



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**MODELO 2,5D DE PREDIÇÃO DE PROPAGAÇÃO
PARA AMBIENTES INTERIORES UTILIZANDO O
MÉTODO DO TRAÇADO DE RAIOS**

Francisco Alekson Alves

Orientador: Prof. Dr. Sandro Gonçalves da Silva

Co-Orientadora: Profa. Dra. Maria Rosa Medeiros Lins de Albuquerque

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte,
como parte dos requisitos necessários
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica

NATAL – RN
Junho de 2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**MODELO 2,5D DE PREDIÇÃO DE PROPAGAÇÃO
PARA AMBIENTES INTERIORES UTILIZANDO O
MÉTODO DO TRAÇADO DE RAIOS**

Francisco Alekson Alves

Orientador: Prof. Dr. Sandro Gonçalves da Silva

Co-Orientadora: Profa. Dra. Maria Rosa Medeiros Lins de Albuquerque

**NATAL – RN
Junho de 2005**

UFRN
621.39(043.2)
A 474 m
ORIGEM
4095
Processo

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Alves, Francisco Alekson.

Modelo 2,5D de predição de propagação para ambientes interiores utilizando o método do traçado de raios / Francisco Alekson Alves. – Natal, RN, 2005.

70 f.

Orientador : Sandro Gonçalves da Silva.

Co-orientadora : Maria Rosa Medeiros Lins de Albuquerque.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

1. Comunicação móvel - Dissertação. 2. Traçado de raios - Dissertação. 3. Predição de propagação - Dissertação. 4. Método dos raios forçados - Dissertação. 5. Método GTD - Dissertação. I. Silva, Sandro Gonçalves da. II. Albuquerque, Maria Rosa Medeiros Lins de. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.39 (043.2)

PPGEE/Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica
Biblioteca Setorial do PPGEE
Quadrado Central

MODELO 2,5D DE PREDIÇÃO DE PROPAGAÇÃO PARA AMBIENTES INTERIORES UTILIZANDO O MÉTODO DO TRAÇADO DE RAIOS

Francisco Alekson Alves

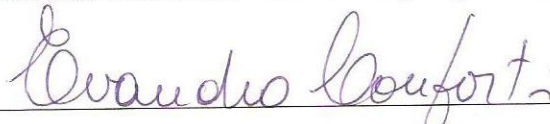
Dissertação de Mestrado aprovada em 06 de julho
de 2005 pela Banca Examinadora composta pelos
seguintes membros:



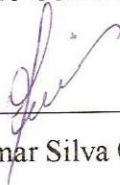
Dr. Sandro Gonçalves da Silva – UFRN



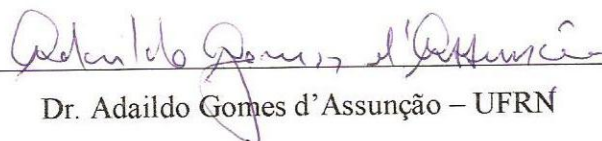
Dra. Maria Rosa Medeiros Lins de Albuquerque – UFRN



Dr. Evandro Conforti – UNICAMP



Dr. José de Ribamar Silva Oliveira – CEFET-RN



Dr. Adaildo Gomes d'Assunção – UFRN

Natal-RN, 06 de julho de 2005

Ao meu pai, Francisco Alves de Assis (*in memoriam*),
por sua perseverança em vida.

Agradecimentos

A Deus, por mais esta vitória.

Aos meus pais, Francisco Alves de Assis (in memoriam) e Rita Leandro Alves, e ao meu irmão, Francisco Alessandro Alves, pela compreensão, carinho e apoio recebidos ao longo deste trabalho e de toda minha vida.

À minha namorada, Theresa Cynthia Miranda Souza, fonte perene de afeto, pelo incentivo e companheirismo.

Ao Prof. Sandro Gonçalves da Silva e à Profa. Maria Rosa Medeiros Lins de Albuquerque, pelo incentivo, dedicação e amizade demonstrados na orientação e desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores Laércio Martins de Mendonça, Adaildo Gomes d'Assunção e José de Ribamar Silva Oliveira, pelas sugestões apresentadas.

Aos Professores do CEFET-PB Alfredo Gomes Neto, Jefferson Costa e Silva e Joabson Nogueira de Carvalho, pelo apoio nas medições e colaborações.

Aos colegas de curso que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta realização.

À CAPES, pelo suporte financeiro.

Resumo

Este trabalho apresenta um modelo 2,5D de traçado de raios para predição de propagação em ambientes interiores (*indoor*). Especificamente, optou-se pelo Método dos Raios Forçados (SBR) em combinação com a Teoria Geométrica da Difração (GTD). Considera-se que, além de propagação em visada direta (LOS), podem ocorrer os mecanismos de reflexão, refração e difração (NLOS).

No Método dos Raios Forçados (SBR), a antena transmissora lança um feixe de raios que pode ou não alcançar o receptor. Considerando a antena transmissora como elemento pontual, os raios são lançados dessa posição, podendo alcançar o receptor diretamente ou mediante reflexões, refrações, difrações, ou pela combinação dessas modalidades de propagação.

Para o modelamento do ambiente, um banco de dados é construído para armazenar as características geométricas e informações dos materiais constituintes do cenário. O banco de dados funciona independentemente do programa de simulação, possibilitando robustez à implementação e maior flexibilidade para a representação de outros ambientes.

Cada mecanismo de propagação é tratado separadamente. Na propagação em linha de visada, o raio direto oferece maior contribuição ao sinal recebido, enquanto o raio refletido, refratado e difratado apresentam maior influência quando a propagação ocorre com obstrução. Neste caso, o sinal transmitido alcança o receptor por diversas trajetórias, ocorrendo desvanecimento por múltiplos percursos. O canal de transmissão, no sistema móvel, é simulado deslocando-se o transmissor ou o receptor ao longo do ambiente.

A validação do método é verificada através de simulações e medições. As perdas de percurso calculadas são comparadas com os valores medidos, na frequência de 1,8 GHz. Os resultados são obtidos para ambientes de corredor e salas de aula adjacentes. Uma boa convergência é observada. Os resultados numéricos deste trabalho são também comparados com os disponíveis na literatura especializada, na frequência de 900 MHz e 2,44 GHz, mostrando boa concordância.

Abstract

A 2.5D ray-tracing propagation model is proposed to predict radio loss in indoor environment. Specifically, we opted for the Shooting and Bouncing Rays (SBR) method, together with the Geometrical Theory of Diffraction (GTD). Besides the line-of-sight propagation (LOS), we consider that the radio waves may experience reflection, refraction, and diffraction (NLOS).

In the Shooting and Bouncing Rays (SBR) method, the transmitter antenna launches a bundle of rays that may or may not reach the receiver. Considering the transmitting antenna as a point, the rays will start to launch from this position and can reach the receiver either directly or after reflections, refractions, diffractions, or even after any combination of the previous effects.

To model the environment, a database is built to record geometrical characteristics and information on the constituent materials of the scenario. The database works independently of the simulation program, allowing robustness and flexibility to model other scenarios.

Each propagation mechanism is treated separately. In line-of-sight propagation, the main contribution to the received signal comes from the direct ray, while reflected, refracted, and diffracted signal dominate when the line-of-sight is blocked. For this case, the transmitted signal reaches the receiver through more than one path, resulting in a multipath fading. The transmitting channel of a mobile system is simulated by moving either the transmitter or the receiver around the environment.

The validity of the method is verified through simulations and measurements. The computed path losses are compared with the measured values at 1.8 GHz frequency. The results were obtained for the main corridor and room classes adjacent to it. A reasonable agreement is observed. The numerical predictions are also compared with published data at 900 MHz and 2.44 GHz frequencies showing good convergence.

Sumário

		1
Capítulo 1	Introdução	4
Capítulo 2	Disposições Gerais sobre Comunicações Móveis	4
	2.1 Introdução	4
	2.2 Evolução da comunicação celular	4
	2.3 Métodos de predição de propagação	10
Capítulo 3	Técnica de predição de potência através do Método dos Raios Forçados	12
	3.1 Introdução	12
	3.2 Mecanismos de propagação – raio direto, refletido, refratado e difratado	14
	3.3 Modelamento do ambiente no Método do Traçado de Raios	24
	3.4 Emissão de raios	27
Capítulo 4	Definição do algoritmo e implementação das rotinas	29
	4.1 Introdução	29
	4.2 Caracterização do problema	29
	4.3 Algoritmo	31
	4.4 Implementação do algoritmo do Método do Traçado de Raios	32
Capítulo 5	Resultados	35
	5.1 Introdução	35
	5.2 Determinação do Erro Médio e do Desvio Padrão	36
	5.3 Resultados experimentais	37
	5.4 Resultados numéricos	45
Capítulo 6	Conclusões	53
	Referências Bibliográficas	55

Lista de Símbolos e Abreviaturas

A	Número de raios que chegam ao receptor
$\hat{A}rea_{efetiva}$	Área efetiva da antena
α	Ângulo de emissão de raios
β	Ângulo entre o raio incidente e a parede ou estrutura de colisão
d	Distância percorrida pelo raio
D	Coefficiente de difração
δ	Erro Médio
e	2,71828182
f	Frequência de operação da antena
ϕ	Ângulo entre as paredes formadoras da quina
$G_{receptora}$	Ganho da antena receptora
$G_{transmissora}$	Ganho da antena transmissora
Γ	Coefficiente de reflexão
η_1	Impedância do meio 1
η_2	Impedância do meio 2
i	Índice que determina a posição simulada;
j	Imaginário igual a $\sqrt{-1}$
k	Número de onda
m	Número de valores simulados;
λ	Comprimento de onda
$P_{chegada}$	Potência de chegada ao receptor
$P_{difratada}$	Potência difratada
$P_{refletida}$	Potência refletida
$P_{refratada}$	Potência refratada
P_{total}	Potência total na antena receptora

$P_{transmitida}$	Potência efetivamente transmitida
π	3,141592654
$\theta_{incidente}$	Ângulo de incidência em relação à normal
$\theta_{refletido}$	Ângulo de reflexão em relação à normal
$\theta_{refratado}$	Ângulo de refração em relação à normal
R	Coefficiente de refração
ρ	Ângulo entre o raio difratado e a normal à parede
φ	Ângulo entre o raio incidente e a normal à parede
U_{total}	Campo total na antena receptora
$U_{chegada}$	Campo de chegada à antena receptora relacionado a cada raio
$x_{simulado(i)}$	Valor simulado na posição i
$x_{medido(i)}$	Valor medido na posição i
x_{erro}	Valor do erro na posição i
\bar{x}	Média dos valores do erro i

Lista de Figuras

Capítulo 2

2.1	Célula hexagonal e <i>Cluster</i> com sete células	6
2.2	Celularização da região e exemplo de reuso com a célula 1	6
2.3	Forma de cobertura utilizada (a) no sistema móvel e (b) no sistema móvel celular	8
2.4	Ilustração de propagação em ambientes interiores (a) sem visada direta e (b) com visada direta	9

Capítulo 3

3.1	Raios lançados com trajetórias definidas pelo cenário	13
3.2	Propagação com antenas (a) em visada direta e (b) com obstrução	13
3.3	Propagação do raio direto	15
3.4	Diferentes modalidades de propagação de raios com antenas em visada direta	15
3.5	Raios refletidos no ambiente	17
3.6	Raio refletido e seus descendentes	17
3.7	Descarte das refrações que não atingem a antena receptora	18
3.8	Raios refratados	20
3.9	Trajectoria do raio refratado	20
3.10	Geração dos raios difratados	22
3.11	Ângulos associados ao mecanismo do raio difratado	22
3.12	Difração com ângulo entre as paredes diferente de 90°	23
3.13	Modelamento de um ambiente	25
3.14	Modelo de cenário utilizado nas simulações	26
3.15	Emissão dos raios com o ângulo fixo	27

Capítulo 4

4.1	Fluxograma da implementação do modelo	30
4.2	Tela do programa utilizado para comparações de resultados teóricos	34
4.3	Tela do programa utilizado para comparações de resultados experimentais	34

Capítulo 5

5.1	Cenário de medições no CEFET-PB	38
5.2	Perda de propagação no corredor R1 para frequência de 1.8 GHz.	39
5.3	Perda de propagação na sala 21 para frequência de 1.8 GHz.	41
5.4	Perda de propagação na sala 22 para frequência de 1.8 GHz.	42
5.5	Perda de propagação na sala 23 para frequência de 1.8 GHz.	43
5.6	Perda de propagação na sala 24 para frequência de 1.8 GHz.	44
5.7	Cenário simulado [1]	47
5.8	Perda de propagação na Rota 1 para a frequência de 900 MHz [1]	48
5.9	Perda de propagação na Rota 1 para a frequência de 2,44 GHz [1]	49
5.10	Perda de propagação na Rota 2 para a frequência de 900 MHz [1]	51
5.11	Perda de propagação na Rota 2 para a frequência de 2,44 GHz [1]	52

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos, a expansão das comunicações móveis e sua crescente utilização em novos ambientes promoveram a necessidade do desenvolvimento de ferramentas adequadas, que permitissem uma análise mais precisa do comportamento da distribuição da potência em ambientes rádio-móveis. O aumento da densidade de usuários dos sistemas celulares tem resultado na implementação de técnicas de reutilização de frequências a partir da diminuição do tamanho das células. Desse modo, os sistemas passaram a operar com antenas e potências de transmissão cada vez mais baixas, criando um cenário de células com dimensões que vão desde centenas de metros de raio (microcélulas) até poucas dezenas de metros (picocélulas) [1-3].

Devido às dimensões reduzidas das áreas de cobertura, surge um novo cenário para predição de propagação, que não é suprido pelos métodos tradicionais aplicados aos ambientes macrocelulares. As condições de confinamento das antenas em ambientes fechados criam novos padrões de propagação e exigem a implementação de métodos que atendam suas peculiaridades, permitindo uma predição aceitável. Em caso contrário, haverá maiores dispêndios na instalação de sistemas celulares em ambientes interiores [4-8].

Embora os modelos empíricos apresentem simplicidade e rapidez de uso, por outro lado, por serem derivados de medições em ambientes específicos, só são adequados para ambientes cujas características se assemelhem àquelas dos ambientes para os quais foram desenvolvidos. Já os modelos teóricos, fundamentados nas técnicas de traçado de raios, apesar da maior complexidade, simulam a predição de potência de acordo com as características inerentes a cada ambiente analisado [9-12].

O Método do Traçado de Raios é um dos modelos determinísticos mais utilizados para predição de cobertura em ambientes interiores devido, principalmente, à sua capacidade de delinear com grande precisão o cenário em estudo [1], [7], [13]. Existem basicamente três mecanismos de implementação do Método do Traçado de Raios, quanto

ao modelamento do ambiente: o modelo 2D (bidimensional), o modelo 2,5D e o modelo 3D (tridimensional). O modelo bidimensional dispõe da vantagem de fornecer bons resultados a um baixo custo computacional. Porém, para ambientes com grande detalhamento estrutural, os modelos 2,5D e 3D fornecem resultados mais precisos por melhor considerar a geometria do cenário [13].

O Método do Traçado de Raios pode ser implementado por meio do Método dos Raios Forçados ou do Método das Imagens. O Método dos Raios Forçados consiste na análise do lançamento de raios no ambiente rádio-móvel, que podem ou não chegar ao receptor, de acordo com as características modeladas para o ambiente. No Método das Imagens, são determinadas imagens geométricas das faces do ambiente considerado e que, deste modo, definirão a trajetória do sinal da antena transmissora até a antena receptora, considerando apenas os raios que efetivamente chegam à antena receptora [14-17].

Neste trabalho, o Método 2,5D do Traçado de Raios, combinado com a Teoria Geométrica da Difração (Geometrical Theory of Diffraction - GTD), é utilizado na predição de propagação dos ambientes interiores [1-2]. A implementação deste modelo é realizada por meio do desenvolvimento de um programa gráfico e de ferramentas que auxiliam no trabalho de predição, dando versatilidade à implementação. Especificamente, optou-se pelo Método dos Raios Forçados pela facilidade de implementação da análise gráfica dos raios no ambiente analisado.

A geometria do ambiente é modelada através da inserção de suas características geométricas em um banco de dados, representando-o da maneira mais próxima possível da realidade, em escalas adequadas à tela de simulação e à precisão na conversão para as dimensões reais. Os dados contêm informações sobre os materiais constituintes das paredes e das estruturas que compõem o cenário modelado. O banco de dados funciona de maneira independente do programa de simulação, possibilitando maior robustez à implementação e maior flexibilidade para a representação de outros ambientes.

Ferramentas são implementadas para facilitar a análise de predição por meio da visualização dos dados de potência gerados em função da frequência, de grande utilidade na análise. O programa permite determinar, simultaneamente, a potência em diversos pontos de recepção, diminuindo, assim, o tempo de processamento.

A validação do modelo é investigada através de comparações com resultados experimentais, obtidos por meio de medições realizadas em ambientes interiores, envolvendo casos com maior complexidade de predição. São também efetuadas comparações com resultados numéricos publicados na literatura especializada.

No Capítulo 2, são abordados os aspectos gerais que motivaram o desenvolvimento de modelos especificamente voltados para ambientes interiores. Alguns dos modelos de predição mais utilizados são também apresentados.

O Capítulo 3 é dedicado à descrição do Método do Traçado de Raios, enfatizando suas particularidades e propostas de implementação. O Método dos Raios Forçados, empregado neste trabalho, é descrito minuciosamente apresentando-se os detalhes necessários para a implementação da técnica.

O Capítulo 4 descreve os procedimentos de implementação do modelo proposto, apresentando as principais rotinas implementadas e sua utilização.

O Capítulo 5 mostra os resultados obtidos, através de simulações e medições, para a perda de potência em função da distância, em vários ambientes interiores. Comparações com resultados da literatura especializada são também apresentados.

No Capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões e sugestões de continuidade deste trabalho.

Capítulo 2

Disposições Gerais sobre Comunicações Móveis

2.1 – Introdução

O processo evolutivo dos sistemas de comunicações móveis impulsionou o surgimento de técnicas e topologias que utilizassem mais eficientemente o espectro de frequências e atendessem aos requisitos de novos e melhores serviços. Paralelamente a esses aspectos tecnológicos, buscou-se também reduzir o custo de implantação, manutenção e gerenciamento dos sistemas em operação.

O desenvolvimento de novas tecnologias culminou com o advento dos sistemas de comunicações móveis celulares, acompanhados de técnicas que potencializaram, ao longo de sua evolução, sua capacidade e qualidade [13], [15-16].

2.2 – Evolução da Comunicação Celular

Os primeiros sistemas de comunicações móveis consistiam em uma estação base, com transmissor e receptor instalados no topo de uma colina. A área de cobertura era grande, com raio da ordem de dezenas de quilômetros, servida por transmissores operando com potências muito altas. Essa estrutura, de baixa capacidade, usada nas décadas de 70 e 80, mostrando-se extremamente ineficiente com o aumento da demanda das comunicações móveis. Sendo assim, surgiu a necessidade do desenvolvimento de novas topologias, que melhor fizessem uso do espectro disponível e permitissem a alocação de novos serviços e usuários [15-16].

Nesse contexto, surgiu a comunicação móvel celular, com a proposta de divisão das regiões em células e *clusters*, que deveriam comportar o grande crescimento da demanda observada. Em uma regulamentação de 22 de Junho de 1981, o sistema celular foi definido como: “Um sistema móvel terrestre de alta capacidade no qual o espectro disponível é dividido em canais que são alocados, em grupos, através de células que cobrem determinada área geográfica de serviço. Os canais podem ser reusados em células diferentes na área de serviço” [15].

Com a substituição do transmissor único de alta potência, que cobria uma grande área, por vários transmissores de baixa potência, cada um provendo cobertura a uma pequena região da área total, gerou-se o conceito de célula como sendo a área definida pelo alcance de cada antena [16].

O conjunto de todos os canais disponíveis no sistema é alocado a um grupo de células que constitui o *cluster*. Uma configuração muito utilizada é a de *cluster* de sete células. A Figura 2.1 ilustra um exemplo de célula hexagonal e de um *cluster* de sete células.

A melhoria da eficiência das comunicações celulares, em relação à utilização do espectro, baseava-se fundamentalmente em algumas técnicas, sendo as principais :

1. Reutilização de frequências – que permitiu, de maneira controlada, fazer reuso de canais que estavam sendo utilizados por outros usuários em outras células, a uma determinada distância de controle, denominada de distância de reuso, cuja determinação depende de diversas variáveis, mas principalmente do tipo de divisão celular utilizada. A Figura 2.2 ilustra um exemplo de reutilização de células no padrão de *cluster* por sete células.
2. Divisão de região em células – que permitiu controlar a potência transmitida para cada região, fornecendo um maior controle da cobertura em cada ponto. Deste modo, se houvesse uma região de sombra, poderia corrigi-la mais facilmente através de refletores ou de novas estações rádio-base;
3. Diminuição da altura e da potência irradiada pelas antenas – com a celularização das regiões, as áreas de cobertura passam a ser menores, reduzindo-se a altura das antenas e a potência utilizada pelos transmissores.

Assim, foram criadas novas estruturas físicas nas regiões onde foram implementados os sistemas móveis celulares.

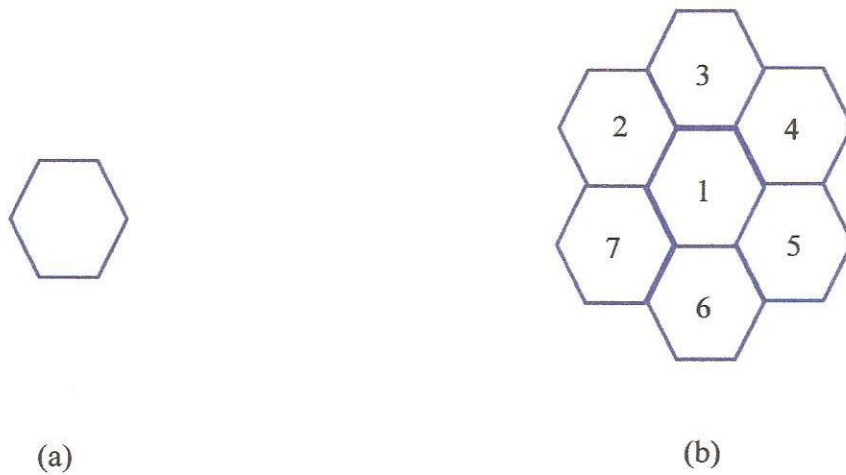


Figura 2.1 – (a) Célula hexagonal e (b) *Cluster* com sete células.

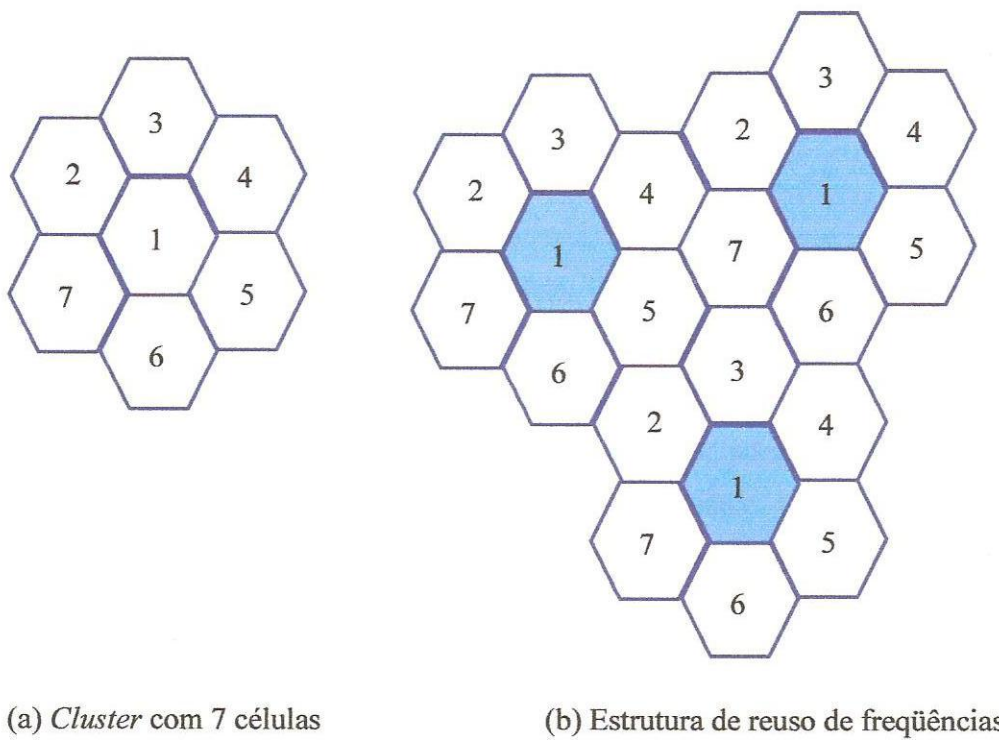


Figura 2.2 – Celularização da região e exemplo de reuso com a célula 1.

As principais características na cobertura por comunicação móvel convencional são: baixa densidade de usuários, não reutilização de frequências, alta potência de transmissão, antenas elevadas, grande área de cobertura por antena. Por outro lado, os sistemas móveis celulares caracterizam-se por apresentar: alta densidade de usuários, reuso de frequências, baixa potência de transmissão, antenas pouco elevadas, área de cobertura dividida em células. A Figura 2.3 ilustra as duas formas de cobertura apresentadas.

Na década de 90, o desenvolvimento de novas tecnologias acarretou grande redução dos custos dos aparelhos celulares e dos serviços de voz. Aliado a isso, a exploração de novos mercados possibilitou o acesso de diversas camadas da população a essa tecnologia, observando-se um aumento da demanda não só em quantidade, mas também em qualidade e novos serviços.

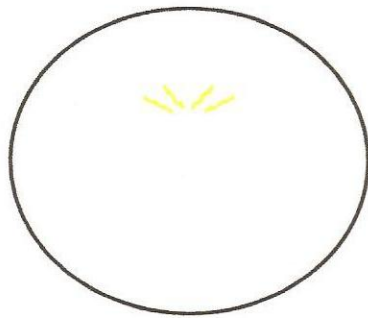
Por outro lado, a necessidade de melhoria dos sistemas já existentes motivou a busca por técnicas que potencializassem a utilização do espectro, necessário para sustentar tal demanda. Como consequência, houve a sucessiva diminuição das células da ordem de centenas de metros, caracterizando o que se chama de microcélulas e, posteriormente, para raios da ordem de dezenas de metros, hoje denominadas de picocélulas [18-21].

O emprego da técnica de diminuição de células e a utilização de antenas dentro de ambientes, onde havia grande demanda de serviços, melhoraram a eficiência do espectro e a qualidade dos sinais em ambiente interiores.

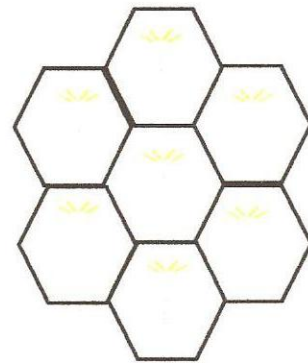
Esse estado de confinamento das antenas, em ambientes interiores, gerou um novo cenário de propagação que necessita de modelos mais precisos de predição e que considere as características específicas desses ambientes [13].

Os modelos de predição empíricos, semi-empíricos e determinísticos, em uso para predição em ambientes exteriores, não se adequam às condições específicas dos ambientes interiores. Nesses casos, a presença de mobília, paredes, pisos, tetos e a própria geometria do ambiente determinam grande influência nos mecanismos de propagação [22].

A Figura 2.4 apresenta dois cenários adequados à aplicação do Método do Traçado de Raios aqui proposto. No ambiente, pode-se observar uma situação (a) sem visada direta e (b) com visada direta entre as antenas transmissora e receptora.

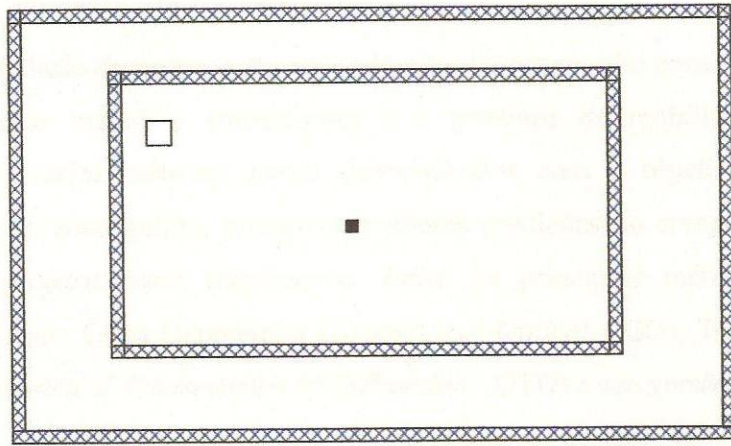


(a)

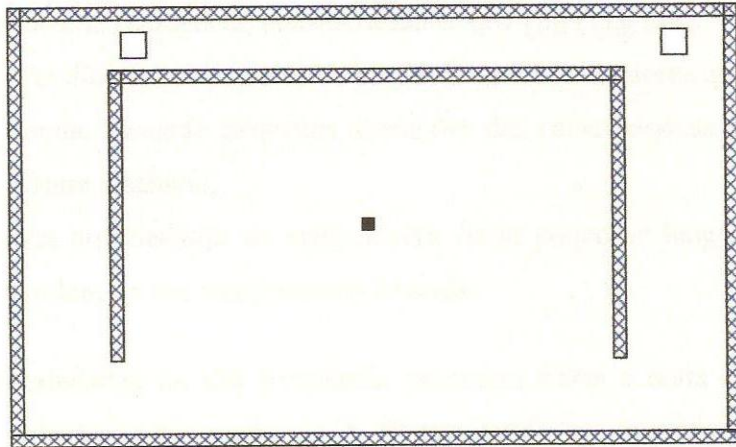


(b)

Figura 2.3 – Forma de cobertura utilizada (a) no sistema móvel convencional e (b) no sistema móvel celular.



(a)



(b)

■ Transmissor □ Receptor ▨ Parede

Figura 2.4 – Ilustração de propagação em ambientes interiores (a) sem visada direta e (b) com visada direta.

2.3 – Métodos de Predição de Propagação

Para predição de propagação em ambientes interiores, são considerados a geometria do cenário, seus materiais constituintes e a presença de mobílias. A partir dessas características, vários métodos foram desenvolvidos com o objetivo de modelar tais ambientes e, por conseguinte, promover melhores predições do comportamento do sinal, viabilizando projetos mais econômicos. Entre os principais métodos e abordagens, merecem destaque: Ótica Geométrica (*Geometrical Optical* - GO), Teoria Geométrica da Difração (*Geometrical Transmission of Diffraction* - GTD) e sua versão uniforme (*Uniform Transmission of Diffraction* - UTD), Ótica Física (*Physical Optic* - PO), além de formalismos rigorosos como o Método da Equação Integral (*Integral Equation* - IE) e o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*Finite Difference Time Domain* - FDTD) [11], [23-24].

A aplicação dos métodos GTD/UTD e do método GO está intimamente relacionada aos problemas de alta frequência, considerando-se que [2], [11], [23]:

1. As dimensões dos obstáculos devem ser bem maiores que o comprimento de onda, havendo pequenas alterações das características ambientais ao longo dessa distância;
2. As propriedades do meio devem variar pouco ao longo de um intervalo da ordem de um comprimento de onda.

As propriedades da alta frequência permitem tratar a onda como sendo plana e uniforme em relação ao meio propagado. Nessas condições, os raios podem ser utilizados para representar a frente de onda e, portanto, o Método do Traçado de Raios pode ser aplicado. Os raios emitidos sofrerão as influências impostas pelo ambiente, ocorrendo propagação através dos mecanismos de múltiplas reflexões, refrações e difrações. O transporte de energia ocorre ao longo dessas trajetórias, não havendo transporte de energia transversalmente a um raio [10].

O Método do Traçado de Raios é um dos modelos determinísticos mais utilizados para predição de cobertura em ambientes interiores por abordar características de predição em ambientes com complexidade estrutural, inclusive com detalhamento de cantos de

paredes. Neste método, as antenas de transmissão e de recepção podem estar posicionadas em visada direta ou em ambientes com obstrução [25-28].

Existem basicamente três mecanismos de implementação do Método do Traçado de Raios, quanto ao modelamento dos cenários de simulação: o modelo 2D, o modelo 2,5D e o modelo 3D. Cada um desses modelos dispõe de vantagens e desvantagens basicamente relacionadas ao custo computacional exigido (cada simulação gera milhares de raios a serem analisados) e à precisão no modelamento dos ambientes.

Em ambientes sem grande detalhamento estrutural, o modelo bidimensional dispõe da vantagem de fornecer bons resultados, acompanhados de um baixo custo computacional. Porém, para ambientes representados por regiões próximas a cantos de paredes, regiões de quinas e regiões distantes dos pontos de transmissão, os modelos 2,5D e 3D fornecem resultados mais precisos a um custo computacional maior.

O Método do Traçado de Raios pode, quanto à técnica de análise e transmissão dos raios, ser implementado usando as técnicas do Método dos Raios Forçados ou do Método das Imagens. O Método dos Raios Forçados consiste na análise do lançamento de raios no ambiente rádio-móvel que podem ou não chegar ao receptor, de acordo com as características modeladas para o ambiente. Sua viabilização, quanto ao custo computacional, depende da implementação de critérios de otimização adotados. Por sua vez, no Método das Imagens, são determinados pontos imagem em relação às faces do cenário que definirão os percursos entre a antena transmissora e a receptora, envolvendo reflexões [29-31].

Capítulo 3

Técnica de Predição de Potência através do Método dos Raios Forçados

3.1 – Introdução

O Método dos Raios Forçados (*Shooting and Bouncing Rays* - SBR) consiste, basicamente, no lançamento de raios emitidos, em todas as direções, a partir de uma antena transmissora, onde cada raio representa uma porção da frente de onda propagante. É também conhecido por Método Direto (ou *Forward*), pois mapeia a propagação, partindo da antena transmissora, de cada raio e seus descendentes, originados das interações com as faces do cenário [1], [4].

No modelo 2,5D dos Raios Forçados, os raios são mapeados em dois planos, horizontal e vertical, sendo o ambiente representado por sólidos com a mesma altura .

Os raios lançados da antena transmissora, considerada como um elemento pontual, propagam-se até a antena receptora, por meio de múltiplas reflexões, refrações e difrações. A potência de chegada, já consideradas as perdas relacionadas ao espaço livre, às reflexões, às refrações e às difrações, é determinada para cada modalidade de propagação.

Estas modalidades de propagação permitem caracterizar os múltiplos percursos e, conseqüentemente, os desvanecimentos rápido e lento, fenômenos determinantes para o modelamento de um ambiente de comunicação rádio-móvel [13], [32-34]. A Figura 3.1 apresenta o comportamento dos raios no Método dos Raios Forçados.

Como cada raio possui uma trajetória independente, podendo gerar, com as interações do ambiente, novas fontes de raios, deve-se analisar cada um deles individualmente, investigando sua possibilidade de chegar ou não ao receptor. A perda de potência, relacionada a cada situação, é determinada em cada ponto da análise, ao longo do percurso, considerando cada mecanismo de interação envolvida [35-39].

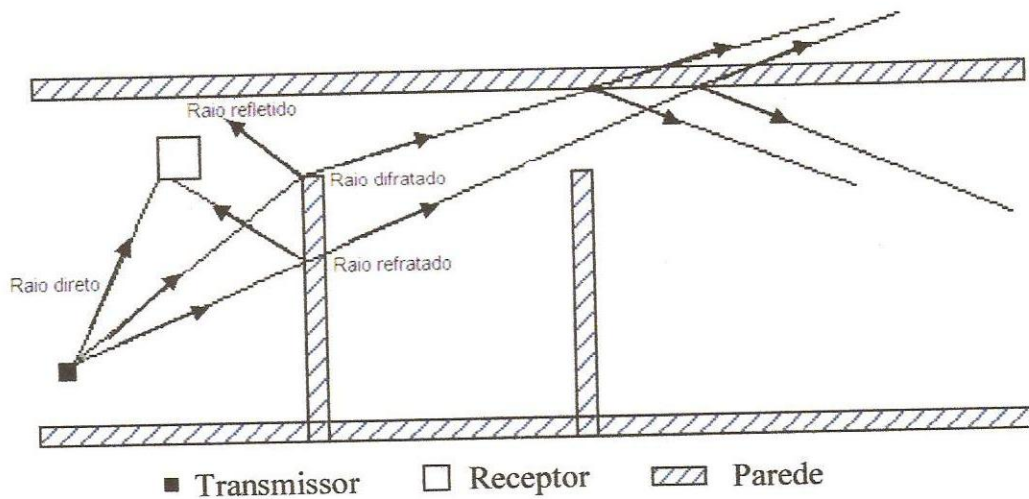


Figura 3.1 – Raios lançados com trajetórias definidas pelo cenário.

Neste modelo, a transmissão e a recepção ocorrem com os transmissores e os receptores em ambientes interiores, considerando as condições inerentes a esses ambientes como as paredes, pisos e tetos. A Figura 3.2 ilustra dois casos de aplicação do modelo, com as antenas transmissora e receptora (a) com obstrução pelas paredes e (b) em visada direta.

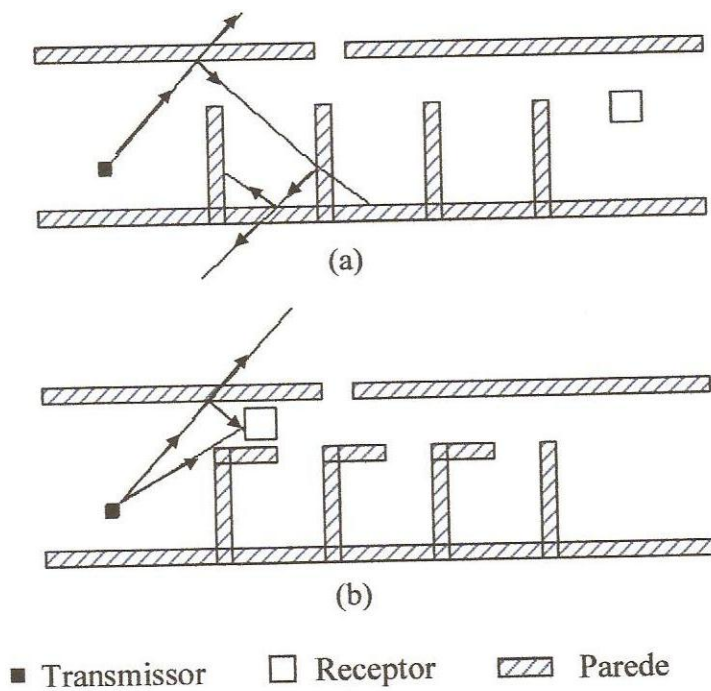


Figura 3.2 – propagação com antenas (a) com obstrução e (b) em visada direta.

3.2 – Mecanismos de Propagação – Raio Direto, Refletido, Refratado e Difrato

Raio Direto

Neste mecanismo de propagação, o raio chega à antena receptora sem obstrução. A equação de transmissão de Friis determina a potência de chegada na antena receptora, como função da distância percorrida pelo raio, dos ganhos das antenas e da frequência de operação, sendo dada por [10]:

$$\frac{P_{chegada}}{P_{transmitida}} = G_{transmissora} \cdot G_{receptora} \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (3.1)$$

onde $P_{chegada}$ é a potência de chegada na antena receptora, $P_{transmitida}$ é a potência efetivamente transmitida, $G_{transmissora}$ é o ganho da antena transmissora, $G_{receptora}$ é o ganho da antena receptora, λ é o comprimento de onda e d é a distância percorrida pelo raio.

A Figura 3.3 ilustra duas situações de propagação do raio direto em relação à antena receptora nos ambientes 1 e 2.

Com as antenas posicionadas em visada direta, além da propagação de raios diretos, pode também ocorrer propagação de raios refletidos, refratados e difratados. Este comportamento é mostrado na Figura 3.4.

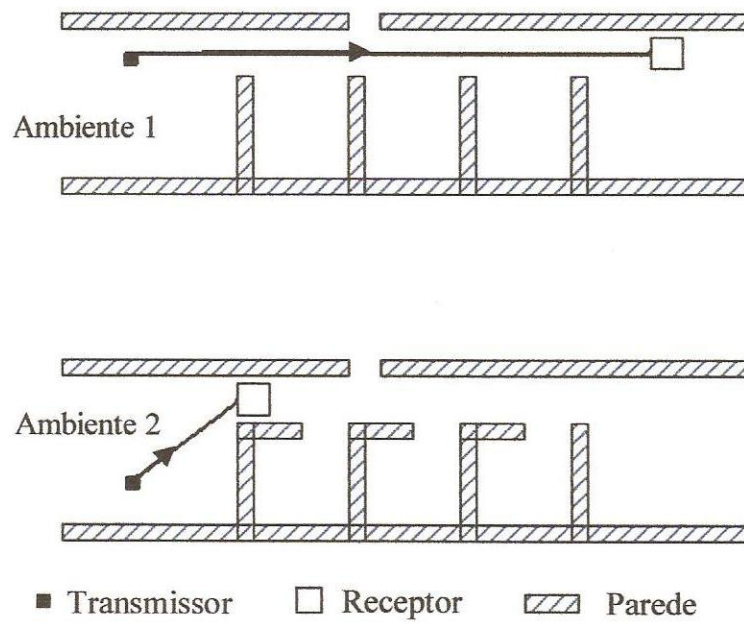


Figura 3.3 – Propagação do raio direto.

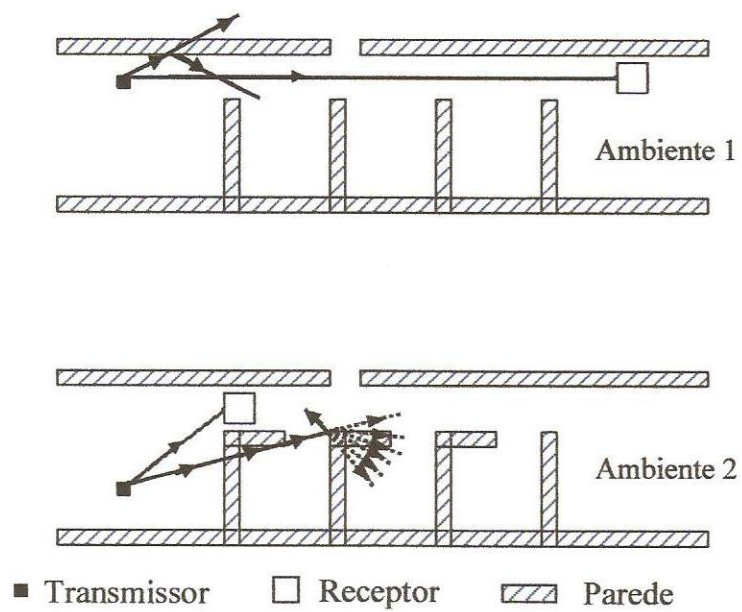


Figura 3.4 – Diferentes situações de propagação de raios com antenas em visada direta.

Raio Refletido

A reflexão ocorre quando o raio encontra uma obstrução, gerando uma nova fonte de transmissão, a partir das coordenadas do ponto de colisão, com ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência, em relação à normal, como mostra a Figura 3.5.

Em ambientes com antenas em visada direta, contendo divisórias e mobílias, as múltiplas reflexões estão entre os principais mecanismos de propagação, permitindo que o sinal alcance maiores distâncias.

A potência refletida é obtida pelo produto da potência incidente sobre a parede e o coeficiente de reflexão que, no caso da polarização vertical da antena, é dado por (3.3) [11]:

$$P_{refletida} = P_{incidente} \cdot R \quad (3.2)$$

sendo:

$$R = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_r}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_r} \quad (3.3)$$

onde R é o coeficiente de reflexão de Fresnel (interface de dois meios), $P_{refletida}$ é a potência refletida, $P_{incidente}$ é a potência incidente, η_1 é a impedância intrínseca do meio 1, η_2 é a impedância intrínseca do meio 2, θ_i é o ângulo de incidência na estrutura em relação à normal e θ_r é o ângulo de reflexão em relação à normal.

A propagação, conforme ilustrada na Figura 3.6, continuará até que o raio seja eliminado por uma das condições de descarte (estas condições de descarte de raios são melhor discutidas em 3.4) considerada no modelo, ou alcance o receptor, podendo ocorrer múltiplas reflexões, refrações e difrações.

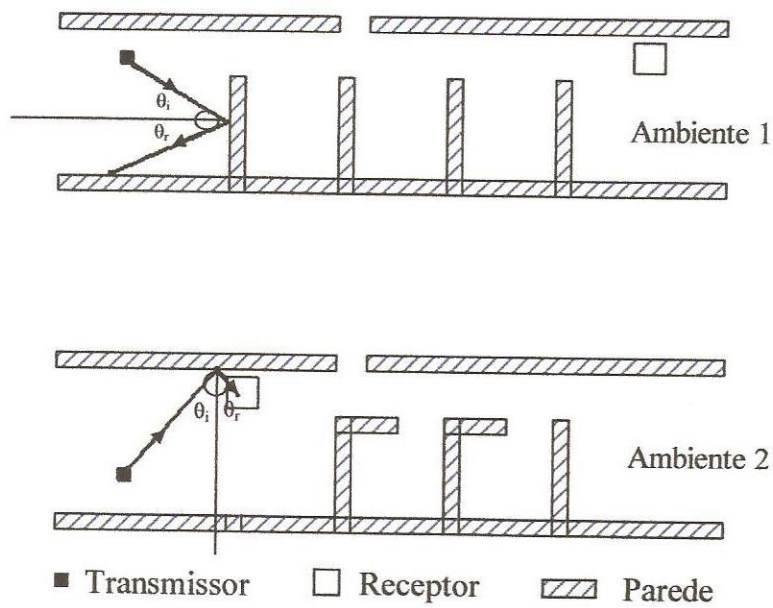


Figura 3.5 – Raios refletidos no ambiente.

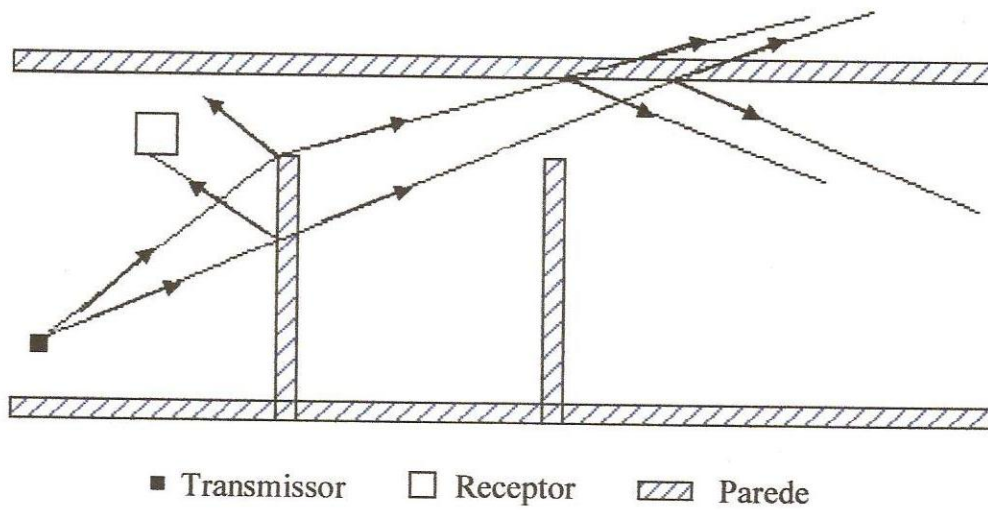


Figura 3.6 – Raio refletido e seus descendentes

Na Figura 3.7, observa-se que se o raio refratado continuasse a ser executado, sairia do ambiente e, conseqüentemente, não chegaria à antena receptora. Nesse caso, a fonte de raio refratada é desconsiderada e apenas a fonte de potência refletida contribui para a

intensidade do sinal que chegará à antena de recepção. Esse procedimento melhora o desempenho da análise computacional.

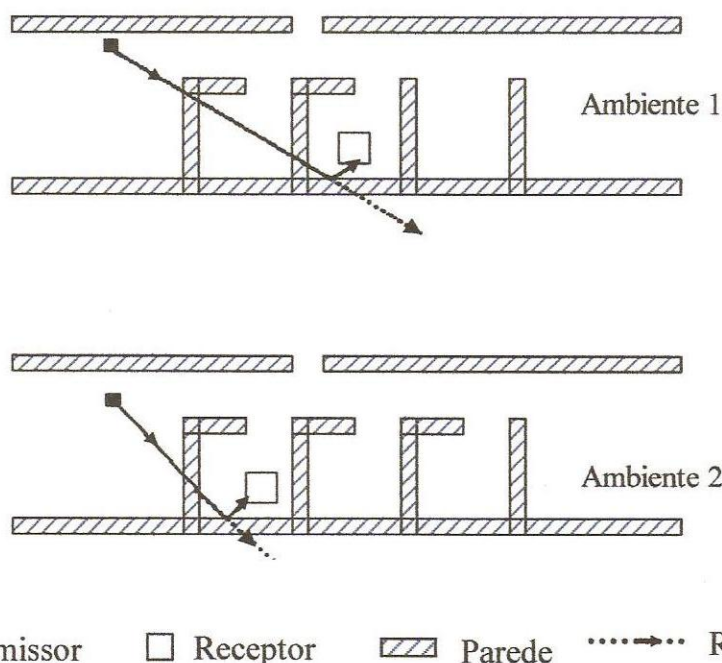


Figura 3.7 – Descarte das refrações que não atingem a antena receptora.

Raio Refratado

A determinação do raio refratado segue um mecanismo mais complexo que aquele adotado na obtenção do raio refletido. O raio refratado surge quando o raio incide em uma determinada superfície que não seja uma região de quina. Neste caso, o raio incidente é eliminado e gera duas novas fontes de raios, sendo uma refletida, cujo tratamento de cálculo já foi apresentado, e outra fonte de raio refratado.

A Figura 3.8 apresenta dois casos em que as refrações são consideradas fundamentais no cálculo de predição, tendo em vista que as antenas não estão em visada direta. Nesses casos, a obtenção de uma precisão aceitável não seria possível apenas com os procedimentos de raio direto, refletido e raio difratado.

O tratamento dado ao estudo da refração assemelha-se ao procedimento adotado no caso da reflexão. A Figura 3.9 ilustra a trajetória do raio refratado. A potência incidente (percurso 1) é determinada usando a equação 3.1. A potência refratada (percurso 2) é obtida pelo produto da potência incidente sobre a parede e o coeficiente de refração que, no caso da polarização vertical da antena, é dado por (3.5) [11]:

$$P_{refratada} = P_{incidente} \cdot T \quad (3.4)$$

sendo:

$$T = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \quad (3.5)$$

onde T é o coeficiente de refração ou transmissão, $P_{refratada}$ é a potência refratada, $P_{incidente}$ é a potência incidente, η_1 é a impedância intrínseca do meio 1, η_2 é a impedância intrínseca do meio 2, θ_i é o ângulo de incidência na estrutura em relação à normal e θ_t é o ângulo de refração em relação à normal.

As estruturas utilizadas neste trabalho não apresentam grande espessura, por conseguinte, os desvios dos ângulos inerentes à espessura das paredes não foram considerados.

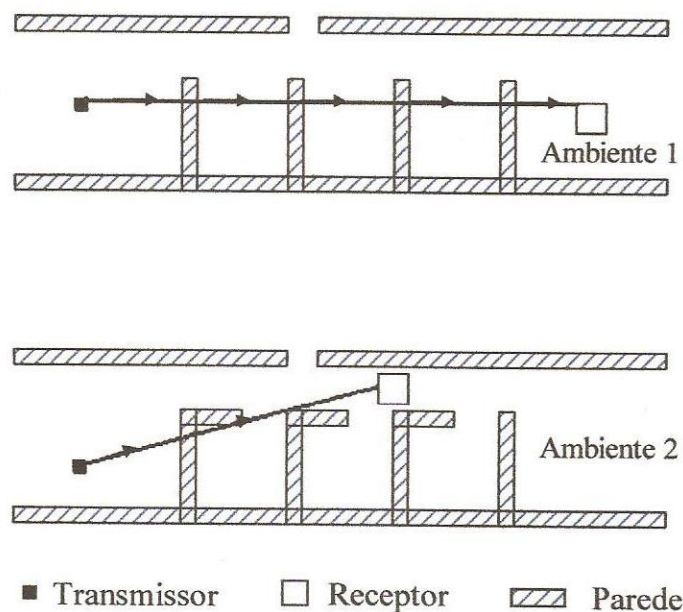


Figura 3.8 – Raios refratados.

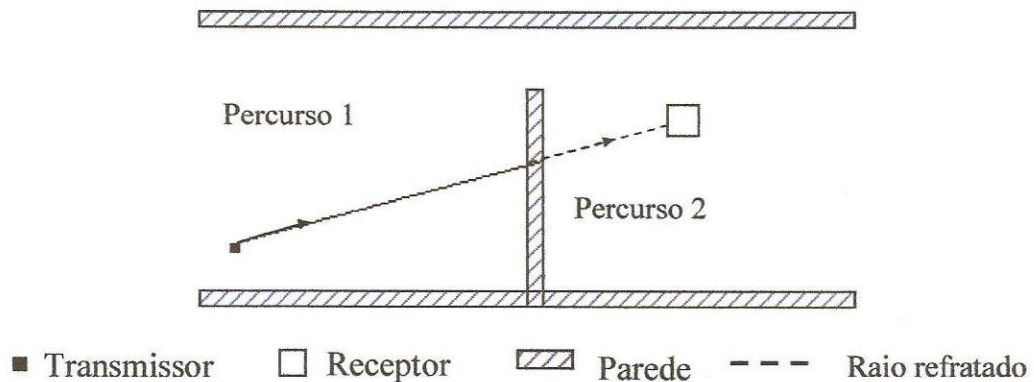


Figura 3.9 – Trajetória do raio refratado.

Raio Difrato

A difração consiste no espalhamento do sinal, ocorrido devido a colisões com regiões de quinas. Deste modo, a difração permite a decomposição do raio incidente em diversos outros raios, que atingem uma maior região de irradiação, permitindo que haja mais possibilidade de o sinal chegar à antena receptora. Esse espalhamento é tratado como diversas fontes de raios gerados [24].

A Teoria Geométrica da Difração [23] é aplicada para calcular o campo difratado. No momento da colisão com a quina, o raio incidente é descartado e dá origem a diversos raios difratados, em diferentes direções e com potências reduzidas, como mostra a Figura 3.10.

As novas fontes de raios difratados são determinadas de acordo com a Teoria Geométrica da Difração. A potência de cada raio difratado está relacionada com a potência incidente através de:

$$P_{\text{difratada}} = P_{\text{incidente}} \cdot D \quad (3.6)$$

sendo:

$$D = -\frac{e^{j\frac{\pi}{4}}}{2(2\pi k)^{\frac{1}{2}} \text{sen}(\beta)} \left[\sec \frac{1}{2}(\rho - \varphi) \pm \csc \frac{1}{2}(\rho + \varphi) \right] \quad (3.7)$$

onde D é o coeficiente de difração, $P_{\text{difratada}}$ é a potência difratada, $P_{\text{incidente}}$ é a potência incidente na quina, K é o número de onda, β é o ângulo entre o raio incidente e a parede ou estrutura de colisão, φ é o ângulo entre o raio incidente e a normal em relação à parede e ρ é o ângulo entre o raio difratado e a normal em relação à parede.

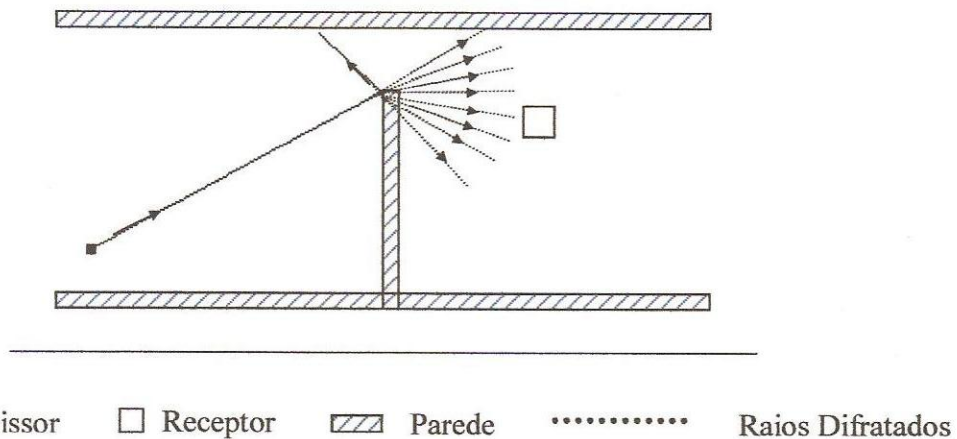


Figura 3.10 – Geração dos raios difratados.

A Figura 3.11 mostra os ângulos associados à determinação do coeficiente de difração e, conseqüentemente, da potência difratada [23].

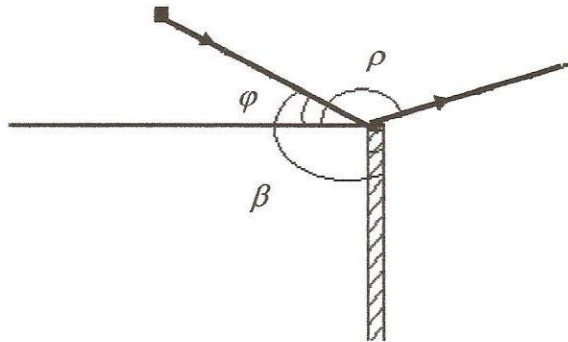


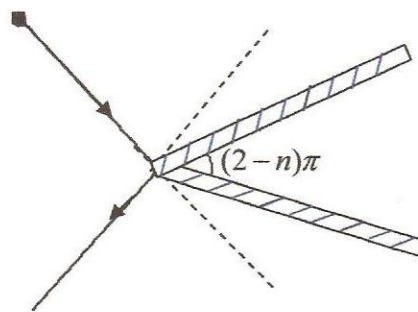
Figura 3.11 – Ângulos associados ao mecanismo do raio difratado.

A Equação 3.7 é aplicada para os ângulos de incidência normais à parede. Para os ângulos oblíquos, o coeficiente de difração pode ser determinado por [23]:

$$D = \frac{e^{j\frac{\pi}{4}} \operatorname{sen} \frac{\pi}{4}}{n(2\pi k)^{\frac{1}{2}} \operatorname{sen} \beta} \left[\left(\cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{\rho - \varphi}{n} \right)^{-1} \mp \left(\cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{\rho + \varphi + \pi}{n} \right) \right] \quad (3.8)$$

onde D é o coeficiente de difração, $P_{\text{difratada}}$ é a potência difratada, $P_{\text{incidente}}$ é a potência incidente na quina, K é o número de onda, β é o ângulo entre o raio incidente e a parede ou estrutura de colisão, φ é o ângulo entre o raio incidente e a normal em relação à parede, ρ é o ângulo entre o raio difratado e a normal em relação à parede e $(2-n)\pi$ é o ângulo entre as quinas.

A Figura 3.12 ilustra a geração dos raios difratados quando o ângulo entre as paredes é diferente de 90° .



■ Transmissor □ Receptor ▨ Parede - - - Raio difratado

Figura 3.12 – Difração com ângulo entre paredes diferente de 90°.

As Figuras 3.10 e 3.12 ilustram os procedimentos de geração de raios na região delimitada em função do ângulo de incidência e do ângulo formado entre as paredes formadoras da quina, onde ocorre a colisão. A geração de novos raios difratados requer um cuidado especial, por delimitarem importantes regiões de predição na caracterização do sistema de comunicação.

Os raios difratados que não alcançarem o receptor, pela sua trajetória ou ângulo de difração, poderão ser descartados. Esse procedimento melhora o desempenho da análise computacional.

3.3 – Modelamento do Ambiente no Método do Traçado de Raios

A necessidade de representação do ambiente, da forma mais fidedigna possível, requer uma modelagem que inclua, na sua representação, a incorporação de elementos que definam o cenário analisado.

Nesse contexto, o Método do Traçado de Raios surge como alternativa de modelamento, devido à possibilidade de caracterização fiel do ambiente a ser representado.

A precisão desse modelamento está associada diretamente ao número de dimensões envolvidas. Assim, os modelos 2,5D e 3D deverão obter resultados mais próximos aos

resultados reais que os modelos 2D, por considerarem características, tais como teto, piso, paredes laterais e disposição de mobílias no ambiente.

Os modelos 2,5D e 3D confrontam-se quanto à precisão e à descrição do ambiente, combinando uma precisão aceitável com um custo computacional tolerável. A precisão de ambos é considerável em ambientes com detalhamento estrutural e em cenários mais simples.

A escolha de um modelo 2,5D se deve principalmente à relação entre precisão e custo computacional, pois no Método do Traçado de Raios, esta variável é de grande importância.

No Método dos Raios Forçados, o modelamento do ambiente também resulta em singular importância por determinar a trajetória que o raio terá na propagação. Do contrário, raios que poderiam chegar à antena receptora seriam descartados enquanto outros seriam considerados, ao invés de eliminados, gerando resultados imprecisos.

Outro fator importante é a consideração das características relacionadas aos materiais constituintes do meio, quando se trata de modelamento de um cenário real. Essas características estão relacionadas às suas respectivas estruturas. Uma proposta é que as características sejam inseridas em um banco de dados, promovendo um menor custo computacional. Assim, os dados são disponibilizados mais rapidamente, fornecendo maior segurança, por estarem independentes em relação à implementação [40-43].

Neste trabalho, o modelamento foi efetuado na escala de 1:500 do ambiente real, sendo esta escala escolhida por melhor enquadrar os cenários na tela do computador, sem perda de precisão.

A Figura 3.13 ilustra um exemplo de como modelar um ambiente através do Método do Traçado de Raios. Os dados são constituídos de códigos, das coordenadas dos pontos da parede, da posição da parede (vertical ou horizontal) e, por fim, da impedância relacionada à estrutura.

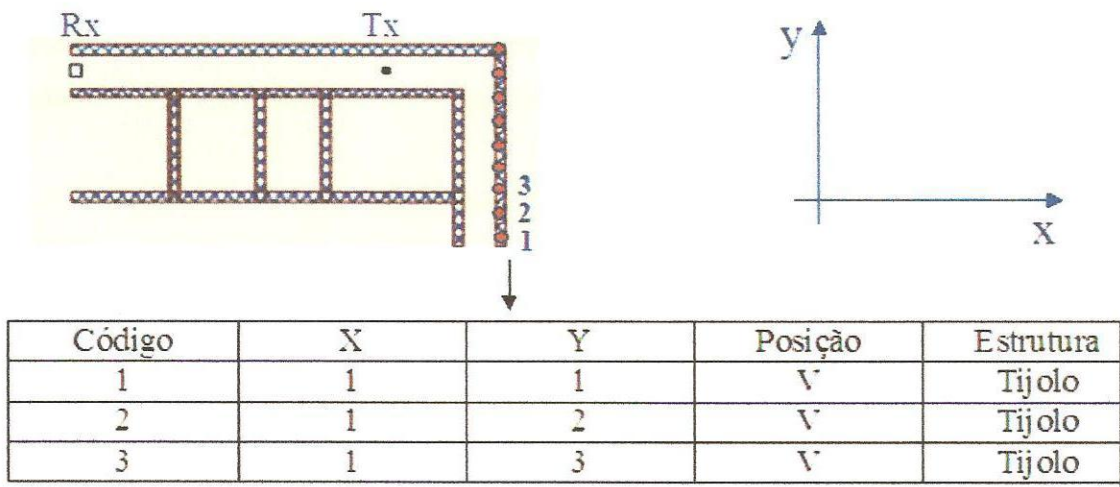


Figura 3.13 – Modelamento de um ambiente.

Com esse tipo de estrutura de modelamento, o modelo pode dispor das informações necessárias à simulação, permitindo a flexibilidade desejada para criar novos ambientes, sem alterar o procedimento de análise da implementação, desde que se utilize a mesma escala adotada [9].

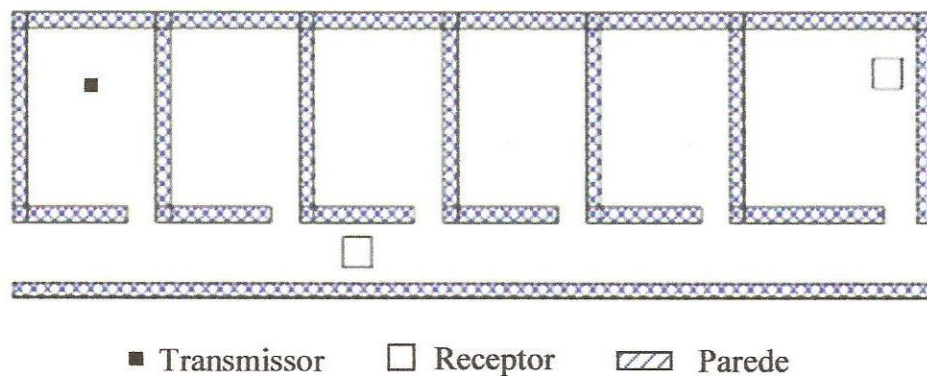


Figura 3.14 – Modelo de cenário utilizado nas simulações.

Na estrutura representada na Figura 3.14, a antena transmissora é considerada pontual. Cada antena receptora apresenta área efetiva, cujo valor deve ser convertido para a escala adotada na simulação. Tem-se que [10]:

$$Área_{efetiva} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_0 \quad (3.9)$$

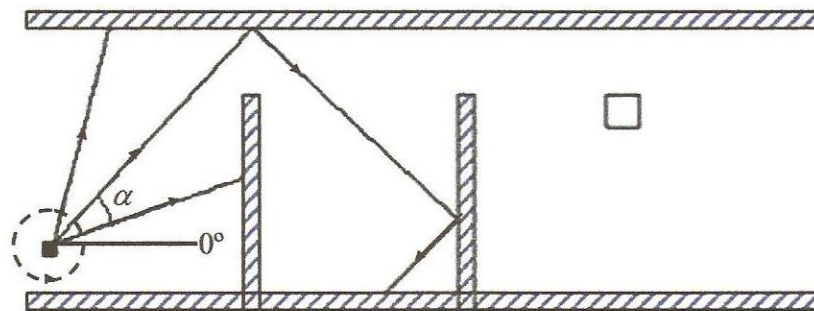
onde G_0 é o ganho da antena e λ é o comprimento de onda na frequência de operação da antena.

3.4 – Emissão de Raios

No Método dos Raios Forçados, os raios são lançados em todas as direções, a partir da antena transmissora, onde cada raio representa uma porção da frente de onda propagante. Deste modo, quanto mais raios forem considerados, melhor será a representação da onda.

Por outro lado, cada raio lançado no meio gera novas fontes de raios que, na análise, demandam um grande custo computacional. Por isso, é fundamental que haja um equilíbrio entre a quantidade de raios emitidos e os recursos computacionais disponíveis.

Como ilustra a Figura 3.15, os raios são lançados com uma diferença de ângulo α entre eles. Quanto menor for esse ângulo, mais raios serão lançados no ambiente, necessitando de boas condições de descarte de raios, para que o custo computacional não seja proibitivo.



■ Transmissor □ Receptor ▨ Parede

Figura 3.15 – Emissão dos raios com o ângulo fixo.

Além das técnicas de descarte de raios utilizadas, é importante o desenvolvimento de rotinas mais rápidas de simulação, com a utilização de estruturas de dados adequadas, como a transferência de dados para memória, ao invés da leitura através do disco rígido cuja velocidade se mostra bem menor.

O limiar de descarte é importante porque determina a eliminação de um raio, evitando que ele seja executado indefinidamente. Observa-se que os raios, abaixo de um

determinado limiar, representam pouca influência na potência recebida, podendo inclusive gerar um custo adicional, sem a devida contribuição no resultado final.

As principais técnicas de limiar de descarte utilizadas são [44]:

1. Eliminação do raio após um determinado número de reflexões, refrações e difrações. Este é um método de descarte simples e eficiente, pois não precisa testar a potência em cada ponto da propagação, o que geraria um grande custo computacional;
2. Eliminação do raio devido sua potência estar abaixo de um determinado limiar. A contrapartida desfavorável deste critério é a dificuldade na definição de um limiar que permita uma boa concordância com a quantidade de raios emitidos;
3. Eliminação devido à saída dos raios da área de investigação. Este critério elimina o raio que ultrapassa um determinado limite da estrutura simulada, por exemplo, quando a simulação ocorre em um prédio e o raio sai da construção;
4. Eliminação do raio que, por uma razão ou por outra, jamais chegará à antena receptora, como no procedimento de eliminação das refrações, cujos raios descendentes não conseguem alcançar a antena receptora.

Todas essas técnicas são utilizadas, em maior ou menor grau na implementação, exceto o critério da potência.

Capítulo 4

Definição do Algoritmo e Implementação das Rotinas

4.1 – Introdução

Este capítulo tem por objetivo descrever os procedimentos de implementação do modelo aqui proposto. São apresentados o algoritmo desenvolvido e as rotinas constituintes da implementação, bem como aspectos relacionados às variáveis consideradas. A Figura 4.1 apresenta um fluxograma do algoritmo implementado, enfatizando as variáveis de entrada e as rotinas desenvolvidas.

4.2 – Caracterização do Problema

A partir do Método do Traçado de Raios, apresentado no Capítulo 3, foi desenvolvido um algoritmo para análise dos cenários objetos de estudo. As características das antenas consideradas para o modelamento dos ambientes são:

1. Tipo de antena utilizada na transmissão e recepção;
2. Frequência da antena – definição da frequência de operação das antenas componentes do sistema de transmissão simulado;
3. Ganho das antenas transmissora e receptora;
4. Potência efetivamente transmitida, isto é, a potência que efetivamente sai da antena, já deduzidas as perdas inerentes aos cabos e às imperfeições do gerador. Neste trabalho, considera-se a potência medida à distância de 1m da antena transmissora;
5. Área efetiva da antena receptora;
6. Altura das antenas em relação ao solo.

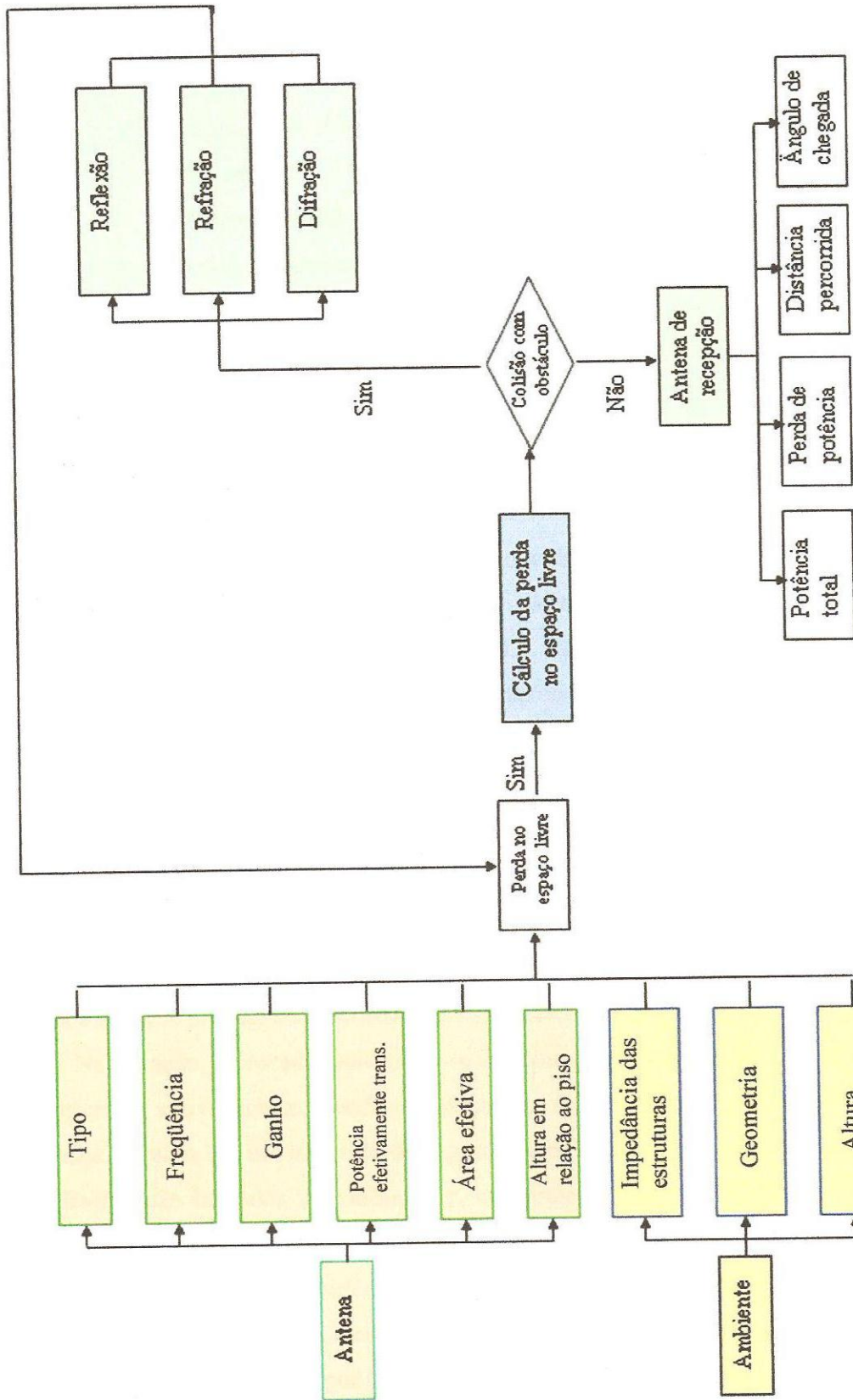


Figura 4.1 – Fluxograma da implementação do modelo.

Em relação aos cenários modelados, são considerados os seguintes parâmetros:

1. Impedância intrínseca dos meios componentes do cenário;
2. Geometria do ambiente – será requerida diretamente ao banco de dados, na execução dos procedimentos de reflexão, refração, difração e descarte dos raios;
3. Altura do ambiente sob simulação – na implementação, considera-se que todas as paredes que compõem o ambiente apresentam a mesma altura.

4.3 – Algoritmo

O programa de simulação trata separadamente a reflexão, a refração e a difração, facilitando o estudo dos raios que se propagam no ambiente.

Na modalidade de propagação do raio direto, a potência de chegada à antena receptora é determinada através da Equação 3.1. Essa Equação é também utilizada na determinação da potência incidente em propagação com obstrução.

Quando ocorre o evento da reflexão, a rotina do cálculo da perda relacionada à reflexão é ativada. Após a execução do referido procedimento, o raio continua a se propagar podendo, inclusive, ser requerida nova entrada no procedimento de reflexão, refração ou difração.

Analogamente, o procedimento relacionado ao cálculo das perdas na refração, que ocorre concomitantemente à reflexão, é ativado sendo gerada uma nova fonte de potência que continuará se propagando, podendo solicitar reflexão, refração ou difração.

Na difração, o procedimento torna-se um pouco mais complexo, quando comparado aos descritos anteriormente, conforme discutido no Capítulo 3. Nesse caso, os raios difratados, gerados em um intervalo de ângulo determinado conforme a Teoria Geométrica da Difração, são lançados no ambiente e, conforme sua trajetória, podem sofrer novas interações [23].

Na recepção, são considerados os raios que atingirem a área efetiva da antena receptora. A potência total na recepção é obtida pela soma de todas as contribuições dos raios propagantes, sendo dada por [23]:

$$\bar{E}_{\text{total}} = \bar{E}_{\text{chegada}(1)} + \bar{E}_{\text{chegada}(2)} + \bar{E}_{\text{chegada}(3)} + \dots + \bar{E}_{\text{chegada}(A)} \quad (4.1)$$

sendo \bar{E}_{total} o campo total na antena receptora, \bar{E}_{chegada} o campo de chegada à antena receptora relacionada a cada raio e A o número de raios que chegam à antena receptora.

4.4 – Implementação do Algoritmo do Método do Traçado de Raios

Neste trabalho, como o modelo é implementado em um ambiente gráfico, algumas características são observadas, destacando-se:

1. Modelamento da geometria do ambiente de modo a não comprometer o tempo de simulação;
2. Ilustração dos procedimentos durante a execução. Essa característica permite a correção de erros que porventura venham a ocorrer durante a execução dos procedimentos;
3. Facilidade de posicionamento das antenas transmissoras e receptoras no ambiente;
4. Flexibilidade para simulação de novos cenários.

Para a simulação do ambiente, inicialmente, deve-se posicionar as antenas de transmissão e recepção. No programa desenvolvido, admite-se a simulação com mais de uma antena receptora, simultaneamente.

Em seguida, considera-se que os raios são lançados a partir de 0° até $299,99^\circ$, fazendo-se uma varredura anti-horária entre os raios. Como objetiva o modelo, essa forma de implementação permite analisar cada raio, individualmente, proporcionando uma simplificação na análise. Sendo assim, é possível executar um raio por vez, independente da quantidade de raios descendentes, os quais serão posteriormente simulados.

A Figura 4.2 e a Figura 4.3 ilustram dois ambientes utilizados nas simulações, enfatizando o posicionamento das antenas transmissora e receptora. A antena receptora, representada em escala, possui área definida por (3.9).

Nas Figuras 4.2 e 4.3, os ambientes simulados estão representados na escala de 1:500. Durante a execução, os resultados podem ser acompanhados em tempo real. São mostrados, durante a simulação, a distância percorrida pelo raio até o obstáculo, a distância até a antena receptora, as coordenadas do raio e das antenas transmissora e receptora, o valor da potência a cada modalidade de propagação executada e as características da propagação do raio considerado.

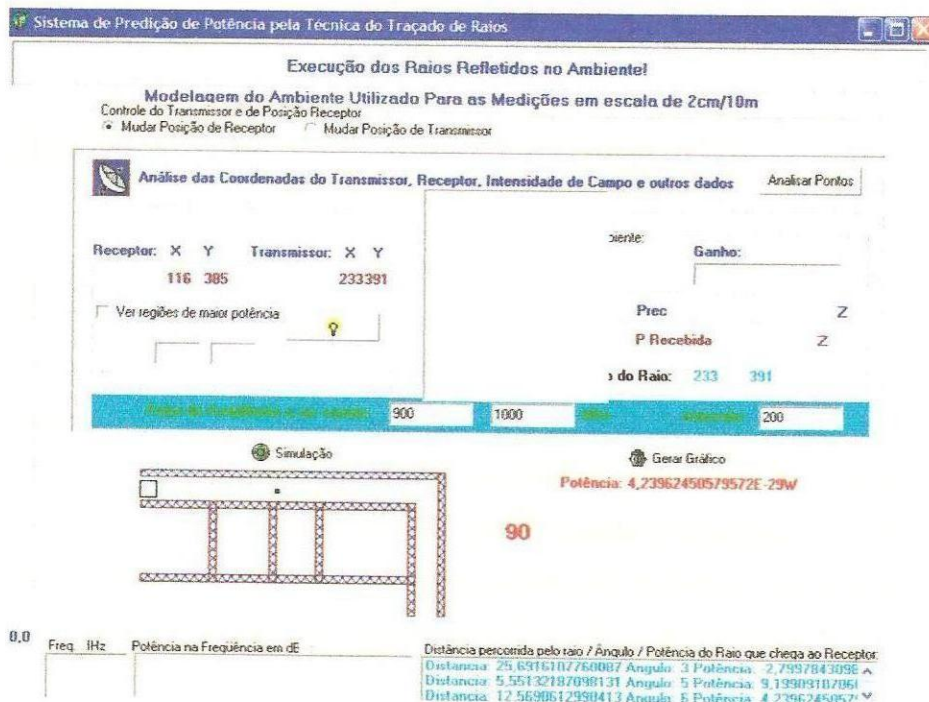


Figura 4.2 – Tela do programa utilizado para comparações de resultados teóricos.

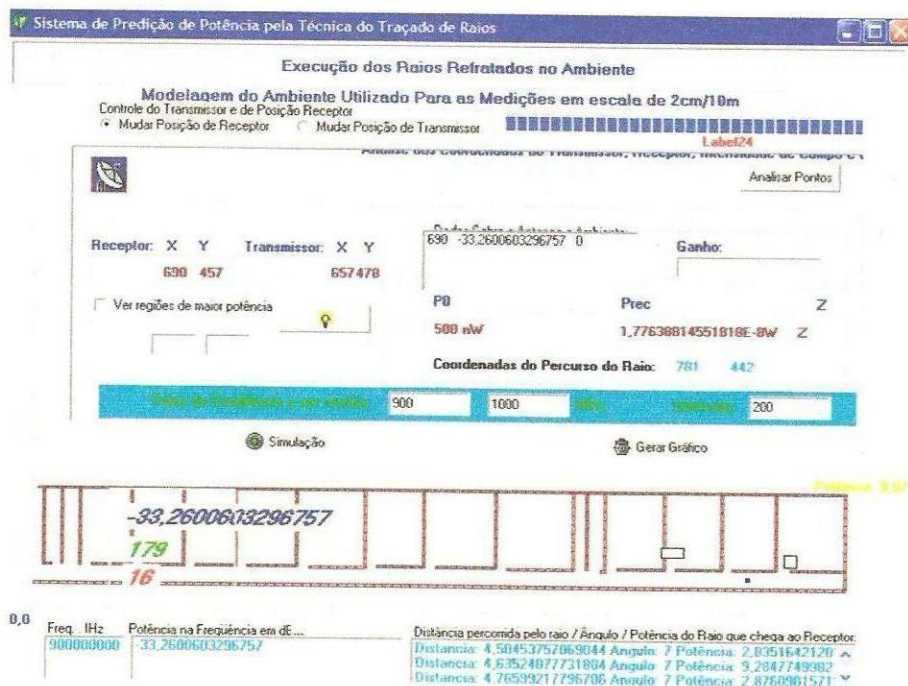


Figura 4.3 – Tela do programa utilizado para comparações de resultados experimentais.

Capítulo 5

Resultados

5.1 – Introdução

Foram obtidos resultados experimentais, através de medições com antenas em visada direta e em ambientes parcial ou totalmente obstruídos. As medições foram realizadas no CEFET-PB (Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba) em cenários de corredor e salas de aula, desprovidas de mobílias, vizinhas ao corredor principal. Foram projetadas antenas dipolo de meia onda para a frequência de operação de 1,8 GHz.

Para a obtenção dos resultados numéricos, um programa foi desenvolvido usando o Método dos Raios Forçados combinado com a Teoria Geométrica da Difração, para a simulação de ambientes interiores [45]. Os resultados simulados foram comparados com valores obtidos usando os métodos 2D, 2,5D e 3D Uniforme e o Método 3D *Patched*, observando-se uma boa concordância [1].

Em todas as simulações, foi utilizada a escala de 1:500 para melhor adequação do cenário em estudo à tela do computador. Foram também utilizadas antenas dipolos de meia onda, polarizadas verticalmente, e colocadas à mesma altura. Para as simulações foram considerados ambientes desprovidos de mobílias.

Os resultados foram obtidos em um computador PC, com processador de 1,6 GHz e de 128 MB de memória RAM, executando o Windows XP. O tempo de processamento dos resultados varia, principalmente, em função da distância entre as antenas transmissora e receptora e da complexidade do ambiente.

Técnicas de processamento foram implementadas, visando o aumento da velocidade de execução dos pontos de simulação, objetivando a melhoria do desempenho da implementação.

5.2 – Determinação do Erro Médio e do Desvio Padrão do Erro

Foram determinados o valor do Erro Médio (δ) e do Desvio Padrão do Erro (σ), referentes aos resultados medidos e simulados, para melhor análise e avaliação da precisão dos resultados obtidos através do modelo.

O valor do Erro Médio é determinado por [46]:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{\text{simulado}(i)} - x_{\text{medido}(i)})}{m} \quad (5.1)$$

onde δ é o Erro Médio, $x_{\text{simulado}(i)}$ é o valor simulado na posição i , $x_{\text{medido}(i)}$ é o valor medido na posição i , m é o número de valores da amostra simulados e i representa o índice que determina a posição simulada.

O Desvio Padrão do Erro é determinado por [46]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{\text{erro}(i)} - \bar{x})^2}{m-1}} \quad (5.2)$$

onde σ é o Desvio Padrão do Erro, x_{erro} é o valor do erro na posição i , \bar{x} é a média dos valores do erro i , m é o número de valores da amostra e i representa o índice que determina a posição simulada.

5.3 – Resultados Experimentais

O procedimento de medições experimentais foi realizado no CEFET-PB, utilizando como cenário um ambiente de salas de aula e corredor, como mostra a Figura 5.1, com as seguintes especificações:

1. Antenas dipolos de meia onda projetadas para a frequência de 1,8 GHz;
2. Salas e corredor com paredes de tijolos, piso de concreto e teto de gesso;
3. Dimensões do corredor: comprimento de 96 m, altura de 3 m e largura 2,5 m;
4. Gerador de frequências para simular um transmissor;
5. Um analisador de espectro para capturar a potência recebida;
6. Suporte para antenas com carrinho.

Para efetuar as medidas no corredor, a estratégia adotada consistiu em fixar a antena transmissora no corredor R1 (Figura 5.1), enquanto a antena receptora foi deslocada da posição 1 até a posição 29, com uma distância de 20 cm entre cada ponto medido. Neste caso, foram efetuadas todas as medições considerando-se a propagação em visada direta (LOS).

A Figura 5.2 mostra a perda de potência em função da distância no corredor R1 (Figura 5.1). Os resultados medidos são comparados com os simulados considerando-se as mesmas características de propagação.

Foram determinados os valores do Erro Médio ($\delta = -0,81$) e do Desvio Padrão do Erro ($\sigma = 4,06$) em relação aos valores medidos. Observa-se uma boa convergência entre os resultados simulados e medidos. Convém ressaltar, que a presença de fendas de ventilação (da ordem de 15 cm de diâmetro) nas paredes do corredor R1 devem ter interferido na precisão das medições.

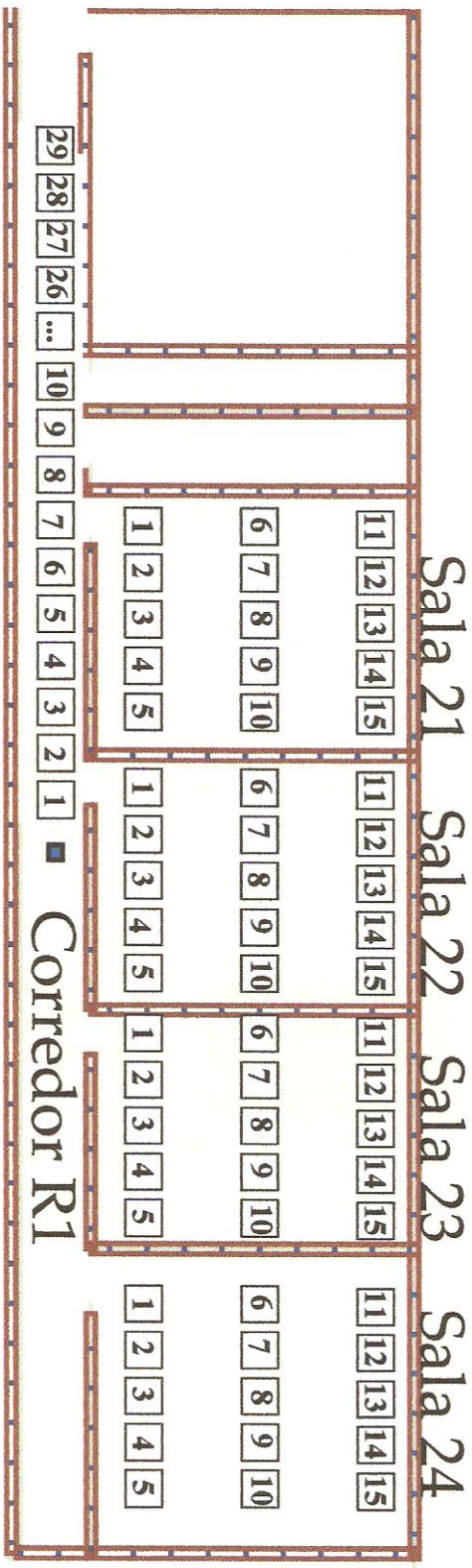


Figura 5.1. Cenário de medições no CEFET-PB.

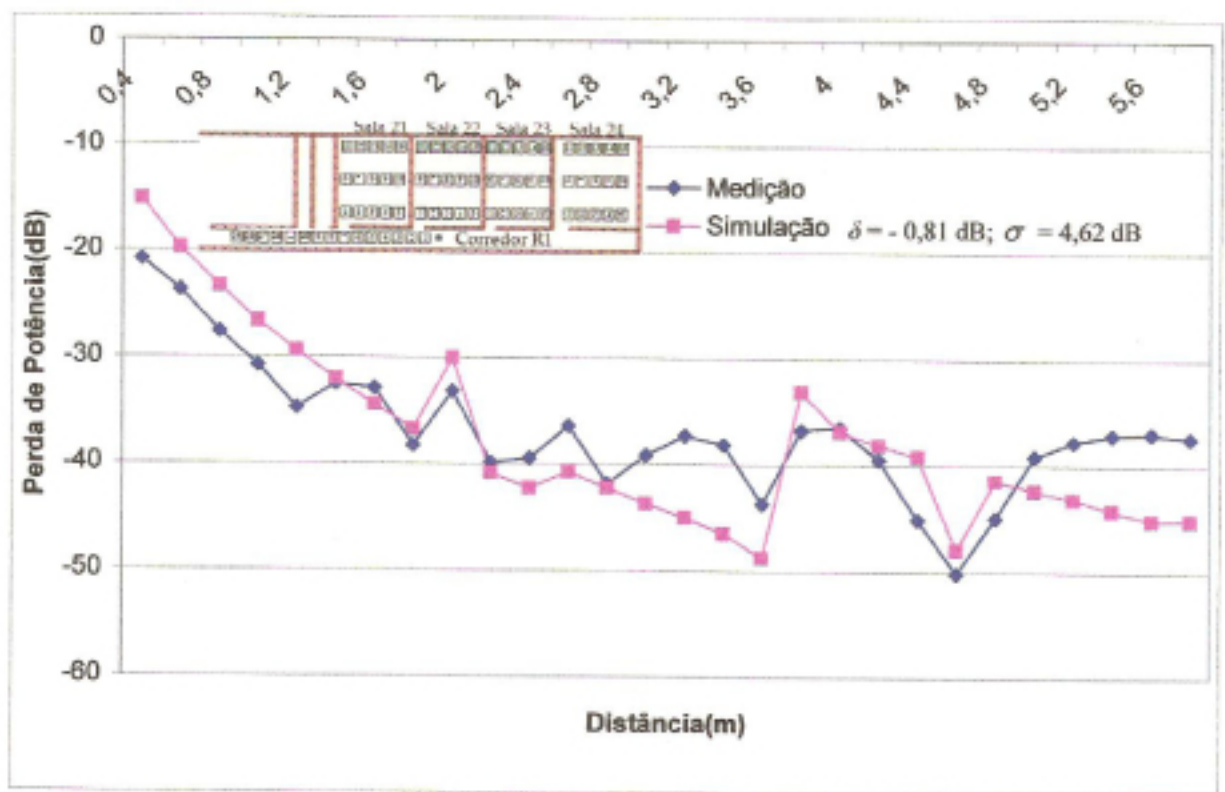


Figura 5.2 – Perda de propagação no corredor R1 para frequência de 1,8 GHz.

Foram realizadas medições nas salas 21, 22, 23 e 24, cujas posições das antenas transmissora e receptora podem ser observadas no cenário apresentado pela Figura 5.1. Nesse ambiente, para efeito de medições, em cada sala foram consideradas três seqüências de medições, sendo uma delas próximo à porta, outra no meio da sala e a terceira seqüência localizada no fim da sala.

Para efeito de medição, enquanto a antena transmissora foi fixada no corredor, a antena receptora foi colocada no interior de cada sala, deslocando-se da posição 1 até posição 15, como mostra a Figura 5.1. A distância entre duas posições adjacentes é de 1m.

Resultados numéricos foram obtidos para as salas descritas no ambiente, sendo comparados com os resultados medidos, conforme mostram as Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6.

Na simulação, foram consideradas as modalidades de propagação com reflexão, refração, difração e, em casos particulares, propagação em visada direta. Das curvas de perda de potência em função da distância, verifica-se que o modelo 2,5D do Traçado de Raios permite predição, com boa precisão, para os ambientes obstruídos.

O método é também avaliado através do Erro Médio (δ) e do Desvio Padrão do Erro (σ), determinados em relação aos valores medidos.

Na simulação das salas 22 e 23, como a antena transmissora e receptora estão próximas entre si, obtêm-se menores perdas de potência. Porém, à medida que a distância entre as antenas cresce, os resultados apresentam perdas de potência maiores, da ordem de 60dB, como pode ser observado nas simulações das salas 21 e 24. Nas salas 22 e 23, como as antenas podem ser alcançadas com reflexões diretas na parede do corredor, onde está posicionado o transmissor, a perda de potência tende a ser menor. Deste modo, a contribuição determinada pelos raios refletidos será maior que nas salas 21 e 24.

Como se pode observar do Erro Médio e do Desvio Padrão do Erro, foi obtida uma boa convergência entre os resultados simulados e os valores medidos. Vale a pena ressaltar que na sala 23, o valor do Erro Médio obtido ($\delta = 4,04$) deve-se ao fato de os valores simulados ficarem abaixo dos valores medidos. Esse comportamento pode ser justificado pela presença de fendas de ventilação, da ordem de 15 cm de diâmetro, que influenciaram nas medições e que não foram consideradas nas simulações. Essas fendas aumentam o erro no cálculo da predição à medida que cresce a distância entre as antenas transmissora e receptora.

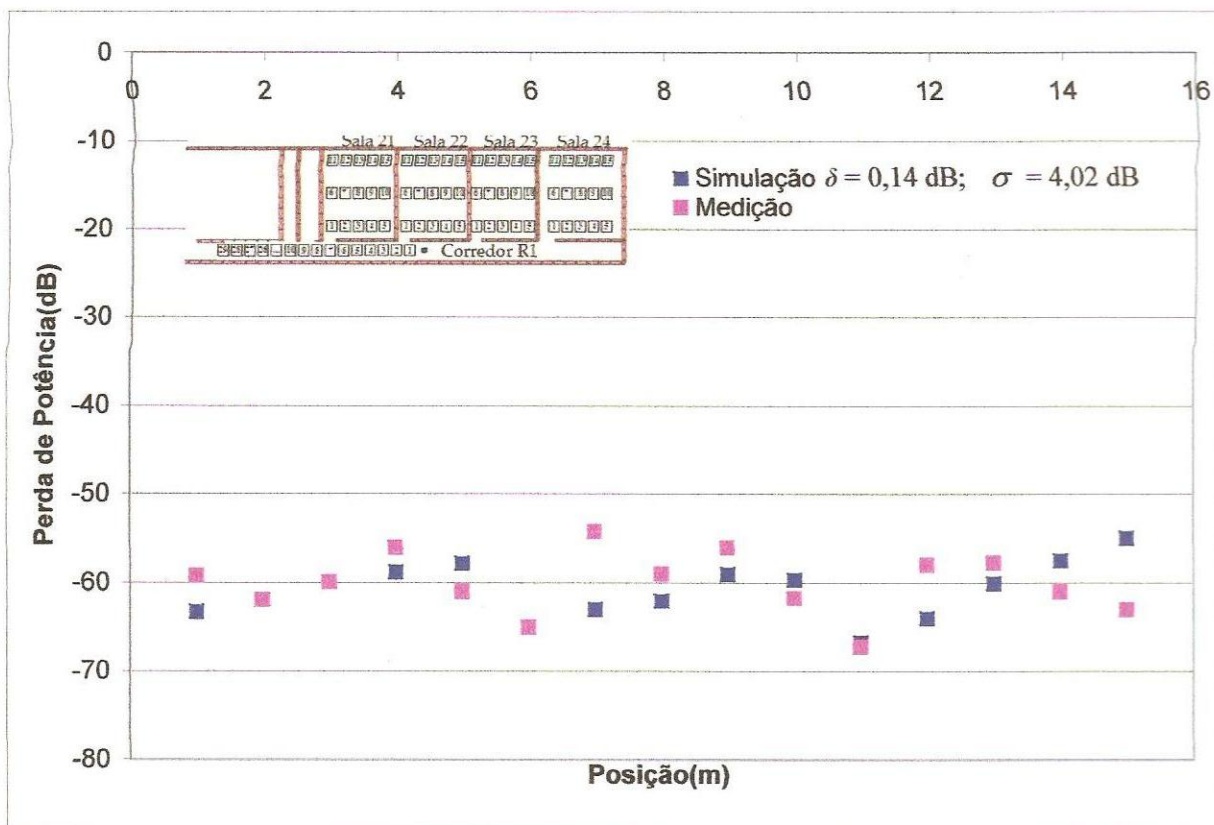


Figura 5.3 - Perda de propagação na sala 21 para frequência de 1,8 GHz.

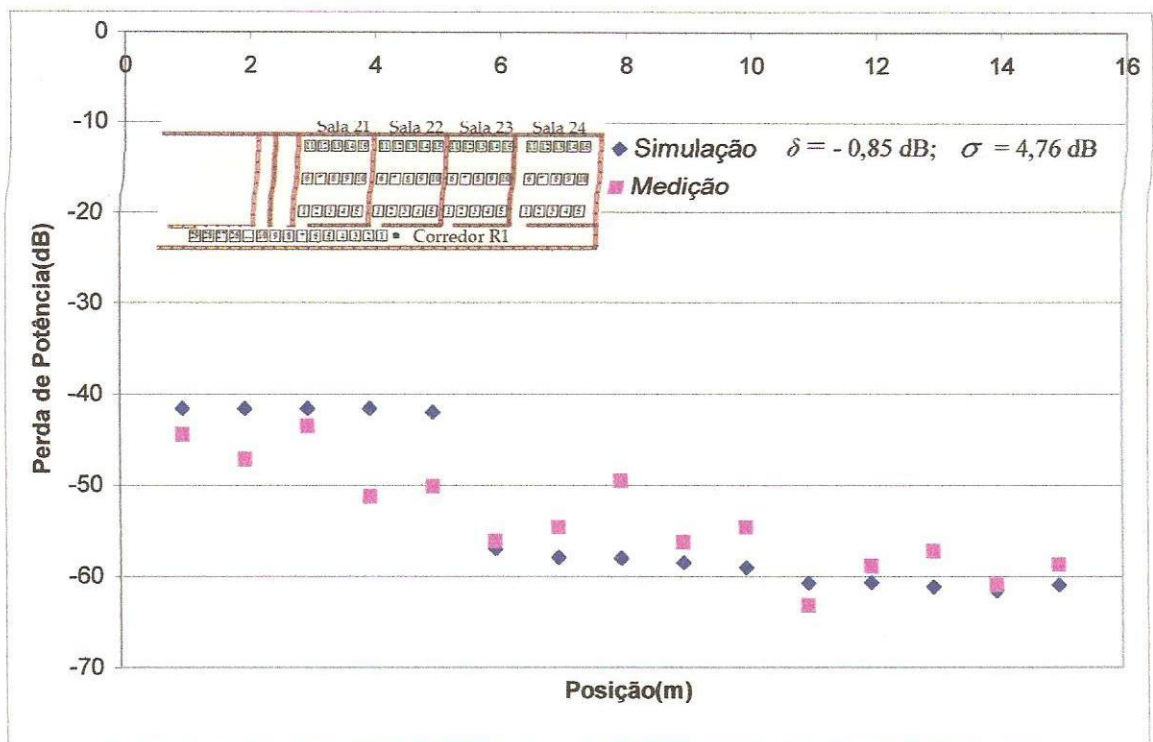


Figura 5.4 - Perda de propagação na sala 22 para frequência de 1,8 GHz.

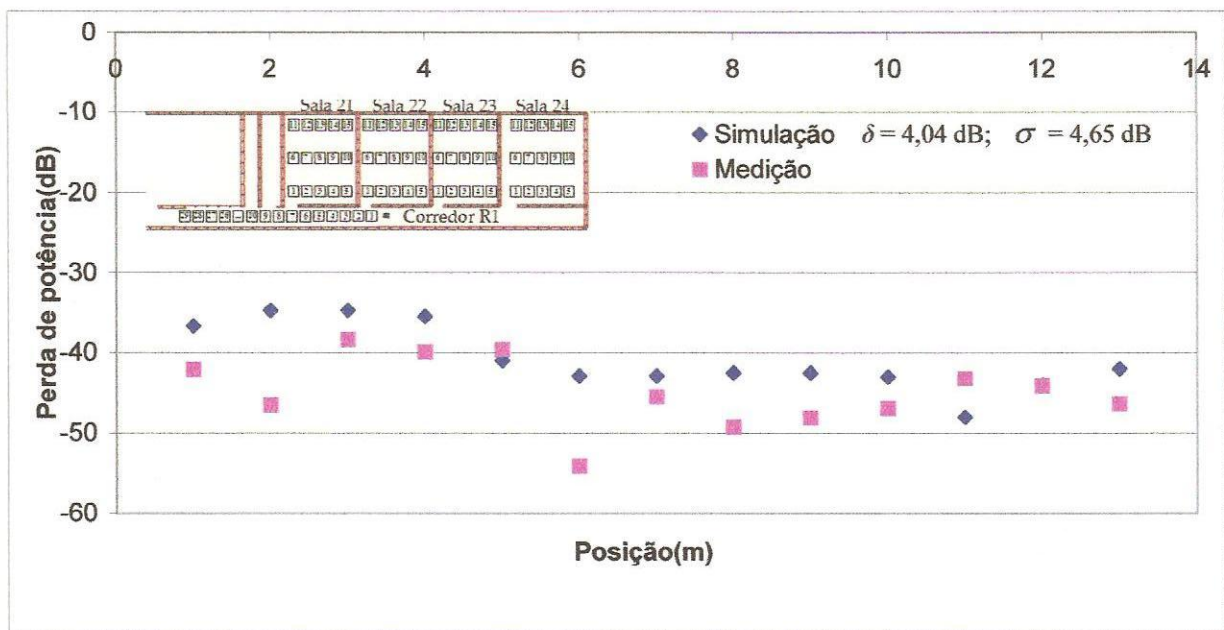


Figura 5.5 - Perda de propagação na sala 23 para frequência de 1,8 GHz.

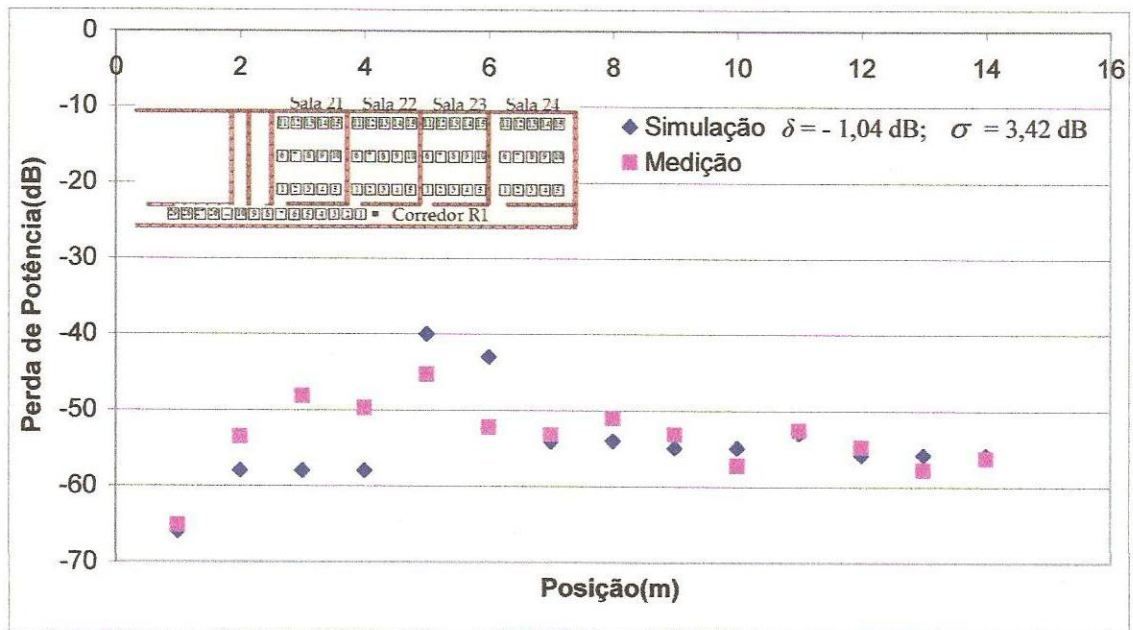


Figura 5.6 - Perda de propagação na sala 24 para frequência de 1,8 GHz.

5.4 – Resultados Numéricos

A fim de efetuar comparações entre os resultados simulados e os apresentados pela literatura especializada [1], os cenários representados na Figura 5.7 foram modelados com as seguintes especificações:

1. Antenas dipolos de meia onda projetadas para 900 MHz e 2,44 GHz, situadas a 1,5 m do solo;
2. Receptor fixo e transmissor móvel;
3. Simulação de duas trajetórias, uma em visada direta (Rota 1) e outra com obstrução (Rota 2);
4. Dimensões do corredor (Rota 1): altura de 2,4 m, largura de 2,6 m e comprimento de 34 m;
5. Dimensões do corredor (Rota 2): altura de 2,4 m, largura de 2,6 m e comprimento de 20 m;
6. Paredes, piso e teto construídos de concreto;
7. Distância entre duas posições consecutivas do transmissor: 1 m.

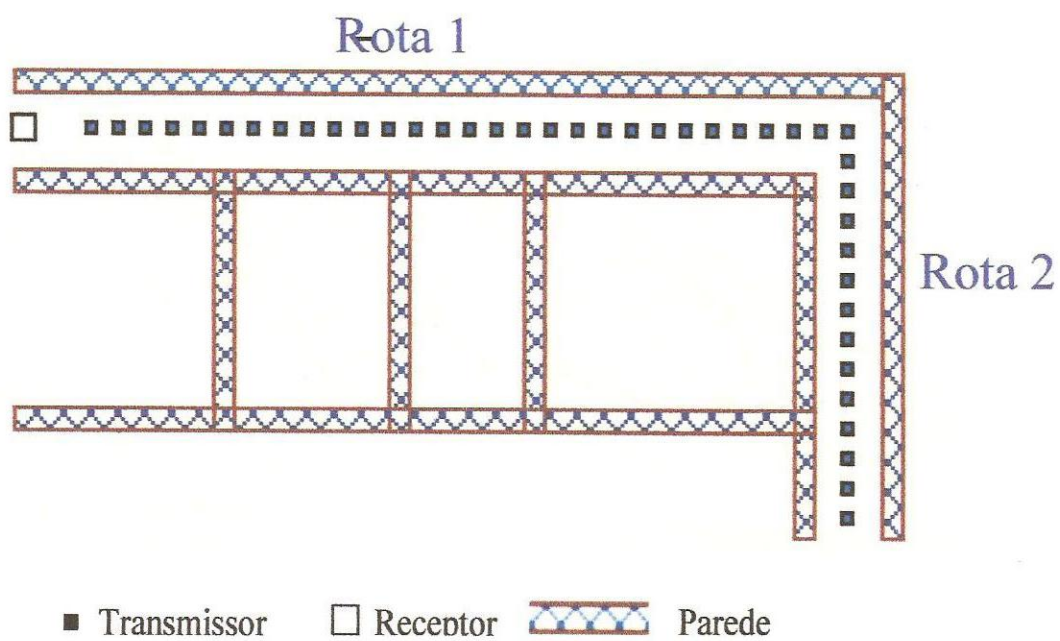
Nesse ambiente, na Rota 1, o transmissor sempre se encontra em visada direta com o receptor, ao longo do percurso de 27 m. A predição de potência na Rota 2, após a quina, torna-se mais complexa por se tratar de um ambiente com total obstrução. Aqui, são considerados os mecanismos de reflexão, refração e, principalmente, difração.

Os resultados para a Rota 1, obtidos para a frequência de 900 MHz, foram confrontados com os métodos 2,5D Uniforme, 3D Uniforme e 3D *Patched* [1], conforme mostra a Figura 5.8, verificando-se uma boa concordância.

Quando comparado com o Método 2,5D Uniforme [1], o valor do Erro Médio obtido para as simulações, através do Método 2,5D do Traçado de Raios, apresenta um maior resultado. Essa diferença decorre do fato de que os valores de perda de potência simulados, no Método do Traçado de Raios, resultarem, neste caso, em valores inferiores aos medidos. Por outro lado, o Desvio Padrão do Erro apresentou um menor valor que aquele obtido usando o Método 2,5D Uniforme.

Os resultados para a Rota 1, obtidos na frequência de 2,44 GHz, foram comparados com os valores simulados pelos métodos 2D Uniforme, 2,5D Uniforme, 3D Uniforme e 3D *Patched* [1]. Da Figura 5.9, conclui-se que o valor do Desvio Padrão do Erro, calculado para os resultados deste trabalho, apresenta resultado maior que aqueles obtidos pelos métodos citados, exceto o 2D Uniforme. O Erro Médio calculado apresentou um melhor resultado em relação ao Método 2D Uniforme, 2,5D Uniforme e 3D *Patched*.

Pode-se, ainda, observar da Figura 5.9, que a curva correspondente ao modelo 2D Uniforme, sugere uma predição menos precisa, devido ao valor apresentado pelo Desvio Padrão do Erro ($\sigma = 5,68$) ser superior aqueles correspondentes aos demais métodos analisados.



■ Transmissor □ Receptor  Parede

Figura 5.7 – Cenário simulado [1].

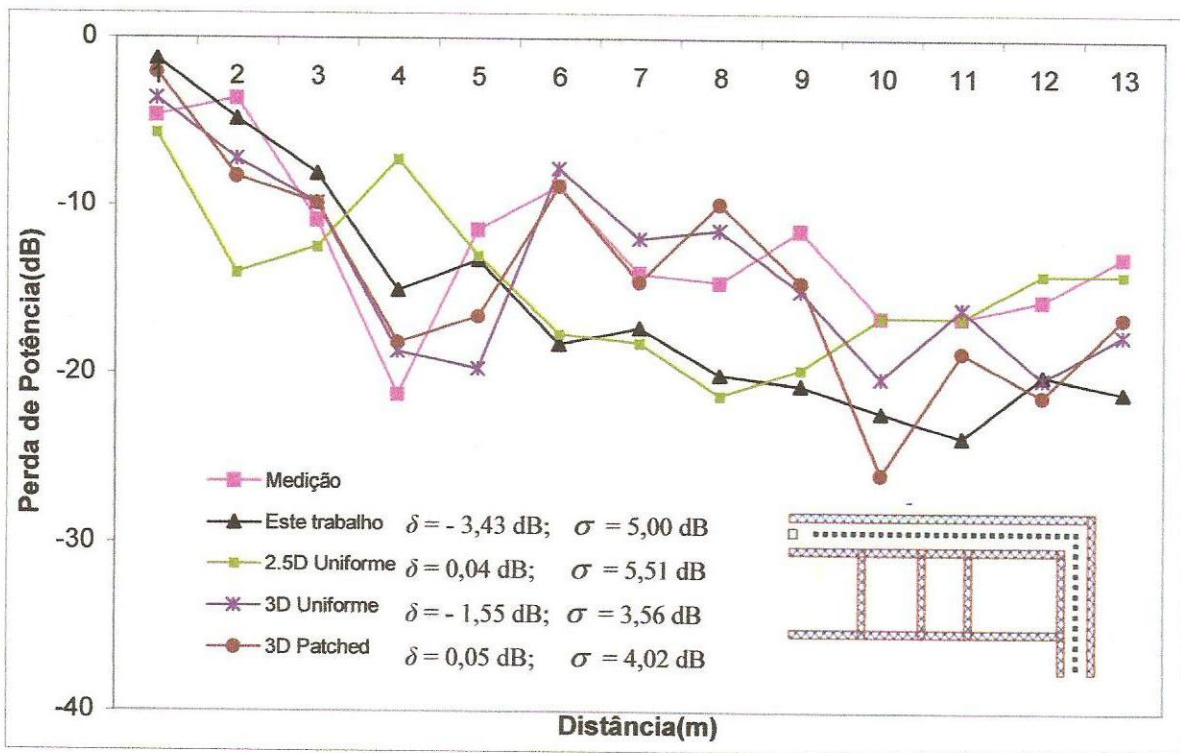


Figura 5.8 – Perda de propagação na Rota 1 para a frequência de 900 MHz.

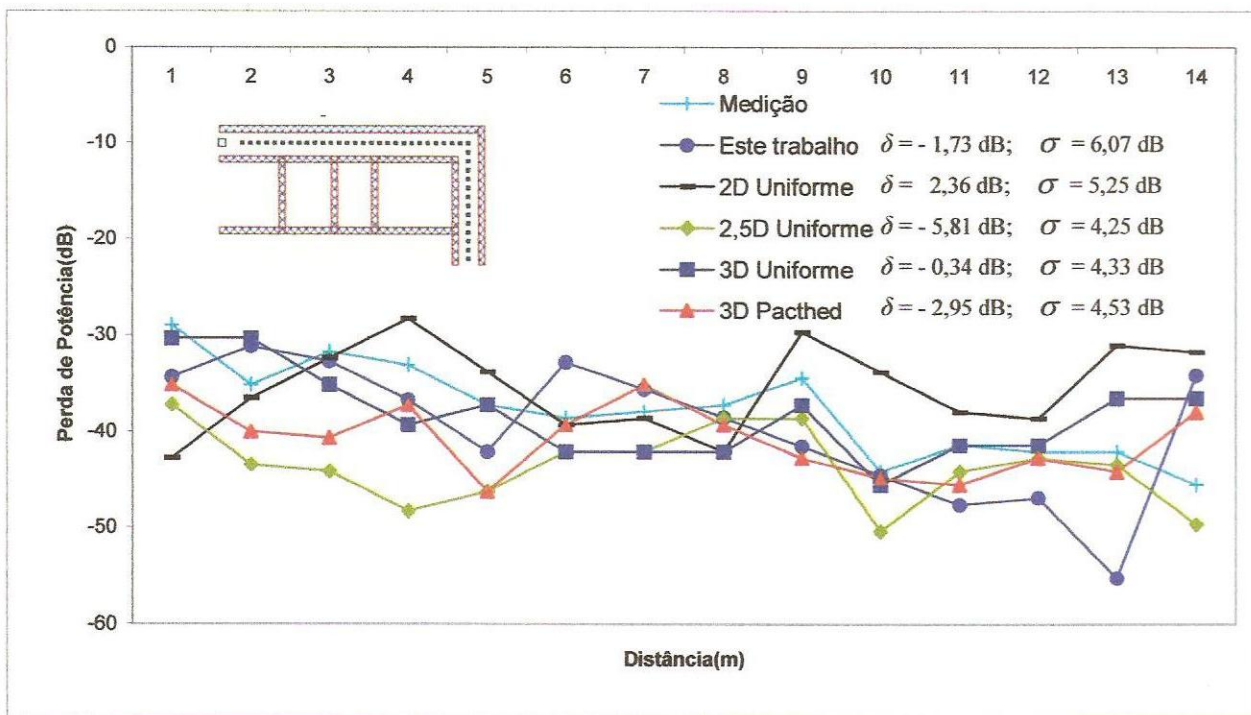


Figura 5.9 – Perda de propagação na Rota 1 para a frequência de 2,44 GHz.

Para a simulação dos resultados obtidos na Rota 2 (Figura 5.7), o receptor foi posicionado nas mesmas coordenadas localizadas na Rota 1. Em seguida, o transmissor foi deslocado pelo corredor, ao longo da Rota 2, com distância de 1 m entre duas posições de leitura adjacentes. Na Rota 2, são mantidas todas as especificações da Rota 1, exceto o comprimento do corredor. Os dados simulados foram determinados para as frequências de 900 MHz e 2,44 GHz.

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam os resultados numéricos obtidos na Rota 2, para as frequências de 900 MHz e 2,44 GHz, respectivamente. Também são mostrados os valores do Erro Médio e do Desvio Padrão do Erro.

Os resultados simulados na Rota 2 convergem com os valores medidos e apresentados em [1]. Dos valores do Erro Médio e do Desvio Padrão do Erro, verifica-se que os resultados obtidos pelo Método do Traçado de Raios, para a frequência de 900 MHz GHz, convergiram, de forma mais satisfatória, que aqueles obtidos por meio de medições e de simulações (Método 3D *Patched*), para a frequência de 2,44 GHz.

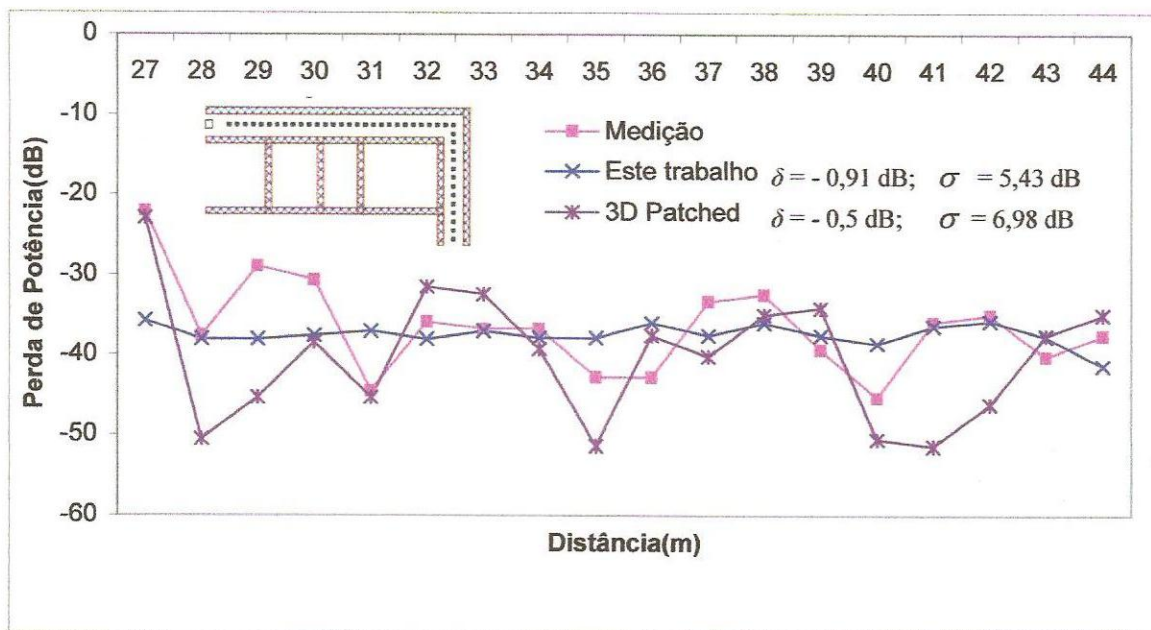


Figura 5.10 – Perda de propagação na Rota 2 para a frequência de 900 MHz.

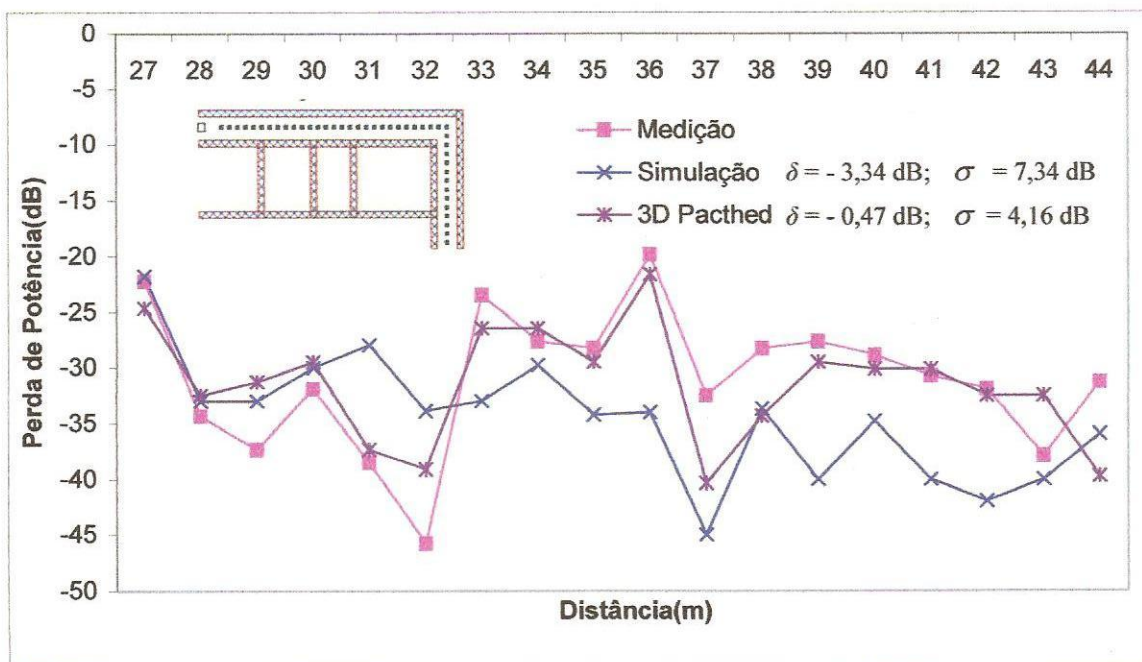


Figura 5.11 – Perda de propagação na Rota 2 para a frequência de 2,44 GHz.

Capítulo 6

Conclusões

Foi apresentado um modelo 2,5D de predição de propagação em ambientes interiores, tendo por objetivo a implementação de projetos, em comunicações móveis, mais precisos e econômicos. O Método do Traçado de Raios, na modalidade dos Raios Forçados, foi utilizado para a análise da visada direta, da reflexão e da refração, combinado com a Teoria Geométrica da Difração, aplicada na análise dos raios difratados.

No estudo da propagação dos sinais, foram utilizadas as modalidades de propagação do raio direto, refletido, refratado e difratado. Deste modo, foi possível obter um modelamento mais próximo ao comportamento real da onda propagante, obtendo-se os parâmetros desejados de forma mais precisa. Neste trabalho, as antenas transmissora e receptora são posicionadas internamente aos ambientes considerados.

Para a representação dos cenários, seus dados físicos e geométricos foram armazenados em uma estrutura de banco de dados, promovendo-se a integridade das informações. Além disso, esse procedimento permitiu melhorar a velocidade de processamento com a disponibilização de dados mais rapidamente.

A partir do modelo, foi desenvolvido um algoritmo considerando as características físicas e geométricas do cenário, as modalidades de propagação e os parâmetros de saída requeridos.

Na implementação do algoritmo, um programa gráfico foi desenvolvido, de forma a permitir a observação da aplicação do método durante a análise do ambiente. Os parâmetros podem ser observados em tempo real, de forma numérica e/ou gráfica.

Para a análise dos resultados obtidos, foram utilizados o Erro Médio e o Desvio Padrão do Erro. Essas variáveis estatísticas permitiram avaliar, mais precisamente, o conjunto de valores obtidos em relação a resultados experimentais e numéricos. Na validação do método, as medições foram efetuadas em ambientes de visada direta e com obstrução total ou parcial, realizadas no CEFET-PB na frequência de 1,8 GHz. Neste cenário, observou-se uma boa convergência entre os resultados

simulados e medidos. Os resultados numéricos, obtidos neste trabalho, foram comparados com valores publicados usando os métodos 2D, 2,5D e 3D Uniforme e o Método 3D *Patched*, observando-se uma boa concordância.

Como prosseguimento deste trabalho, sugere-se:

1. Implementar um modelo 3D de predição de propagação, que promova uma descrição mais detalhada do cenário e conduza a resultados mais precisos;
2. Efetuar simulações/medições em ambientes com mobílias;
3. Efetuar simulações/medições em ambientes com vários andares;
4. Implementar técnicas de processamento paralelo para a simulação dos raios.

Referências Bibliográficas

- [1] J. H. Tarng, W. R. Chang, and B. J. Hsu, "Three-dimensional modeling of 900-MHz and 2.44-GHz radio propagation in corridors," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 46, pp. 519-527, 1997.
- [2] D. A. McNamara, C. W. I. Pistorius, and J. A. G. Malherbe, "Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction," Boston, MA: Artech House, 1990.
- [3] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, "914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. 40, pp. 207-217, 1992.
- [4] J. H. Tarng, W-S. Liu, H. Y-F. Huang, and J-M. Huang, "A novel and efficient hybrid model of radio multipath-fading channels in indoor environments," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. 51, pp. 585-594, 2003.
- [5] E. S. Abdullah, F. Majeed, M. Zeeshan, T. Rabbani, and I. Sheikh, "Efficient implementation of deterministic 3-D ray-tracing to predict propagation losses in indoor environments," *Proc. 2002 IEEE Intern. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1208-1212, 2002.
- [6] J. Zhong, B-H. Li, H-X. Wang, H-Y. Chen, and T. K. Sarkar, "Efficient ray-tracing methods for propagation prediction for indoor wireless communications," *IEEE Antennas and Propagat. Magazine*, vol. 43, pp. 41-49, 2001.
- [7] K. A. Remley, H. R. Anderson, and A. Weissnar, "Improving the accuracy of ray-tracing techniques for indoor propagation modeling," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 49, pp. 2350-2358, 2000.
- [8] F. A. Agelet, A. Formella, J. M. H. Rábanos, F. I. de Vicente, and F. P. Fontán, "Efficient ray-tracing acceleration techniques for radio propagation modeling," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 49, pp. 2089-2104, 2000.
- [9] F. A. Alves, G. M. Feitoza, A. Gomes Neto, J. C. Silva, J. N. Carvalho, "Software didático para predição de potência em ambiente indoor," *Anais X Simp. Bras. Microondas e Optoeletrônica (SBMO 2002)*, Recife, PE, pp. 187-190, 2002.

- [10] C. A. Balanis, *Antenna Theory- Analysis and Design*, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2nd. Ed., 1997.
- [11] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Eletromagnetics*, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [12] P. A. Tenerelli, *Diffraction by building corners at 28GHz: Measurements and modeling*, MSc Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 1998.
- [13] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, USA: Prentice Hall, 1995.
- [14] M. E. C. Rodrigues, *Técnicas de Traçado de Raios em Três Dimensões para Cálculo de Campos em Ambientes Interiores e Exteriores*, Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, 2000.
- [15] A. Mehrotra, *Cellular Radio: Analog and Digital Systems*, Mobile Communications Series – USA: Artech House, 1994.
- [16] S. Faruque, *Cellular Mobile Systems Engineering*, Mobile Communications Series - USA: Artech House, 1996.
- [17] A. Toscano, F. Bilotti, and L. Vegni, "Fast ray-tracing technique for electromagnetic field prediction in mobile communications," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 39, pp. 1238-1241, 2003.
- [18] P. Wertz, D. Zimmermann, F. M. Landstorfer, G. Wolfle and R. Hoppe, "Hybrid ray optical models for the penetration of radio waves into enclosed spaces," *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*, Orlando, USA, vol. 1, 2003, pp. 109-113.
- [19] P. Wertz, G. Wolfle, R. Hoppe and F. M. Landstorfer, "Deterministic propagation models for radio transmission into buildings and enclosed spaces," *Proc. 33rd European Microwave Conference*, Munich, Germany, vol. 3, 2003, pp. 1147-1150.
- [20] C. M. Stallard and M.A. Wickert, "Evaluation of long term channel prediction methods using ray tracing simulation [cellular radio]," *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*, Orlando, USA, vol. 1, 2003, pp. 31-35.
- [21] D-Y. Kwak, N. Kang, J. Lee, S-C. Kim, and J. Choi, "Characterization of spatial channel model based on ray path analysis in high-rise urban environment," *Proc. 14th IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Beijing, China, vol. 1, 2003, pp. 955-959.
- [22] Z. Zhang, Z. Yun and M. F. Iskander, "New computationally efficient 2.5D and 3D ray tracing algorithms for modeling propagation environments," *Proc. IEEE Antennas and Propagat. Society Intern. Symp.*, Boston, USA, vol. 1, 2001, pp. 460-463.

- [23] J. B. Keller. "Geometrical theory of diffraction". *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 52, pp. 116-130, 1962.
- [24] M. Y. D. Wang and G. A. Deschamps, "Application of complex ray tracing to scattering problems," *Proc. IEEE*, 1974, pp. 1541-1551.
- [25] D. I. Axiotis and M. E. Theologou, "2 GHz outdoor to indoor propagation at high elevation angles," *Proc. 13th IEEE Intern. Symp. on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Lisboa, Portugal, vol. 2, 2002, pp. 901-905.
- [26] P. Wertz, V. Cvijic, R. Hoppe, G. Wolfle and F. M. Landstorfer, "Wave propagation modeling inside vehicles by using a ray tracing approach," *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*, Vancouver, Canada, vol. 3, 2002, pp. 1264-1268.
- [27] T-S. Wang and C-F. Yang, "A global ray-tube tracing method to determine signal variations in urban areas for mobile communications," *Proc. IEEE Antennas and Propagat. Society International Symposium*, Monterey, USA, vol. 2, 2003, pp. 614-617.
- [28] D. V. Diki, E. A. Parker and R. J. Langley, "A ray tracing approach to predicting indoor field distributions," *IEE Colloquium on Antennas and Propag. for Future Mobile Communications (Ref. No. 1998/219)*, London, England, 1998, pp. 6/1 - 6/4.
- [29] V. Degli-Eposti, G. Lombardi, C. Passerini and G. Riva, "Wide-band measurement and ray-tracing simulation of the 1900-MHz indoor propagation channel: comparison criteria and results," *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, vol. 49, pp. 1101-1110, 2001.
- [30] K. A. Remley, H. R. Anderson and A. Weissnar, "Improving the accuracy of ray-tracing techniques for indoor propagation modeling," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 49, pp. 2350-2358, 2000.
- [31] E. Costa, "Ray tracing based on the method of images for propagation simulation in cellular environments," *Proc. Tenth Intern. Conf. on Antennas and Propagat.*, Edinburgh, UK, vol. 2, 1997, pp. 204-209.
- [32] F. S. Adana, ; O. Gutierrez Blanco, I. Gonzalez Diego, J. Perez Arriaga and M. F. Catedra, "Propagation model based on ray tracing for the design of personal communication systems in indoor environments," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 49, pp. 2105-2112, 2000.

- [33] C-F Yang, B-C. Wu and C-J. Ko, "A ray-tracing method for modeling indoor wave propagation and penetration," *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, vol. 46, pp. 907-919, 1998.
- [34] M. Hassan-Ali and K. Pahlavan, "Site-specific wideband indoor channel modelling using ray-tracing software," *Electronics Letters*, vol. 33, pp.1983-1984, 1997.
- [35] P. M. Rodriguez, L. G. D. R. Guedes, R. P. Lemos, "On the effectiveness of 2D ray tracing model," *Proc. SBMO/IEEE Intern. Microwave and Optoelectronics Conf.*, Rio de Janeiro, RJ, vol. 1, 1999, pp. 312-315.
- [36] Z. Yun, M. F. Iskander, and Z. Zhang, "A fast ray tracing procedure using space division with uniform rectangular grid," *Proc. IEEE Antennas and Propagat. Society Intern. Symp.*, Boston, USA, vol. 1, 2000, pp. 430-433.
- [37] C-F. Yang and B-C. Wu, "Simulations and measurements for indoor wave propagation through periodic structures," *Proc. IEEE Antennas and Propagat. Society Intern. Symp.*, Boston, USA, vol. 1, 1999, pp.384-387.
- [38] C. Passerini, "A quality measure for ray-tracing algorithms," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. 49, pp. 500-502, 2001.
- [39] R. P. Torres, S. Loredó and L. Valle, M. Domingo, "An accurate and efficient method based on ray-tracing for the prediction of local flat-fading statistics in picocell radio channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 19, pp. 170-178, 2001.
- [40] H. Suzuki and A. S. Mohan, "Measurement and prediction of high spatial resolution indoor radio channel characteristic map" *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 49, pp. 1321-1333, 2000.
- [41] F. A. Agelet, F. P. Fontan and A. Formella, "Fast ray tracing for microcellular and indoor environments," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 33, pp. 1484-1487, 1997.
- [42] V. Degli-Esposti, G. Lombardi and C. Passerini, "Measurement and ray-tracing prediction of indoor channel parameters," *Electronics Letters*, vol. 34, pp. 2167-2168, 1998.
- [43] M. Nidd, S. Mann and J. Black, "Using ray tracing for site-specific indoor radio signal strength analysis," *Proc. IEEE 47th Vehicular Technology Conf.*, Pasadena, USA, vol. 2, 1997, pp. 795-799.

- [44] F. Aguado, F. P. Fontan and A. Formella, "Indoor and outdoor channel simulator based on ray tracing," *Proc. IEEE 47th Vehicular Technology Conf.*, Pasadena, USA, vol. 3, 1997, pp. 2065-2069.
- [45] F. A. Alves, M. R. M. L. Albuquerque, S. G. da Silva, A. G. d'Assunção, "Efficient ray-tracing method for indoor propagation prediction," *Proc. SBMO/IEEE Intern. Microwave and Optoelectronics Conf.*, Brasília, DF, 2005 (aceito para publicação).
- [46] W. O. Bussad, P. A. Marettin, *Estatística básica*, Brasil, Saraiva, 2002.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)