foundations of Mobile Radio Engineering**”, 1ª Edição, CRC Press, Florida, 1993.

Nawrocki, M., Dohler, M., Aghvami, A, “**Understending UMTS Radio Network Modelling, Planing and Automate Optimization - Theory and Praticce**”, 1ª Edição, Jonh Wiley & Sons Inc, New Jersey, 2006.

Ndzi, D., Savage N. e Stuart, K., “**Wideband Signal Propagation Through Vegetation**”, University of Portsmouth, Portsmouth, 2006.

Oliveira, R., Cavalcante, G. e Siqueira, G. “**Ray Tracing Model for Mobile Systems in a Forested Environments**”, ITS'98 International Telecommunication Symposium, São Paulo, 2000.

Parsons, J., “**Mobile Radio Propagation Channel**”, 2ª Edição, New York, John Wiley & Sons,1998.

Rappaport, T. S., “**Wireless Communications: Principles and Practice**”, New Jersey, Prentice-Hall, 1996.

Rogers, N., Seville, A. e Richter, J. **“A Generic Model of 1-60 GHz Radio Propagation through Vegetation – Final Report”**, QuinetiQ, Reino Unido, 2002.

Schwering, F., Vilolette, E. e Espeland, R., **“Millimeter-Wave Propagation in Vegetation: Experiments and Theory”**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volume: 26, 1988.

Sizun, H., **“Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications”**, Paris, Springer, 2003.

Strother, S., **“Telecommunication Cost Management”**, 2ª Edição, Norwood, Artech House, 2002.

Swarup, S. e Tewari, R.K., **“Depolarization of Radio Waves in Jungle Environment”**, IEEE Trans. Antennas Propagation, 1979.

Tachikawa, K., **“W-CDMA Mobile Communications System”**, 1ª Edição, New Jersey, John Wiley & Sons Inc, 2002.

Tamir, T., **“Radio Wave Propagation Along Mixed Paths in Forest Environments”**, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1977.

Zaltrão C. J., **“Resgate da Memória Científica Nacional: A Obra do Padre Roberto Landell de Moura”**, Curitiba, 2006.