

3 Técnica de Traçado de Raios

3.1. Introdução

Uma técnica de traçado de raios aplicada à rádio-propagação consiste na análise, com base nos resultados da ótica geométrica, da propagação de ondas de rádio-freqüência através de um cenário que represente, com razoável fidelidade, o ambiente onde se deseja determinar a cobertura eletromagnética.

Questões relativas ao tempo de processamento e aos requisitos de armazenamento em memória, críticas em modelos teóricos, têm sido grandes motivadoras do uso disseminado de modelos empíricos e semi-empíricos. Tais requisitos estão relacionados às dimensões do ambiente e ao número de obstáculos considerados na sua representação. Porém, quando o interesse concentra-se no estudo da propagação em microcélulas e em picocélulas, aumenta-se significativamente a viabilidade de se trabalhar com modelos de predição teóricos.

Ferramentas flexíveis, capazes de modelar adequadamente os diversos ambientes de interesse e de fornecer uma estimativa prévia da resposta ao impulso do canal (entre outras informações) têm grande utilidade no planejamento de tais sistemas móveis [8]. Elas permitem a realização econômica de simulações e análises de várias configurações possíveis para o mesmo sistema, determinando coberturas e auxiliando no planejamento de estratégias para a redução de níveis de interferências. A técnica de traçado de raios possui todas as características necessárias ao desenvolvimento destas ferramentas e tem sido amplamente utilizada com esta finalidade [10, 17, 18].

A literatura usualmente classifica os modelos de traçado de raios em três categorias: modelo de duas dimensões (2D), três dimensões (3D) e duas dimensões e meia ($2 \frac{1}{2}$ D). Esta classificação pode ser relativa tanto à descrição do ambiente quanto à propagação dos raios.

No que se refere à descrição do ambiente, em modelos 2D os cenários são compostos por polígonos, em modelos 3D são compostos por sólidos, cada qual com sua altura, conforme a edificação representada, e em modelos $2 \frac{1}{2}$ D

representam o ambiente através de sólidos com a mesma altura (em geral, quando se desconhecem maiores detalhes a respeito do ambiente).

Se a classificação refere-se à propagação, modelos 2D mapeiam raios em um único plano, usualmente o plano horizontal paralelo à base do cenário e na mesma altura da antena transmissora; modelos 2 ½ D mapeiam os raios nos planos horizontal e vertical; e nos modelos 3D, os raios percorrem todo o espaço tridimensional.

O modelo 2D descrito no presente capítulo fará uma estimativa prévia da resposta ao impulso do canal, incluindo, entre outras informações, estatísticas temporais e espaciais da intensidade do sinal e do espalhamento de retardos devido a multipercursos, considerando os ambientes específicos nos quais o mesmo será implantado.

A propagação apresentada pelo modelo será no plano horizontal, que se aplica a estações rádio base de sistemas microcelulares, cujas antenas estão situadas em alturas muito inferiores comparadas às das edificações. Neste caso, as alturas das edificações podem ser consideradas infinitas e a difração pelas arestas verticais das mesmas é um dos mecanismos de propagação predominantes.

Desta forma, o sinal recebido será obtido como o resultado da composição de raios: (i) refletidos pelas paredes laterais externas das edificações; e (ii) difratados pelas arestas verticais das coberturas das edificações. Este modelo incluirá reflexões e difrações múltiplas, assim como interações mistas (reflexões e difrações) entre um raio e o ambiente.

Deve-se observar que outros espalhadores, como árvores, postes e linhas de transmissão são ignorados pelo modelo.

3.2. Dados das Edificações

Uma parte fundamental do modelo é um banco de dados que caracterize os atributos geométricos do ambiente específico no qual o sistema de comunicações será implantado.

A base de dados de edificações de diversos bairros da cidade do Rio de Janeiro utilizada foi adquirida do Instituto Pereira Passos da Prefeitura do Município do Rio de Janeiro (IPP). Através de várias rotinas desenvolvidas em FORTRAN, foi possível extrair diversas informações. As principais características determinadas foram quais edificações pertenciam a cada quadra.

Trabalhar com todas as edificações reais pertencentes a cada quadra exigiria área de armazenamento e tempo de processamento muito elevados para a versão do programa e para a plataforma disponíveis atualmente. Portanto, optou-se por usar a cobertura convexa das edificações, ou seja, o menor polígono convexo que contém todas as edificações de uma determinada quadra.

As alturas das coberturas convexas não são importantes neste trabalho, uma vez que o traçado de raios se dará no plano horizontal, onde as edificações são consideradas com alturas infinitas.

As paredes das edificações são consideradas superfícies planas com valores médios de permissividade relativa ϵ_r e de condutividade σ . Tais valores são dados de entrada do programa.

A utilização da cobertura convexa não tornou o modelo menos consistente para a realização do trabalho, conforme será mostrado através dos resultados obtidos. Os bairros selecionados para serem usados foram Copacabana e Ipanema, que apresentam alto grau de urbanização e quadras de geometria relativamente regular.

3.3. Traçado de Raios no Plano Horizontal

A literatura descreve, pelo menos, duas técnicas de traçado de raios aplicadas a estudo de propagação. A primeira, denominada “força bruta”, “*shooting and bouncing*”, direta ou exaustiva [9], [10], lança e rastreia através da região de interesse um grande número de raios espaçados angularmente em todas as direções. A partir deste conjunto de raios, usando um critério de mínima distância, são selecionados os mais próximos daqueles que efetivamente atingiriam cada ponto de observação no qual se deseja determinar as características do sinal recebido.

Por outro lado, a técnica apresentada no presente modelo corresponde ao método das imagens que, conforme o nome indica, determina, inicialmente, o conjunto único de imagens múltiplas do transmissor em relação ao terreno e às edificações [11].

Inicialmente, o programa identifica os pontos de difração dos polígonos resultantes das interseções das coberturas convexas com o plano horizontal. Estes pontos são os vértices dos polígonos cujos ângulos internos voltados para seus interiores são menores que 180° . Um raio que atinge um destes pontos é espalhado em todas as direções, de acordo com um diagrama de espalhamento não uniforme. Portanto, estes pontos são tratados pelo programa de forma semelhante à fonte real (ponto que representa a antena transmissora). Obviamente, os raios só se originam da fonte real.

O programa determina, então, todas as ligações possíveis, envolvendo apenas percursos não obstruídos, entre dois e, no máximo, três pontos de difração. Quando o ponto de observação puder ser ligado ao transmissor através de um ou mais pontos de difração, sem que qualquer dos segmentos seja obstruído, tem-se um raio puramente difratado.

Em seguida, as imagens especulares da fonte real e dos pontos de difração relativas aos segmentos não obstruídos pelas arestas dos polígonos que representam as coberturas convexas são determinadas. Este processo é repetido, sendo as imagens determinadas na interação imediatamente anterior utilizadas como novas fontes para a interação atual. Desta forma, são geradas *árvores de imagens* (uma para cada ponto de difração, além de outra para a fonte real), nas quais cada imagem está ligada à fonte anterior (real, ponto de difração ou imagem) e à aresta responsável pela sua criação.

Para se traçar um raio refletido, une-se o ponto de observação a uma imagem arbitrária por um segmento de reta. Caso este segmento seja obstruído por uma aresta diferente daquela que gerou a imagem, o raio não existe. Caso contrário, determina-se a interseção entre o segmento que une o receptor à imagem e a aresta que a gerou. Se a interseção ocorre no exterior do segmento ou da aresta, o raio não existe. Caso contrário, o processo descrito acima é repetido, usando a imagem imediatamente anterior à selecionada na *árvore de imagens* atual e com a interseção desempenhando o papel de ponto de observação.

Quando o processo descrito no parágrafo acima for bem sucedido, chegar-se-á à raiz da *árvore de imagens* (a fonte real ou um ponto de difração). No primeiro caso, será identificado um raio puramente refletido (um número de vezes dado pela posição da imagem selecionada inicialmente na árvore de imagens correspondente). No segundo caso, será identificado um raio se o ponto de difração puder ser ligado ao transmissor sem obstruções. Alternativamente, poderão ser testadas ligações deste ponto de difração a outros ou a imagens da mesma ou de outras árvores de imagens. Na ausência de obstruções, ter-se-ão identificados raios com interações mistas (reflexões e difrações) e múltiplas com as coberturas convexas das edificações.

Finalmente, o raio direto entre o transmissor e o ponto de observação existe quando o percurso entre ambos estiver desobstruído.

O algoritmo descrito acima permite a identificação de diversas classes de raios, definidas a partir do número de reflexões e difrações, assim como da seqüência com que as mesmas ocorrem no trajeto entre o transmissor e um ponto de observação. O número máximo de interações entre um raio e o perfil foi limitado a quatro, sendo três o número máximo de difrações.

Assim, representando-se o raio direto por D , uma reflexão por r e uma difração por d , as seguintes trinta classes de raios estão presentes no modelo: D ; r ; d ; rr ; rd ; dr ; dd ; rrr ; rrd ; rdr ; drd ; ddr ; ddd ; $rrrr$; $rrrd$; $rrdr$; $rdrr$; $rrdd$; $rdrd$; $drdd$; $rddr$; $drdr$; $ddrr$; $rddd$; $drdd$; $ddrd$; e $dddr$. O modelo é completo em relação a estas classes. Isto é, dados o transmissor e um ponto de observação, ele determina todos os raios pertencentes a cada uma das classes listadas.

As figuras 3.1 e 3.2 apresentam os raios que partem do transmissor e efetivamente atingem o receptor para um ponto de recepção em Ipanema (figura 3.1) e um ponto de recepção em Copacabana (figura 3.2), ressaltando que todos os raios pertencem a uma das trinta classes listadas anteriormente.

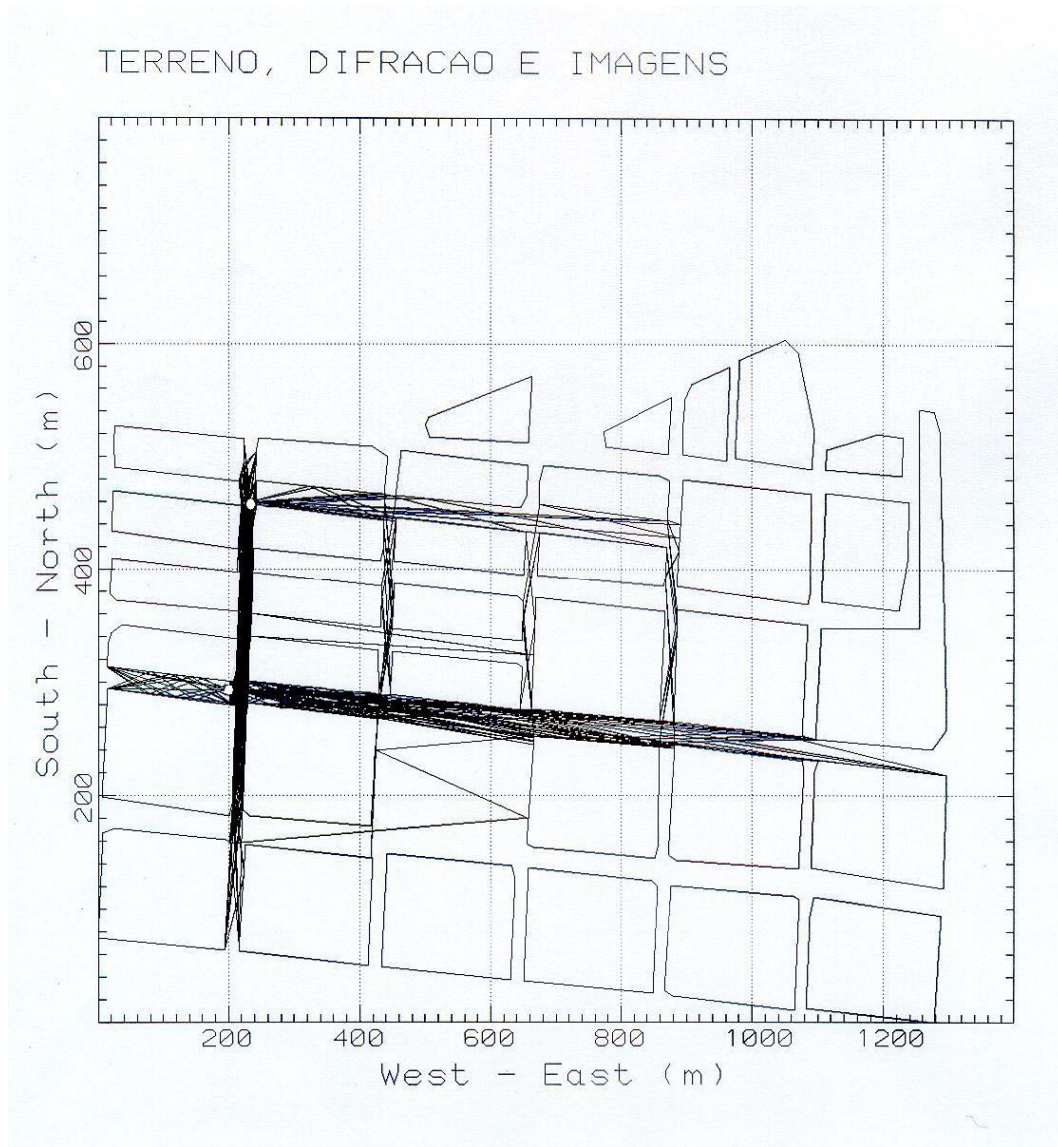


Figura 3.1: Raios que partem do transmissor e atingem receptor em NLOS em Ipanema.

TERRENO, DIFRAÇÃO E IMAGENS

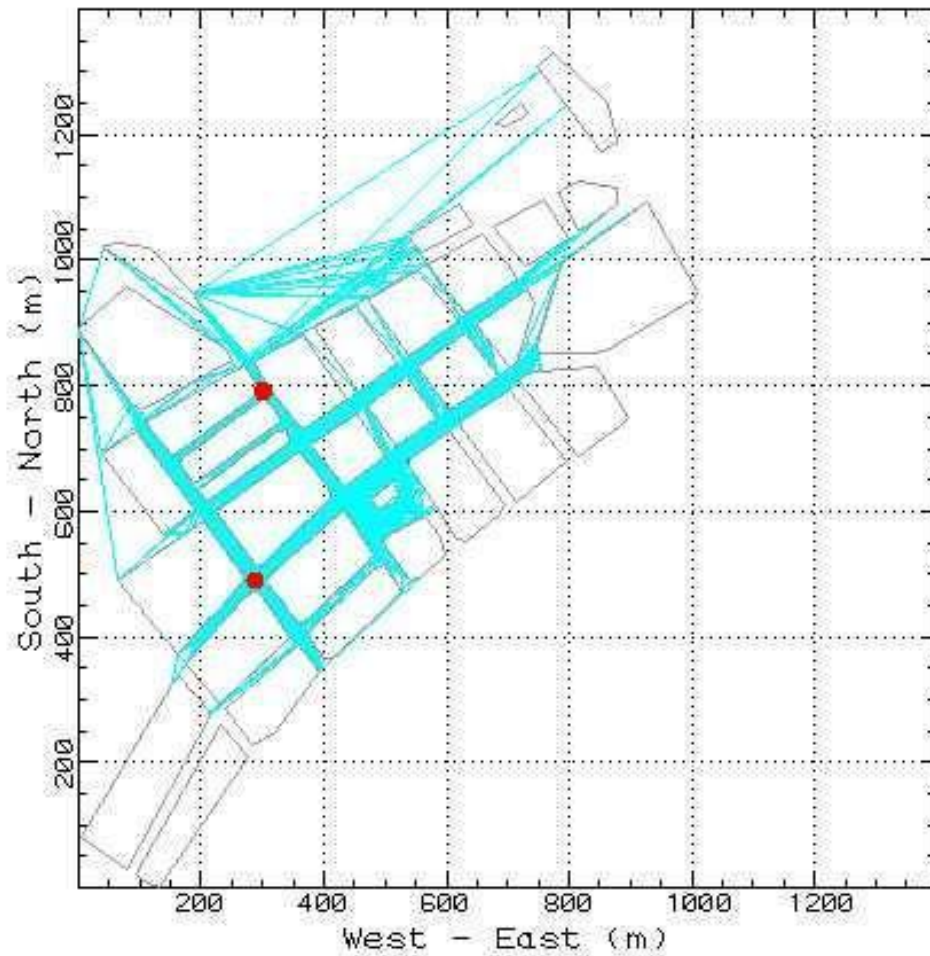


Figura 3.2: Raios que partem do transmissor e atingem receptor em NLOS em Copacabana.

A amplitude de cada raio é proporcional ao produto do inverso do seu comprimento total, de acordo com a fórmula de Friis, pelos diversos coeficientes associados às reflexões e/ou difrações sofridas ao longo de seu percurso entre a antena transmissora e o ponto de observação. O modelo calcula estes coeficientes individualmente, considerando os ângulos de incidência, a polarização (vertical ou horizontal) e os atributos locais supostos para as faces laterais das coberturas convexas.

Os coeficientes de reflexão são calculados a partir das fórmulas de Fresnel, modificadas para considerar os efeitos da rugosidade das paredes das edificações, conforme desenvolvido no capítulo 2.

Os coeficientes de difração são calculados a partir dos resultados da Teoria Uniforme da Difração [2], de acordo com as expressões desenvolvidas por Luebbers [7] e apresentadas no capítulo 2.

As sub-rotinas que implementam o cálculo destes coeficientes foram adaptadas a partir das apresentadas por Stutzman e Thiele [6].

Em seguida, o valor eficaz $\langle E_\rho \rangle$ da amplitude do campo elétrico num dado ponto de observação P é determinado pela soma em potência das contribuições individuais E_n ($n = 1, \dots, N$) das diversas componentes de multipercursos existentes entre o transmissor e o ponto considerado.

$$\langle E_\rho \rangle = \sqrt{\sum_{n=1}^N E_n^2} \quad (3.1)$$

O retardo τ_n de cada raio é proporcional ao seu comprimento, sendo geralmente apresentado em relação a uma referência pré-fixada (por exemplo, em relação ao menor retardo obtido no ponto de observação ou na área de interesse). A resposta média ao impulso do canal no ponto de observação P pode, então, ser representada analiticamente pela expressão:

$$\langle h_p(t) \rangle = \sum_{n=1}^N E_n \delta(t - \tau_n) \quad (3.2)$$

A figura 3.3 abaixo representa graficamente, na forma de um diagrama de potência e retardo, a resposta ao impulso do canal correspondente a uma determinada geometria especificada na região de Copacabana. No caso, ambos os parâmetros são apresentados em relação ao do raio direto entre a antena transmissora e o ponto de observação.

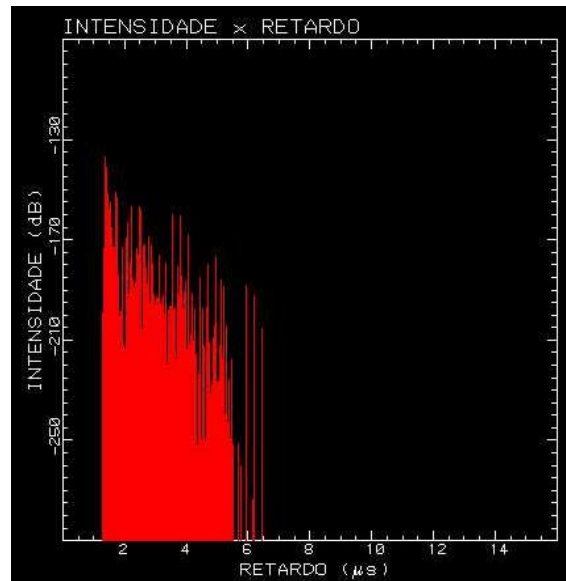


Figura 3.3: Diagrama de Potência versus Retardo em Copacabana.

As informações contidas na figura 3.1 são resumidas pelos parâmetros retardo médio $\langle \tau \rangle$ e *rms delay spread* σ_τ caracterizados pelas expressões [12]:

$$\langle \tau \rangle = \frac{\sum_{n=1}^N E_n^2 \tau_n}{\sum_{n=1}^N E_n^2} \quad (3.3)$$

e

$$\sigma_\tau = \sqrt{\langle \tau^2 \rangle - \langle \tau \rangle^2} \quad (3.4)$$

onde

$$\langle \tau^2 \rangle = \frac{\sum_{n=1}^N E_n^2 \tau_n^2}{\sum_{n=1}^N E_n^2} \quad (3.5)$$

Nas expressões acima, tanto a intensidade quanto o retardo de cada raio são relativos à primeira componente detectada.