

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Modelo semi-empírico de predição de cobertura na faixa de VHF
para ambientes de propagação em regiões com vegetação**

João Renato Aguiar Soares

Trabalho apresentado à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Cássio Gonçalves do Rego

Manaus, Julho de 2014

Este trabalho é dedicado à minha esposa Leonilda e aos
meus filhos João Renato Júnior e Leonardo F. Soares.

Agradecimentos

Aos meus pais Maria Guimarães Aguiar e Manoel João Soares (*in memoriam*).

Ao professor Cássio Gonçalves do Rego por ter aceitado o desafio em orientar esta pesquisa e incentivado a superar as minhas dificuldades.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela ajuda financeira à pesquisa.

À direção do Ifam representada pelos professores João Dias, Vicente Lucena, José Pinheiro e Livia Camurça, que me confiaram a oportunidade neste programa de pós-graduação.

À UFMG e a todos os professores que participaram do programa Dinter.

A todos os meus ex-professores que indiretamente contribuíram para este trabalho.

Aos colegas professores do Ifam/CMDI, Pedro Ivan das Graças Palheta, João Batista Pinto de Oliveira, Gilberto Andrade da Silva, Úrsula Abecassis, Wagner Nunes, Dário Rocha, Cleonor Neves e a todos os demais que contribuíram positivamente para a realização deste trabalho.

Aos colegas administrativos do Ifam/CMDI, que proveram os recursos das mais diversas ordens necessários para concretização desta obra.

Aos colegas de Laboratório de Antenas e Propagações da UFMG Arnaldo Vidalgo, Cláudio Garcia Batista, Gláucio Ramos, Marcos Pacheco, Ramon Dornelas, William da Silva e Williams L. de Nicomedes, pelas boas e proveitosas sugestões.

Ao acolhimento e apoio do professor Gervásio P. dos Santos Cavalcante e seus colaboradores do Laboratório de Computação e Telecomunicações da UFPA: Regina Nascimento, Bruno Costa, Allan Costa, Ramz Lopes, Rita de Cassia e a todos os demais pesquisadores.

À engenheira eletricista Janeide Martins que via Nokia do Brasil intermediou a doação dos equipamentos de comunicações ao Ifam e utilizados nesta pesquisa.

Ao Sr. Jonas Félix G. Neto pelos equipamentos cedidos e pelos aconselhamentos.

Ao Sr. Carlos Camurça do Campus Zona Leste-CZL pela permissão do uso daquele espaço.

Aos meus irmãos Ana Paulina, Terezinha de Jesus, Pedro Marcelo, Flávio José e Adelane Correa pelo apoio e suas preces.

... à Deus que sempre tem nos ajudado.

Resumo

O principal objetivo desta pesquisa é estudar o comportamento do deslocamento do sinal de rádio no interior de florestas com vegetações médias, na faixa de VHF, tendo como cenários algumas vegetações típicas da Floresta Amazônica. Para isso, são realizadas campanhas de medições em duas florestas: uma em região com vegetação equivalente a de um seringal em Belém/PA no Parque Cidadão nos arredores do *campus* do Instituto de Tecnologia - IT da Universidade Federal do Pará – UFPA e outra dentro de um castanhal em Manaus/AM no Campus Manaus Zona Leste – CZL do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - Ifam. As duas florestas têm aspectos favoráveis ao desenvolvimento da pesquisa por terem os relevos considerados como terra plana, as árvores têm caules cilíndricos com alturas acima de 20 m cujas folhagens concentram-se na parte mais superior dos caules o que possibilita a passagem do sinal de rádio irradiado e recebido por antenas instaladas abaixo das copas das árvores, emitindo e recebendo sinais com comprimentos de onda em torno de um metro, que descrevendo percursos serpenteando os troncos deslocam-se por meio da floresta. A metodologia utilizada em ambas as campanhas de medições contou com a instalação de um sistema de comunicação no interior da floresta, sendo o módulo transmissor mantido fixo enquanto que o módulo receptor, posicionado após uma árvore e no mesmo alinhamento do módulo transmissor, teve a potência do sinal recebido medida e registrada sendo em seguida deslocado o módulo receptor para o próximo ponto de medição pré-estabelecido, onde novamente o sinal recebido foi medido e registrado e assim as ações se repetiram até que fosse atingida a distância máxima possível entre os módulos transmissor e receptor. Os dados experimentais obtidos nas campanhas de medições foram implementados computacionalmente e estabeleceram-se as formulações dos modelos de propagação semi-empíricos para os ambientes com vegetação de densidade média estudados. A pesquisa provou que a propagação do sinal radioelétrico por meio desta vegetação, em terreno plano, desde que os elementos do sistema de radiação estejam posicionados dentro da floresta e abaixo da copa das árvores e que operem na faixa de frequência de VHF com comprimento de onda de aproximadamente um metro, os obstáculos de maior impacto para esta propagação do sinal, considerando-se também a perda no espaço livre, são os troncos das árvores. Com este comprimento de onda o sinal perde potência nos caules, mas também os contorna e de acordo com a potência aplicada no transmissor pode espalhar-se por longas distâncias.

Abstract

The main objective of this research is to analyze the behavior of the radio's signal deviation through forests with medium vegetation, on VHF band, having some typical Amazon Forests vegetation as background. In that purpose, measurements campaigns were done inside two forests: the first region with the equivalent of a rubber tree vegetation, inside Cidadão's Park in Belém/PA, near the campus of the Technology Institute – IT of the Federal University of Pará – UFPA; The second one is inside a Brazil nut tree region, in Manaus/AM, at the East Zone Campus – CZL, of the Federal Institution of Education, Science and Technology of Amazonas – IFAM. Both forests have the agreeable aspects for the development of the research for having their landscape shapes considered as plane and the trees have rounded trunks with heights above 20 m, which leaves are grouped at the top of the stems, making the radio signal flow possible, irradiated and received by antennas set under the tree's crown, sending and receiving signals with the wavelength of about one meter, that runs the path around the tree trunks and spanning throughout the forest. The methodology used in both of the measurement campaigns was done on setting a communication system inside the forest with the transmitter module kept still, while the receptor module, placed behind a tree and put in the same alignment as the transmitter module, had the power of the received signal measured and registered. Nearly after, the receptor module was moved to the next preset measurement point, and those actions went on until they reach the maximum point of distance possible between the transmitter and receptor modules. The experimental data gathered on the measurement campaigns were computationally implemented and it was established the formulation of semi empirical models for medium density vegetation environments here studied. The research proved that the propagation of the radioelectric signal through this vegetation, on a flat shaped land, admitting that the elements of the radiation system are placed inside the forest, under the tree crowns and working at the frequency of VHF band, with wavelengths of about a meter, the biggest obstacles for the propagation of these signals, also considering the loss on free space, are the tree trunks. With this wavelength, the signal lose power on stems, but also outlines them according to the power applied on the transmitter, being able to spread for long distances.

Sumário

Lista de Ilustrações	vii	
1	Introdução	1
2	Propagação de Sinais de Rádio em Ambiente de Floresta	6
2.1	Modelo de Tamir para a Propagação em Floresta	6
2.1.1	Floresta como Camada Dielétrica Entre o Solo e o Ar	7
2.1.2	Modelo de Onda Lateral de Tamir	7
2.1.3	Influência do Modelo de Tamir Nesta Pesquisa	7
2.2	Floresta Amazônica	9
2.2.1	Seringueiras	9
2.2.2	Castanheiras	10
2.3	Conclusões Parciais	12
3	Campanha de Medições em Seringal	13
3.1	Propagação de Sinal de Rádio em Seringal	13
3.1.1	Cenário das Medições	13
3.1.2	Equipamentos e Configurações	15
3.1.3	Procedimentos para as Medições	16
3.1.4	Resultados Numéricos	19
3.1.5	Algoritmo	19
3.1.6	Formulação Matemática do Modelo	21
3.1.7	Resultados Gráficos	23
3.2	Conclusões Parciais	27
4	Campanha de Medições em Castanhal	28
4.1	Propagação de Sinal de Rádio em Castanhal	28
4.1.1	Cenário das Medições	28
4.1.2	Equipamentos e Configurações	30

4.1.3	Procedimentos para as Medições	34
4.1.4	Resultados Numéricos	37
4.1.5	Algoritmo	37
4.1.6	Formulações Matemáticas dos Modelos	39
4.1.7	Resultados Gráficos	42
4.2	Conclusões Parciais	49
5	Conclusões e Propostas de Continuidade	50
5.1	Conclusões	50
5.2	Propostas de Continuidade	51
	Referências Bibliográficas	53
A	Relatórios das Medições Preparatórias	56
A1	Aferições/Ajustes dos Equipamentos	57
A.1.1	Aferição/Ajuste de Frequência do Rádio Monocanal Utilizando Analizador de Espectro	57
A.1.2	Aferição/Ajuste de Frequência do Rádio Monocanal Utilizando Power Meter	59
A2	Medições das Perdas nos Cabos e Acessórios	61
A.2.1	Medição da Perda no Sensor	61
A.2.2	Medições das Perdas nos Transformadores de Impedância	63
A.2.3	Medições das Perdas nos Cabos de RF	65
A.2.4	Medição da Perda Total=Sensor+Cabos+Transformadores de Impedância	67
A.2.5	Resumo das Medições das Perdas nos Cabos e Acessórios	69
B	Relatórios das Medidas da Campanha de Medições no Ifam/CZL	70
B1	Medições de Campo - Ifam/CZL	71
C	Imagens e Relatos das Campanhas de Medições	74
C1	Imagens e Relatos da Campanha de Medição no IT/UFPA	75
C2	Imagens e Relatos da Campanha de Medição no Ifam/CMDI	78
C3	Imagens e Relatos da Campanha de Medição no Ifam/CZL	84
D	Programas de Computador	89
D1	MatLab - Cálculos e Figuras do Modelo de Predição - IT/UFPA	90
D2	MatLab - Cálculos e Figuras do Modelo de Predição - Ifam/CZL	92

Lista de Ilustrações

2.1	Ilustração do modelo de floresta como camada dielétrica entre a Terra e ar	8
2.2	Ilustração do modelo de raios no ambiente de floresta segundo a teoria de Tamir	8
2.3	Foto de um seringal cultivado	11
2.4	Foto de um castanhal natural	11
3.1	Foto da vista superior do Parque Cidadão - Instituto de Tecnologia da UFPA	14
3.2	Ilustração da vista lateral do procedimento de medições. As antenas instaladas em torres apoiadas em tripés e posicionados na polarização vertical, tendo como obstáculo apenas uma árvore	14
3.3	<i>Set up</i> dos equipamentos dos módulos T_X e R_X utilizados nas medições de campo no bosque do Instituto de Tecnologia da UFPA	16
3.4	Diagramas da vista superior dos procedimentos de medições de campo. São demonstradas as posições dos módulos T_X e R_X em espaço livre e tendo uma árvore como obstáculo. a) Medição no espaço livre. b) Medições com uma árvore como obstáculo	17
3.5	Foto da equipe de pesquisadores transportando o módulo R_x para o posicionamento de uma nova medição	18
3.6	Diagrama da representação do código usado na implementação do modelo	20
3.7	Ilustração da transmissão de radiofrequência na faixa de VHF, tendo como obstáculos várias árvores	23
3.8	Gráfico dos níveis médios de potência do sinal recebido e medido na frequência portadora de $f_0 = 300\text{MHz}$ e da reta da média dos valores medidos, cuja inclinação corresponde ao expoente de perda de $n = 4,01$	25

3.9	Gráficos do desempenho das Perdas da Simulação do Modelo - L_{PM} comparados com as Perdas da Potência Medida - L_M e as Perdas da Simulação do Espaço Livre - L_0	26
4.1	Foto da vista superior do Campus Manaus Zona Leste – CZL	29
4.2	Ilustração da vista lateral do procedimento de medições usado. As antenas direcionais instaladas em torres apoiadas em tripés e posicionadas na polarização vertical, tendo como obstáculo apenas uma árvore	29
4.3	<i>Set up</i> dos equipamentos dos módulos T_x e R_x	34
4.4	Foto da vista frontal do cenário de medições onde são vistos o aluno Reury Matias, o prof. João Renato, o ex-aluno Willer Pinheiro e o prof. João Batista. Na direita a frente o módulo T_x e ao centro no fundo o módulo R_x	35
4.5	Diagramas da vista superior dos procedimentos de medições de campo. São demonstradas as posições dos módulos T_x e R_x em espaço livre e tendo uma árvore como obstáculo. a) Medição no espaço livre. b) Medições com uma árvore como obstáculo	36
4.6	Diagrama da representação do código usado na implementação do modelo	38
4.7	Ilustração da transmissão de sinal de rádio nas frequências $f_1=169,870$ MHz e $f_2=244,599$ MHz na faixa de VHF, utilizando antenas log-periódicas na polarização vertical, tendo como obstáculos várias árvores	40
4.8	Gráficos dos níveis médios de potência dos sinais recebidos e medidos nas frequência portadoras de $f_1=169,870$ MHz e de $f_2=244,599$ MHz além das retas das médias dos valores medidos, cujas inclinações correspondem, respectivamente, aos expoentes de perdas de $n = 2,40, 3,65, 1,61$ e $3,20$	40
4.9	Gráficos do desempenho do modelo para os sinais medidos na frequência portadora $f_1=169,870$ MHz com a antena na polarização horizontal	45
4.10	Gráficos do desempenho do modelo para os sinais medidos na frequência portadora $f_1=169,870$ MHz com a antena na polarização vertical	46
4.11	Gráficos do desempenho do modelo para os sinais medidos na frequência portadora $f_2=244,599$ MHz com a antena na polarização horizontal	47
4.12	Gráficos do desempenho do modelo para os sinais medidos na frequência portadora $f_2=244,599$ MHz com a antena na polarização vertical	48
A.1.1	<i>Set up</i> dos equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados na aferição/ajuste de frequência do rádio monocanal utilizando analisador de espectro	58

A.1.2	<i>Set up</i> dos equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados na aferição/ajuste de potência do rádio monocanal utilizando Power Meter	60
A.2.1	<i>Set up</i> dos equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados na medição da perda no sensor	62
A.2.2	<i>Set up</i> dos equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados nas medições das perdas nos transformadores de impedância	64
A.2.3	<i>Set up</i> dos equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados nas medições das perdas nos cabos de RF	66
A.2.4	<i>Set up</i> dos equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados na medição da perda total=sensor+cabos+transformador de impedância	68
C.1.1	Foto da equipe de pesquisadores fazendo a preparação inicial para a campanha de medições	75
C.1.2	Foto do prof. João Renato e pesquisador Bruno Costa posicionando as antenas T_x e R_x nas suas respectivas torres	75
C.1.3	Foto dos módulos T_x e R_x instalados para a condição de medição no espaço livre	76
C.1.4	Foto do equipamento Gerador de RF	76
C.1.5	Foto do equipamento Analisador de Espectro portátil	77
C.1.6	Foto da aluna bolsista Rúbia fazendo a anotação das medidas lidas no equipamento R_x	77
C.2.1	Foto das torres dos módulos T_x e R_x , com antenas log-periódicas, torres estaiadas, montadas sobre plataforma em madeira	79
C.2.2	Foto do prof. João Renato e os auxiliares Antônio e Kevim fazendo a montagem do módulo T_x completo	79
C.2.3	Foto dos auxiliares Antônio e Kevim fazendo a montagem do módulo R_x completo	80
C.2.4	Foto do prof. João Renato tentando fazer a leitura na tela do Analisador de Espectro causada pela dificuldade da luminosidade do ambiente	80
C.2.5	Foto do prof. João Renato e o auxiliar Kevim mudaram a posição do módulo R_x e utilizaram material opaco na tentativa de melhor visualizarem a tela do equipamento	81
C.2.6	Foto do prof. João Renato e os auxiliares Antônio e Kevim fazendo a adaptação do módulo T_x para fazerem a leitura na tela do equipamento	81

C.2.7	Foto do prof. João Renato e equipe de auxiliares analisando o ambiente sem luz solar para as medições noturnas	82
C.2.8	Foto do carretel com 300 m de cabo elétrico alimentando o nobreak do módulo R_x completo	82
C.3.1	Foto do prof. João Batista fazendo os primeiros preparativos para as medições de campo	84
C.3.2	Foto do prof. João Batista e João Renato fazendo a montagem da antena do módulo R_x	85
C.3.3	Foto do cenário mostrando em primeiro plano o módulo T_x e ao fundo a equipe fazendo a medição no módulo R_x	85
C.3.4	Foto do cenário mostrando em primeiro plano a equipe fazendo a medição no módulo R_x e ao fundo o módulo T_x	86
C.3.5	Foto do prof. João Renato e Leonardo Firmino puxando o cabo do carretel para alimentar o nobreak do módulo R_x para uma nova medição	86
C.3.6	Foto do aluno Reury Matias fotografando a tela do Analisador de Espectro que apresenta a imagem da onda portadora sintonizada na frequência $f_2=244,599$ MHz	87
C.3.7	Foto do módulo R_x em uma das posições para as medições	87
C.3.8	Foto de uma situação recorrente quando o módulo R_x ficava muito afastado do módulo T_x : a comunicação entre a equipe que fazia a medição e a que operava os equipamentos de rádio se comunicando via celular pela dificuldade de contato visual	88
C.3.9	Foto do módulo R_x na última posição para medição com a presença do aluno Reury Matias e de João Renato Jr	88

Capítulo 1

Introdução

Na literatura específica encontra-se uma vasta gama de modelos de propagação de sinais radioelétricos para calcularem as perdas em terrenos irregulares. Enquanto tais modelos têm como objetivo calcular a perda da potência do sinal conforme sua propagação até um ponto de observação em particular ou em uma determinada área, os métodos variam com relação a abordagem, complexidade e precisão.

Em Rappaport [1] consta que muitos destes modelos são baseados na interpretação sistemática de dados medidos obtidos em uma determinada área. Cátedra e Pérez-Arriaga [2] afirmam que a atenuação do sinal radioelétrico ao longo do seu percurso de propagação é o parâmetro comumente utilizado para caracterizar a potência média recebida através do canal. O fato de existirem poucos modelos analíticos e determinísticos, mas muitos modelos empíricos é uma constatação feita por de Lee [3].

Os modelos já existentes sempre são destinados a situações específicas, geralmente em relação ao ambiente e de maior aplicabilidade dentro de uma determinada faixa de frequências. Citando alguns exemplos de modelos de propagação considerados clássicos, tem-se o de Okumura-Hata que é um modelo empírico desenvolvido a partir de medições feitas na cidade de Tokyo com maior aplicabilidade nas frequências de 150, 450 e 900 MHz e é citado por Rappaport [1], Cátedra e Pérez-Arriaga [2], Lee [3], Bertoni [4], Saunders [5], Blaunstein e Christodoulou [6], Parsons [7] e Rego [8]. O modelo empírico de Lee que é para regiões urbanas ($f < 450$ MHz) e suburbanas ($f > 450$ MHz), é citado por Cátedra e Pérez-Arriaga [2], Lee [3], Saunders [5] e Parsons [7].

O modelo semi-determinístico de Ikegame, que é apropriado para ambientes urbanos homogêneos e é aplicado em uma cidade ideal com prédios de altura uniforme, consta em Cátedra e Pérez-Arriaga [2] e Saunders [5].

O modelo semi-empírico de Walfish-Bertoni que utiliza a difração do sinal e é apropriado para ambientes urbanos e suburbanos homogêneos, com prédios organizados em filas paralelas, com alturas e larguras uniformes, como a maioria das áreas residenciais na América do Norte e o modelo semi-empírico de Walfish-Ikegami destinado a ambientes urbanos que inclui algumas correções empíricas no modelo de Walfish-Bertoni, adaptando-o para as características das cidades europeias estão em Cátedra e Pérez-Arriaga [2], Saunders [5], Blaunstein e Christodoulou [6] e Parsons [7].

Em Tamir [9] a propagação de ondas electromagnéticas em ambientes de floresta nas frequências médias e altas (1 a 100 MHz) é abordada para o caso em que ambos os pontos de transmissão e de recepção estão situados dentro da vegetação. A floresta é considerada como um bloco cujo sinal radiolétrico emitido pela antena transmissora chega à antena receptora por meio da reflexão ionosférica. Se o efeito da interface Terra-floresta é ignorado, ou seja, desconsiderando-se a predição de cobertura da propagação ponto-a-ponto no interior da floresta, o campo irradiado por uma pequena antena dipolo (infinitesimal) arbitrariamente orientada é obtido na recepção e consiste principalmente de duas ondas separadas: uma onda lateral que desliza ao longo das copas das árvores, cujo conceito e ilustração encontra-se na Seção 4.1.2, e uma onda produzida por uma reflexão na camada ionosférica. Estes dois componentes de campo são comparados neste trabalho e os seus domínios de preponderância são calculados para uma grande variedade de parâmetros pertinentes, que é, então, observado que a onda lateral desempenha o papel mais importante uma vez que a onda refletida na ionosfera é restrita a uma estreita banda de frequência e a sua amplitude é útil apenas a grandes distâncias. O comprimento de onda da frequência do sinal a ser utilizada deve ser suficientemente grande para validar a representação da floresta em termos de um meio uniforme. Observando que uma separação média entre árvores de 1 a 5 m e que o espaço intermediário é geralmente preenchido com folhagem e outra vegetação de menor porte, uma frequência máxima de 100 MHz (ou seja, um comprimento de onda máximo de 3 m), parece ser razoável.

Segundo Dias [10], o modelo de Tamir [9] para propagação em florestas na faixa de 2 a 200 MHz considera a predominância do mecanismo conhecido da onda lateral para obter a equação de intensidade de campo elétrico recebido em um enlace de antenas infinitesimais. Ao estabelecer os limites de distâncias de validade do modelo, alguns aspectos foram aparentemente desconsiderados, como a influência relativa das demais componentes de propagação de primeira ordem e mesmo a esfericidade da Terra.

Em Melo [11] há o relato de que modelo de Tamir [9] é uma das poucas abordagens analíticas para o cálculo da perda de percurso de sinais de rádio em florestas, nas faixas de HF ou VHF. Em que pese a sua simplicidade e facilidade de uso para predições do tipo ponto-área, aplicar esse modelo em predições ponto-a-ponto ainda é um problema em aberto.

Em Seker [12] tem-se um modelo de propagação por meio da floresta incluindo os efeitos dos troncos, ramos, folhas e do solo. Este modelo representa a floresta como um plano, estratificada, anisotrópica, discreta, meio aleatório, limitada na parte superior pelo ar e na parte inferior pelo solo. O campo médio de propagação da onda foi obtido pelo reconhecimento de que o conjunto de espalhadores distintos pode ser substituído por um meio contínuo equivalente caracterizado por uma permissividade linear diádica. Foi utilizada a faixa de frequência de 100 a 2.000 MHz.

Palude, Duparquier e Bertel [13] abordaram a propagação de sinais radioelétricos na faixa de VHF em ambiente de floresta, realizado com experimentos em um ambiente da Europa Ocidental nas frequências de 60 e 70 MHz. As experiências foram baseadas em enlaces ponto-a-ponto entre um rádiotransmissor fixo e um receptor móvel. Para alcançar a mais completa caracterização da propagação, foram utilizados vários tipos de medições.

O resultado do trabalho de Palude [14] é um modelo onde a floresta é tratada como uma camada atmosférica com perda caracterizada pela sua permissividade e condutividade. O método pode também ser utilizado no caso de terreno irregular e com sofisticados modelos multi-camadas e ou modelos de propagação em florestas que dependam de faixas de frequências.

Em Ziade [15] tem-se que a propagação de ondas eletromagnéticas por meio da floresta foi também experimentada em uma faixa de frequência de 100 a 300 MHz. Foi proposto um modelo simplificado para representar o meio nesta banda de frequências. Foi desenvolvido um método para calcular o campo electromagnético recebido dentro ou fora do ambiente de floresta quando o transmissor é colocado entre ou em frente das árvores.

Azevedo e Santos [16] elaboraram um modelo que foi desenvolvido a partir de uma extensa campanha de medição realizada para as densidades de vegetação e tipos diferentes de árvores. Observando o comportamento típico decadente de propagação do sinal, o objetivo foi estimar os principais parâmetros do modelo lognormal que se ajustam aos dados medidos. Como em muitas aplicações, o transmissor e o receptor estão dentro da floresta e o caminho de propagação é caracterizado principalmente por troncos de árvores. Neste caso, verificou-se

que a atenuação do sinal é dependente da densidade de vegetação, definida pelo produto da densidade da árvore e o diâmetro médio dos troncos.

Em Karaml, Amur e Fung [17] encontra-se um trabalho sobre o espalhamento de onda eletromagnética de uma floresta ou da copa das árvores. Foi desenvolvido um modelo de espalhamento de onda eletromagnética em média aleatória, em que generaliza as suposições impostas em modelos anteriormente desenvolvidos e ainda compara com as medições obtidas de diversas copas de árvores em florestas.

Em Schettino, Moreira e Rego [18] foi desenvolvida uma técnica para analisar a propagação da onda eletromagnética em ambientes complexos. Foi utilizada a teoria uniforme da difração (UTD). Os coeficientes de difração heurísticos foram propostos por Luebbers para considerar as perdas no solo na análise de *links* de rádio obstruídos nas faixas de VHF e UHF.

O resultado do trabalho elaborado por Borderies e Villard [19] e Ruiz e Borderies [20] foi um modelo do espalhamento eletromagnético em galhos de árvores na floresta. Nos modelos de Ruiz e Borderies [20], Champion [21], Villard e Borderies [22] os ramos foram muitas vezes representados por cilindros em linha reta de comprimento finito. De acordo com a categoria de árvore em consideração, esta suposição pode ser razoável ou indevidamente exagerada de acordo com as formas curvas dos ramos.

Das pesquisas realizadas para a elaboração do modelo de propagação em regiões com vegetação, optou-se por investigar a predição de cobertura da propagação dos sinais radioelétricos ponto-a-ponto no interior da floresta, que representa uma parcela do sinal recebido que não é considerada por Tamir [9], em um cenário com o transmissor T_x e o receptor R_x instalados dentro da floresta semelhante ao experimento de Tamir [9], utilizar a faixa de VHF adotada por Palude, Duparquier e Bertel [13], cujo percurso da propagação é caracterizado principalmente pelos troncos das árvores como utilizado por Azevedo e Santos [16] e adotar as características da vegetação típica para representar botanicamente a Floresta Amazônica.

O principal objetivo desta pesquisa é ter como resultados modelos de propagação semi-empíricos de predição de cobertura para ambientes com vegetação, na faixa de frequências de VHF, tendo como cenário a Floresta Amazônica, o que ainda é uma lacuna nesta literatura específica. Assim sendo, este trabalho fará campanhas de medições em regiões com vegetações formadas por árvores de seringueiras, denominada seringal e de castanheiras, denominada castanhal. Para atingir este objetivo esta pesquisa buscou fundamentação teórica consistente e correlata e para isso consultou vários artigos abordando a propagação em regiões

com vegetações, porém, não localizou nenhum que trate especificamente da atenuação da propagação do sinal radioelétrico nos ambientes de seringal e nem de castanhal.

Até aqui foram definidos alguns dos parâmetros a serem adotados e caminhos a serem seguidos. Os próximos capítulos tratam os detalhes deste trabalho que são: por ser de interesse desta pesquisa realizar atividades de campo em áreas com vegetações típicas da Floresta Amazônica que apresentem densidade média de arborização, o Capítulo 2 aborda algumas características das áreas dos seringais e dos castanhais. Também está incluso neste Capítulo um resumo da propagação do sinal radioelétrico em região de floresta, segundo o modelo de Tamir. O Capítulo 3 trata da campanha de medições realizada em uma região com vegetação equivalente a de um seringal, cujo principal resultado é um modelo de propagação semi-empírico neste tipo de floresta. No Capítulo 4 têm-se os fatos relativos aos preparativos de uma campanha de medições em uma área de castanhal, os seus procedimentos, sua execução e os dados experimentais obtidos, e, ao seu final a elaboração de quatro modelos semi-empíricos para propagação de sinais de rádio em ambiente com densidade média de arborização. O Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e as propostas de continuidade da pesquisa.

Capítulo 2

Propagação de Sinais de Rádio em Ambiente de Floresta

Existem dificuldades para se estabelecer contanto via rádio em áreas com vegetação. No ambiente de floresta esta dificuldade é mais acentuada e o sinal radioelétrico transmitido sofre intensa atenuação devido ao espalhamento, a difração, a reflexão e a absorção causadas pelas árvores. Neste ambiente, a operação nas faixas de HF e VHF é uma das alternativas mais apropriadas para enlaces de alguns poucos quilômetros [10] [23][24].

Outra dificuldade a ser considerada para as comunicações no ambiente de floresta é a indisponibilidade de energia eléctrica de baixa tensão para alimentar os equipamentos e, em geral, o alcance dos rádios portáteis desses usuários é reduzido, por serem seus equipamentos normalmente de pequeno volume pela necessidade de operação em baixa potência e pelo fato de usarem baterias como fontes de energia, de peso e dimensões reduzidas.

2.1 Modelo de Tamir para Propagação em Floresta

Na experiência desenvolvida por Tamir que resultou em seu modelo semideterminístico [9], constou de um sistema de comunicação via rádio instalado dentro desta floresta, com o módulo transmissor distanciado do módulo receptor numa distância maior que 1 km. Neste experimento o autor observou que os sinais emitidos pela antena transmissora utilizam pelo menos três mecanismos de propagação: um que sobe, atinge a camada da ionosfera [25], refrata e desce até a antena receptora; o outro sobe, se desloca por sobre as copas das árvores, e desce até a antena receptora; e um terceiro que se desloca por dentro da vegetação e chega até a antena receptora. Analisando a intensidade da potência dos sinais recebidos, constatou que o de maior representatividade foi o recebido pela onda que se desloca por sobre as copas das árvores, dando menor importância para os demais resultados.

2.1.1 Floresta como Camada Dielétrica entre o Solo e o Ar

Detalhando um pouco mais o modelo de Tamir [9], tem-se que este adota as hipóteses de Terra plana e que a floresta é uma camada dielétrica com perdas (condutividade finita), localizada entre o solo e o ar [9] [11]. O modelo assume que as antenas A_{TX} e A_{RX} têm a mesma polarização [26], no caso, vertical. Este modelo de floresta é representado na fig. 2.1. Nesta ilustração a altura média da copa das árvores define a altura da camada h_f , ambas as antenas A_{TX} e A_{RX} estão instaladas no interior da floresta e suas alturas são h_{ATX} e $h_{ARX} < h_f$. O comprimento total das hastes das antenas dipolo de meia onda é definido por l .

2.1.2 Modelo de Onda Lateral de Tamir

Para o desenvolvimento do modelo, o bloco de floresta foi então modelado como um meio homogêneo com perdas e índice de refração maior que o do ar [9][23][24]. A fig. 2.2 ilustra o conceito de onda lateral do modelo de Tamir, onde o sinal descreve o percurso A_{TX} -A-B-C- A_{RX} [9] [26].

2.1.3 Influência do Modelo de Tamir Nesta Pesquisa

O modelo de Tamir foi desenvolvido para as condições de uma floresta densa e com os módulos de transmissão e recepção ali inseridos distanciados a mais de um quilômetro. Por sermos nativos da região, sabemos que a Floresta Amazônica é imensa e diversificada e, assim sendo, compõe-se também de regiões com florestas de densidade média, em que é possível até receber sinais de rádio FM, que como sabemos opera na faixa de VHF.

Diante destes fatos, idealizou-se o grande desafio da pesquisa que foi fazer campanhas de medições em florestas de densidades médias e provar que é possível fazer a propagação em visada direta neste tipo de ambiente. A pesquisa tem apenas como referência o padrão de vegetação do modelo de Tamir, que realizou os seus experimentos em floresta com vegetação densa e compacta o que se diferencia do modelo que se pretende estabelecer para um tipo de vegetação que naturalmente favoreça a passagem do sinal de rádio.

O próximo passo foi buscar na literatura e posteriormente *in loco* vegetações capazes de favorecerem a esta empreitada. As vegetações encontradas mais promissoras para esta tarefa são as das seringueiras e a das castanheiras estudadas a seguir.

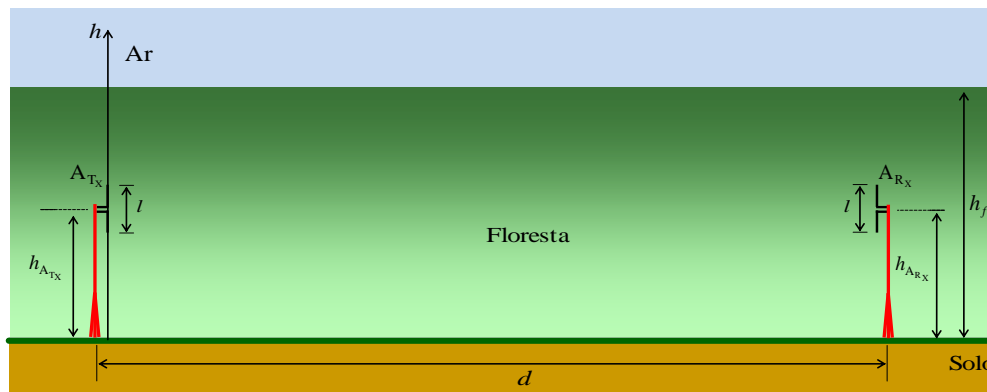


Figura 2.1: Ilustração do modelo de floresta como camada dielétrica entre a Terra e o ar.

Fonte: Reprodução de [10] e [11].

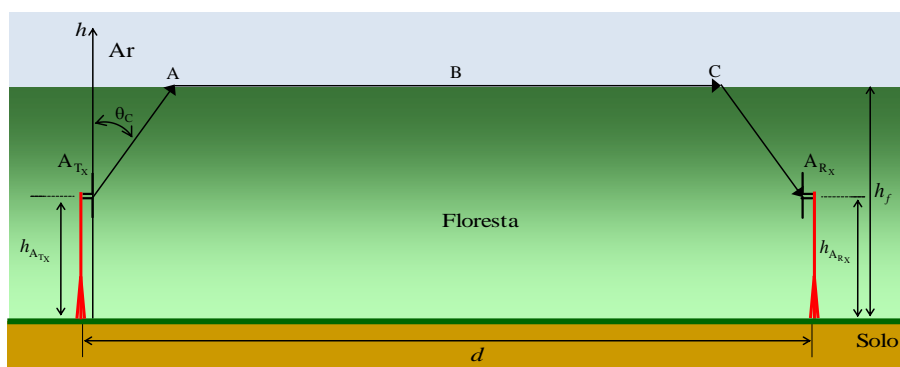


Figura 2.2: Ilustração do modelo de raios no ambiente de floresta segundo a teoria de Tamir.

Fonte: Reprodução de [10] e [11].

2.2 Floresta Amazônica

A Amazônia brasileira corresponde a cerca de 65% da área total da Amazônia Continental e tem fronteira de aproximadamente 11.248 km. No território brasileiro a Floresta Amazônica abrange os Estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Roraima, Rondônia e Tocantins.

É a maior floresta tropical do planeta e contém 1/5 da água doce nele existente em estado líquido, graças à bacia do rio Amazonas. Encontra-se densamente recoberta pela floresta tropical latifoliada úmida. No artigo Ciência [27] tem-se que esta floresta não é uniforme como pode parecer.

2.2.1 Seringueiras

Em Vieira [28] tem-se que na Floresta Amazônica encontram-se diversas vegetações nativas, dentre elas a seringueira, nome vulgar de uma planta do gênero *Hévea*, família *Euphorbiaceae*. No livro Tratado de fitogeografia do Brasil de Rizinni [29] consta que esta vegetação é encontrada em praticamente toda a área desta floresta. Gonçalves [30] afirma que quando a árvore da seringueira é nativa ela pode atingir até 40 m de altura (fig. 2.3).

A publicação de Kenricke P. Crane [31] fornece alguns detalhes da planta como, por exemplo, árvore adulta cultivada mede de 20 a 30 m de altura, tem tronco reto, de 30 a 60 cm de diâmetro como ilustrada na Fig. 2.1. As árvores das seringueiras têm troncos do tipo caule lenhoso, resistente, cilíndrico com ramificações, que se formam a partir de certa altura.

Planta lenhosa, ou simplesmente lenhosa, é a designação dada às plantas que são capazes de produzirem madeiras como tecido de suporte dos seus caules. Do artigo de Marques [32] obtiveram-se as informações de que do seu tronco extrai-se o látex que, por coagulação espontânea ou por processos químico-industriais, se transforma no produto comercial denominado de borracha. A matéria-prima borracha é largamente utilizada na produção de bens industrializados, sendo a indústria de pneumáticos a sua maior consumidora. A produção brasileira, ainda que tenha apresentado acréscimos nos últimos anos, só responde por 18% das suas necessidades, sendo o restante importado de outros centros produtores, com reflexos negativos na nossa balança comercial.

Nos trabalhos de Pushparajah [33] e Onokpise [34] constam que sementes da seringueira, aqui denominada de *Hevea brasiliensis*, foram levadas para a Ásia e cultivadas em

latitudes 6°N e 6°S, onde encontraram condições favoráveis de produção, o que contribuiu para tirar o Brasil do cenário mundial da borracha por um longo período.

O livro de Jackson [35] relata que inglês Henry Wickham (1846-1928), um homem comum e sem dinheiro, que contrabandeou 70 mil sementes de seringueiras da Floresta Amazônica para a Inglaterra no século XIX, foi o protagonista do primeiro caso de biopirataria massiva na era moderna.

Em pesquisa de campo realizada no Museu Seringal Vila Paraíso [36], registrada em vídeo, localizado no Igarapé do São João, afluente do Igarapé do Tarumã Mirim, na zona rural da cidade de Manaus a 30 minutos de barco do Porto do Davi no bairro da Ponta Negra, constatou-se que as árvores de seringueiras lá plantadas são de tipos diferentes e, por isso mesmo, não têm uniformidade aproximada nas circunferências dos caules, sendo estes, por exemplo, de $\phi_1=20,36$ cm, $\phi_2=33,10$ cm e até $\phi_3=66,84$ cm, onde os índices representam as diferentes dimensões dos diâmetros dos caules. A distância entre as árvores foram registradas nos valores de $d_{12}=6$ m, $d_{13}=15$ m e até $d_{23}=20$ m, onde os índices representam as distâncias relativas entre três árvores. A média de altura das árvores observada foi em torno de 25 m. O seringal cultivado na área da Embrapa Amazônia Ocidental [37] localizada no km 29 da rodovia AM 010 também foi também visitado e o cenário é de uma vegetação de altura média de 10 m.

2.2.2 Castanheiras

São árvores da castanheira-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*), também conhecida como castanheira-do-Pará, que é uma árvore alta e bela, nativa da Amazônia (fig. 2.4). Ela pode ser encontrada em florestas às margens de grandes rios, como o Amazonas, o Negro, o Orinoco e o Araguaia. Normalmente atingem entre 30 e 50 m de altura e de 1 a 2 m de diâmetro. É uma das espécies mais altas da Amazônia. Há registros de castanheiras que alcançaram 50 m de altura e mais de 5 m de diâmetro. Seu tronco é reto e os galhos se concentram na parte mais alta da árvore. A casca é acinzentada, e as folhas, que ficam acima da copa das outras árvores, têm de 20 a 35 cm de comprimento [38].



Figura 2.3: Foto de um seringal cultivado.

Fonte: Gonçalves [30].



Figura 2.4: Foto de um castanhal natural.

Fonte: [39].

2.3 Conclusões Parciais

Neste Capítulo há um resumo ilustrado do modelo de propagação na floresta definido por Tamir. Neste modelo o autor considerou o relevo como terra plana, deu prioridade a intensidade do sinal recebido pela onda que se desloca por sobre a copa das árvores e chega até o receptor, fenômeno este denominado de onda lateral e desprezou a parte do sinal que se desloca por dentro da floresta. Utilizou para isso a estratégia de considerar o bloco de floresta como um meio homogêneo com perdas e índice de refração maior que o do ar.

Foram também tratadas neste Capítulo as características básicas de duas vegetações de densidades médias típicas da Floresta Amazônica: as seringueiras e as castanheiras. Ambas as vegetações apresentam árvores altas, com folhagens apenas na parte mais alta, caules cilíndricos e com distanciamento entre as árvores o suficiente para serem contornados por sinais de rádio com comprimentos de ondas de frequências na faixa de VHF.

O próximo Capítulo trata da campanha de medições realizada no Parque Cidadão no campus do IT – UFPA, numa floresta similar a de um seringa, onde foi montado um sistema de comunicação via sinal de rádio no interior da floresta em que os sinais emitidos pelo gerador, que fazia parte do módulo T_x fixo, foram medidos no módulo R_x que foi localizado em posições atrás de uma árvore, no mesmo alinhamento do módulo T_x , porém, que se distanciava a cada medida realizada, sempre na mesma direção e alinhamento.

Capítulo 3

Campanha de Medições em Seringal

A floresta com vegetação de árvores de seringueiras é denominada seringal. Nesta pesquisa foram adquiridos conhecimentos por meio dos dados obtidos nas visitas ao seringal do Museu Paraíso [36], ao plantio da Embrapa [37] e na campanha de medições no Parque Cidadão do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará – UFPA. Destas ações tem-se como principal resultado um modelo semi-empírico de propagação para um ambiente de vegetação onde a floresta é formada por seringueiras.

3.1 Propagação de Sinal de Rádio em Seringal

As condições estabelecidas para esta campanha de medições é que o sinal radioelétrico seja propagado em uma vegetação de densidade média, em terreno plano, usando os elementos do sistema de radiação posicionados abaixo da copa das árvores e operando na faixa de frequência de VHF. Para estas condições, com o comprimento de onda do sinal irradiado tendo dimensão próxima de um metro, o principal obstáculo para a propagação do sinal, considerando a perda no espaço livre, são os troncos das árvores. A hipótese aqui defendida é a de que este sinal de rádio pode contornar os caules das árvores e de acordo com a potência aplicada, espalhar-se por longas distâncias.

3.1.1 Cenário das Medições

A campanha de medições de sinal de rádio foi realizada na região de floresta do Parque Cidadão dentro do Campus do Instituto de Tecnologia - ITEC, na Universidade Federal do Pará – UFPA, cuja vista superior é mostrada na fig. 3.1. Na fig. 3.2 é ilustrada a vista lateral do procedimento de medida usado.

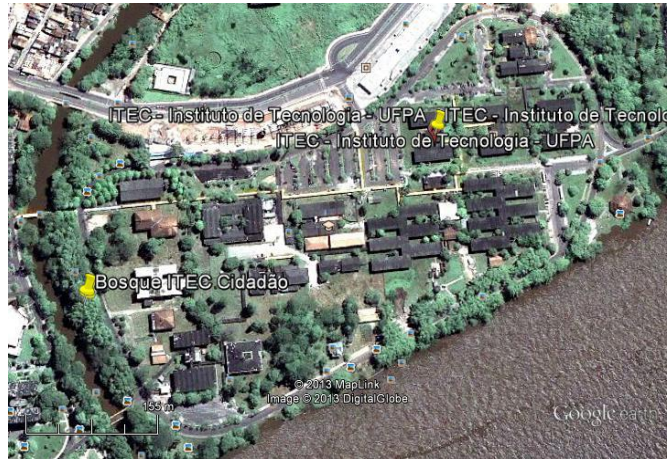


Figura 3.1: Foto da vista superior do Parque Cidadão - Instituto de Tecnologia da UFPA.

Fonte: Google Earth [40].

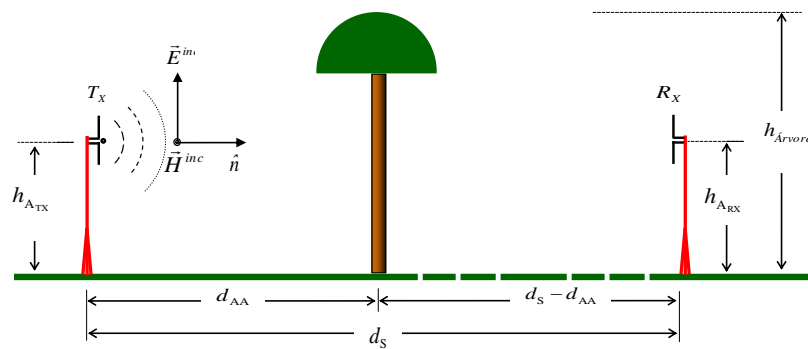


Figura 3.2: Ilustração da vista lateral para o procedimento de medições. As antenas instaladas em torres apoiadas em tripés e posicionadas na polarização vertical, tendo como obstáculo apenas uma árvore.

3.1.2 Equipamentos e Configurações

Para a realização desta atividade, utilizaram-se os equipamentos de transmissão e de recepção, nobreaks e extensões elétricas disponíveis no Laboratório de Computação e Telecomunicações - LCT. Utilizaram-se também pares de antenas dipolo simples, cabos de RF, torres de madeira e tripés metálicos cedidos pela Anatel/PA, autorizados pelo professor Carnot Braun da UFPA.

Com a ajuda dos pesquisadores Allan Costa, Bruno Costa, Rams Lopes, do professor doutorando Cleonor Neves e das estagiárias do laboratório Rita de Cássia, Rúbia e Juliana, os equipamentos foram transportados do LCT para a região de floresta do Parque Cidadão, nos arredores do Instituto de Tecnologia. A facilidade encontrada no local foi a existência de tomadas monofásicas energizadas em 127 V em uma das árvores.

Após os equipamentos terem sido posicionados, ligados e aquecidos, foram configurados os seus respectivos parâmetros conforme os dados que constam na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Equipamentos, dispositivos e acessórios.

Equipamentos/Dispositivos/Acessórios	Parâmetros	Valor/Unidade
T _x : Vector Signal Generator ANRITSU – Model MG 3700 ^a	Frequência Portadora	300 MHz
	Potência	0 dBm
	Impedância	50 Ω
R _x : Site Master ANRITSU – Model S332E	Frequência Central	300 MHz
	Spam	+/- 10 MHz
	Impedância	50 Ω
Antenas Dipolo ANRITSU – Model M 34324	Ganho	3,0 dB
	Altura	2,0 m
	Impedância	50 Ω
Cabo Coaxial ANRITSU – Model MP 534A	Comprimento	2 m
	Atenuação	1 dB/m
	Impedância	50 Ω
Torre de Madeira com Base em Tripé	Altura	2 m
	Diâmetro	1”

Os *set up* dos equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados nesta campanha de medição está ilustrado na fig. 3.3.

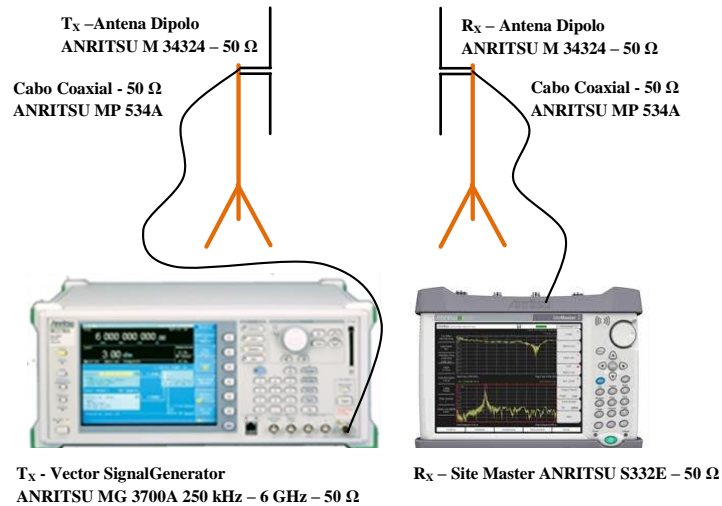


Figura 3.3: *Set up* dos equipamentos dos módulos T_x e R_x utilizados nas medidas de campo no Parque Cidadão do Instituto de Tecnologia da UFPA.

Fonte: Manual Produtos ANRITSU [41].

3.1.3 Procedimentos para as Medições

- A primeira medida é feita com o módulo T_x fixado na posição de referência 0,0 e o módulo R_x na Posição 0, na distância $d_0 = 10,5$ m, numa condição sem obstáculos que é denominada espaço livre [1]. São lidas cinco medidas da amplitude da onda portadora na frequência em medição na tela do Analisador de Espectro que são registradas no relatório (fig. 3.4a);
- Para a próximo procedimento de medida, o módulo T_x é instalado na posição de referência 0,0 a uma distância $d_{AA} = 9$ m (distância entre o módulo T_x e o eixo da árvore) e neste mesmo alinhamento o módulo R_x é instalado a uma distância de $d_S - d_{AA} = 1,5$ m (fig. 3.2), na Posição 1, ou seja, a uma distância de 1,5 m após o eixo do caule de $\phi_1 = 27,69$ cm de diâmetro da árvore correspondente a 10,5 m do módulo T_x (fig. 3.2 e 3.4b). São lidas cinco medidas da amplitude da onda portadora na frequência em medição na tela do Analisador de Espectro que são registradas no relatório;
- O passo seguinte é manter o módulo T_x na posição em que se encontra e deslocar o módulo R_x para a Posição 2, mantendo ambos os módulos no mesmo alinhamento da árvore. O módulo R_x é instalado a uma distância de $d_S - d_{AA} = 3,0$ m correspondente a 12,0 m do módulo T_x (fig. 3.2 e 3.4b).

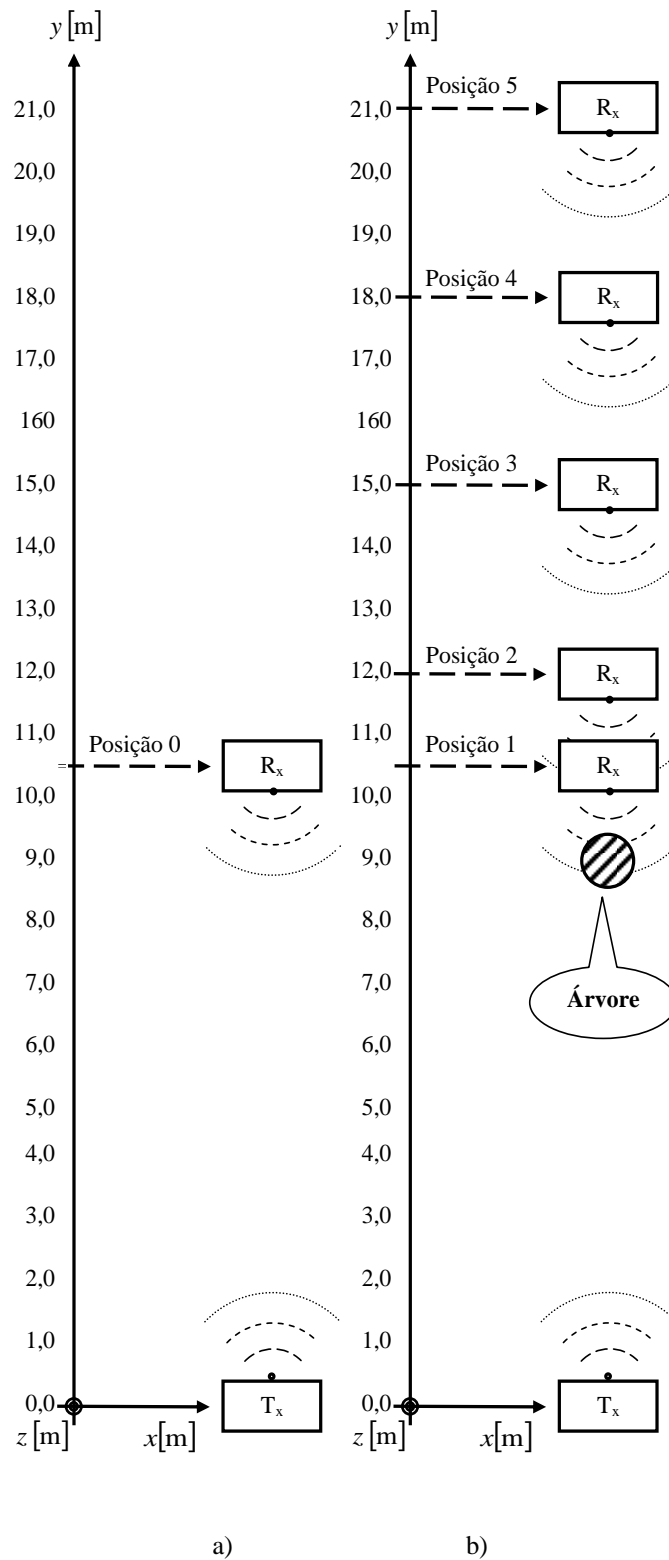


Figura 3.4: Diagramas da vista superior dos procedimentos de medições de campo. São demonstradas as posições dos módulos T_x e R_x em espaço livre e tendo uma árvore como obstáculo. a) Medição no espaço livre. b) Medições com uma árvore como obstáculo.

São lidas cinco medidas da amplitude da onda portadora na frequência em medição na tela do Analisador de Espectro que são registradas no relatório;

- Em seguida, sempre mantendo o módulo T_x na posição de referência 0,0, desloca-se o módulo R_x para a distância $d_S-d_{AA}= 6,0$ m correspondente a 15,0 m do módulo T_x (fig. 3.2 e 3.4b). Novamente são lidas cinco medidas da amplitude da onda portadora na frequência em medição na tela do Analisador de Espectro que são registradas no relatório;
- São repetidos os mesmos procedimentos anteriores em que o módulo R_x é deslocado de 3 em 3 m até que chegue na Posição 5 (fig. 3.4b), que está a 21 m de distância do módulo T_x .

Na fig. 3.5 tem-se uma foto da equipe de pesquisadores trabalhando na campanha de medições no Parque Cidadão no campus do IT/UFPA.



Figura 3.5: Foto da equipe de pesquisadores transportando o módulo R_x para o posicionamento de uma nova medição.

Foto: Prof. Cleonor Neves

Mais detalhamentos e fotos que registraram esta atividade constam no Apêndice C Imagens e Relatos das Campanhas de Medições, C1 Imagens e Relatos da Campanha de Medição no IT/UFPA.

3.1.4 Resultados Numéricos

Os resultados numéricos das medições dos sinais recebidos no módulo R_x são mostrados na Tabela 3.2. Os valores medidos de cada posição foram convertidos em valores médios.

Tabela 3.2: Valores Médios Obtidos da Potência Recebida.

Posição	Distância $T_x - R_x$ (m)	Distância Árvore - R_x (m)	Valor Médio (dBm)
0	10,5	-	-45,50
1	10,5	1,5	-43,00
2	12,0	3,0	-42,54
3	15,0	6,0	-72,83
4	18,0	9,0	-73,90
5	21,0	12,0	-75,50

3.1.5 Algoritmo

Os códigos usados na implementação do modelo seguiram a sequência do diagrama da fig. 3.6 e constam no Apêndice D Programas de Computador, D1 MatLab – Cálculos e Figuras do Modelo de Predição-IT/UFPA.

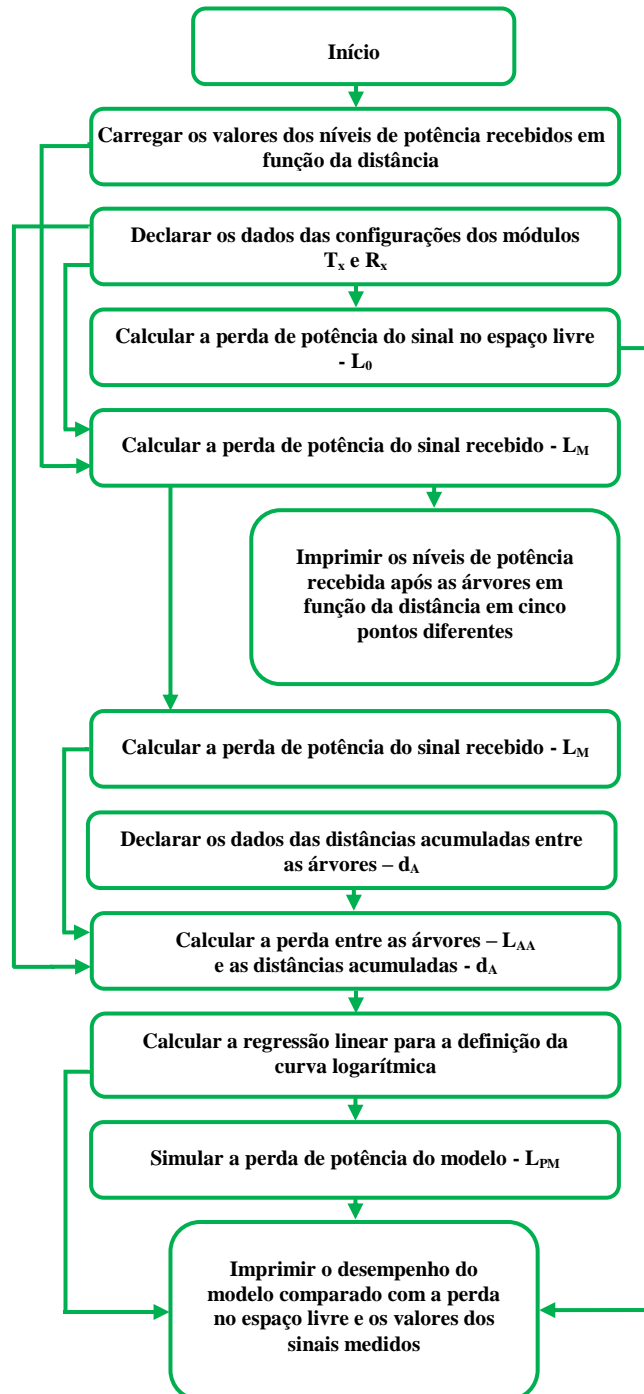


Figura 3.6: Diagrama da representação do código usado na implementação do modelo.

3.1.6 Formulação Matemática do Modelo

A perda no espaço livre L_0 em dB é calculada pela expressão [5]:

$$L_0 = 32,44 + 20\log_{10}(d_{0[km]}) + 20\log_{10}(f_{0[MHz]}) \quad (3.1)$$

onde d_0 é a distância do enlace entre T_x e R_x no espaço livre de obstáculos, medida em km e f_0 é frequência de operação do sistema em MHz.

A perda no espaço livre entre o módulo T_x e a primeira árvore L_{AA} é calculada em dB pela expressão:

$$L_{AA} = 32,44 + 20\log_{10}(d_{AA[km]}) + 20\log_{10}(f_{0[MHz]}) \quad (3.2)$$

onde d_{AA} é a distância entre o módulo T_x e a primeira árvore medida em km e f_0 é frequência de operação do sistema em MHz.

Quando a distância entre os módulos T_x e R_x for menor do que a distância entre o módulo T_x e a primeira árvore, a perda no intervalo entre as árvores L_P é calculada em dB pela expressão:

$$L_P = 32,44 + 20\log_{10}(d_{S[km]}) + 20\log_{10}(f_{0[MHz]}) \quad (3.3)$$

onde d_S é o comprimento da distância da floresta simulada (distância entre os módulos T_x e R_x) medida em km e f_0 é frequência de operação do sistema em MHz.

Quando a distância entre os módulos T_x e R_x for maior do que a distância entre o módulo T_x e a primeira árvore, a perda L_P é calculada em dB pela expressão:

$$L_P = [A\log_{10}(d_{S[km]} - d_{AA[km]})] + B + L_{AA} \quad (3.4)$$

onde A é uma constante, o termo $(d_{S[km]} - d_{AA[km]})$ representa a distância da floresta simulada entre a árvore e o módulo R_x medida em km, B é uma constante e L_{AA} é a perda no espaço livre entre o módulo T_x e a primeira árvore medida em dB.

A perda do sinal medido L_M em dB é expressa por:

$$L_M = (P_{T_x} + G_{T_x} + G_{R_x} - L_{TC}) - P_{R_x} \quad (3.5)$$

onde P_{T_x} é a potência transmitida em dBm, G_{T_x} é o ganho da antena do módulo T_x em dBi, G_{R_x} é o ganho da antena do módulo R_x em dBi, L_{TC} é a perda total nos cabos de RF e P_{R_x} é a potência recebida em dBm.

A predição de perda na floresta L_{PM} com o sistema operando apenas na frequência de 300 MHz é calculada em dB pela expressão:

$$L_{PM} = A \log_{10}(d_{S[km]}) + B \quad (3.6)$$

onde A é uma constante, d_S é o comprimento da distância da floresta simulada medida em km e B é uma constante.

Para fazer o ajuste da curva descrita pela interpolação dos valores das potências dos sinais recebidos e medidos, aplicou-se a técnica dos mínimos quadrados lineares, e assim sendo, os valores encontrados para as constantes A e B da equação (3.6) são:

$$A = 40,13 \quad \text{e} \quad B = -4,15$$

Assim sendo, (4.6) fica na forma:

$$L_{PM} = 40,13 \log_{10}(d_{[km]}) - 4,15 \quad (3.7)$$

Separando a distância em dB do resto do termo (3.7), tem-se:

$$n \times 10 \log_{10}(d_{[km]})$$

Baseado no que foi mostrado, isto é equivalente a:

$$n \times 10 = 40,13$$

Portanto, o valor do expoente de perda n é definido por:

$$n = \frac{40,13}{10} = 4,01 \quad (3.8)$$

A previsão de perda do modelo L_{PM} para várias árvores como ilustrado na fig. 3.7 é calculada em dB pela expressão:

$$L_{PM} = \left[\sum_{n=1}^M 40,13 \log_{10}(d_{S[km]} - d_{AA[km]}) + 4,15 \right] + L_{AA} \quad (3.9)$$

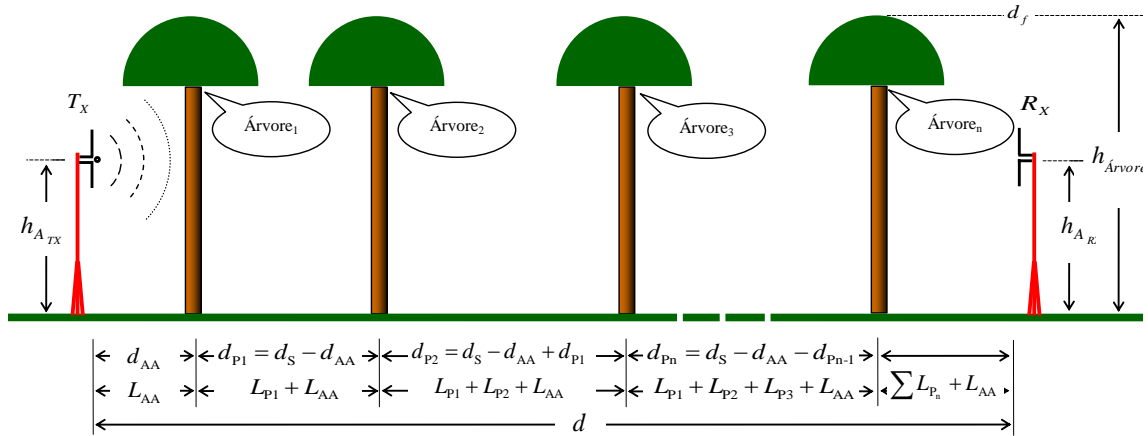


Figura 3.7: Ilustração da transmissão de radiofrequência na faixa de VHF, tendo como obstáculos várias árvores.

onde M é o número total de árvores, d_S é o comprimento da distância da floresta simulada medida em km, d_{AA} é a distância entre o módulo T_X e a primeira árvore medida em km, n é o valor do expoente perda, d_p é a distância entre as árvores medida em km e L_0 é a perda no espaço livre em dB.

A potência do sinal recebido P_{R_X} é calculada em dB pela expressão:

$$P_{R_X} = P_{T_X} + G_{T_X}(\theta, \phi) + G_{R_X}(\theta, \phi) - L_{PM} - L_{TC} \quad (3.10)$$

onde P_{T_X} é a potência transmitida em dBm, G_{T_X} é o ganho da antena do módulo T_X em dBi, G_{R_X} é o ganho da antena do módulo R_X em dBi, L_{PM} é a previsão de perda do modelo em dB e L_{TC} é a perda total nos cabos de RF em dB.

3.1.7 Resultados Gráficos

A fig. 3.8 mostra os níveis médios da intensidade do sinal medido após as árvores como obstáculo, registrados na Tabela 3.2, de acordo com a localização das posições de 1 a 5, como ilustrado na fig. 3.4b. Após um leve aumento de nível entre o primeiro e o segundo passo, as medições seguintes foram registradas com reduções de níveis do sinal recebido em função da distância do módulo R_X em relação ao módulo T_X , como esperado. Nesta mesma

figura tem-se o gráfico da reta da média dos valores medidos, cuja inclinação corresponde ao expoente de perda de $n = 4,01$.

A fig. 3.9 mostra os gráficos do desempenho das Perdas da Simulação do Modelo - L_{PM} comparados com as Perdas da Potência Medida - L_M e as Perdas da Simulação do Espaço Livre - L_0 . Observa-se que enquanto as Perdas da Simulação do Espaço Livre - L_0 têm uma inclinação suave, de menos de 10 dB entre 10,5 e 21 m, para este mesmo intervalo de distância o gráfico das Perdas da Simulação do Modelo - L_{PM} enfatiza estas perdas, que ocorrem a partir do ponto onde o sinal de visada direta foi interceptado pela árvore, sendo, para esta situação a atenuação estimada em torno de 30 dB. Também fica demonstrado que a tendência das Perdas da Simulação do Modelo - L_{PM} , com aumento da distância, é de serem consistentes com o nível das Perdas da Potência Medida - L_M .

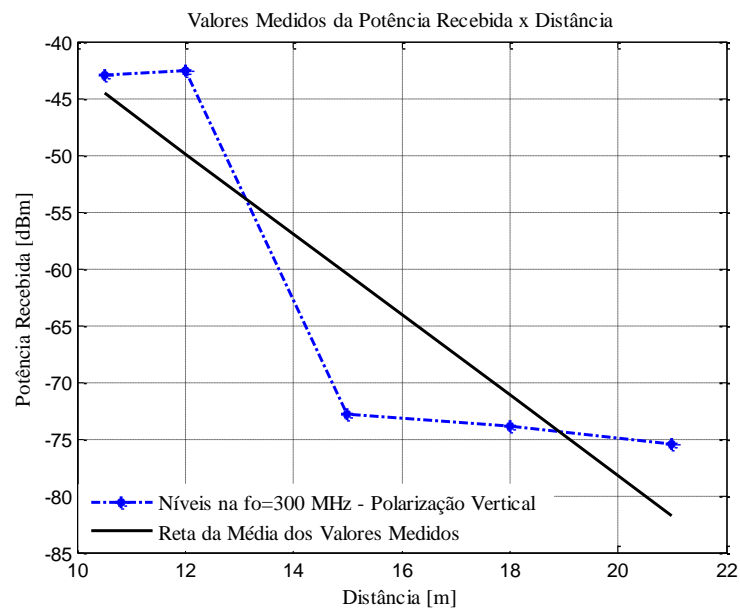


Figura 3.8: Gráficos dos níveis médios de potência do sinal recebido e medido na frequência portadora de $f_0=300$ MHz e da reta da média dos valores medidos, cuja inclinação corresponde ao expoente de perda de $n = 4,01$.

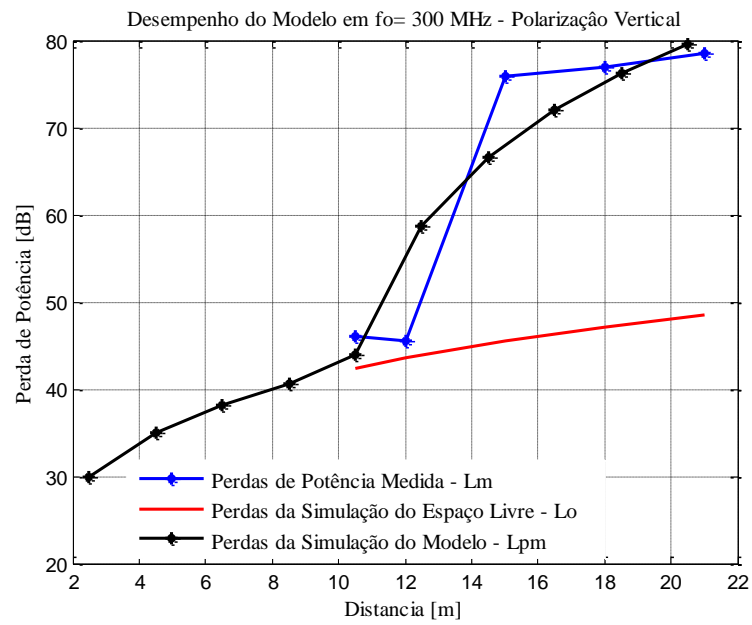


Figura 3.9: Gráficos do desempenho das Perdas da Simulação do Modelo - L_{PM} comparados com as Perdas da Potência Medida - L_M e as Perdas da Simulação do Espaço Livre - L_0 .

3.2 Conclusões Parciais

Este Capítulo tratou de uma campanha de medições experimental realizada com o apoio dos pesquisadores e dos equipamentos do Laboratório de Computação e Telecomunicações – LCT e da Anatel/PA, na região de floresta do Parque Cidadão dentro do Campus do Instituto de Tecnologia - ITEC, na Universidade Federal do Pará – UFPA. Neste ambiente de floresta tem-se uma vegetação com similaridades a de um seringal e o relevo tem características de terra plana.

Nesta atividade foram utilizados gerador de sinais de radiofrequência – RF operando na frequência portadora de 300 MHz (sem modulação) emitindo potência de 0 dBm, analisador de espectro portátil sintonizado em 300 MHz, antenas tipo dipolo simples instaladas no topo de torres de madeira com alturas de 2 m sustentadas por tripés metálicos.

Para estas medições foi desenvolvida uma metodologia que teve início com a instalação dos módulos T_x e R_x distanciados em posicionamentos previamente estabelecidos e em seguida a medição do nível do sinal recebido entre estes dois pontos no espaço livre. Os passos seguintes foram as medições do sinal radioelétrico a partir da distância entre dois pontos de T_x e R_x , agora interceptados pelo tronco de uma árvore. A cada nova medida o módulo T_x foi mantido fixo enquanto que o módulo R_x ficou cada vez mais distanciados do módulo T_x como está devidamente ilustrado nas fig. 3.2 e 3.4.

Os dados experimentais obtidos foram inseridos em programa computacional que teve como resultado a formulação matemática do modelo semi-empírico de propagação em ambiente com densidade média de vegetação. O comportamento dos sinais recebidos e o desempenho do modelo criado são demonstrados nos gráficos das fig. 3.8 e 3.9.

O modelo desenvolvido prevê sua aplicação na propagação do sinal radioelétrico por meio de vegetação de densidade média, em terreno plano, desde que os elementos do sistema de radiação sejam posicionados abaixo da copa das árvores e operem na faixa de frequência de VHF. Para estas condições os principais obstáculos encontrados para a propagação do sinal, além da perda no espaço livre, foram os troncos das árvores.

O próximo Capítulo trata de uma campanha de medição mais bem estruturada realizada dentro de um castanhal que produziu resultados satisfatórios.

Capítulo 4

Campanha de Medições em Castanhal

A floresta com vegetação de árvores de castanheiras é denominada castanhal. Nesta última fase pesquisa de campo foram adquiridos conhecimentos e dados por meio da campanha de medições realizadas em uma área de vegetação formada por árvores de castanheiras no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Manaus Zona Leste-CZL. O principal resultado desta atividade foi a elaboração de um modelo semi-empírico de propagação para um ambiente de vegetação onde a floresta é formada por castanheiras.

4.1 Propagação de Sinal de Rádio em Castanhal

As condições estabelecidas para o tipo de floresta, terreno, posição das antenas abaixo da copa das árvores e faixa de frequência de VHF são as mesmas estabelecidas na Seção 3.1 para a campanha de medições realizada na floresta de seringueiras. Nesta campanha, as diferenças em relação a anterior é que foi realizada em outro tipo de vegetação, com antenas diretivas polarizadas na horizontal e na vertical, torres mais altas, maior distância na extensão das medições, duas diferentes frequências portadoras e com maior potência do sinal transmitido. A hipótese é a mesma na campanha de medição anterior.

4.1.1 Cenário das Medições

Esta campanha de medições foi realizada em uma área de vegetação formada por árvores de castanheiras no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Manaus Zona Leste-CZL (fig. 4.1). Na fig. 4.2 é ilustrada a vista lateral do procedimento de medida usado.



Figura 4.1: Foto da vista superior do Campus Manaus Zona Leste-CZL.

Fonte: Google Earth 2 [42].

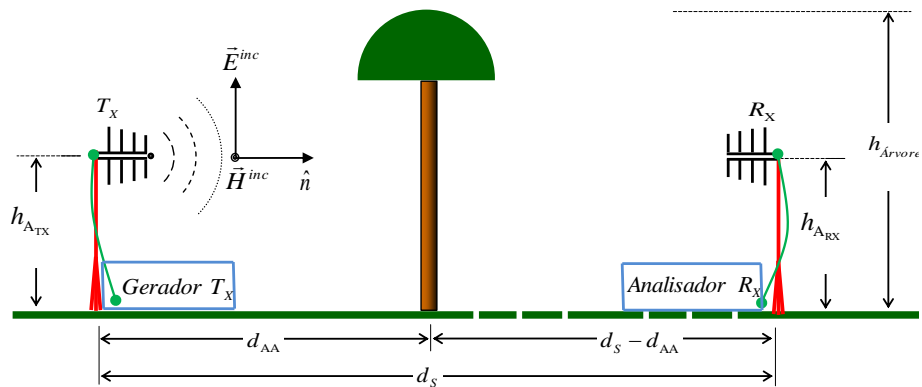


Figura 4.2: Ilustração da vista lateral do procedimento de medidas a ser usado. Antenas direcionais instaladas em torres estaiadas apoiadas em tripés e posicionadas na polarização vertical, tendo como obstáculo apenas uma árvore.

4.1.2 Equipamentos e Configurações

Tomando-se por base a fig. 4.2, utilizaram-se antenas direcionais do tipo log-periódicas com maior ganho que as antenas dipolo simples instaladas no topo de torres onde $h_{A_{TX}} = h_{A_{RX}} = 6,0$ m de altura, pois, a antena em uma maior altura automaticamente estima-se que o sinal transmitido alcance distâncias mais longas que as das medições anteriores.

Ainda tomando como referência a mesma figura, a antena do módulo T_x foi posicionada na distância $d_{AA} = 12,5$ m entre a torre e a árvore e os 9 pontos para as medições foram distanciados em 25 m, perfazendo um total de $d_s = 225$ m.

Antes de serem configurados, ainda no Laboratório de Redes de Telecomunicações, os equipamentos, dispositivos e acessórios foram previamente avaliados conforme consta no Apêndice A Relatórios das Medições Preparatórias:

- a. A1 Aferições/Ajustes dos Equipamentos;
- b. A2 Medições das Perdas nos Cabos e Acessórios.

Para testar o conjunto da funcionalidade dos equipamentos, dispositivos e acessórios a serem utilizados na campanha de medições no Ifam/CZL, foi feita uma campanha de medições no Ifam/CMDI. Detalhamentos e fotos da operacionalização desta atividade constam no Apêndice C Imagens e Relatos das Campanhas de Medições, C2 Imagens e Relatos da Campanha de Medição no Ifam/CMDI.

Os equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados no Módulo Transmissor – T_x constam na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados no Módulo T_x .

Módulo Transmissor – T_x		
Equipamentos/Dispositivos/Acessórios	Parâmetros	Valor/Unidade
Rádio Monocanal ACS-10 Stein Telecom → f_1 Rádio Transceptor Monocanal VHF-FM ST&S → f_2	Frequência Portadora → f_1	169,870 MHz
	Frequência Portadora → f_2	244,599 MHz
	Potência	30 dBm
	Impedância	50 Ω
Agilent System DC Power Supply 6632B 0-20 V/0-5 A	Tensão	12 V
	Corrente Máx.	5 A
No Break Enermax PG II 1400	Tensão de Entrada	115/220 V
	Potência	1.400 VA
	Frequência	60 Hz
	Tensão de Saída	115 V +/- 6%
Antena Log-periódica Aquário LVU-11	Número de Elementos	11
	Impedância	75 Ω
	Fx Frequência	54 - 806 MHz
	Ganho	5,9 dBi
	Conector	N Fêmea
RGC58 RG FLEX™ Foam-Dielectric Coax Braided Cable RFS	Comprimento	8 m
	Atenuação	0,187 dB/m*
	Impedância	50 Ω
	Conectores	N Macho
Impedância Transformer Anritsu MP 614A	Impedância	50-75 Ω
	Atenuação	0,56 dB*
Conectores Emendas	I – N	Fêmea/ Fêmea
	I – N	Macho/Macho
	I – F	Fêmea/Macho
Torre Metálica	Altura	6 m
	Diâmetro	1”
Tripé Metálico	Altura	0,75 m
	Diâmetro	1”
Cabo Elétrico PP 2x6mm ²	Comprimento	30 m
	Isolação	750 V
	Material	Cobre
Arame Galvanizado	Diâmetro	1,208 mm ²
	Comprimento	20 m
Esticador para cabo de aço	Diâmetro	3/16”
	Material	Ferro Galvanizado

* Valor medido na frequência $f_2=244,599$ MHz.

Os equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados no Módulo Receptor – R_x constam na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados no Módulo R_x .

Módulo Receptor – R_x		
Equipamentos/Dispositivos/Acessórios	Parâmetros	Valor/Unidade
Agilent Technologies E4406A VSA Series Transmitter Tester 7 MHz – 4 GHz	Frequência Central $\rightarrow f_1$	169,870 MHz
	Frequência Central $\rightarrow f_2$	244,599 MHz
	Spam	+/- 1,0 MHz
	Impedância	50 Ω
No Break Enermax PG II 1400	Tensão de Entrada	115/220 V
	Potência	1.400 VA
	Frequência	60 Hz
	Tensão de Saída	115 V +/- 6%
Antena Log-periódica Aquário LVU-11	Número de Elementos	11
	Impedância	75 Ω
	Fx Frequência	54 - 806 MHz
	Ganho	5,9 dBi
	Conector	N Fêmea
RGC58 RG FLEX™ Foam-Dielectric Coax Braided Cable RFS	Comprimento	8 m
	Atenuação	0,187 dB/m*
	Impedância	50 Ω
	Conectores	N Macho
Impedância Transformer Anritsu MP 614A	Impedância	50-75 Ω
	Atenuação	0,56 dB*
Conectores Emendas	Tipo I - N	Fêmea/ Fêmea
	Tipo I - N	Macho/Macho
	Tipo I - F	Fêmea/Macho
Torre Metálica	Altura	6 m
	Diâmetro	1”
Tripé Metálico	Altura	0,75 m
	Diâmetro	1”
Cabo Elétrico PP 2x6mm ²	Comprimento	300 m
	Isolação	750 V
	Material	Cobre
Arame Galvanizado	Diâmetro	1,208 mm ²
	Comprimento	20 m
Esticador para cabo de aço	Diâmetro	3/16”
	Material	Ferro Galvanizado

* Valor medido na frequência $f_2=244,599$ MHz.

Na configuração do módulo T_x composto pelo Radio Monocanal de impedância $Z_{T_x}=50 \Omega$, este é ajustado na frequência portadora $f_1=169,870$ MHz ou $f_2=244,599$ MHz (sem modulação) na potência $P_{T_x}=30$ dBm, acoplado a uma antena direcional log-periódica de ganho $G_{T_x}=5,9$ dBi para a faixa de 54 – 806MHz, de impedância $Z_{A_{T_x}}=50 \Omega$, na polarização horizontal e vertical, fixada em torre metálica estaiada de diâmetro $\phi=1''$, com altura $h_{A_{T_x}}= 6,0$ m, por meio de cabo coaxial RGC58 com impedância $Z_{C_{T_x}}=50 \Omega$ e comprimento $L_{C_{T_x}}=8$ m. O equipamento de rádio é alimentado pela fonte Agilent System DC Power Supply 6632B 0-20 V/0-5 A ajustada em $V_{DC}= 12$ V.

Na configuração do módulo R_x o Agilent Technologies E4406A VSA Series Transmitter Tester 7 MHz – 4 GHz de impedância $Z_{R_x}=50 \Omega$ desempenha a função de analisador de espectro, configurado na frequência central $f_1=169,870$ MHz ou $f_2=244,599$ MHz e Spam \pm 1,0 MHz, acoplado a uma antena direcional log-periódica de ganho $G_{R_x}=5,9$ dBi para a faixa de 54 – 806 MHz, na polarização horizontal e vertical, fixada em torre metálica estaiada de diâmetro $\phi=1''$, com altura de $h_{A_{R_x}}= 6,0$ m, por meio de cabo coaxial RGC58 com impedância $Z_{C_{R_x}}=50 \Omega$ e comprimento $L_{C_{R_x}}=8$ m.

Os conjuntos dos equipamentos dos módulos T_x e R_x são individualmente alimentados por tensão alternada estabilizada por Nobreaks de potência de 1.400 VA com tensão de saída de 115 V \pm 6%.

As linhas de transmissão dos módulos T_x e R_x utilizam transformadores de impedância 50-75 Ω Anritsu MP 614A, além de conectores emendas para acoplarem e harmonizarem as impedâncias entre as antenas e os demais componentes do sistema.

O *Set up* dos equipamentos utilizados é o mostrado na fig. 4.3.

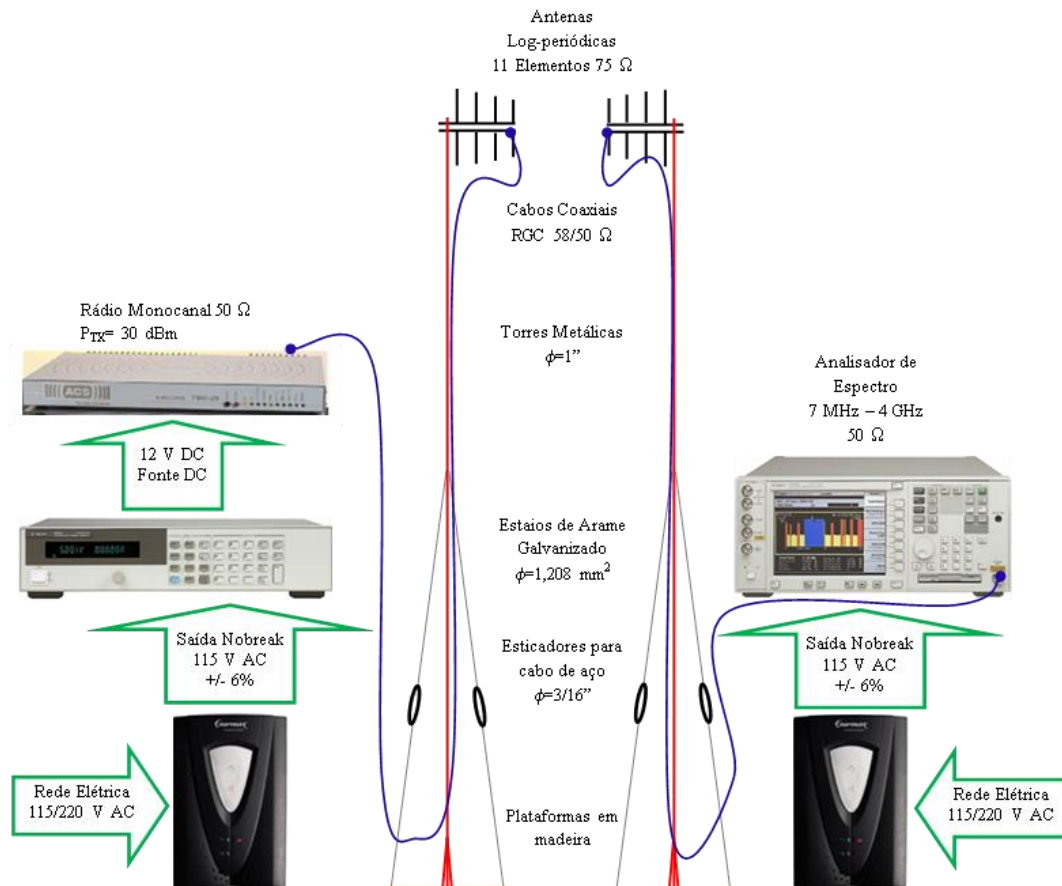


Figura 4.3: Set up dos equipamentos dos módulos T_x e R_x .

Na fig. 4.4 tem-se uma foto da equipe de pesquisadores trabalhando na campanha de medições no Campus Manaus Zona Leste-CZL.

4.1.3 Procedimentos para as Medições

- A primeira medida é feita com o módulo T_x fixado na posição de referência 0,0 e o módulo R_x na Posição 0, na distância $d_0=25$ m, numa condição sem obstáculos que é denominada espaço livre (fig. 4.5a). São lidas e registradas as cinco medidas da amplitude da onda portadora em medição na tela do Analisador de Espectro;
- Para a segunda de medida, o módulo T_x é instalado na posição de referência 0,0 a uma distância $d_{AA}=12,5$ m (distância entre o módulo T_x e o eixo da árvore) e neste mesmo alinhamento o módulo R_x é instalado a uma distância de $d_S-d_{AA}=12,5$ m (fig. 4.2), na Posição 1, ou seja, a uma distância de 12,5 m após o eixo do caule de $\phi_1=35,33$ cm de diâmetro da árvore correspondente a 25 m do módulo T_x (fig. 4.2 e 4.5b). São lidas

cinco medidas da amplitude da onda portadora na frequência em medição na tela do Analisador de Espectro que são registradas no relatório;

- O passo seguinte é deslocar o módulo R_x para a Posição 2, mantendo ambos os módulos no mesmo alinhamento da árvore. O módulo R_x é instalado a uma distância de $d_S-d_{AA}=37,5$ m correspondente a 50,0 m do módulo T_x (fig. 4.2 e 4.5b). São lidas cinco medidas da amplitude da onda portadora na frequência em medição na tela do Analisador de Espectro que são registradas no relatório;
- Em seguida, o módulo R_x é deslocado para a distância $d_S-d_{AA}= 62,5$ m correspondente a 75,0 m do módulo T_x (fig. 4.2b). Novamente são lidas cinco medidas da amplitude da onda portadora na frequência em medição na tela do Analisador de Espectro que são registradas no relatório;
- São repetidos os mesmos procedimentos anteriores em que o módulo R_x é deslocado de 25 em 25 m até que chegue na Posição 9 (fig. 4.5b), que está a 225 m de distância do módulo T_x .



Figura 4.4: Foto da vista frontal do cenário de medições onde são vistos o aluno Reury Matias, o prof. João Renato, o ex-aluno Willer Pinheiro e o prof. João Batista. Na direita a frente o módulo T_x e ao centro no fundo o módulo R_x .

Foto: Willer Pinheiro.

Detalhamentos e fotos da operacionalização desta atividade constam no Apêndice C Imagens e Relatos das Campanhas de Medições, C3 Imagens e Relatos da Campanha de Medição no Ifam/CZL.

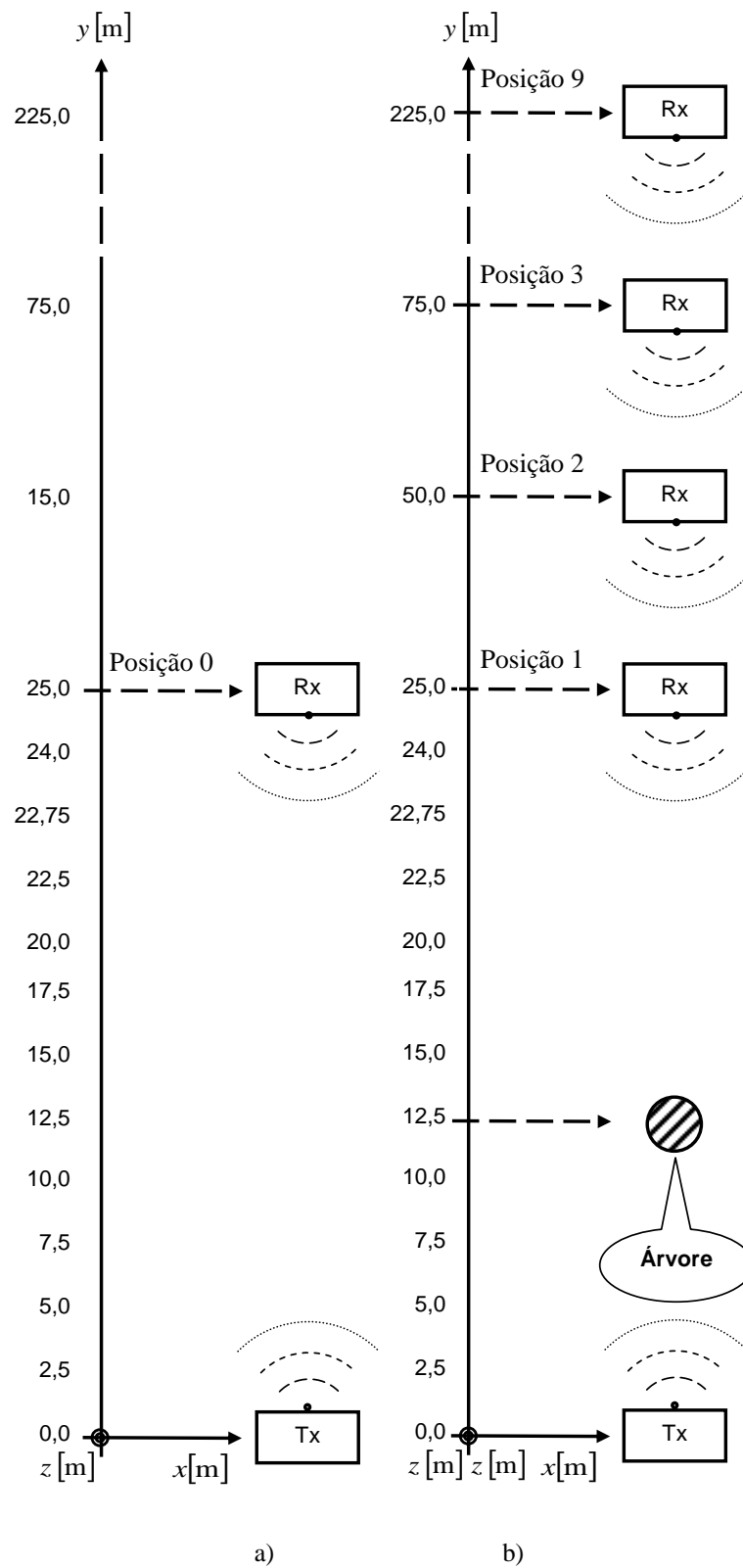


Figura 4.5: Diagramas da vista superior dos procedimentos de medições de campo. São demonstradas as posições dos módulos T_x e R_x , tanto em espaço livre como tendo uma árvore como obstáculo. a) Medição no espaço livre. b) Medição tendo uma árvore como obstáculo.

4.1.4 Resultados Numéricos

Os valores médios das amplitudes das potências recebidas ondas portadoras medidas nas frequências $f_1=169,870$ MHz e $f_2=244,599$ MHz estão na Tabela 4.3, abaixo.

Tabela 4.3: Valores Médios Obtidos da Potência Recebida.

Posição	Distância T_x-R_x (m)	PH	PV	PH	PV
		$f_1=169,870$ MHz	$f_1=169,870$ MHz	$f_2=244,599$ MHz	$f_2=244,599$ MHz
		Valor Médio (dBm)	Valor Médio (dBm)	Valor Médio (dBm)	Valor Médio (dBm)
0	$d_{0T_x-R_x}= 25$	-10,84	-19,28	-15,99	-18,68
1	$d_{T_x-R_x}= 25$	-11,74	-27,06	-23,98	-21,51
2	$d_{T_x-R_x}= 50$	-17,00	-31,32	-24,15	-21,56
3	$d_{T_x-R_x}= 75$	-20,79	-36,17	-25,95	-24,63
4	$d_{T_x-R_x}= 100$	-21,02	-40,61	-26,09	-26,52
5	$d_{T_x-R_x}= 125$	-22,34	-41,27	-27,27	-31,63
6	$d_{T_x-R_x}= 150$	-31,36	-48,07	-29,46	-35,72
7	$d_{T_x-R_x}= 175$	-32,31	-57,72	-31,69	-42,34
8	$d_{T_x-R_x}= 200$	-33,22	-59,74	-38,70	-47,67
9	$d_{T_x-R_x}= 225$	-40,63	-64,36	-40,17	-49-17

Os valores reais medidos da amplitude da onda portadora na frequência $f_1=169,870$ MHz produziram os dados registrados na Tabela B.1.1 no Apêndice B – Relatórios das Medidas da Campanha de Medições no Ifam/CZL.

Com onda portadora na frequência $f_2=244,599$ MHz os valores reais medidos da sua amplitude foram registrados na Tabela B.1.2 no Apêndice B – Relatórios das Medidas da Campanha de Medições no Ifam/CZL.

4.1.5 Algoritmo

Os códigos usados na implementação do modelo seguiram a sequência do diagrama da fig. 4.6 e constam no Apêndice D Programas de Computador, D2 MatLab – Cálculos e Figuras do Modelo de Predição - Ifam/CZL.

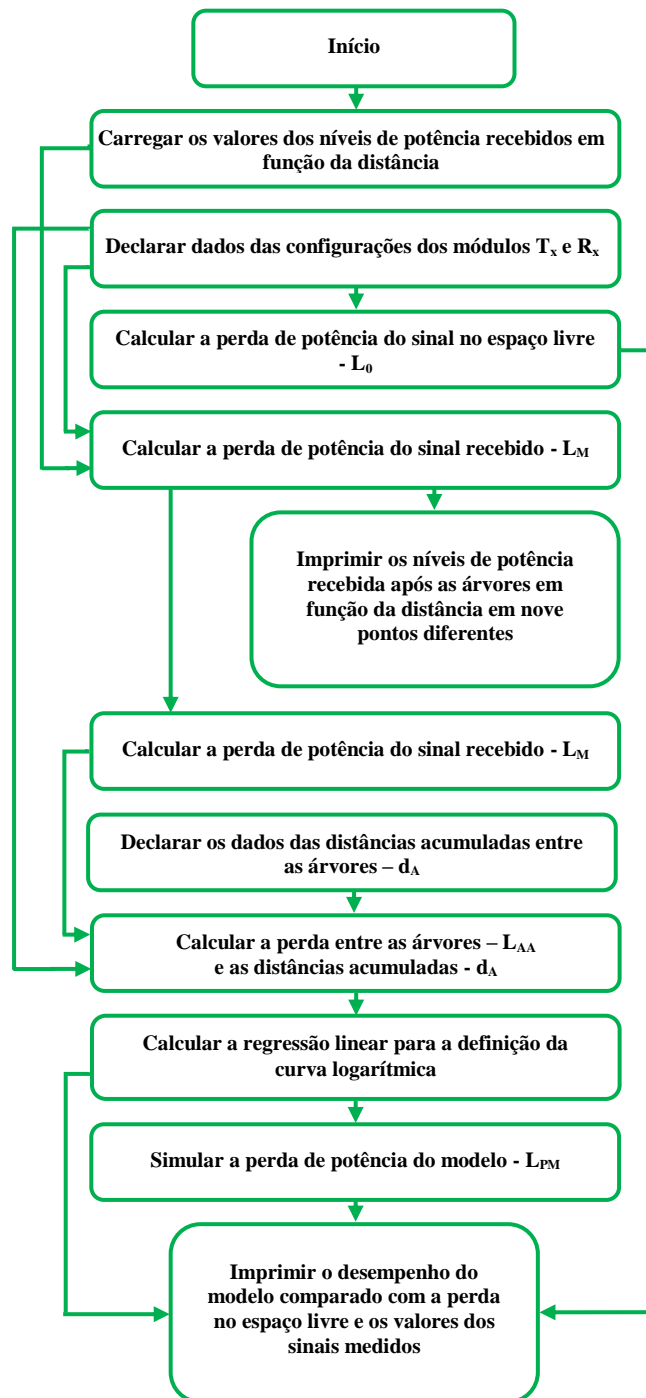


Fig. 4.6: Diagrama da representação do código usado na implementação do modelo.

4.1.6 Formulações Matemáticas dos Modelos

Para os valores destes parâmetros, da perda em dB no espaço livre L_0 , da perda entre as árvores L_{AA} , da perda L_p no intervalo entre as árvores quando a distância entre T_x e R_x for menor do que a distância entre T_x e a primeira árvore, da perda L_p quando a distância entre T_x e R_x é maior do que a distância entre T_x e a primeira árvore foram calculados respectivamente pelas equações (3.1), (3.2), (3.3), (3.4).

A perda do sinal medido L_M em dB é a mesma expressa pela equação (3.5):

$$L_M = (P_{T_x} + G_{T_x} + G_{R_x} - L_{TC}) - P_{R_x}$$

Utilizando (3.6) para o cálculo da predição de perda em dB na floresta L_{PM} e os mesmos procedimentos do Item 3.2.3, agora nas frequências $f_1=169,870$ MHz e $f_2=244,599$ MHz, com as antenas T_x e R_x nas polarizações horizontal e vertical, tem-se:

Para a $f_1=169,870$ MHz com as antenas T_x e R_x na polarização horizontal os valores encontrados para as constantes A_{h1} e B_{h1} são:

$$A_{h1} = 24,04 \quad \text{e} \quad B_{h1} = -31,84$$

Assim sendo, (3.6) fica na forma:

$$L_{PM} = 24,04 \log_{10}(d_{[km]}) - 31,84 \quad (4.1)$$

Portanto, o valor do expoente de perda n é definido por:

$$n = \frac{24,04}{10} = 2,40 \quad (4.2)$$

A previsão de perda do modelo L_{PM} para várias árvores como ilustrado na Fig. 4.7, calculada em dB, é expressa por:

$$L_{PM} = \left[\sum_{n=1}^M 24,04 \log_{10}(d_{S[km]} - d_{AA[km]}) + (0,65 \times 31,84) \right] + L_{AA} \quad (4.3)$$

Para a $f_1=169,870$ MHz com as antenas T_x e R_x na polarização vertical os valores encontrados para as constantes A_{v1} e B_{v1} são:

$$A_{v1} = 36,58 \quad \text{e} \quad B_{v1} = -51,85$$

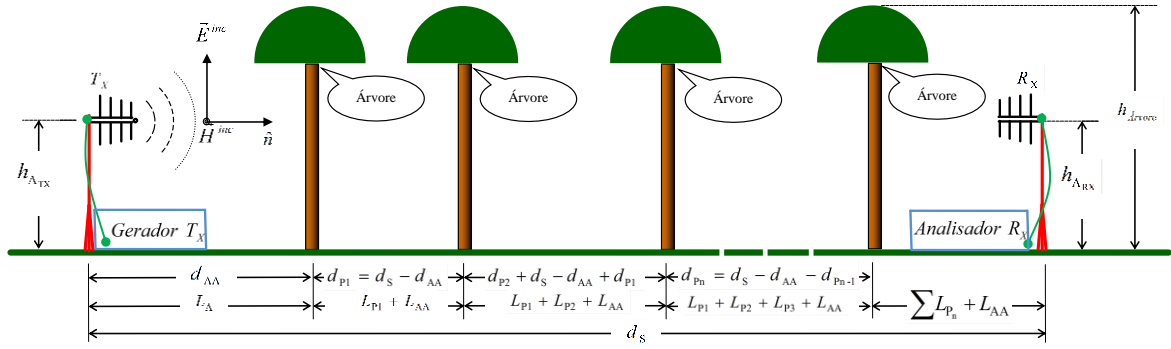


Figura 4.7: Ilustração da transmissão de sinal de rádio nas frequências $f_1=169,870$ MHz e $f_2=244,599$ MHz na faixa de VHF, utilizando antenas log-periódicas na polarização vertical, tendo como obstáculos várias árvores.

Assim sendo, (3.6) fica na forma:

$$L_{PM} = 36,58 \log_{10}(d_{[km]}) - 51,85 \quad (4.4)$$

Portanto, o valor do expoente de perda n é definido por:

$$n = \frac{36,58}{10} = 3,65 \quad (4.5)$$

Então, a previsão de perda do modelo L_{PM} para várias árvores como ilustrado na fig. 4.7 é calculada em dB pela expressão:

$$L_{PM} = \left[\sum_{n=1}^M 35,58 \log_{10}(d_{S[km]} - d_{AA[km]}) + (0,5 \times 51,85) \right] + L_{AA} \quad (4.6)$$

Para a $f_2=244,599$ MHz com as antenas T_x e R_x na polarização horizontal os valores encontrados para as constantes A_{h2} e B_{h2} são:

$$A_{h2} = 16,12 \quad \text{e} \quad B_{v2} = -25,33$$

Assim sendo, (3.6) fica na forma:

$$L_{PM} = 16,12 \log_{10}(d_{[km]}) - 25,33 \quad (4.7)$$

Portanto, o valor do expoente de perda n é definido por:

$$n = \frac{16,12}{10} = 1,61 \quad (4.8)$$

O valor de $n=1,61$ da equação (4.8) é explicado por um possível confinamento da onda do sinal radioelétrico entre as vegetações, o que facilitou a sua propagação ao longo do percurso definido pela metodologia.

Para a previsão de perda do modelo L_{PM} para várias árvores como ilustrado na fig. 4.7, esta é calculada, em dB, pela expressão:

$$L_{PM} = \left[\sum_{n=1}^M 16,12 \log_{10}(d_{S[km]} - d_{AA[km]}) + (0,25 \times 25,33) \right] + L_{AA} \quad (4.9)$$

Para a $f_2=244,599$ MHz com as antenas T_x e R_x na polarização vertical os valores encontrados para as constantes A_{v_2} e B_{v_2} são:

$$A_{v_2} = 32,08 \quad e \quad B_{v_2} = -49,93$$

Assim sendo, (3.6) fica na forma:

$$L_{PM} = 32,08 \log_{10}(d_{[km]}) - 49,93 \quad (4.10)$$

Portanto, o valor do expoente de perda n é definido por:

$$n = \frac{32,08}{10} = 3,20 \quad (4.11)$$

A previsão de perda do modelo L_{PM} para várias árvores como ilustrado na fig. 4.7 é calculada em dB pela expressão:

$$L_{PM} = \left[\sum_{n=1}^M 32,08 \log_{10}(d_{S[km]} - d_{AA[km]}) + (0,65 \times 49,93) \right] + L_{AA} \quad (4.12)$$

A potência do sinal recebido P_{R_x} em dB é calculada pela mesma expressão definida pela equação (3.10).

4.1.7 Resultados Gráficos

Como resultados gráficos tem-se demonstrado na fig. 4.8 os níveis médios da intensidade do sinal radioelétrico medido após as árvores como obstáculo, com as antenas T_x e R_x nas polarizações horizontal e vertical em função da distância em nove pontos diferentes distanciados em 25 m, de acordo com a localização das posições de 1 a 9, como ilustrado nas fig. 4.2 e 4.5b. Por ser um sinal que se propaga ao longo da distância, como previsto, a amplitude do sinal decai no prolongamento do percurso do sinal. Também são mostradas para cada gráfico do nível dos valores medidos, em uma determinada frequência e com a antena em uma determinada polarização, as retas dos valores médios destes níveis.

Nas figuras de 4.9 a 4.12 têm-se os gráficos que mostram o desempenho do modelo nas frequências portadoras de $f_1=169,870$ MHz e $f_2=244,599$ MHz com as antenas log-periódicas de T_x e de R_x nas polarizações horizontal e vertical em função da distância com os sinais medidos em nove pontos diferentes. Como parâmetros para comparação, são mostrados os gráficos das Perdas da Potência Medida - L_M , das Perdas da Simulação do Espaço Livre - L_0 e das Perdas da Simulação do Modelo - L_{PM} . Ficam demonstradas nestas figuras que as tendências dos gráficos dos modelos, com aumento da distância, é a de serem consistentes com os níveis das perdas dos dados medidos. Os gráficos demonstram coerência quando a curvas referentes às Perdas da Simulação do Espaço Livre - L_0 têm menor perda em relação aos demais. Os gráficos das Perdas da Simulação do Espaço Livre - L_0 e os gráficos que simulam as Perdas da Simulação do Modelo - L_{PM} estão ajustados aos gráficos das Perdas da Potência Medida - L_M .

Na Tabela 4.4 têm-se as estatísticas relativas aos valores medidos das potências recebidas tais como: erro padrão (RMS) em relação aos valores da reta, o desvio padrão (dB) e a média (dBm) da potência recebida.

Nas Tabelas 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 têm-se as estatísticas relativas às Perdas da Potência Medida - L_M , Perdas da Simulação do Espaço Livre - L_0 e das Perdas da Simulação do Modelo - L_{PM} , estando cada uma das tabelas respectivamente correspondente a cada uma das fig. de 4.9 a 4.12.

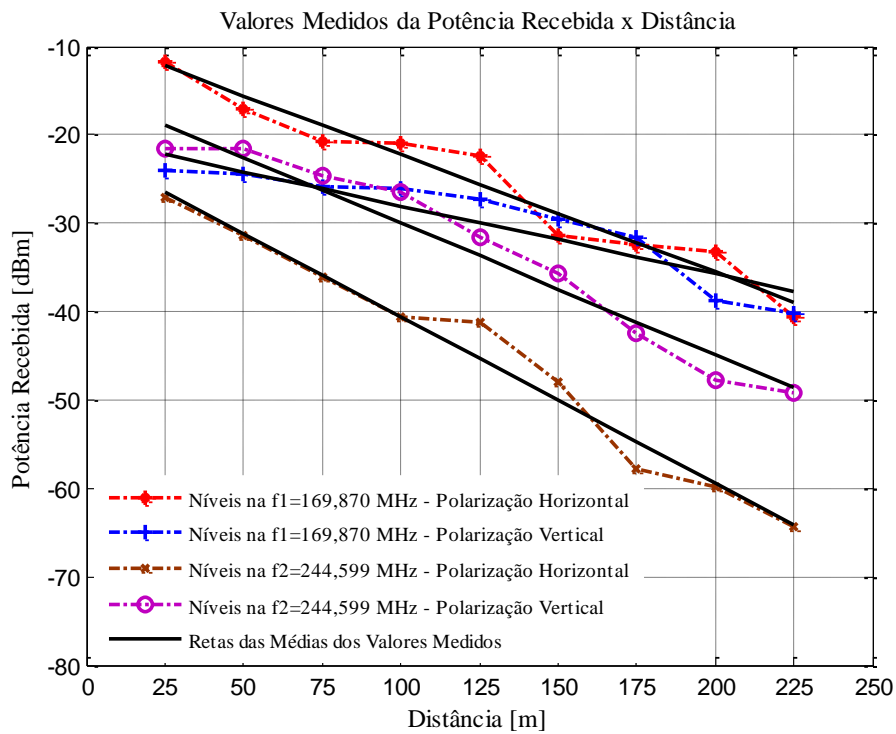


Figura 4.8: Gráficos dos níveis médios de potência dos sinais recebidos medidos na frequência portadora de $f_1=169,870$ MHz e de $f_2=244,599$ MHz além das retas das médias dos valores medidos, cujas inclinações correspondem, respectivamente, aos expoentes de perdas de $n = 2,40$, $3,65$, $1,61$ e $3,20$.

Tabela 4.4: Estatísticas Relativas aos Valores Medidos da Potência Recebida.

Parâmetros $f_1=169,870$ MHz Polarização Horizontal	Distâncias (m)								
	25	50	75	100	125	150	175	200	225
P_{R_x} (dBm)	-11,74	-17,00	-20,79	-21,02	-22,34	-31,36	-32,31	-33,32	-40,63
Dados da Reta (dBm)	-12,23	-15,56	-18,89	-22,22	-25,55	-28,88	-32,21	-35,55	-38,88
Parâmetros		Valor (dB)							
Erro Padrão (RMS)		1,88							
Desvio Padrão P_{R_x}		9,12							
Média de P_{R_x} (dBm)		25,55							
Parâmetros $f_1=169,870$ MHz Polarização Vertical	Distâncias (m)								
	25	50	75	100	125	150	175	200	225
P_{R_x} (dBm)	-27,06	-31,32	-36,17	-40,61	-41,27	-48,07	-57,72	-59,74	-64,36
Dados da Reta (dBm)	-26,39	-31,10	-35,80	-40,51	-45,22	-49,92	-54,63	-59,33	-64,04
Parâmetros		Valor (dB)							
Erro Padrão (RMS)		1,80							
Desvio Padrão P_{R_x}		12,88							
Média de P_{R_x} (dBm)		45,22							
Parâmetros $f_2=244,599$ MHz Polarização Horizontal	Distâncias (m)								
	25	50	75	100	125	150	175	200	225
P_{R_x} (dBm)	-23,98	-24,51	-25,95	-26,09	-27,27	-29,46	-31,69	-38,70	-40,17
Dados da Reta (dBm)	-22,26	-24,18	-26,10	-28,02	-29,94	-31,87	-33,79	-35,71	-37,63
Parâmetros		Valor (dB)							
Erro Padrão (RMS)		2,09							
Desvio Padrão P_{R_x}		5,26							
Média de P_{R_x} (dBm)		29,94							
Parâmetros $f_2=244,599$ MHz Polarização Vertical	Distâncias (m)								
	25	50	75	100	125	150	175	200	225
P_{R_x} (dBm)	-21,51	-21,56	-24,63	-26,52	-31,63	-35,72	-42,34	-47,67	-49,17
Dados da Reta (dBm)	-18,44	-22,56	-26,28	-29,99	-33,71	-37,42	-41,14	-44,85	-48,57
Parâmetros		Valor (dB)							
Erro Padrão (RMS)		2,10							
Desvio Padrão P_{R_x}		10,17							
Média de P_{R_x} (dBm)		33,71							

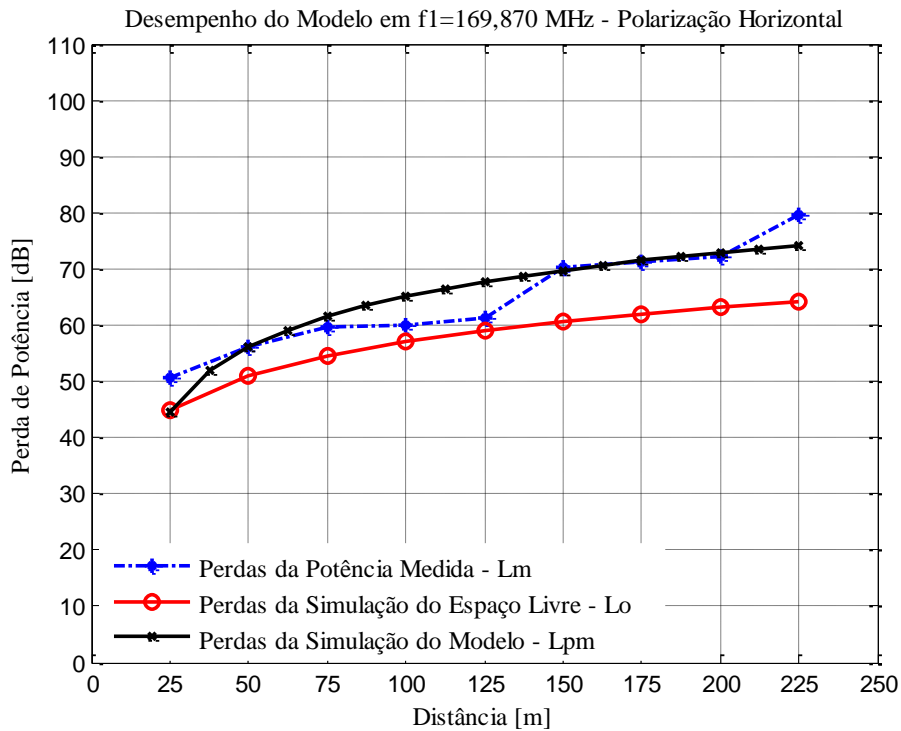


Figura 4.9: Gráficos do desempenho do modelo para os sinais medidos na frequência portadora $f_1=169,870$ MHz com a antena na polarização horizontal.

Tabela 4.5: Estatísticas Relativas às Perdas L_M e L_{PM} na $f_1=169,870$ MHz em Polarização Horizontal.

Parâmetros	Distâncias (m)								
	25	50	75	100	125	150	175	200	225
L_M (dBm)	50,74	56,00	59,79	60,02	61,34	70,36	71,31	72,32	79,63
L_{PM} (dBm)	44,65	56,12	61,46	64,97	67,59	69,69	71,43	72,93	74,23
Parâmetros		Valor (dB)							
Erro Padrão (RMS)		3,85							
Desvio Padrão L_{PM}		9,50							
Média de L_{PM} (dBm)		64,79							

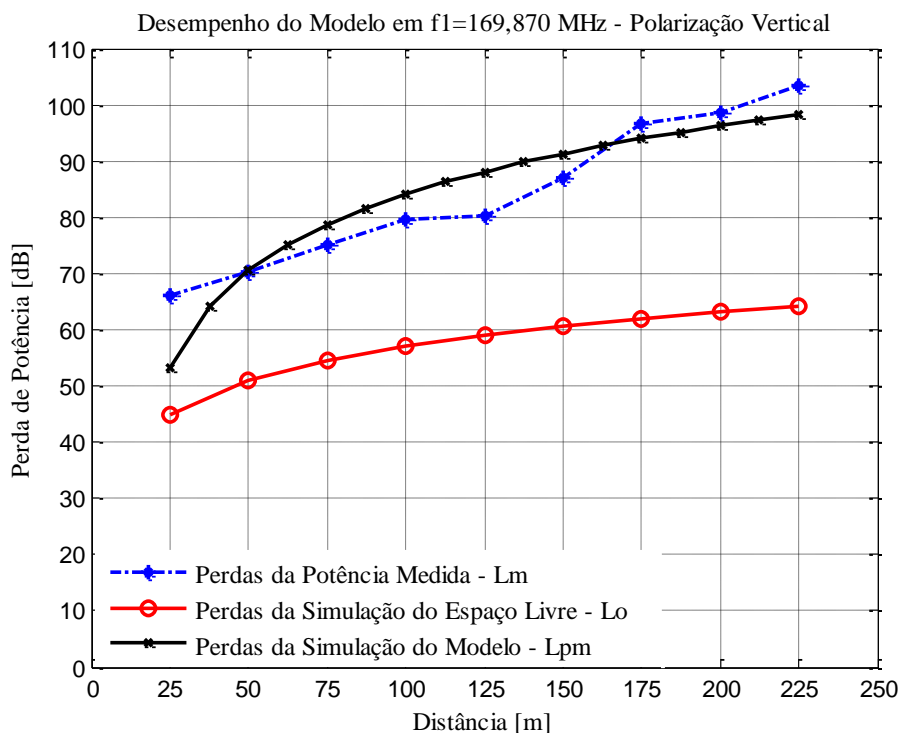


Figura 4.10: Gráficos do desempenho do modelo para os sinais medidos na frequência portadora $f_1=169,870$ MHz com a antena na polarização vertical.

Tabela 4.6: Estatísticas Relativas às Perdas L_M e L_{PM} na $f_1=169,870$ MHz em Polarização Vertical.

Parâmetros	Distâncias (m)								
	25	50	75	100	125	150	175	200	225
L_M (dBm)	66,06	70,32	75,17	79,61	80,27	87,07	96,72	98,74	103,3
L_{PM} (dBm)	53,18	70,63	78,75	84,10	88,09	91,28	93,93	96,20	98,19
Parâmetros		Valor (dB)							
Erro Padrão (RMS)		5,95							
Desvio Padrão L_{PM}		14,46							
Média de L_{PM} (dBm)		83,82							

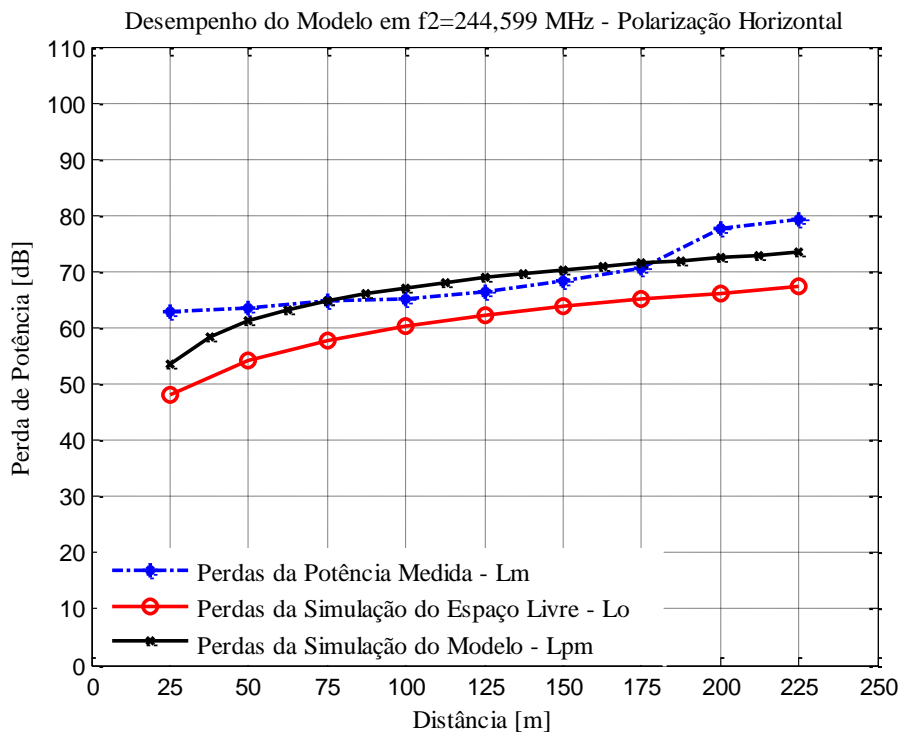


Figura 4.11: Gráficos do desempenho do modelo para os sinais medidos na frequência portadora $f_2=244,599$ MHz com a antena na polarização horizontal.

Tabela 4.7: Estatísticas Relativas às Perdas L_M e L_{PM} na $f_2=244,599$ MHz em Polarização Horizontal.

Parâmetros	Distâncias (m)								
	25	50	75	100	125	150	175	200	225
L_M (dBm)	62,98	63,51	64,95	65,09	66,27	68,46	70,69	77,70	79,17
L_{PM} (dBm)	53,50	61,20	64,77	67,13	68,89	70,30	71,47	72,47	73,35
Parâmetros		Valor (dB)							
Erro Padrão (RMS)		4,36							
Desvio Padrão L_{PM}		6,37							
Média de L_{PM} (dBm)		67,01							

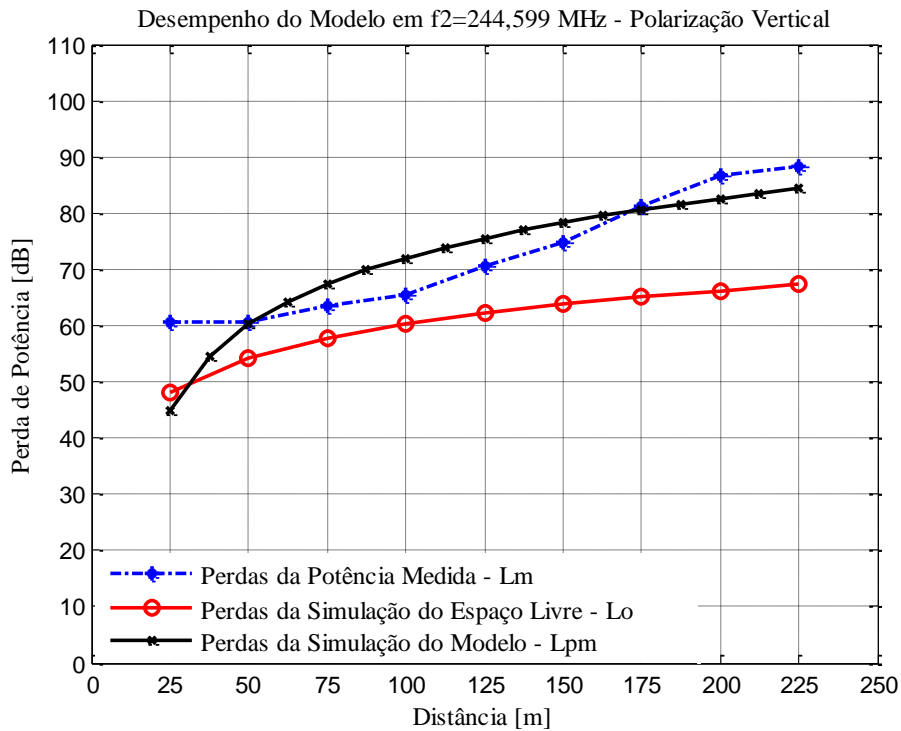


Figura 4.12: Gráficos do desempenho do modelo para os sinais medidos na frequência portadora $f_2=244,599$ MHz com a antena na polarização vertical.

Tabela 4.8: Estatísticas Relativas às Perdas L_M e L_{PM} na $f_2=244,599$ MHz em Polarização Vertical.

Parâmetros	Distâncias (m)								
	25	50	75	100	125	150	175	200	225
L_M (dBm)	60,51	60,56	63,63	65,52	70,63	74,72	81,34	86,67	88,17
L_{PM} (dBm)	44,86	60,17	67,29	71,98	75,48	78,28	80,60	82,60	84,34
Parâmetros		Valor (dB)							
Erro Padrão (RMS)		6,39							
Desvio Padrão L_{PM}		12,68							
Média de L_{PM} (dBm)		71,73							

4.2 Conclusões Parciais

O Capítulo abordou uma campanha de medições mais bem estruturada que a anterior realizada com o apoio de professores, alunos, ex-alunos e servidores do Ifam/CMDI. Os equipamentos utilizados foram os do Laboratório de Redes de Telecomunicações desta instituição e os cedidos pela empresa Consertec - Telecomunicações. A atividade foi desenvolvida dentro de um castanhal no Campus Manaus Zona Leste – CZL do Ifam, onde o ambiente de floresta do castanhal tem relevo com características de terra plana.

Para esta atividade foi necessária a instalação de um sistema de comunicação dentro da floresta composto por equipamentos de rádio monocal operando nas frequências portadoras de $f_1=169,870$ MHz ou $f_2=244,599$ MHz (sem modulação), emitindo potência de 30 dBm, fonte de alimentação DC, analisador de espectro de bancada sintonizado nas frequências transmitidas, antenas tipo log-periódicas com onze elementos na polarização horizontal ou vertical, instaladas no topo de torres metálicas com alturas de 6 m, estaiadas por arames galvanizados, sustentadas por tripés metálicos, nobreak, cabos e conectores de RF além de 330 m de cabo elétrico do tipo PP 2x6mm².

As medições foram desenvolvidas utilizando-se a mesma metodologia anteriormente adotada, sendo diferenciada pelo fato de que neste caso as distâncias entre os pontos de posicionamento do módulo R_x são maiores e a distância máxima entre T_x e R_x é de 225 m.

Os dados experimentais encontrados foram inseridos em programa computacional que resultou nas formulações matemáticas de quatro modelos semi-empíricos de propagação em ambiente com densidade média de vegetação, relativos às medidas feitas com as duas frequências portadoras e com as antenas nas polarizações horizontal e vertical. O comportamento dos sinais recebidos e o desempenho dos modelos criados estão demonstrados nos gráficos das fig. de 4.8 a 4.12. São também apresentadas as tabelas de 4.5 a 4.8 relativas às estatísticas das medidas e dos modelos de propagação desenvolvidos.

Os modelos desenvolvidos nesta campanha também prevêm sua aplicação na propagação do sinal radioelétrico por meio de vegetação de densidade média, em terreno plano, estando os elementos do sistema de radiação posicionados abaixo da copa das árvores e operando na faixa de frequência de VHF. Conclui-se mais uma vez que para estas condições os principais obstáculos encontrados para a propagação do sinal, além da perda no espaço livre, são os troncos das árvores.

O próximo Capítulo trata das conclusões deste trabalho e as propostas de continuidade desta pesquisa.

Capítulo 5

Conclusões e Propostas de Continuidade

5.1 Conclusões

Este trabalho de pesquisa foi motivado pela busca de modelos de propagação semi-empíricos de predição de cobertura para ambientes com vegetação, na faixa de frequências de VHF, tendo como cenário uma vegetação da Floresta Amazônica.

Após a revisão bibliográfica que pode ser referenciada pelo contexto do Capítulo 1, constatou-se que dentre todos os artigos pesquisados não existir nenhum trabalho de pesquisa científica que tenha apurado a atenuação da propagação do sinal radioelétrico no ambiente de seringal ou castanhal, caracterizando-se assim o ineditismo desta obra.

Nesta revisão bibliográfica tem-se um resumo sobre o modelo de Tamir que foi desenvolvido para as condições de floresta densa e com os módulos de transmissão e recepção ali inseridos distanciados a mais de um quilômetro. Como tratado no Capítulo 2, sabemos que a Floresta Amazônica é imensa e diversificada e compõe-se também de regiões com florestas de densidade média, onde é inclusive possível a recepção sinais de emissoras de rádio FM, que operam na faixa de VHF. A partir daí passou-se a trabalhar com a ideia de realizar campanhas de medições em florestas de densidades médias para provar que é possível fazer a propagação em visada direta em ambientes com este tipo de vegetação. Buscou-se na literatura e posteriormente *in loco* vegetações onde fossem possíveis realizar estas campanhas. As vegetações encontradas mais apropriadas para esta atividade foram as das seringueiras e as das castanheiras. Neste Capítulo também consta um breve estudo sobre as características das vegetações dos seringais e dos castanhais.

Por ser a Floresta Amazônica de dimensão gigantesca, optou-se em fazer preliminarmente em uma campanha de medições em uma floresta formada por árvores semelhantes as das seringueiras, assunto abordado no Capítulo 3. Anteriormente já haviam

sido feitas visitas aos seringais [36][37] onde se constatou a possibilidade da propagação do sinal de rádio por dentro desta vegetação, desde que ela fosse de densidade média. Nesta campanha, devido as limitações de equipamentos, acessórios, dispositivos, fornecimento de energia e outras limitações, foram utilizadas antenas dipolo na polarização horizontal, torres de madeira com 2 m de altura, equipamento gerador de RF como transmissor com potência de 0 dBm, operando em uma frequência portadora na faixa de VHF e a distância máxima de 21 m entre o módulo T_x e o módulo R_x . Dos dados experimentais obtidos, estabeleceu-se um modelo de propagação semi-empírico para ambiente com vegetação de densidade média.

Numa condição mais bem estruturada que na da campanha de medições preliminar, foi realizada uma campanha de medições dentro de uma floresta com vegetação de castanheiras, tema tratado no Capítulo 4. Nesta atividade foram utilizadas antenas direcionais do tipo log-periódicas com 11 elementos, nas polarizações horizontal e vertical; instaladas em torres metálicas com 6 m de altura, estaiadas por arames galvanizados e suportadas por tripés metálicos; equipamentos de rádios transmissores com potência de 30 dBm, operando em duas frequências portadoras na faixa de VHF e a distância máxima de 225 m entre os módulos T_x e R_x . Os dados experimentais obtidos foram implementados computacionalmente e estabeleceram-se quatro modelos de propagação semi-empírico para ambiente com vegetação de densidade média.

Como conclusão final, pode-se afirmar tendo como provas as figuras dos desempenhos dos modelos dos Capítulos 3 e 4 que a propagação do sinal radioelétrico por meio de uma vegetação de densidade média, em terreno plano, desde que os elementos do sistema de radiação sejam posicionados abaixo da copa das árvores e operem na faixa de frequência de VHF, os obstáculos de maior impacto para esta propagação do sinal, considerando-se também a perda no espaço livre, são os troncos das árvores. Tendo o comprimento de onda do sinal radioelétrico aproximadamente 1 m, os modelos provam que este sinal pode contornar os troncos das árvores e de acordo com a potência aplicada espalhar-se por longas distâncias.

5.2 Propostas de Continuidade

Em um trabalho de pesquisa, sendo este preponderantemente baseado em pesquisa de campo, sempre há o que melhorar e aprimorar.

Na revisão bibliográfica sugere-se que sejam inseridas novas publicações que tratem da propagação de sinais em regiões de florestas.

Nas formulações sugere-se que sejam incluídas as parcelas de atenuações relativas a influência da propagação de sinal de rádio em ambiente de terra plana.

Nas campanhas de medições que sejam experimentadas as medidas em regiões com outras vegetações, desde que o ambiente tenha relevo de terra plana e a densidade média de vegetação.

Considerando-se que um dos objetivos da pesquisa é modelar a atenuação do sinal de rádio deslocando-se em um percurso no interior da Floresta Amazônica e que a distância de 225 m dentro desta imensa floresta é um espaço muito curto, sugere-se que sejam utilizados equipamentos adequados e por meio de condições satisfatórias de deslocamento da equipe de pesquisadores e dos equipamentos, que a distância entre os módulos T_x e R_x seja estendida para pelo menos dois quilômetros, ou seja, uma distância dez vezes maior que a utilizada na floresta de castanheiras.

Reunindo-se em um modelo as formulações que são as contribuições desta pesquisa, e que nesta formulação sejam inseridas as sugestões aqui expressadas, a tendência é que se tenha um modelo de propagação semi-empírico mais completo para região com vegetação de média densidade.

Referências Bibliográficas

- [1] T. S. Rappaport, “*Wireless Communications*”. 2TH Edition. New Jersey - U.S.A: Prentice Hall PTR, 2002.
- [2] M. F. Cátedra, J. Pérez-Arriaga, “*Cell Planning for Wireless Communications*”. Boston :Artech House, 1999.
- [3] W. C. Y. Lee, “*Mobile communications design fundamentals*”. 2th Edition. New York - U.S.A: John Wiley & Sons, 1993.
- [4] H. L. Bertoni, “*Radio Propagation for Modern Wireless Systems*”. New Jersey - U.S.A: Prentice Hall PTR, 2000.
- [5] S. R. Saunders, A. Aragón-Zavala, “*Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*” – 2. ed. – USA: Wiley, 2007.
- [6] N. BLAUSTEIN, C. G. CHRISTODOULOU. “*Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links*”. New Jersey - U.S.A: John Wiley& Sons, 2007.
- [7] J. D. Parsons, “*The Mobile Radio Propagation Channel*”, John Wiley and Sons, Liverpool-UK, 1998.
- [8] C. G. do Rego, “*Conceitos Básicos em Propagação de Ondas de Rádio*”. – Minas Gerais: Departamento de Engenharia Eletrônica, 2003.
- [9] T. Tamir, “On Radio Wave Propagation in Forest Environments”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-15, no. 6, PP. 806-817, Nov, 1967.
- [10] M. H. C. Dias, R. A. Alem, J. C. A. Santos, “*Análise Crítica do Modelo de Tamir para Predição de alcance de Rádio-Enlace sem Florestas*”, in 9th Int. Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS) 2010, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, vol. 1, pp. 1-7, 13-15 Dez 2010.
- [11] M. A. K. Melo, J. C. A. Santos, M. H. C. Dias, “*Adaptação do Modelo de Tamir para Predição de Cobertura de Sistemas HF/VHF em Florestas Usando Bases Digitais de Terreno*”, XXIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES – SBrT’11, 02-05 de outubro de 2011, Curitiba, PR.
- [12] S. S. Seker, “VHF/UHF radiowave propagation through forests: modeling and experimental observations” - USA: IEEE Proceedings, vol. 139, No. 1, Feb 1992.
- [13] M. L. Palude, T. Duparquier, L. Bertel, “Experimental study of VHF propagation in forested environment and modeling techniques” - France: IEEE International Radar Conference, 2000.
- [14] M. L. Palude, “Propagation modeling ofVHF radio channel in forested environments” - France: IEEE Military Communications Conference, 2004.

- [15] Y. Ziade, *et al*, “A theoretical model of propagation in forest compared with experimental results” - France: IEEE, 2005.
- [16] J. A. R. Azevedo, F. E. S. Santos, “A empirical propagation model for forest environments at three trunk level” - USA: IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 59, No. 6, June 2011.
- [17] M. A. Karaml, F. Amur, A. K. Fung, “Electromagnetic Wave Scattering from a Forest or Vegetation Canopies”, USA: IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 35, Apr 1993.
- [18] D. N. Schettino, F. J. S. Moreira, K. L. Borges e C. G. Rego, “*Novel heuristic UTD coefficients for the characterization of radio channels*,” IEEE Transactions on Magnetics, volume 43, number 4, pp. 1301-1304, Abril de 2007.
- [19] P. Borderies, L. Villard, “Branches Modeling In Forest Electromagnetic Propagation and Scattering at L and P Bands”. Spain: IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Apr 2010.
- [20] C. Ruiz, P. Borderies, “Sensitivity analysis for forest interferometric, polarimetric observables estimation”, proceeding of Polinsar 2005, Italy, January 2005.
- [21] I. Champion, “*Tree Architecture in remote sensing analytical models: the Bray experiment*”, Int. J. REMOTE SENSING, 2001, vol. 22, N°9, 1827-1843.
- [22] L. Villard, P. Borderies, “*Backscattering border effects for forests at C-Band*”. Piers Online, Vol3 n°5, 731-735, 2007.
- [23] J. C. R. Dal Bello, M. S. Assis, “Comunicações táticas na região amazônica – 1ª Parte”, *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, vol IX, n° 3, pp. 12-20, 1992.
- [24] J. C. R. Dal Bello, M. S. Assis, “Comunicações táticas na região amazônica – 2ª Parte”, *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, vol IX, n° 4, pp. 7-19, 1992.
- [25] J. A. J. Ribeiro, “*Engenharia de microondas: fundamentos e aplicações*”. -- 1.ed. São Paulo: Érica, 2008.
- [26] T. Tamir, “Radio Wave Propagation Along Mixed Paths in Forest Environments”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-25, no. 4, PP. 471-477, Jul, 1977.
- [27] Ciências, “*Floresta Amazônica: A maior floresta tropical do mundo*”. Disponível em <http://educacao.uol.com.br/ciencias/floresta-amazonica-a-maior-floresta-tropical-do-mundo.jhtm>. Acessado em 26/dez/2011.
- [28] L. S. Vieira, “*O solo e a cultura da seringueira*”. Informe Didático 2. MEC – Faculdade de Ciências Agrárias do Pará. 1981.
- [29] C. T. Rizinni, Tratado de fitogeografia do Brasil: Aspectos ecológicos, sociológicos e florísticos. Âmbito Cultural Edições Ltda., 1997, 747p.
- [30] P. S. Gonçalves, “*Seringueira*”. Disponível em www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/historia-da-borracha/seringueira.php. Acessado em 21/set/2011.
- [31] P. Kenrick and P. Crane. 1997. The Origin and Early Diversification of Land Plants: A Cladistic Study. Smithsonian Institution Press, USA.

- [32] J. R. Marques “*A Seringueira*”. Disponível em <http://www.ceplac.gov.br/radar/seringueira.htm>. Acessado em 21/set/2011.
- [33] E. Pushparajah, “Problems and potentials for establishing Hevea under difficult environment conditions”. Planter, Kuala Lumpur, v. 59, p. 242-251, 1983.
- [34] O. U. Onokpise, “*Natural rubber*”, *Heveabrasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg., germ plasm collection in the Amazon basin, Brazil: a retrospective. Economic Botany, Bronx, v. 58, n. 4, p. 544-555, Oct. 2004.
- [35] J. Jackson, “O Ladrão do Fim do Mundo”. Rio de Janeiro: Editora Objetiva, 2011.
- [36] Museu Seringal Vila Paraíso. Disponível em <http://www.culturamazonas.am.gov.br/programas>. Acessado em 18 set 2012.
- [37] Embrapa Amazônia Ocidental. Disponível em <http://www.cpaa.embrapa.br/programas>. Acessado em 22 mar 2014.
- [38] Castanheira do Brasil: grandiosa e ameaçada. Disponível em http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira.
- [39] História de Xapuri. Disponível em <http://historiamultimidiadexapuri.blogspot.com.br>
- [40] Google Earth. Disponível em <http://www.google.com/earth>.
- [41] Manual Produtos ANRITSU. Disponível em <http://www.anritsu.com>.
- [42] Google Earth 2. Disponível em <http://www.google.com/earth>.

Apêndice A

Relatórios das Medições Preparatórias

Neste apêndice consta o conjunto de atividades preparatórias envolvendo os equipamentos, dispositivos e acessórios necessários para a campanha de medição que foi realizada no castanhal do Campus Manaus Zona Leste – CZL.

Esta parte preparatória ocorreu no Laboratório de Redes de Telecomunicações do Ifam/CMDI e foi essencial para que se tivesse a certeza de que no momento da medição todo o *set up* estaria em plenas condições de funcionamento.

A1. Aferições/Ajustes dos Equipamentos

A.1.1 Aferição/Ajuste de Frequência do Rádio Monocanal Utilizando Analizador de Espectro.

Tabela A.1.1: Equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados na aferição/ajuste de frequência do rádio monocanal utilizando Analizador de Espectro.

Equipamentos/Dispositivos/Acessórios	Parâmetros	Valor/Unidade
Rádio Monocanal ACS-10 Stein Telecom $\rightarrow f_2$	Frequência Portadora $\rightarrow f_2$	244,599 MHz
	Potência	30 dBm
	Impedância	50 Ω
Agilent System DC Power Supply 6632B 0-20 V/0-5 A	Tensão	12 V
	Corrente Máx.	5 A
Agilent Technologies E4406A VSA Series Transmitter Tester 7 MHz – 4 GHz	Frequência Portadora $\rightarrow f_2$	244,599 MHz
	Spam	+/- 1,0 MHz
	Impedância	50 Ω
RGC58 RG FLEX™ Foam-Dielectric Coax Braided Cable RFS	Comprimento	8 m
	Atenuação	0,187 dB/m*
	Impedância	50 Ω
	Conectores	N Macho
2x Atenuador de Impedância Narda 765-20 DC-5 GHz	Impedância	50 Ω
	Atenuação	20 dB
	Dissipação	50 W
Conectores Emendas	Tipo I - N	Fêmea/ Fêmea
2x No Break Enermax PG II 1400	Tensão de Entrada	115/220 V
	Potência	1.400 VA
	Frequência	60 Hz
	Tensão de Saída	115 V +/- 6%

* Valor medido na frequência $f_2=244,599$ MHz.

Configuração dos Equipamentos

O Rádio Monocanal ACS na função T_x em aferição de impedância $Z_{Tx}=50 \Omega$ é acoplado a um par de Atenuadores Narda 765-20 DC-5 GHz de -20 dB, com impedância $Z_{Att}=50 \Omega$, por meio de cabo coaxial RGC58 com impedância $Z_{CTx}=50 \Omega$. O equipamento de rádio é alimentado pela fonte Agilent System DC Power Supply 6632B 0-20 V/0-5 A ajustada em $V_{DC}=12$ V.

O Analisador de Espectro na função de R_x é o Agilent Technologies E4406A VSA Series Transmitter Tester 7 MHz – 4 GHz de impedância $Z_{AP}=50 \Omega$, configurado na frequência central $f_2=244,6$ MHz e $Spam=\pm 1,0$ MHz. É acoplado aos atenuadores por meio de cabo coaxial RGC58 com impedância $Z_{CRx}=50 \Omega$.

Os conjuntos dos equipamentos dos módulos T_x e R_x são individualmente alimentados por tensão alternada estabilizada por Nobreaks de potência de 1.400 VA com tensão de saída de 115 V $\pm 6\%$. O *Set up* dos equipamentos utilizados é o mostrado na fig. A.1.1.

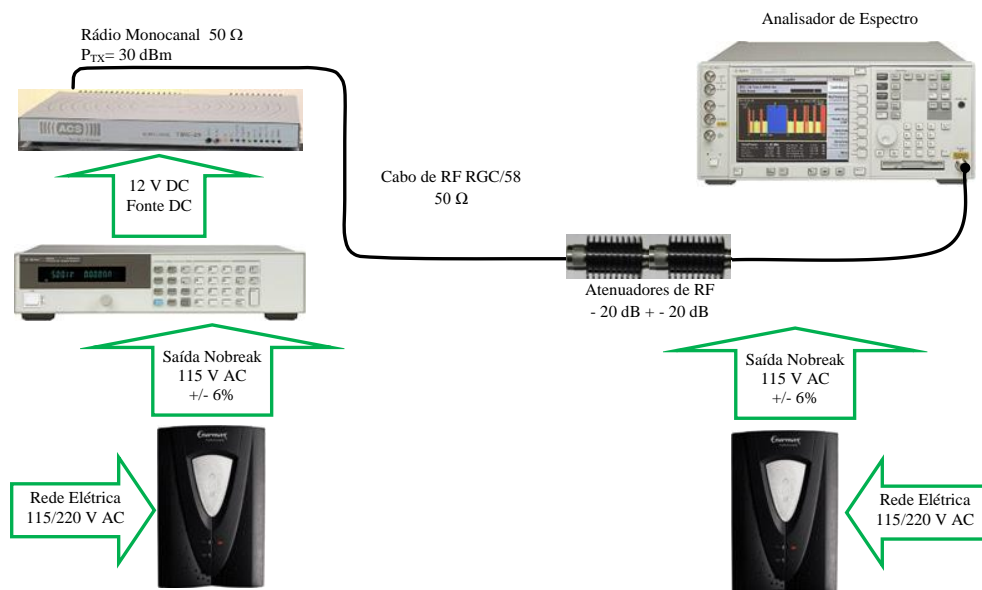


Figura A.1.1: *Set up* dos equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados na aferição/ajuste de frequência do rádio monocanal utilizando analisador de espectro.

Procedimentos das Medições

Após os equipamentos terem sido ligados, aquecidos e configurados, é lida na tela do Analisador de Espectro a amplitude a frequência da onda portadora gerada pelo Rádio Monocanal. Por meio do capacitor C8 no circuito do rádio é ajustada a frequência portadora em $f_2=244,599$ MHz (sem modulação). A potência medida na tela do Analisador de Espectro é de aproximadamente em $P_{AE}=-10$ dBm correspondente a $P_{TX}=30$ dBm.

A.1.2 Aferição/Ajuste de Potência do Rádio Monocanal Utilizando Power Meter

Tabela A.1.2: Equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados na aferição/ajuste de potência do rádio monocanal utilizando Power Meter.

Equipamentos/Dispositivos/Acessórios	Parâmetros	Valor/Unidade
Rádio Monocanal ACS-10 Stein Telecom $\rightarrow f_2$	Frequência Portadora $\rightarrow f_2$	244,599 MHz
	Potência	30 dBm
	Impedância	50 Ω
Agilent System DC Power Supply 6632B 0-20 V/0-5 A	Tensão	12 V
	Corrente Máx.	5 A
Agilent E4418B EPM Series Single-Channel Power Meter	Frequência $\rightarrow f_2$	244,599 MHz
	Power Range	-70 dBm a +44 dBm
	Impedância	50 Ω
Agilent E9300A E-Series Average Power Sensor	Frequency Range	10 MHz a 18 GHz
	Power Range	-60 dBm a +20 dBm
	Impedância	50 Ω
RGC58 RG FLEX™ Foam-Dielectric Coax Braided Cable RFS	Comprimento	8 m
	Atenuação	0,187 dB/m*
	Impedância	50 Ω
	Conectores	N Macho
2xAtenuador de Impedância Narda 765-20 DC-5 GHz	Impedância	50 Ω
	Atenuação	20 dB
	Dissipação	50 W
Conectores Emendas	Tipo I - N	Fêmea/ Fêmea
2xNo Break Enermax PG II 1400	Tensão de Entrada	115/220 V
	Potência	1.400 VA
	Frequência	60 Hz
	Tensão de Saída	115 V +/- 6%

* Valor medido na frequência $f_2=244,599$ MHz.

Configuração dos Equipamentos e Procedimentos das Medições

O Rádio Monocanal ACS na função T_x em aferição de impedância $Z_{Tx}=50 \Omega$ é acoplado a dois Atenuadores Narda 765-20 DC-5 GHz de -20 dB em série com impedância $Z_{Att}=50 \Omega$ por meio de cabo coaxial RGC58 com impedância $Z_{CTx}=50 \Omega$. O equipamento de rádio é alimentado pela fonte Agilent System DC Power Supply 6632B 0-20 V/0-5 A ajustada em $V_{DC}=12$ V.

Na função de R_x tem-se o Agilent E9300A E-Series Average Power Sensor em série com o Agilent E4418B EPM Series Single-Channel Power Meter de impedância $Z_{R_x}=50 \Omega$, configurado na frequência $f_2=244,6$ MHz. É acoplado aos atenuadores de -20 dB por meio de cabo coaxial RGC58 com impedância $Z_{C_{R_x}}=50 \Omega$.

Os conjuntos dos equipamentos dos módulos T_x e R_x são individualmente alimentados por tensão alternada estabilizada por Nobreaks de potência de 1.400 VA com tensão de saída de 115 V +/- 6%.

Após os equipamentos serem ligados e aquecidos, é lido no visor do Power Meter a frequência da onda portadora $f_2=244,599$ MHz (sem modulação) gerada pelo Rádio Monocanal. Por meio do capacitor C6 no circuito do rádio é ajustada a intensidade da potência mostrada no visor do Power Meter em $P_{PM}=-10$ dBm correspondente a $P_{T_x}=30$ dBm. O *Set up* dos equipamentos utilizados é o mostrado na fig. A.1.2.

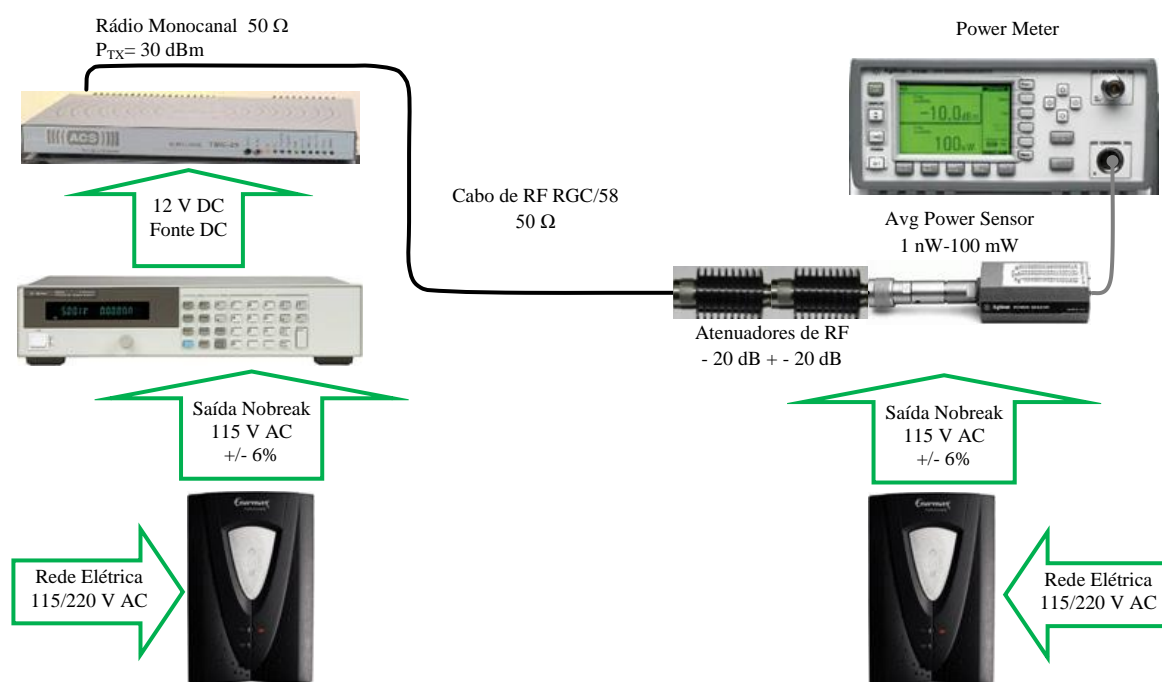


Figura A.1.2: *Set up* dos equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados na aferição/ajuste de potência do rádio monocanal utilizando Power Meter.

A2. Medições das Perdas nos Cabos e Acessórios

A.2.1 Medição da Perda no Sensor

Tabela A.2.1: Equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados na medição da perda no sensor.

Equipamentos/Dispositivos/Acessórios	Parâmetros	Valor/Unidade
Agilent E4420B ESG-A Series Analog RF Signal Generator, 2 GHz $\rightarrow f_2$	Frequência Portadora $\rightarrow f_1$	244,599 MHz
	Potência	0 dBm
	Impedância	50 Ω
Agilent E4418B EPM Series Single-Channel Power Meter	Frequência $\rightarrow f_1$	244,599 MHz
	Power Range	-70 dBm a +44 dBm
	Impedância	50 Ω
Agilent E9300A E-Series Average Power Sensor	Frequency Range	10 MHz a 18 GHz
	Power Range	-60 dBm a +20 dBm
	Impedância	50 Ω
No Break Enermax PG II 1400	Tensão de Entrada	115/220 V
	Potência	1.400 VA
	Frequência	60 Hz
	Tensão de Saída	115 V +/- 6%

* Valor medido na frequência $f_2=244,599$ MHz.

Configuração dos Equipamentos e Procedimentos das Medições

O Rádio Monocanal ACS na função T_x de impedância $Z_{T_x}=50 \Omega$ é acoplado por meio de cabo coaxial RGC58 com impedância $Z_{CT_x}=50 \Omega$ de comprimento $L_{CT_x}=8$ m a um Agilent E9300A E-Series Average Power Sensor que está em série com o Agilent E4418B EPM Series Single-Channel Power Meter na função R_x de impedância $Z_{R_x}=50 \Omega$, configurado na frequência de $f_2=244,6$ MHz. O equipamento de rádio é alimentado pela fonte Agilent System DC Power Supply 6632B 0-20 V/0-5 A ajustada em $V_{DC}=12$ V.

Os conjuntos dos equipamentos dos módulos T_x e R_x são individualmente alimentados por tensão alternada estabilizada por Nobreaks de potência de 1.400 VA com tensão de saída de 115 V +/- 6%.

O *Set up* dos equipamentos utilizados é o mostrado na fig. A.2.1.

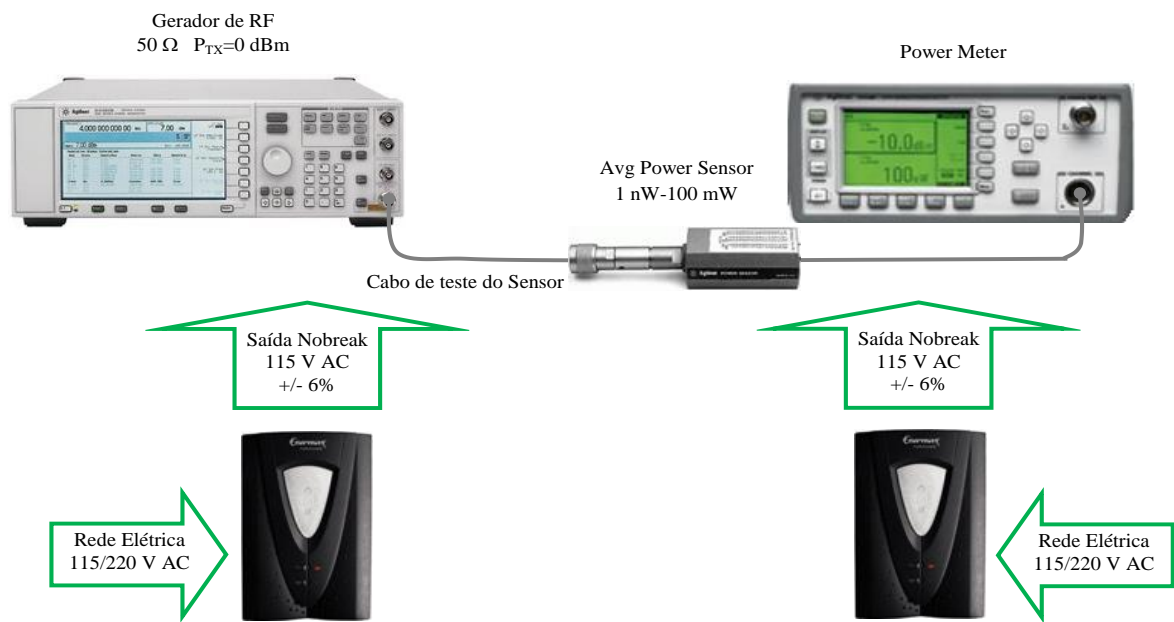


Figura A.2.1: *Set up* dos equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados na medição da perda no sensor.

A.2.2 Medições das Perdas nos Transformadores de Impedância

Tabela A.2.2: Equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados nas medições das perdas nos transformadores de impedância.

Equipamentos/Dispositivos/Acessórios	Parâmetros	Valor/Unidade
Agilent E4420B ESG-A Series Analog RF Signal Generator, 2 GHz $\rightarrow f_2$	Frequência Portadora $\rightarrow f_1$	244,599 MHz
	Potência	0 dBm
	Impedância	50 Ω
Agilent E4418B EPM Series Single-Channel Power Meter	Frequência $\rightarrow f_2$	244,599 MHz
	Power Range	-70 dBm a +44 dBm
	Impedância	50 Ω
Agilent E9300A E-Series Average Power Sensor	Frequency Range	10 MHz a 18 GHz
	Power Range	-60 dBm a +20 dBm
	Impedância	50 Ω
Impedance Transformer Anritsu MP 614A	Impedância	50-75 Ω
	Atenuação	0,56 dB*
Conectores Emendas	Tipo I - N	Fêmea/ Fêmea
	Tipo I - N	Macho/Macho
No Break Enermax PG II 1400	Tensão de Entrada	115/220 V
	Potência	1.400 VA
	Frequência	60 Hz
	Tensão de Saída	115 V +/- 6%

* Valor medido na frequência $f_2=244,599$ MHz.

Configuração dos Equipamentos e Procedimentos das Medições

O Rádio Monocanal ACS na função T_x em aferição de impedância $Z_{Tx}=50 \Omega$ é acoplado a dois Atenuadores Narda 765-20 DC-5 GHz de -20 dB em série com impedância $Z_{Att}=50 \Omega$ por meio de cabo coaxial RGC58 com impedância $Z_{CTx}=50 \Omega$ e comprimento $L_{CTx}=8$ m. O equipamento de rádio é alimentado pela fonte Agilent System DC Power Supply 6632B 0-20 V/0-5 A ajustada em $V_{DC}=12$ V.

Na função de R_x tem-se o Agilent E4418B EPM Series Single-Channel Power Meter de impedância $Z_{Rx}=50 \Omega$, configurado na frequência de $f_2=244,6$ MHz. É acoplado aos atenuadores de -20 dB por meio de cabo coaxial RGC58 com impedância $Z_{CRx}=50 \Omega$ e comprimento $L_{CTx}=8$ m.

Os conjuntos dos equipamentos dos módulos T_x e R_x são individualmente alimentados por tensão alternada estabilizada por Nobreaks de potência de 1.400 VA com tensão de saída de 115 V +/- 6%.

O *Set up* dos equipamentos utilizados é o mostrado na fig. A.2.2.

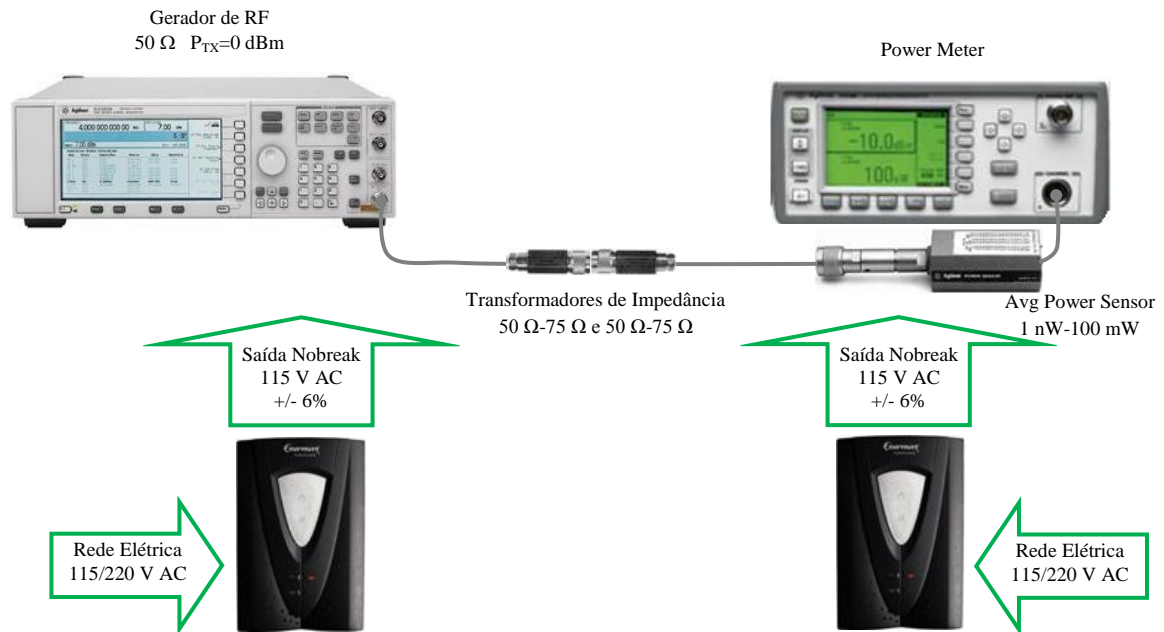


Figura A.2.2: *Set up* dos equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados nas medições das perdas nos transformadores de impedância.

A.2.3 Medições das Perdas nos Cabos de RF

Tabela A.2.3: Equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados nas medições das perdas nos cabos de RF.

Equipamentos/Dispositivos/Acessórios	Parâmetros	Valor/Unidade
Agilent E4420B ESG-A Series Analog RF Signal Generator, 2 GHz $\rightarrow f_2$	Frequência Portadora $\rightarrow f_2$	244,599 MHz
	Potência	0 dBm
	Impedância	50 Ω
Agilent E4418B EPM Series Single-Channel Power Meter	Frequência $\rightarrow f_2$	244,599 MHz
	Power Range	-70 dBm a +44 dBm
	Impedância	50 Ω
Agilent E9300A E-Series Average Power Sensor	Frequency Range	10 MHz a 18 GHz
	Power Range	-60 dBm a +20 dBm
	Impedância	50 Ω
RGC58 RG FLEX™ Foam-Dielectric Coax Braided Cable RFS	Comprimento	8 m
	Atenuação	0,187 dB/m*
	Impedância	50 Ω
	Conectores	N Macho
Conectores Emendas	Tipo I - N	Fêmea/ Fêmea
	Tipo I - N	Macho/Macho
No Break Enermax PG II 1400	Tensão de Entrada	115/220 V
	Potência	1.400 VA
	Frequência	60 Hz
	Tensão de Saída	115 V +/- 6%

* Valor medido na frequência $f_2=244,599$ MHz.

Configuração dos Equipamentos e Procedimentos das Medições

O Rádio Monocanal ACS na função T_x em aferição de impedância $Z_{Tx}=50 \Omega$ é acoplado a dois Atenuadores Narda 765-20 DC-5 GHz de -20 dB em série com impedância $Z_{Att}=50 \Omega$ por meio de cabo coaxial RGC58 com impedância $Z_{CTx}=50 \Omega$ e comprimento $L_{CTx}=8$ m. O equipamento de rádio é alimentado pela fonte Agilent System DC Power Supply 6632B 0-20 V/0-5 A ajustada em $V_{DC}=12$ V.

Na função de R_x tem-se o Agilent E4418B EPM Series Single-Channel Power Meter de impedância $Z_{Rx}=50 \Omega$, configurado na frequência de $f_2=244,6$ MHz. É acoplado aos

atenuadores de -20 dB por meio de cabo coaxial RGC58 com impedância $Z_{CRx}=50 \Omega$ e comprimento $L_{CTx}=8$ m.

Os conjuntos dos equipamentos dos módulos T_x e R_x são individualmente alimentados por tensão alternada estabilizada por Nobreaks de potência de 1.400 VA com tensão de saída de 115 V +/- 6%.

O *Set up* dos equipamentos utilizados é o mostrado na fig. A.2.3.

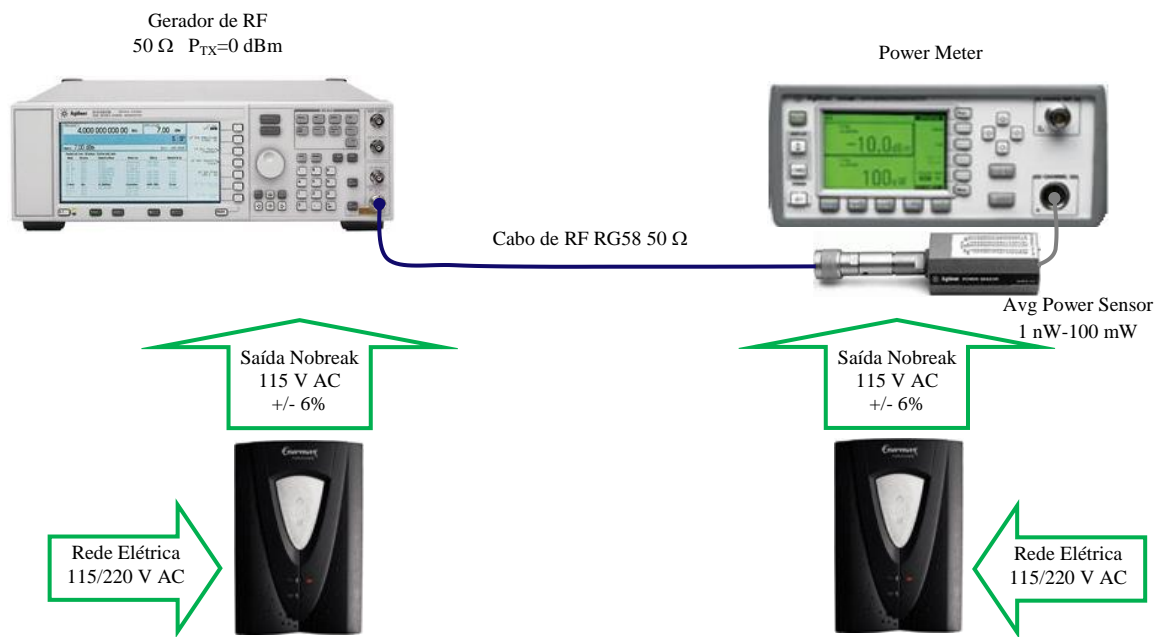


Figura A.2.3: *Set up* dos equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados nas medições das perdas nos cabos de RF.

A.2.4 Medição da Perda Total=Sensor+Cabos+Transformador de Impedância

Tabela A.2.4: Equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados na medição da perda total=sensor+cabos+transformador de impedância.

Equipamentos/Dispositivos/Acessórios	Parâmetros	Valor/Unidade
Agilent E4420B ESG-A Series Analog RF Signal Generator, 2 GHz $\rightarrow f_2$	Frequência Portadora $\rightarrow f_1$	244,599 MHz
	Potência	0 dBm
	Impedância	50 Ω
Agilent E4418B EPM Series Single-Channel Power Meter	Frequência Portadora $\rightarrow f_1$	244,599 MHz
	Power Range	-70 dBm a +44 dBm
	Impedância	50 Ω
Agilent E9300A E-Series Average Power Sensor	Frequency Range	10 MHz a 18 GHz
	Power Range	-60 dBm a +20 dBm
	Impedância	50 Ω
RGC58 RG FLEX™ Foam-Dielectric Coax Braided Cable RFS	Comprimento	8 m
	Atenuação	0,187 dB/m*
	Impedância	50 Ω
	Conectores	N Macho
Impedância Transformer Anritsu MP 614A	Impedância	50-75 Ω
	Atenuação	0,56 dB*
Atenuador de Impedância Narda 765-20 DC-5 GHz	Impedância	50 Ω
	Atenuação	20 dB
	Dissipação	50 W
Conectores Emendas	Tipo I - N	Fêmea/ Fêmea
	Tipo I - N	Macho/Macho
No Break Enermax PG II 1400	Tensão de Entrada	115/220 V
	Potência	1.400 VA
	Frequência	60 Hz
	Tensão de Saída	115 V +/- 6%

* Valor medido na frequência $f_2=244,599$ MHz.

Configuração dos Equipamentos e Procedimentos das Medições

O Rádio Monocanal ACS na função T_x em aferição de impedância $Z_{Tx}=50 \Omega$ é acoplado a dois Atenuadores Narda 765-20 DC-5 GHz de -20 dB em série com impedância $Z_{Att}=50 \Omega$ por meio de cabo coaxial RGC58 com impedância $Z_{CTx}=50 \Omega$ e comprimento

$L_{CTx}=8$ m. O equipamento de rádio é alimentado pela fonte Agilent System DC Power Supply 6632B 0-20 V/0-5 A ajustada em $V_{DC}=12$ V.

Na função de R_x tem-se o Agilent E4418B EPM Series Single-Channel Power Meter de impedância $Z_{Rx}=50 \Omega$, configurado na frequência de $f_2=244,6$ MHz. É acoplado aos atenuadores de -20 dB por meio de cabo coaxial RGC58 com impedância $Z_{CRx}=50 \Omega$ e comprimento $L_{CTx}=8$ m.

Os conjuntos dos equipamentos dos módulos T_x e R_x são individualmente alimentados por tensão alternada estabilizada por Nobreaks de potência de 1.400 VA com tensão de saída de 115 V +/- 6%.

O *Set up* dos equipamentos utilizados é o mostrado na fig. A.2.4.

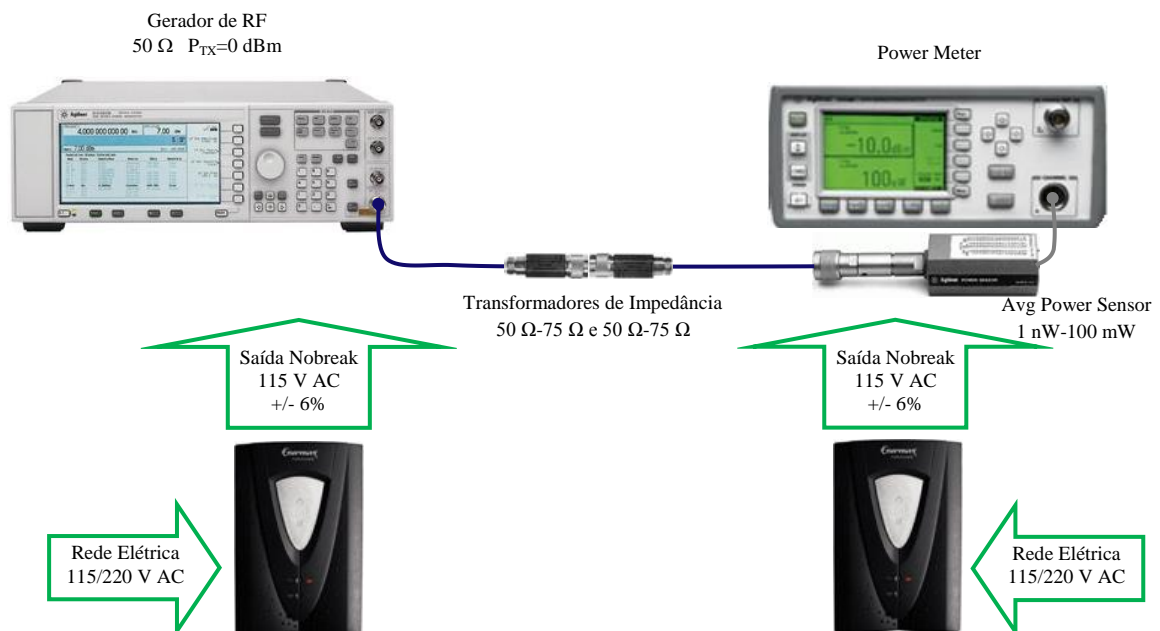


Figura A.2.4: *Set up* dos equipamentos, dispositivos e acessórios utilizados na medição da perda total=sensor+cabos+transformador de impedância.

A.2.5 Resumo das Medições das Perdas nos Cabos e Acessórios

Após os equipamentos serem ligados e aquecidos, são lidas a frequência da onda portadora e a intensidade da potência recebida no visor do Power Meter na frequência $f_2=244,599$ MHz (sem modulação) geradas pelo Rádio Monocanal.

Tabela A.2.5: Resumo das medições das perdas nos cabos e acessórios.

Atividade	Potência Gerada (dBm) Gerador RF	Potência Medida (dBm) Power Meter	Resultados (dB)
C.2.1	0	-0,14	Perda no sensor: 0,14
C.2.2	0	-1,26	Perda em cada Transformador de Impedância: $-1,26+0,14=-1,12/2=0,56$
C.2.3a Cabo RF "A"	0	-1,58	Perda em cada Cabo: $-1,58-1,70=3,28/2=-1,640$
C.2.3b Cabo RF "B"	0	-1,70	
C.2.4	0	-4,54	Perda total

Apêndice B

Relatórios das Medidas da Campanha de Medições no Ifam/CZL

Neste Apêndice constam as tabelas dos valores brutos obtidos nas medições durante a campanha de medições realizada no castanhal do Campus Manaus Zona Leste – Ifam/CZL.

A atividade ocorreu em quatro etapas, sendo a primeira com o rádio monocanal transmitindo na frequência portadora $f_1=169,870$ MHz com a antena em polarização horizontal. O módulo T_x ficou em posição fixa e o módulo R_x foi posicionado conforme pré-definida na metodologia. Após a leitura da potência do sinal recebido no analisador de espectro, o módulo R_x , que considerando todo o conjunto (equipamentos+mesa+antena+torre+cabos+base de madeira ...) pesa aproximadamente 80 kg, foi transportado para a próxima posição 25 m à frente e assim se repetiu até chegar na nona posição em 225 m. Os mesmos procedimentos se repetiram para esta mesma frequência com a antena polarizada na posição vertical, depois com a frequência portadora em $f_2=244,599$ MHz com a antena polarizada na posição horizontal e finalmente nesta mesma frequência portadora com a antena polarizada na posição vertical.

B1. Medições de Campo – Ifam/CZL

Tabela B.1.1: Valores medidos da amplitude da onda portadora na frequência $f_1=169,870$ MHz.

Registros dos Valores Medidos $\rightarrow f_1=169,870$ MHz						
Posição	Distância T_x-R_x (m)	Distância \acute{A} rvore- R_x (m)	Polarização Horizontal		Polarização Vertical	
			Valor Medido (dBm)	Valor Medio (dBm)	Valor Medido (dBm)	Valor Medio (dBm)
0	$d_{0T_x-R_x}=25$	$d_{0\acute{A}rv-R_x}=0$	-10,49	-10,84	-19,24	-19,28
			-11,01		-19,19	
			-10,94		-19,38	
			-10,95		-19,45	
			-10,88		-19,17	
1	$d_{T_x-R_x}=25$	$d_{\acute{A}rv-R_x}=12,5$	-11,25	-11,74	-27,01	-27,06
			-11,15		-27,62	
			-11,26		-26,15	
			-11,27		-26,88	
			-10,94		-27,66	
2	$d_{T_x-R_x}=50$	$d_{\acute{A}rv-R_x}=37,5$	-16,83	-17,00	-31,39	-31,32
			-16,98		-31,52	
			-17,07		-31,63	
			-16,97		-30,78	
			-17,15		-31,28	
3	$d_{T_x-R_x}=75$	$d_{\acute{A}rv-R_x}=62,5$	-20,82	-20,79	-36,28	-36,17
			-20,72		-36,44	
			-20,74		-36,11	
			-20,85		36,07	
			-20,85		35,99	
4	$d_{T_x-R_x}=100$	$d_{\acute{A}rv-R_x}=87,5$	-21,06	-21,02	-40,62	-40,61
			-20,94		-40,54	
			-20,97		-40,59	
			-21,05		-40,72	
			-21,11		-40,57	
5	$d_{T_x-R_x}=125$	$d_{\acute{A}rv-R_x}=112,5$	-22,34	-22,34	-41,95	-41,27
			-22,36		-41,48	
			-22,35		-41,25	
			-22,38		-41,07	
			-22,28		-40,61	
6	$d_{T_x-R_x}=150$	$d_{\acute{A}rv-R_x}=137,5$	-31,37	-31,36	-48,56	-48,07
			-31,74		-48,01	
			-31,21		-47,99	
			-31,19		-47,85	
			-31,29		-47,94	

Posição	Distância Tx-Rx (m)	Distância Árvore-Rx (m)	Polarização Horizontal		Polarização Vertical	
			Valor Medido (dBm)	Valor Médio (dBm)	Valor Medido (dBm)	Valor Médio (dBm)
7	$d_{Tx-Rx}=175$	$d_{Árv-Rx}=162,5$	-32,02	-32,31	-58,81	-57,72
			-32,33		-60,47	
			-32,17		-59,91	
			32,62		-57,65	
			32,44		-57,10	
8	$d_{Tx-Rx}=200$	$d_{Árv-Rx}=187,5$	-33,03	-33,22	-59,16	-59,74
			-33,06		-59,92	
			-33,60		-59,87	
			-33,26		-60,09	
			-33,18		-59,66	
9	$d_{Tx-Rx}= 225$	$d_{Árv-Rx}=212,5$	-40,60	-40,63	-64,34	-64,36
			-40,56		-64,36	
			-40,63		-66,00	
			-40,67		-63,88	
			-40,70		-63,24	

Tabela B.2.2: Valores medidos da amplitude da onda portadora na frequência $f_2=244,599$ MHz.

Registros dos Valores Medidos $\rightarrow f_2=244,599$ MHz						
Posição	Distância Tx-Rx (m)	Distância Árvore-Rx (m)	Polarização Horizontal		Polarização Vertical	
			Valor Medido (dBm)	Valor Médio (dBm)	Valor Medido (dBm)	Valor Médio (dBm)
0	$d_{0Tx-Rx}= 25$	$d_{0Árv-Rx}= 0$	-15,90	-15,99	-18,57	-18,68
			-15,80		-18,67	
			-15,71		-18,69	
			-16,37		-18,79	
			-16,18		-18,71	
1	$d_{Tx-Rx}= 25$	$d_{Árv-Rx}=12,5$	-23,92	-23,98	-21,49	-21,51
			-24,06		-21,60	
			-24,05		-21,55	
			-23,93		-21,49	
			-23,95		-21,46	
2	$d_{Tx-Rx}=50$	$d_{Árv-Rx}=37,5$	-24,12	-24,15	-21,54	-21,56
			-24,14		-21,57	
			-24,15		-21,58	
			-24,18		-21,56	
			-24,19		-21,59	

Posição	Distância Tx-Rx (m)	Distância Árvore-Rx (m)	Polarização Horizontal		Polarização Vertical	
			Valor Medido (dBm)	Valor Médio (dBm)	Valor Medido (dBm)	Valor Médio (dBm)
3	d _{Tx-Rx} =75	d _{Árv-Rx} =62,5	-25,56	-25,95	-24,48	-24,63
			-24,92		-24,62	
			-26,28		-24,75	
			-27,14		-24,64	
			-25,36		-24,68	
4	d _{Tx-Rx} =100	d _{Árv-Rx} =87,5	-26,17	-26,09	-26,62	-26,52
			-26,32		-26,51	
			-25,97		-26,47	
			-25,88		-26,55	
			-26,08		-26,45	
5	d _{Tx-Rx} =125	d _{Árv-Rx} =112,5	-27,33	-27,27	-31,74	-31,63
			-27,25		-31,54	
			-27,34		-31,59	
			-27,11		-31,69	
			-27,30		-31,62	
6	d _{Tx-Rx} =150	d _{Árv-Rx} =137,5	-29,48	-29,46	-35,82	-35,72
			-29,46		-35,73	
			-29,44		-35,74	
			-29,52		-35,72	
			-29,43		-35,60	
7	d _{Tx-Rx} =175	d _{Árv-Rx} =162,5	-31,77	-31,69	-42,02	-42,34
			-31,58		-42,93	
			-31,54		-42,35	
			-31,74		-42,24	
			-31,80		-42,20	
8	d _{Tx-Rx} =200	d _{Árv-Rx} =187,5	-38,99	-38,70	-47,32	-47,67
			-38,52		-47,81	
			-38,60		-47,53	
			-38,97		-47,67	
			-38,45		-47,95	
9	d _{Tx-Rx} = 225	d _{Árv-Rx} =212,5	-39,63	-40,17	-48,84	-49,17
			-40,36		-49,54	
			-40,32		-49,16	
			-40,01		-49,04	
			-40,56		-49,28	

Apêndice C

Imagens e Relatos das Campanhas de Medições

Neste Apêndice constam algumas imagens das campanhas de medições realizadas em Belém e em Manaus. Foram inseridos relatos do desafio que é realizar medidas de campo em ambiente de floresta que envolve muito planejamento, responsabilidade com os equipamentos da Instituição e de terceiros, domínio sobre a tecnologia do funcionamento dos equipamentos, paciência e muito esforço físico. Estas atividades só foram realizadas graças as parcerias com as pessoas que valorizaram e se prontificaram a contribuir voluntariamente com esta pesquisa.

C1. Imagens e Relatos da Campanha de Medição no IT/UFPA

Esta campanha de medição só foi possível pelo apoio do Prof. Gervásio Cavalcante e a ajuda dos pesquisadores Allan Costa, Bruno Costa, Rams Lopes, do professor doutorando Cleonor Neves e das estagiárias do laboratório Rita de Cássia, Rúbia e Juliana.

Foram utilizados os equipamentos de transmissão e de recepção, nobreaks e extensões elétricas disponíveis no Laboratório de Computação e Telecomunicações – LCT, além de pares de antenas dipolo simples, cabos de RF, torres de madeira e tripés metálicos cedidos pela Anatel/PA, autorizados pelo professor Carnot Braun da UFPA.



Figura C.1.1: Foto da equipe fazendo a preparação inicial para a campanha de medições.

Foto: Prof. Cleonor Neves



Figura C.1.2: Foto do prof. João Renato e pesquisador Bruno Costa posicionamento as antenas T_x e R_x nas suas respectivas torres.

Foto: Prof. Cleonor Neves



Figura C.1.3: Foto dos módulos T_x e R_x instalados para a condição de medições no espaço livre.

Foto: Prof. Cleonor Neves



Figura C.1.4: Foto do equipamento Gerador de RF.

Foto: Prof. Cleonor Neves



Figura C.1.5: Foto do equipamento Analisador de Espectro portátil.

Foto: Prof. Cleonor Neves



Figura C.1.6: Foto da aluna estagiária Rúbia fazendo a anotação das medidas lidas no equipamento R_x .

Foto: Prof. Cleonor Neves

C2. Imagens e Relatos da Campanha de Medição no Ifam/CMDI

Como preparativo para as medições de campo a serem realizadas no Ifam/CZL, foram feitos experimentos práticos no Laboratório de Redes de Telecomunicações e na área externa do Ifam/CMDI.

Para a estruturação dos módulos T_x e R_x foram adquiridos os materiais que constam nas Tabelas B.1.1 e B.1.2.

No primeiro momento, foram montados os módulos T_x e R_x no interior do Laboratório de Redes no bloco B superior. Foi fixado em cada tripé metálico para tubo de $\phi=3/4''$, um pedaço de 1,5 m de comprimento de tubo de eletroduto PVC de $\phi=3/4''$. Na parte superior de cada tubo foi instalada uma antena log-periódica de impedância de 75Ω . Pelo fato dos equipamentos disponíveis no laboratório (Gerador de RF e Analisador de Espectro) terem impedâncias de 50Ω , nesta mesma impedância foram adquiridos os dois cabos de RF de comprimento de 8 m, porém como as antenas têm impedância de 75Ω , foi necessária a inserção em série entre cada cabo e a antena de um transformador de impedância de 50Ω para 75Ω .

Os equipamentos foram conectados aos seus respectivos cabos e antenas, compondo assim os módulos T_x e R_x . Após serem ligados, configurados e aquecidos, as antenas foram distanciadas em oito metros e alinhadas, e logo se obteve a visualização do sinal recebido na tela do Analisador de Espectro. Algumas medições foram realizadas e então se teve a certeza de que era possível fazer a montagem na área externa. Não se tem imagens desta atividade.

Com a colaboração dos funcionários terceirizados da Instituição que se revezaram com o passar dos dias, os senhores Eduardo Viana, Kevin Amorim, Ricardo Amorim, Erivelton Aguiar, Antônio Felinte e Salomão Meireles, foram montadas no solo as duas torres com a base fixada sobre plataforma em madeira, estaiadas por meio dos arames galvanizados, fixados à base por esticadores para cabo de aço. As antenas foram fixadas na parte mais alta das torres.

As torres foram erguidas dispostas distanciadas em 25 m. Apresentaram estabilidade confiável para a medida de campo.

Foram transportados os equipamentos, antenas, cabos e acessórios do Laboratório de Redes de Telecomunicações para a área aberta do piso térreo do bloco D, montadas as composições completas dos módulos T_x e R_x no local com terra plana e sem obstáculos.



Figura C.2.1: Foto das torres dos módulos T_x e R_x , com antenas log-periódicas, estruturas estaiadas, montadas sobre plataforma em madeira.

Foto: Aluna Cleiciane Pereira



Figura C.2.2: Foto do prof. João Renato e os auxiliares Antônio e Kevim fazendo a montagem do módulo T_x completo.

Foto: Aluna Karen Santos



Figura C.2.3: Foto dos auxiliares Antônio e Kevim fazendo a montagem do módulo R_x completo.

Foto: Aluna Karen Santos

Depois dos equipamentos, em cada módulo, serem interconectados e ligados, percebeu-se a dificuldade em fazer as suas configurações, tendo em vista que a luminosidade do ambiente em campo aberto impedia uma visualização confiável na tela destes equipamentos. Como provisório, foi necessário o uso de pedaços de papelões para encobrir esta luminosidade.



Figura C.2.4: Foto do prof. João Renato tentando fazer a leitura na tela do Analisador de Espectro causada pela dificuldade da luminosidade do ambiente.

Foto: Aluna Karen Santos



Figura C.2.5: Foto do prof. João Renato e o auxiliar Kevim mudaram a posição do módulo R_x e utilizaram material opaco na tentativa de melhor visualizarem a tela do equipamento.

Foto: Aluna Cleiciane Pereira



Figura C.2.6: Foto do prof. João Renato e os auxiliares Antônio e Kevim fazendo a adaptação do módulo T_x para fazerem a leitura na tela do equipamento.

Foto: Aluna Cleiciane Pereira

Para as medições definitivas a serem realizadas no CZL fez-se então um teste de medições durante a noite, o que naquele campus evitaria a luminosidade nos equipamentos e o aquecimento desnecessário em função da luz solar.



Figura C.2.7: Foto do prof. João Renato e equipe de auxiliares analisando o ambiente sem luz solar para as medições noturnas.

Foto: Aluno Roberto Lopes

O módulo T_x que precisava ser deslocado foi alimentado por um carretel com 300 m de cabo de cobre do tipo PP com $2 \times 6 \text{mm}^2$.



Figura C.2.8: Foto do carretel com 300 m de cabo elétrico alimentando o nobreak do módulo R_x .

Foto: Aluno Roberto Lopes

Foram feitas medições até na distância máxima de 125 m, sendo cada uma em pontos intermediários de 25 m. Ao final da atividade, os equipamentos foram desconectados e recolhidos ao Laboratório de Redes de Telecomunicações. No dia seguinte as torres foram baixadas, retiradas as antenas e os cabos de RF, sendo parcialmente desmontadas para facilitar o transporte.

C3. Imagens e Relatos da Campanha de Medição no Ifam/CZL

Com a colaboração do professor João Batista, do aluno Reury Matias, do ex-aluno Willer Pinheiro e dos filhos João Renato Jr. e Leonardo F. Soares, todo o material necessário para estas medições de campo foi colocado em veículo da Instituição e transportado do Ifam/CMDI para o Ifam/CZL.

No Ifam/CZL, com a permissão do senhor Carlos Camurça, o material foi desembarcado.



Figura C.3.1: Foto do prof. João Batista fazendo os primeiros preparativos para as medições de campo.

Foto: Leonardo F. Soares.

Foram remontadas as torres no chão com suas respectivas antenas, erguidas e conectadas aos equipamentos. Em seguida, no terreno foram identificados os pontos alinhados de 25 m de comprimento até que chegasse a distância de 225 m, conforme consta no diagrama da fig. 4.5. O tempo estava um pouco nublado, o que facilitou a configuração e a leitura dos sinais nos equipamentos.



Figura C.3.2: Foto do prof. João Batista e João Renato fazendo a montagem da antena do módulo R_x .

Foto: Leonardo F. Soares.



Figura C.3.3: Foto do cenário mostrando em primeiro plano o módulo T_x e ao fundo a equipe fazendo a medição no módulo R_x .

Foto: Leonardo F. Soares.



Figura C.3.4: Foto do cenário mostrando em primeiro plano a equipe fazendo a medição no módulo R_x e ao fundo o módulo T_x .

Foto: João Renato Jr.

Para cada conjunto de medições correspondente a uma determinada frequência e a uma polaridade da antena, foi necessário transportar o módulo R_x do ponto de 25 m até o de 225 m. Uma dupla transportava a antena, outra dupla transportava a mesa com os equipamentos, outro puxava os cabos e o professor João Batista reconfigurava o equipamento T_x a cada mudança de frequência/polaridade da antena.



figura C.3.5: Foto do prof. João Renato e Leonardo Firmino puxando o cabo do carretel para alimentar o nobreak do módulo R_x para uma nova medição.

Foto: Reury Matias.



Figura C.3.6: Foto do aluno Reury Matias fotografando a tela do Analisador de Espectro que apresenta a imagem da onda portadora sintonizada na frequência $f_2=244,599$ MHz.

Foto: Reury Matias.



Figura C.3.7: Foto do módulo R_x em uma das posições para as medições.

Foto: João Renato Jr.



Figura C.3.8: Foto de uma situação recorrente quando o módulo R_x ficava muito afastado do módulo T_x : a comunicação entre a equipe que fazia a medição e a que operava os equipamentos de rádio se comunicando via celular pela dificuldade de contato visual.

Foto: Willer Pinheiro.

Nas distâncias mais longas a comunicação entre a equipe de medições e o professor João Batista era realizada via comunicação celular.



Figura C.3.9: Foto do módulo R_x na última posição para medição com a presença do Aluno Reury Matias e de João Renato Jr.

Foto: Willer Pinheiro.

Apêndice D

Programas de Computador

Neste Apêndice constam as listagens dos códigos em MatLab utilizados na implementação computacional dos dados experimentais obtidos nas campanhas de medições realizadas por esta pesquisa, que resultaram nos modelos semi-determinísticos para propagação de sinal de rádio em regiões com de floresta com densidade média de vegetação.

D1. MatLab – Cálculos e Figuras do Modelo IT – UFPA

```
clearall; clc; close all;
```

```
dados = load('C:\Users\jraguiars\Desktop\Doutorado\Tese\dados_bosque.txt');
```

```
% Dados medidos no parque
```

```
%PosiçãoDistancia1Distancia2 Valor medio
```

```
%P0-> 10.5 0 -45.50
```

```
%P1-> 10.5 1.5 -43.00
```

```
%P2-> 12 3 -42.54
```

```
%P3-> 15 6 -72.83
```

```
%P4-> 18 9 -73.90
```

```
%P5-> 21 12 -75.50
```

```
%Dados dos Equipamentos
```

```
f = 300; %frequencia ->MHz
```

```
pt = 0; %potencia transmitida ->dBm
```

```
gt = 3; %ganho da antennaTx ->dB
```

```
gr = 3; %ganho da antennaRx ->dB
```

```
pc_t = 4; %perdas nos cabos ->dB
```

```
%Dados do Modelo
```

```
d = dados(:,1); %distanciaTx<->Rx ->m
```

```
d_a = dados(:,2); %distancia apos a primeira arvore ->m
```

```
pr = dados(:,3); %potencia recebida ->dBm
```

```
%Perda no espaço livre ->db
```

```
L0 = 32.44 + 20*log10(300) + 20*log10(d./1000);
```

```
%Perda no sinal medido ->db
```

```
Lm = (pt+gt+gr - pc_t) - pr;
```

```
n = length(d);
```

```
w = 0; %incremento
```

```
soma = 0;
```

```
soma2 = 0;
```

```
for i = 2:n-1
```

```
    w = w + 1;
```

```
    soma = soma + (pr(i) - pr(i+1));
```

```
    La(w) = soma; %Perda no espaço livre ->db
```

```
    soma2 = soma2 + abs((d(i) - d(i+1)));
```

```
    Da(w) = soma2; %distância acumulada entre as arvores ->m
```

```
end
```

```
n2 = length(Da);
```

```
M = [log10(Da.) ones(n2,1)];
```

```
pesos = M\La.');
```

```
A = pesos(1); B = pesos(2);
```

```

eq = A*log10(Da) + B; %expoente de perda=A/10
%Simulação da perda no modelo proposto
soma3=B+0
ds_max = 22;
ds = 2.5:2:ds_max; %distancia na floresta simulada
n = length(ds);
daa = 9; %distancia antes da primeira arvore

Laa = 32.44 + 20*log10((daa./1000)) + 20*log10(f); %perda entre as arvores ->db

w = 1;
for i = 1:n
if ds(i) <= daa
Lp(i) = 32.44 + 20*log10((ds(i)./1000)) + 20*log10(f);
else ds(i) >daa
Lp(i) = (A*log10((ds(i)-daa)) + B) + Laa;
end
end

%
dados = load('C:\Users\jraguiars\Desktop\Doutorado\Tese\dadostamir.txt');
f = dados(:,1); %frequencia->MHz
L = dados(:,2); %perda de potencia ->dB

figure
plot(Da,La,'-*');hold on; plot(Da,eq,'-*k')
xlabel('Distância Acumulada Entre as Árvores (m)'); ylabel('Perda de Potência (dB)');
legend('Perdas da Potência Medida','Ajuste da Curva Logarítmica');
title('Perdas da Potência Medida e Ajuste da Curva Logarítmica')
gridon

figure
plot(d,pr,'-*'); xlabel('Distância (m)'); ylabel('Intensidade da Potência Recebida (dBm)');
legend('Níveis da Potência Medida');
title('Níveis da Potência Medida em Função da Distância ')
gridon

figure; plot(d,Lm,'-*'); hold on; plot(d,L0,'r');
plot(ds,Lp,'-*k');
xlabel('Distância (m)'); ylabel('Perda de Potência (dB)');
legend('Perdas da Potência Medida','Simulação das Perdas no Espaço Livre','Simulação das
Perdas no Modelo');
title('Desempenho do Modelo')
gridon

figure
plot(f,L,'-*'); xlabel('Frequência [MHz]'); ylabel('Perda de Potência (dB)');
legend('Perda');
title('Perdas no Modelo de Tamir')
gridon

```

D2. MatLab – Cálculos e Figuras do Modelo Ifam/CZL

```

% Dados medidos no CZL
clear all; clc; close all;

%----- todos os cálculos fh1 =169.870 MHz e polarização horizontal

dados = load('C:\Users\jraguiars\Desktop\Doutorado\Tese\dados MH1.txt');

fh1 = 169.870;    %frequência->MHz
pth1 = 30;       %potência transmitida ->dBm
gth1 = 6;       %ganho antena Tx ->dB
grh1 = 6;       %ganho antena Rx ->dB
pc_th1 = 3;     %perda nos cabos ->dB
dh1 = dados(:,1); %distância Tx<->Rx ->m
d_ah1 = dados(:,2); %distância a partir da árvore ->m
prh1 = dados(:,3); %potência transmitida ->dBm

Lmh1 = (pth1+gth1+grh1 - pc_th1) - prh1;    %perda da potência medida ->db
Loh1 = 32.44 + 20*log10(169.870) + 20*log10(dh1./1000); %perda do espaço livre ->db

nh1 = length(dh1);
wh1 = 0;    %incremento
somah1 = 0;
soma2h1 = 0;

for ih1 = 2:nh1-1
    wh1 = wh1 + 1;
    somah1 = somah1 + (prh1(ih1) - prh1(ih1+1));
    Lah1(wh1) = somah1;    %perda na árvore ->dB
    soma2h1 = soma2h1 + abs((dh1(ih1) - dh1(ih1+1)));
    Dah1(wh1) = soma2h1;    %distância acumulada entre árvores ->m
end

n2h1 = length(Dah1);
Mh1 = [log10(Dah1.') ones(n2h1,1)];
pesosh1 = Mh1\ Lah1;
Ah1 = pesosh1(1); Bh1 = pesosh1(2);
eqh1 = Ah1*log10(Dah1) + Bh1;
%expoente de perda=A/10
soma3h1=Bh1+0
% ----- Simulação do modelo
ds_maxh1 = 225;
dsh1 = 25:12.5:ds_maxh1; % distancia simulada na floresta
nh1 = length(dsh1);
daah1 = 12.5; % distancia antes da primeira árvore
Laah1 = 32.44 + 20*log10((daah1./1000)) + 20*log10(fh1); %perda entre o módulo Tx e a
árvore1 ->db

```

```

wh1 = 1;
for ih1 = 1:nh1
    if dsh1(ih1) <= daah1    %distancia antes da árvore
        Lph1(ih1) = 32.44 + 20*log10((dsh1(ih1)./1000)) + 20*log10(fh1);
    else dsh1(ih1) > daah1    %distancia depois da árvore
        Lph1(ih1) = (Ah1*log10((dsh1(ih1)-daah1)) + (0.65*Bh1)) + Laah1;
    end
end

%----- todos os cálculos fv1 = 169.870 MHz e polarização vertical

dados = load('C:\Users\jraguiars\Desktop\Doutorado\Tese\dados MV1.txt');

fv1 = 169.870;    %frequência->MHz
ptv1 = 30;    %potência transmitida ->dBm
gtv1 = 6;    %ganho antena Tx ->dB
grv1 = 6;    %ganho antena Rx ->dB
pc_tv1 = 3;    %perda nos cabos ->dB
dv1 = dados(:,1);    %distância Tx<->Rx ->m
d_av1 = dados(:,2);    %distância a partir da árvore ->m
prv1 = dados(:,3);    %potência transmitida ->dBm

nv1 = length(dv1);
wv1 = 0;    %incremento
somav1 = 0;
soma2v1 = 0;

for iv1 = 2:nv1-1
    wv1 = wv1 + 1;
    somav1 = somav1 + (prv1(iv1) - prv1(iv1+1));
    Lav1(wv1) = somav1;    %perda na árvore ->dB
    soma2v1 = soma2v1 + abs((dv1(iv1) - dv1(iv1+1)));
    Dav1(wv1) = soma2v1;    %distância acumulada entre árvores ->m
end

n2v1 = length(Dav1);
Mv1 = [log10(Dav1.'') ones(n2v1,1)];
pesosv1 = Mv1\((Lav1.''));
Av1 = pesosv1(1); Bv1 = pesosv1(2);
eqv1 = Av1*log10(Dav1) + Bv1;
%expoente de perda=A/10
soma3v1=Bv1+0
% --- Simulação do modelo de perda proposto -----
ds_maxv1 = 225;
dsv1 = 25:12.5:ds_maxv1; % distancia simulada na floresta
nv1 = length(dsv1);
daav1 = 12.5; % distancia antes da primeira árvore

Laav1 = 32.44 + 20*log10((daav1./1000)) + 20*log10(fv1); %perda entre o módulo Tx e a
árvore1 ->db

```



```

wv1 = 1;
for iv1 = 1:nv1
    if dsv1(iv1) <= daav1    %distancia antes da árvore
        Lpv1(iv1) = 32.44 + 20*log10((dsv1(iv1)./1000)) + 20*log10(fv1);
    else dsv1(iv1) > daav1    %distancia depois da árvore
        Lpv1(iv1) = (Av1*log10((dsv1(iv1)-daav1)) + (0.5*Bv1)) + Laav1;
    end
end

% -----

Lmv1 = (ptv1+gtv1+grv1 - pc_tv1) - prv1;          %perda da potência medida ->db
L0v1 = 32.44 + 20*log10(169.870) + 20*log10(dv1./1000); %perda no espaço ->db

%----- todos os cálculos fh2 = 244.599 MHz e polarização horizontal

dados = load('C:\Users\jraguiars\Desktop\Doutorado\Tese\dados PH2.txt');

fh2 = 244.599;    %frequência->MHz
pth2 = 30;        %potência transmitida ->dBm
gth2 = 6;         %ganho antena Tx ->dB
grh2 = 6;         %ganho antena Rx ->dB
pc_th2 = 3;      %perda nos cabos ->dB
dh2 = dados(:,1); %distância Tx<->Rx ->m
d_ah2 = dados(:,2); %distância a partir da árvore ->m
prh2 = dados(:,3); %potência transmitida ->dBm

Lmh2 = (pth2+gth2+grh2 - pc_th2) - prh2;          %perda da potência medida ->db
L0h2 = 32.44 + 20*log10(244.599) + 20*log10(dh2./1000); %perda no espaço ->db

nh2 = length(dh2);
wh2 = 0;        %incremento
soma2 = 0;
soma2h2 = 0;

for ih2 = 2:nh2-1
    wh2 = wh2 + 1;
    soma2 = soma2 + (prh2(ih2) - prh2(ih2+1));
    Lah2(wh2) = soma2;          %perda na árvore ->dB
    soma2h2 = soma2h2 + abs((dh2(ih2) - dh2(ih2+1)));
    Dah2(wh2) = soma2h2;       %distância acumulada entre árvores ->m
end

n2h2 = length(Dah2);
Mh2 = [log10(Dah2.') ones(n2h2,1)];
pesosh2 = Mh2\ Lah2.';
Ah2 = pesosh2(1); Bh2 = pesosh2(2);
eqh2 = Ah2*log10(Dah2) + Bh2;
%expoente de perda=A/10
soma3h2=Bh2+0

```

```

% --- Simulação do modelo de perda proposto -----
ds_maxh2 = 225;
dsh2 = 25:12.5:ds_maxh2; % distancia simulada na floresta
nh2 = length(dsh2);
daah2 = 12.5; % distancia antes da primeira árvore

Laah2 = 32.44 + 20*log10((daah2./1000)) + 20*log10(fh2); %perda entre o módulo Tx e a
árvore1 ->db

wh2 = 1;
for ih2 = 1:nh2
    if dsh2(ih2) <= daah2 %distancia antes da árvore
        Lph2(ih2) = 32.44 + 20*log10((dsh2(ih2)./1000)) + 20*log10(fh2);
    else dsh2(ih2) > daah2 %distancia depois da árvore
        Lph2(ih2) = (Ah2*log10((dsh2(ih2)-daah2)) + (0.25*Bh2)) + Laah2;
    end
end

%----- todos os cálculos fv2 = 244.599 MHz e polarização vertical

dados = load('C:\Users\jraguiars\Desktop\Doutorado\Tese\dados PV2.txt');

fv2 = 244,599; %frequência->MHz
ptv2 = 30; %potência transmitida ->dBm
gtv2 = 6; %ganho antena Tx ->dB
grv2 = 6; %ganho antena Rx ->dB
pc_tv2 = 3; %perda nos cabos ->dB
dv2 = dados(:,1); %distância Tx<->Rx ->m
d_av2 = dados(:,2); %distância a partir da árvore ->m
prv2 = dados(:,3); %potência transmitida ->dBm

Lmv2 = (ptv2+gtv2+grv2 - pc_tv2) - prv2; %perda da potência medida ->db
L0v2 = 32.44 + 20*log10(244.599) + 20*log10(dv2./1000); %perda do espaço livre ->db

nv2 = length(dv2);
wv2 = 0; %incremento
somav2 = 0;
soma2v2 = 0;

for iv2 = 2:nv2-1
    wv2 = wv2 + 1;
    somav2 = somav2 + (prv2(iv2) - prv2(iv2+1));
    Lav2(wv2) = somav2; %perda na árvore ->dB
    soma2v2 = soma2v2 + abs((dv2(iv2) - dv2(iv2+1)));
    Dav2(wv2) = soma2v2; %distância acumulada entre árvores ->m
end

n2v2 = length(Dav2);
Mv2 = [log10(Dav2.) ones(n2v2,1)];
pesosv2 = Mv2\(Lav2.);

```

```

Av2 = pesosv2(1); Bv2 = pesosv2(2);
eqv2 = Av2*log10(Dav2) + Bv2;
%expoente de perda=A/10
soma3v2=Bv2+0
% --- Simulação do modelo de perda proposto -----
ds_maxv2 = 225;
dsv2 = 25:12.5:ds_maxv2; % distancia simulada na floresta
nv2 = length(dsv2);
daav2 = 12.5; % distancia antes da primeira árvore

Laav2 = 32.44 + 20*log10((daav2./1000)) + 20*log10(fv2); %perda entre o módulo Tx e a
árvore1 ->db

wv2 = 1;
for iv2 = 1:nv2
    if dsv2(iv2) <= daav2    %distancia antes da árvore
        Lpv2(iv2) = 32.44 + 20*log10((dsv2(iv2)./1000)) + 20*log10(fv2);
    else dsv2(iv2) > daav2    %distancia depois da árvore
        Lpv2(iv2) = (Av2*log10((dsv2(iv2)-daav2)) + (0.65* Bv2)) + Laav2;
    end
end

%----- todas as retas
coef = polyfit(dh1,prh1,1);
mh1 = coef (1);
bh1 = coef (2);
ybesth1 = mh1*dh1+bh1;
somadisth1 = sum ((prh1 - ybesth1) .^ 2 );

coef = polyfit(dh2,prh2,1);
mh2 = coef (1);
bh2 = coef (2);
ybesth2 = mh2*dh2+bh2;
somadisth2 = sum ((prh2 - ybesth2) .^ 2 );

coef = polyfit(dv1,prv1,1);
mv1 = coef (1);
bv1 = coef (2);
ybestv1 = mv1*dv1+bv1;
somadistv1 = sum ((prv1 - ybestv1) .^ 2 );

coef = polyfit(dv2,prv2,1);
mv2 = coef (1);
bv2 = coef (2);
ybestv2 = mv2*dv2+bv2;
somadistv2 = sum ((prv2 - ybestv2) .^ 2 );

%----- todas as curvas das potencias medidas
ddprh1=[-11.7400,-17.0000,-20.7900,-21.0200,-22.3400,-31.3600,-32.3100,-33.3200,-
40.6300]

```

```
ddybesth1=[-12.2327,-15.5639,-18.8951,-22.2263,-25.5575,-28.8887,-32.2198,-35.5510,-
38.8822]
```

```
drms1 = sqrt(sum((ddprh1-ddybesth1).^2)/9);
```

```
ddprv1=[-27.0600,-31.3200,-36.1700,-40.6100,-41.2700,-48.0700,-57.7200,-59.7400,-
64.3600]
```

```
ddybestv1=[-26.3961,-31.1022,-35.8083,-40.5144,-45.2204,-49.9265,-54.6326,-59.3387,-
64.0447]
```

```
drmsv1 = sqrt(sum((ddprv1-ddybestv1).^2)/9);
```

```
ddprh2=[-23.9800,-24.5100,-25.9500,-26.0900,-27.2700,-29.4600,-31.6900,-38.7000,-
40.1700]
```

```
ddybesth2=[-22.2616,-24.1834,-26.1052,-28.0269,-29.9487,-31.8705,-33.7923,-35.7140,-
37.6358]
```

```
drms2 = sqrt(sum((ddprh2-ddybesth2).^2)/9);
```

```
ddprv2=[-21.5100,-21.5600,-24.6300,-26.5200,-31.6300,-35.7200,-42.3400,-47.6700,-
49.1700]
```

```
ddybestv2=[-18.8492,-22.5650,-26.2808,-29.9965,-33.7123,-37.4281,-41.1439,-44.8597,-
48.5754]
```

```
drmsv2 = sqrt(sum((ddprv2-ddybestv2).^2)/9);
```

```
%----- todas as curvas do modelo
```

```
ddLmh1=[50.7400,56.0000,59.7900,60.0200,61.3400,70.3600,71.3100,72.3200,79.6300]
```

```
ddLph1=[44.6535,56.1258,61.4601,64.9737,67.5981,69.6936,71.4381,72.9324,74.2394]
```

```
ddrms1 = sqrt(sum((ddLmh1-ddLph1).^2)/9);
```

```
difh1=ddLmh1-ddLph1
```

```
ddLmv1=[66.0600,70.3200,75.1700,79.6100,80.2700,87.0700,96.7200,98.7400,103.3600]
```

```
ddLpv1=[53.1821,70.6376,78.7539,84.1000,88.0931,91.2815,93.9357,96.2094,98.1981]
```

```
ddrmsv1 = sqrt(sum((ddLmv1-ddLpv1).^2)/9);
```

```
ddLmh2=[62.9800,63.5100,64.9500,65.0900,66.2700,68.4600,70.6900,77.7000,79.1700]
```

```
ddLph2=[53.5057,61.2009,64.7789,67.1357,68.8960,70.3016,71.4717,72.4740,73.3507]
```

```
ddrms2 = sqrt(sum((ddLmh2-ddLph2).^2)/9);
```

```
ddLmv2=[60.5100,60.5600,63.6300,65.5200,70.6300,74.7200,81.3400,86.6700,88.1700]
```

```
ddLpv2=[44.8662,60.1755,67.2939,71.9827,75.4848,78.2811,80.6091,82.6032,84.3474]
```

```
ddrmsv2 = sqrt(sum((ddLmv2-ddLpv2).^2)/9);
```

```
%----- todas as figuras
```

```
figure;
```

```
plot(dh1,Lmh1,'-*b');hold on;plot(dh1,L0h1,'-or');plot(dsh1,Lph1,'-xk');hold on;
```

```
xlabel('Distância [m]'); ylabel('Perda de Potência [dB]');
```

```
legend('Perdas da Potência Medida - Lm ','Perdas da Simulação do Espaço Livre - Lo','Perdas da Simulação do Modelo - Lpm');
```

```
title('Desempenho do Modelo em f1=169,870 MHz - Polarização Horizontal')
```

```
grid on
```

```
axis ([0 250 0 110])
```

```
figure;
plot(dv1,Lmv1,'-.*b');hold on;plot(dv1,L0v1,'-or');plot(dsv1,Lpv1,'-xk');hold on;
xlabel('Distância [m]'); ylabel('Perda de Potência [dB]');
legend('Perdas da Potência Medida - Lm ','Perdas da Simulação do Espaço Livre - Lo','Perdas
da Simulação do Modelo - Lpm');
title('Desempenho do Modelo em f1=169,870 MHz - Polarização Vertical')
grid on
axis ([0 250 0 110])
```

```
figure;
plot(dh2,Lmh2,'-.*b');hold on;plot(dh2,L0h2,'-or');plot(dsh2,Lph2,'-xk');hold on;
xlabel('Distância [m]'); ylabel('Perda de Potência [dB]');
legend('Perdas da Potência Medida - Lm ','Perdas da Simulação do Espaço Livre - Lo','Perdas
da Simulação do Modelo - Lpm');
title('Desempenho do Modelo em f2=244,599 MHz - Polarização Horizontal')
grid on
axis ([0 250 0 110])
```

```
figure;
plot(dv2,Lmv2,'-.*b');hold on;plot(dv2,L0v2,'-or');plot(dsv2,Lpv2,'-xk');
xlabel('Distância [m]'); ylabel('Perda de Potência [dB]');
legend('Perdas da Potência Medida - Lm ','Perdas da Simulação do Espaço Livre - Lo','Perdas
da Simulação do Modelo - Lpm');
title('Desempenho do Modelo em f2=244,599 MHz - Polarização Vertical')
grid on
axis ([0 250 0 110])
```

```
figure
plot(dh1,prh1,'-.*r');hold on;plot(dh2,prh2,'-.*b');hold on; plot(dv1,prv1,'-.*g');hold
on;plot(dv2,prv2,'-.*k')
plot(dh1,ybesth1,'k');hold on;plot(dh2,ybesth2,'k');plot(dv1,ybestv1,'k');hold
on;plot(dv2,ybestv2,'k');
legend('Níveis na f1=169,870 MHz - Polarização Horizontal','Níveis na f1=169,870 MHz -
Polarização Vertical','Níveis na f2=244,599 MHz - Polarização Horizontal','Níveis na
f2=244,599 MHz - Polarização Vertical','Retas das Médias dos Valores Medidos');
title('Valores Medidos da Potência Recebida x Distância')
xlabel('Distância [m]'); ylabel('Potência Recebida [dBm]');
grid on;
axis ([0 250 -80 -10])
```