

4.

Modelos Adotados para o Simulador

4.1.

Modelo de Tráfego para Voz

O modelo de tráfego adotado na implementação do simulador foi baseado em [14] e [15]. Este modelo considera que os instantes de chegada de novas chamadas são modelados por um processo estacionário de *Poisson*. Por estacionário, entende-se que a taxa de chegadas λ é constante ao longo do tempo. Isto permite que a curva de demanda ao longo do dia, caracterizada por picos nos horários comerciais e vales nos períodos noturnos e finais de semana, possa ser analisada separadamente em casos específicos no simulador, através da variação de λ , que é um parâmetro de entrada da ferramenta de simulação.

Em um processo estacionário de *Poisson*, os intervalos entre chegadas ($A_i = t_i - t_{i-1}$) são exponencialmente distribuídos, com média igual a $\frac{1}{\lambda}$, apresentando a seguinte função densidade de probabilidade (f.d.p.):

$$p(A_i) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot A_i} \quad (5)$$

A partir da equação (5), o instante de chegada do novo usuário pode ser determinado em função de uma variável aleatória (u) uniformemente distribuída no intervalo contínuo entre 0 e 1, resultando na seguinte equação:

$$t_i = t_{i-1} - \frac{1}{\lambda} \cdot \ln(u) \quad (6)$$

onde:

t_{i-1} é o instante de chegada do usuário anterior;

O número de novos usuários permitidos é determinado pelo número de intervalos entre chegadas (A_i) contidos no intervalo de tempo correspondente a

cada iteração. O tempo de cada iteração é um dado de entrada do simulador determinado pelo usuário da ferramenta no início da simulação.

A duração da ligação (Δt_i) também é exponencialmente distribuída com média (β), apresentando a seguinte f.d.p.:

$$p(\Delta t_i) = \frac{1}{\beta} \cdot e^{-\frac{\Delta t_i}{\beta}} \quad (7)$$

A duração da ligação também pode ser escrita em função de uma variável aleatória (u) uniformemente distribuída no intervalo 0 e 1.

$$\Delta t_i = -\beta \cdot \ln(u) \quad (8)$$

O instante de término da ligação é determinado somando-se o instante de chegada do usuário ao sistema à duração da ligação.

Sabendo-se que em um ambiente celular real o tráfego existente é altamente heterogêneo, optou-se por permitir, na ferramenta de simulação, a diferenciação das taxas de originação e do tempo médio de duração de chamadas para cada estação rádio-base existente. Isto nos permite verificar o comportamento do sistema em diferentes condições de uso.

4.2. Modelo de Tráfego para Dados

Foram utilizados dois modelos de tráfego de dados para a implementação do simulador. Em um primeiro momento, utilizou-se o modelo apresentado em 4.1, levando em consideração que o HSCSD provê serviços típicos de comutação por circuito, mas com taxas de originação e tempo médio de duração das chamadas diferenciados para voz e dados. Posteriormente, adaptou-se o modelo apresentado em 4.1, implementando-se a distribuição de *Pareto* [16] para modelar o tamanho dos dados a serem gerados e transmitidos. A duração da chamada passa ser determinada, de agora em diante, pelo tamanho e pela taxa de transferência dos dados transmitidos sobre a interface aérea do GSM.

A função de distribuição de probabilidade de *Pareto* é dada por:

$$F(x) = \text{Prob.}(t \leq x) = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^\alpha, \quad x \geq k \quad (9)$$

e função densidade de probabilidade por:

$$f_x(x) = \begin{cases} \frac{\alpha k^\alpha}{x^{\alpha+1}}, & x \geq k \\ 0, & x < k \end{cases} \quad (10)$$

onde:

α = parâmetro que difere a forma da distribuição;

k = parâmetro de escala.

A média é dada por:

$$\text{Média} = \frac{k \times \alpha}{\alpha - 1} \quad (11)$$

e a variância por:

$$\text{Variância} = \frac{k^2 \times \alpha}{(\alpha - 2) \times (\alpha - 1)^2} \quad (12)$$

4.3. Modelo de Mobilidade

Um modelo de mobilidade possui o objetivo de descrever o deslocamento de um ou de vários usuários em um sistema. Para a implementação do simulador utilizou-se o modelo proposto em [17] e [18], onde o deslocamento de usuários é regido por um itinerário pré-determinado ou aleatório, em um conjunto de ruas ortogonais. O modelo adotado é válido tanto para usuários de voz quanto para usuários de dados.

Devido a infinidade de parâmetros que podem ser considerados em um modelo de mobilidade, foi levado em conta somente os parâmetros mais

importantes apresentados em [17], minimizando assim o esforço computacional requisitado pelo sistema. Estes parâmetros são:

- **Grupos Populacionais:** A população de uma área em estudo pode ser dividida em grupos diferentes, de acordo com suas características de mobilidade. Para o simulador foram implementados três grupos populacionais distintos: o grupo de usuários pedestres, o grupo de usuários veiculares e o grupo de usuários estáticos.
- **Regiões MAP (Movement Attraction Points - Pontos de Atração de Movimento):** Representam localidades pré-determinadas que atraem o movimento dos grupos populacionais, que nestas permanecem por um determinado período de tempo, gerando uma demanda de tráfego específica. Para o simulador foram criados três tipos de regiões MAP diferentes: Residencial, Comercial e *Shoppings/Estações*.
- **Zonas Temporais:** Existem períodos do dia em que os movimentos de deslocamento dos usuários de uma região de atração para outra são bem definidos, como por exemplo, o deslocamento do trabalho para casa no período diurno e vice-versa no período noturno. Estes intervalos são denominados zonas temporais e ajudam a determinar o comportamento dos usuários em horários específicos. Para o simulador existem duas zonas temporais distintas - a diurna (dia) e noturna (noite) - que influenciam no comportamento das Regiões MAP.
- **Zonas Geográficas:** Uma determinada área geográfica pode ser dividida em zonas para que seja melhor caracterizada, levando-se em consideração a sua densidade populacional, sua morfologia, relevo e outras características.

No modelo de mobilidade adotado, a área geográfica a ser coberta pelo sistema celular é apresentada como sendo um aglomerado de blocos de formato retangular, dispostos lado a lado e separados por ruas ou avenidas. Dentro de cada bloco encontra-se um conjunto de edifícios residenciais ou comerciais ou uma área de composta por um shopping e/ou estações de metrô e/ou ônibus, caracterizando o tipo do bloco. Esta configuração de ruas e blocos é conhecida na

literatura como *Manhattan Grid* [18] e sua unidade fundamental é um bloco de prédios, representado pela figura 14.

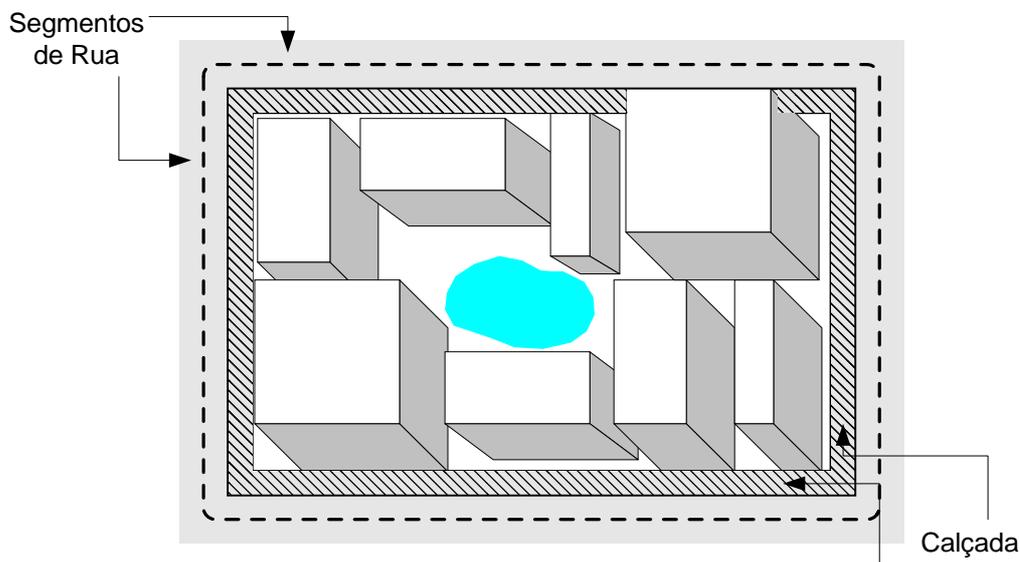


Figura 14 - Unidade Fundamental do Modelo Manhattan Grid

A mobilidade dos usuários dentro da área de cobertura celular é decorrente do grupo populacional ao qual os mesmos estão associados. Isto é, se o usuário for veicular, o deslocamento ocorre sobre ruas e avenidas; se for pedestre, o deslocamento se dá sobre as calçadas; e se for estático, não existe deslocamento, só podendo originar e receber chamadas de dentro de cada bloco ou na calçada.

Para cada grupo populacional também são associadas uma velocidade de deslocamento e a distribuição espacial no sistema. Os usuários veiculares são distribuídos uniformemente sobre os segmentos de ruas ou avenidas, com velocidade seguindo uma distribuição Gaussiana truncada entre 10 e 80 km/h e variância igual a 30% da média, que é calculada pela expressão (13).

$$V_s = V_f \times \left(1 - \frac{D}{D_{jam}} \right) \quad (13)$$

onde:

V_s = a média da velocidade dos carros em um segmento de rua (Km/h);

V_f = a velocidade livre de congestionamento (60 Km/h);

D = a densidade linear de carros por segmento de rua (carros/rua);

D_{jam} = a densidade linear de carros por segmento de rua, em congestionamento (carros/rua).

Os usuários pedestres são distribuídos uniformemente nas calçadas, com velocidade seguindo uma distribuição Gaussiana truncada entre 1 e 8 km/h e com valor médio em 5 Km/h e $1,5 \text{ Km}^2/\text{h}^2$ de variância. Os usuários estáticos são distribuídos uniformemente nos prédios e calçadas.

As zonas temporais e o tipo do bloco são os responsáveis pelo sentido de deslocamento dos usuários na área a ser estudada. Cada tipo de bloco torna-se uma região *MAP* ou não, dependendo da zona temporal escolhida. Os blocos comerciais são caracterizados como regiões *MAP* durante o dia e regiões não-*MAP* durante a noite. Os blocos de *shoppings* ou estações são regiões *MAP*, independentemente da zona temporal. Já os blocos residenciais são caracterizados como regiões não-*MAP* durante o dia e como regiões *MAP* durante a noite. A tabela 5 mostra o comportamento das regiões de atração, com relação ao tipo de bloco e a zona temporal escolhida.

Zona Temporal	Tipo de Bloco	Região de Atração
Dia	Bloco Residencial	Região não- <i>MAP</i>
Noite	Bloco Residencial	Região <i>MAP</i>
Dia	Bloco Comercial	Região <i>MAP</i>
Noite	Bloco Comercial	Região não- <i>MAP</i>
Dia	Bloco de Shopping/Estação	Região <i>MAP</i>
Noite	Bloco de Shopping/Estação	Região <i>MAP</i>

Tabela 5 – Comportamento das regiões de atração com relação a escolha do tipo de bloco e da zona temporal

A mudança de direção no deslocamento só é permitida nas regiões de decisão, que são os cruzamentos de ruas, para o caso de usuários veiculares, e os cruzamentos das calçadas, para o caso de usuários pedestres, conforme mostrado pela figura 15.

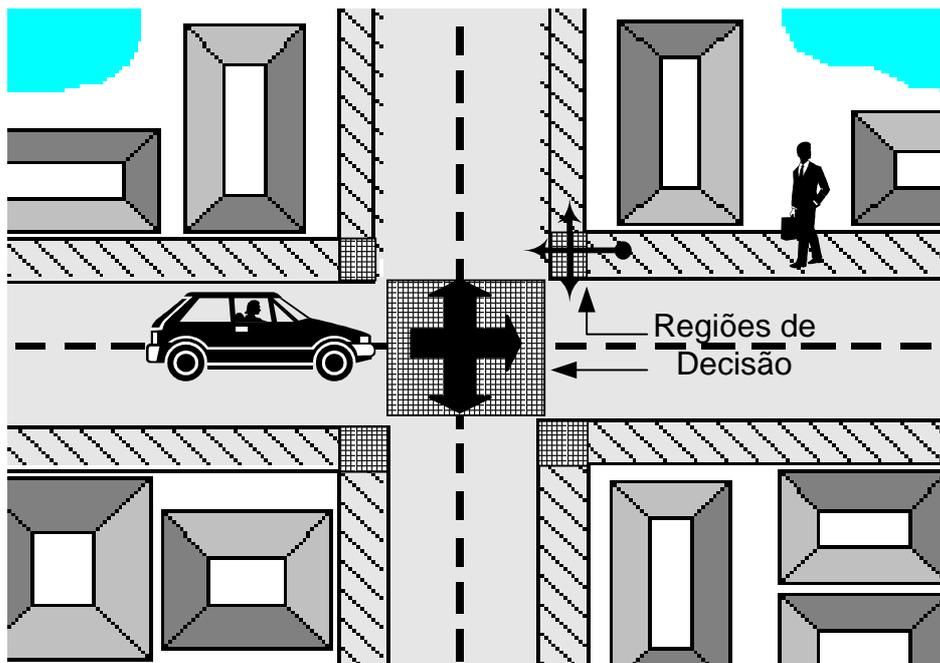


Figura 15 - Regiões de Decisão para a Mudança de Direção do Usuário Pedestre e Veicular

Estando o usuário pedestre ou veicular na região de decisão, o simulador determinará a melhor direção a ser seguida, de acordo com o ângulo entre a coordenada atual do usuário e a coordenada de destino, garantindo que o usuário seguirá a melhor rota de acesso até a região *MAP*, que é o seu destino final. Além disso, uma nova velocidade é atribuída ao usuário, garantindo que este não apresente velocidade constante durante seu percurso até a região *MAP*.

O simulador também permite que a mudança de direção do usuário seja aleatória, desconsiderando as regiões *MAP* e garantindo uma distribuição uniforme de usuários pelo sistema. Durante o processo de entrada de dados no simulador, o usuário do mesmo deverá escolher entre uma mobilidade aleatória ou uma não-aleatória. Caso a opção de mobilidade aleatória seja escolhida, o simulador levará em conta os seguintes valores de probabilidades para efetuar a decisão de mudança de direção:

- 50% para manter a mesma direção de deslocamento do usuário;
- 25% para mudar de direção para a esquerda;
- 25% para mudar de direção para a direita.

4.4. Modelo de Propagação

Geralmente as transmissões rádio em um sistema celular acontecem sobre terrenos irregulares e estas irregularidades contribuem para a degradação do sinal durante o percurso até o seu destino. As irregularidades podem variar da simples curvatura da Terra até a presença de montanhas e outros obstáculos. Em ambientes urbanos, além da morfologia do terreno, também se leva em consideração a presença de vegetação, de edificações e outras construções e imperfeições do terreno, que acarretam uma maior degradação do sinal e multipercursos do mesmo.

Existem vários modelos de propagação para ambientes urbanos, cada um sendo específico para um tipo de área, densidade urbana e faixa de frequência utilizada na transmissão. A maioria destes são baseados na interpretação de medidas de dados obtidas em uma área de serviço. Como o escopo desta dissertação não é detalhar os vários modelos de propagação existentes, nos ateremos somente ao modelo proposto por *Okumura* em [20] e [21], e seus variantes, como o de *Hata*, *Bertoni* e *Ikegami*, também apresentados em [20], [21] e [22], que podem ser utilizados em sistemas GSM.

Para o desenvolvimento do simulador foi utilizado o modelo de propagação proposto por *Walfisch-Ikegami*, explicado em 4.4.4.

4.4.1. O Modelo de *Okumura*

O modelo de *Okumura* é um dos mais utilizados para a predição do sinal em áreas urbanas sendo utilizado para frequências entre 100 a 1920 MHz, distâncias de 1 a 100 Km e para altura das antenas das estações rádio-base variando de 30 a 1000 metros. A base do modelo é a perda do sinal em espaço livre.

Okumura desenvolveu um conjunto de curvas que apresentavam a atenuação relativa do sinal à perda no espaço livre. Estas curvas foram obtidas de medidas reais em uma área urbana com um terreno quase liso, com altura média

das antenas nas estações rádio-base em torno de 200 metros e nos terminais móveis em torno de 3 metros. Foram utilizadas antenas *omnidirecionais* e as curvas foram plotadas em função de frequências em torno de 100 a 1920 MHz em.

Vários fatores de correção foram adicionados aos resultados obtidos pelas curvas, entre eles, o tipo de terreno, a ondulação do mesmo e a presença de terra e água sobre a mesma superfície.

Uma das desvantagens deste modelo é ser baseado completamente em dados medidos, não provendo nenhuma expressão analítica. Esta desvantagem levou *Hata* a propor modificações no modelo de *Okumura*, desenvolvendo assim um novo modelo com formulação empírica.

4.4.2. O Modelo de *Hata*

Para tornar o modelo de *Okumura* aplicável, *Hata* estabeleceu fórmulas matemáticas que descrevem as informações gráficas das curvas obtidas por *Okumura*. Esta formulação é limitada por alguns parâmetros e aplicável somente a terrenos quase lisos. Suas limitações ficam por conta da frequência, que deve estar entre 150 a 1500 MHz, da altura das estações rádio-base, que devem estar entre 30 a 200 metros.

Este modelo é utilizado em sistemas celulares que apresentam raios de células superiores a 1 Km, como por exemplo, o sistema IS-136 descrito em [19], mas não pode ser utilizado em Sistemas Móveis Pessoais (SMP), onde a frequência de operação é superior a 1800 MHz.

Para tornar a utilização do modelo de *Hata* no SMP possível, o programa *Euro-COST (European Co-operations Projects of Scientific and Technical Research – Co-operação Européia para Projetos de Pesquisa Científica e Técnica)* promoveu uma extensão do modelo para frequências até 2 GHz, denominado posteriormente de modelo COST-231. As restrições para este modelo são:

- Frequência de operação: de 1500 MHz a 2000 MHz;
- Altura da antena na estação rádio-base: de 30 a 200 metros;
- Altura da antena do terminal móvel: de 1 a 10 metros;

- Distância entre o terminal móvel e a estação rádio-base: de 1 a 20 Km;
- Utilização somente em ambientes macrocelulares;
- As antenas das estações rádio-base deveriam ser localizadas acima do topo dos prédios.

Devido a intenção de desenvolver uma versão para o simulador que contemple ambientes microcelulares (que não satisfazem as restrições acima descritas), o modelo COST-231 não foi utilizado nesta primeira implementação, sendo deixado como sugestão de trabalhos futuros.

4.4.3. O Modelo de *Walfisch-Bertoni*

O modelo *Okumura-Hata* considera somente a propagação do sinal rádio por terrenos quase lisos. Já *Walfisch e Bertoni* desenvolveram um modelo teórico baseado na geometria do percurso do sinal, mas não levam em consideração a altura dos prédios e a largura das ruas como obstáculos à propagação do sinal rádio. Além disso, desconsideram as reflexões, difrações e a perda de sinal pela penetração nos prédios. A figura 16 ilustra este modelo.

No desenvolvimento do modelo, foram assumidas as seguintes condições:

- Todos os prédios possuem a mesma altura;
- As antenas das estações rádio-base são maiores que a altura média dos prédios;
- A propagação do sinal é perpendicular aos prédios;
- É utilizada polarização vertical nas antenas.

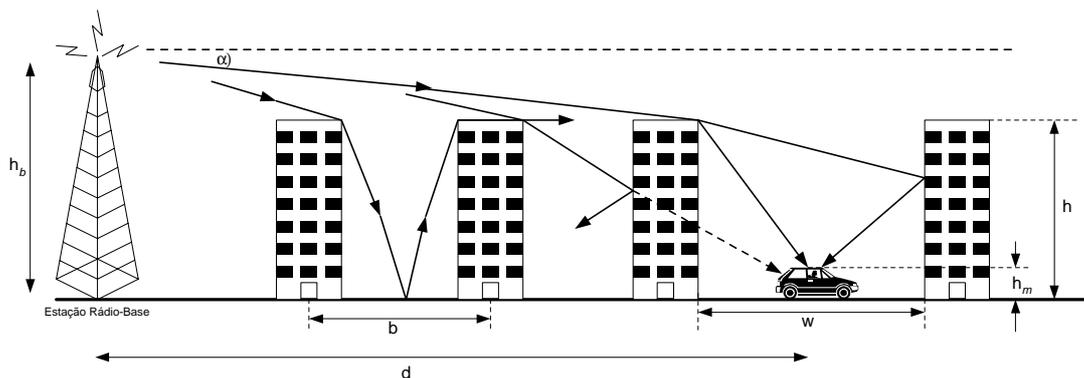


Figura 16 – Geometria do Percurso do Sinal Proposto pelo Modelo de *Walfisch-Bertoni*

Este modelo também não foi adotado no simulador proposto por não admitir ambientes microcelulares, onde as antenas das estações rádio-base se encontram geralmente abaixo da altura média dos prédios.

4.4.4.

O Modelo de *Walfisch-Ikegami* (COST-*Walfisch-Ikegami*)

Durante o projeto COST-231 foi proposta a combinação do modelo de *Walfisch-Bertoni* com o modelo de Ikegami [22]. A intenção é prover uma melhor estimativa da perda de propagação com a inclusão dos fatores desprezados no modelo descrito em 4.4.3.

Este novo modelo é aplicável a terrenos planos e urbanos, compostos por prédios com alturas similares, dispostos em fileiras e separados por ruas, se assemelhando à configuração *Manhattan Grid* descrita em 4.3. A figura 16 também pode ser utilizada para descrever este modelo.

As antenas das estações rádio-base podem irradiar acima ou abaixo da altura média dos prédios, não necessitando possuir visada direta com o terminal móvel situado ao nível da rua. O sinal recebido pelos terminais móveis pode ter componentes gerados pela reflexão e difração dos sinais nos prédios. Neste caso, a perda de propagação é calculada por:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{NLOS} = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \quad , \text{ para } L_{rts} + L_{msd} \geq 0 \\ \text{ou} \\ L_{NLOS} = L_0 \quad , \text{ para } L_{rts} + L_{msd} < 0 \end{array} \right. \quad (14)$$

onde:

L_0 = Perda de propagação no espaço livre [dB];

L_{rts} = Perda por difração e espalhamento [dB];

L_{msd} = Perda por multipercurso [dB].

A perda de propagação no espaço livre é dada por:

$$L_0 = 32,4 + 20 \log d + 20 \log f + L_{ORI} \quad (15)$$

onde L_{ORI} é uma perda adicional referente ao ângulo formado entre o terminal móvel e o enlace de comunicação. Essa perda é dada por:

$$L_{ORI} = \begin{cases} -10 + 0,35\varphi & , \text{para } 0 \leq \varphi \leq 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35^\circ) & , \text{para } 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ \\ 4 - 0,114(\varphi - 55^\circ) & , \text{para } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (16)$$

A figura 17 demonstra como é determinado o ângulo entre o terminal móvel e o enlace do sinal chegado.

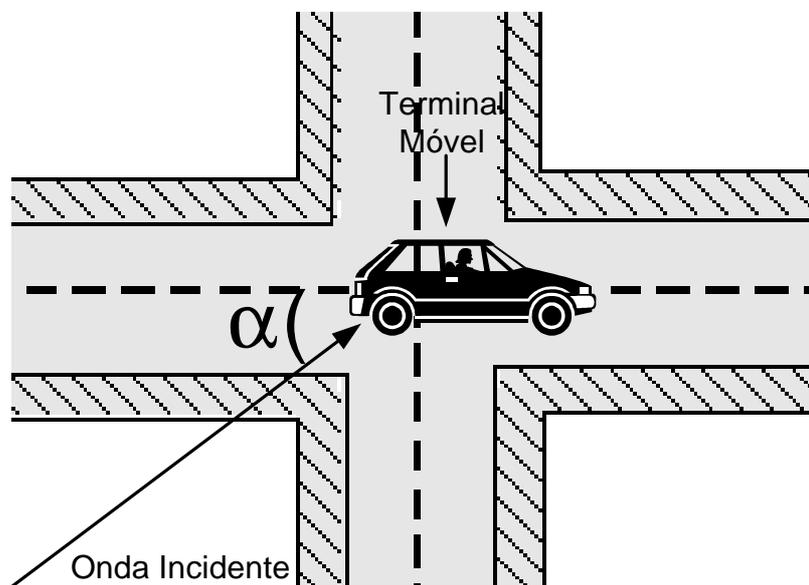


Figura 17 - Ângulo entre o terminal móvel e o sinal do enlace direto

A perda proveniente da difração e espalhamento é dada por:

$$L_{rts} = -16 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h_{móvel} \quad (17)$$

onde:

$$\Delta h_{m\acute{o}vel} = h_{roof} - h_{m\acute{o}vel} \quad (18)$$

A perda devido ao multipercurso é dada pela expressão 19, que considera correções para o caso de antenas localizadas abaixo da altura média dos prédios (expressões 20 a 22), bem como fatores que irão depender do tipo de cidade (expressões 23 e 24).

$$L_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d \log d + K_f \log d + K_f \log f - 9 \log b \quad (19)$$

onde:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_{base}) & , \text{para } h_{base} > h_{roof} \\ 0 & , \text{para } h_{base} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (20)$$

$$K_a = \begin{cases} 54 & , \text{para } h_{base} > h_{roof} \\ 54 - 0,8\Delta h_{base} & , \text{para } d \geq 500m \text{ e } h_{base} \leq h_{roof} \\ 54 - 1,6\Delta h_{base} \times d & , \text{para } d < 500m \text{ e } h_{base} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (21)$$

$$K_d = \begin{cases} 18 & , \text{para } h_{base} > h_{roof} \\ 18 - 15 \times \frac{\Delta h_{base}}{h_{roof}} & , \text{para } h_{base} > h_{roof} \end{cases} \quad (22)$$

Para cidades pequenas e centros suburbanos com baixa densidade de árvores:

$$k_f = -4 + 0,7 \times \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (23)$$

Para centros metropolitanos:

$$k_f = -4 + 1,5 \times \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (24)$$

Em contrapartida, se houver visada direta, a perda de propagação resume-se a equação dada por:

$$L_{LOS} = 42,6 + 26 \log d + 20 \log f \quad (25)$$

Este modelo também apresenta algumas restrições. Elas são:

- Freqüência: entre 800 MHz e 2 GHz;
- Altura das estações rádio-base: de 4 a 50 metros;
- Altura da antena nos terminais móveis: de 1 a 3 metros;
- Distância entre o terminal móvel e a estação rádio-base: de 20 a 5000 metros.