

## CAPÍTULO 3

### ASPECTOS DE PROPAGAÇÃO EM AMBIENTE MÓVEL CELULAR

O projeto de um sistema de comunicações móvel celular têm a finalidade de prover acesso ao serviço em toda a área proposta ao usuário, e isto utilizando o menor número possível de ERBs. Mas nem sempre é possível uma cobertura de 100% da área proposta. Assim, o projeto deve considerar a cobertura adequada de regiões com tráfego expressivo e ser flexível nas regiões de pouco tráfego.

O primeiro passo para o projeto de cobertura é definir que área geográfica onde acesso ao serviço será possível. Quanto maior a área de cobertura, maior a mobilidade para os usuários do sistema, conseqüentemente será maior também a quantidade de ERBs a serem utilizadas. Portanto, um estudo detalhado da área a ser coberta nos aspectos de topografia e tráfego é fundamental, como já foi dito anteriormente, para a elaboração de um projeto eficaz e economicamente viável.

Com relação a propagação do sinal de rádio móvel, o terreno pode influenciar sob três aspectos:

- Obstrução: Obstáculos como montanhas, prédios, árvores ou a própria superfície terrestre podem bloquear parcialmente o feixe causando a atenuação por obstrução.
- Reflexão: Regiões razoavelmente planas como mares, lagos e planícies podem refletir o feixe de ondas com oposição de fase em relação ao sinal direto, causando a atenuação por interferência.
- — Gumes como o cume de montanhas, canto prédios, ou a própria pessoa pode desviar parcialmente o feixe causando a difração do sinal.

A cobertura do sinal pode ser simulada através de modelos de predição que serão apresentados a seguir. Pela necessidade de conhecimento do tipo de terreno no qual o sinal vai ser transmitido, no estudo de propagação do sinal de rádio móvel, considera-se a área de serviço sob as seguintes condições:

<b>Estruturas Artificiais</b>	<b>Terreno</b>
<b>Em área aberta</b>	<b>Sobre terreno plano</b>
<b>Em área suburbana</b>	<b>Sobre terreno montanhoso</b>
<b>Em área urbana</b>	<b>Sobre água</b>
<b>---</b>	<b>Através de folhagem</b>

*Tabela 1: Condições de Propagação*

A localização de uma ERB baseado na predição de cobertura tem índices de acerto maiores que 50 % dependendo do algoritmo de predição. Os planos de urbanização, as áreas sob litígio, dentre outros fatores, impossibilitam o posicionamento de algumas ERBs. Neste caso deve-se escolher um novo local e realizar novos estudos de predição de cobertura.

### **1 Desvanecimento ( Fading )**

Os modelos de predição de cobertura fornecem o valor médio da potência recebida em função dos parâmetros que mais fortemente influenciam a propagação do sinal rádio móvel. Contudo, uma infinidade de fatores existem que pode provocar o desvio instantâneo do sinal com relação ao seu valor médio ( mobilidade do receptor, mudanças de ambientes, etc.). Para se levar em conta as variações provocadas por fenômenos aleatórios, o sinal de rádio móvel é tratado de forma estatística. As variações aleatórias caracterizam o fenômeno de desvanecimento.

A variação da envoltória do sinal recebido em um ambiente móvel celular segue uma lei aleatória com uma distribuição Rayleigh. Uma abordagem comum na descrição do desvanecimento dos sinais de rádio durante sua propagação é:

$$S(x) = M(x) + R(x) \quad \text{Eq.1}$$

onde:

$S(x)$  = sinal rádio móvel com desvanecimento,

$M(x)$  = desvanecimento de longo prazo (média do sinal),

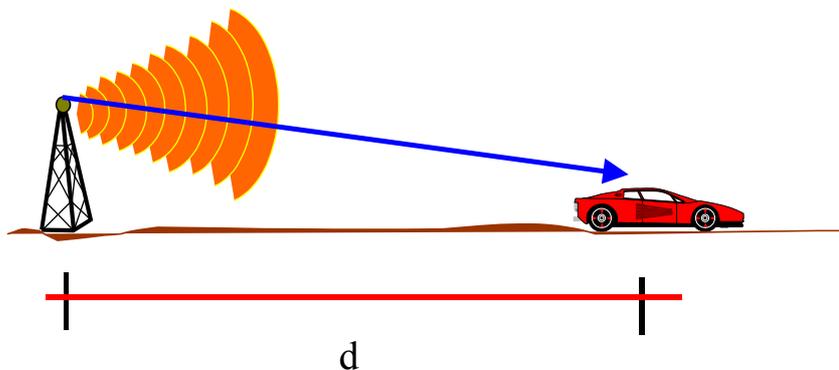
$R(x)$  = desvanecimento de curto prazo.

Logo, existem dois tipos de desvanecimento:

1. O de longo prazo ou lento
2. O de curto prazo ou rápido

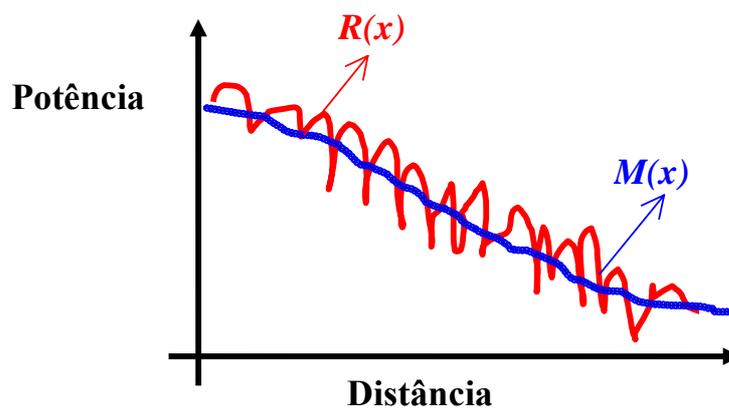
O desvanecimento de longo prazo relaciona-se com a variação da média global do sinal devido ao sombreamento causado por obstáculos, ocorrendo em intervalos de tempo de dezenas de comprimento de onda (para 900 MHz, estes intervalos são da ordem de vários, 8-10, metros). O desvanecimento de curto prazo relaciona-se com a média local do sinal devido a propagação por múltiplos percursos, ocorrendo em intervalos de aproximadamente meio comprimento de onda ( para 900 MHz, estes intervalos seriam da ordem de 17 cm).

O desvanecimento de longo prazo está relacionada com a atenuação média do sinal com a distância entre transmissor e receptor.



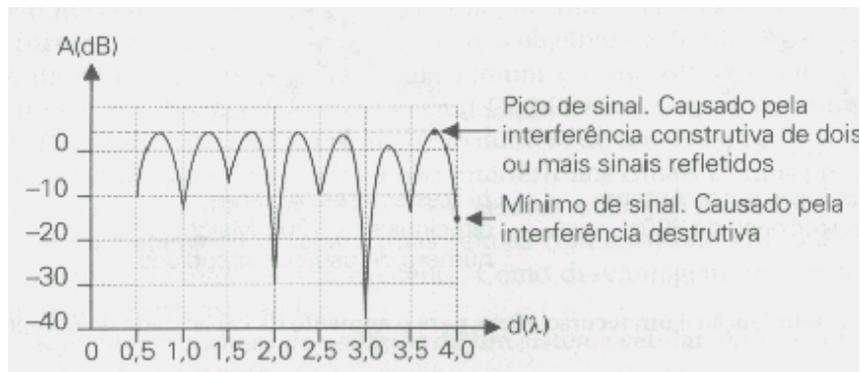
**Figura 2: Desvanecimento de longo prazo**

Portanto, o sinal rádio móvel em um sistema celular pode ser considerado como a soma de um sinal que apresenta desvanecimento lento, em função da distância, e um sinal que apresenta desvanecimento rápido, em função dos multipercursos e obstruções.



**Figura 3 – Caracterização de um sinal rádio móvel com desvanecimento.**

Devido à grande variabilidade das estruturas encontradas em canais de rádio móvel terrestres, a uma mesma distância de um transmissor a potência recebida pode ser variável. Assim, normalmente o telefone celular não recebe os sinais diretamente da antena da ERB, mas sim refletidos, ao se misturarem, resultam em um sinal de intensidade variável, provocando o aparecimento de regiões, no espaço, onde o sinal sofre grandes atenuação e outras, onde existe um pequeno reforço. A atenuação acontece nos pontos em que sinais refletidos se interferem de forma destrutiva. O ganho acontece onde os sinais estão em fase.



**Figura 4 – Variação da intensidade do sinal de RF no meio urbano.**

Na Fig. 4, pode-se notar que os pontos de mínima e máxima intensidade repetem-se a intervalos de meia onda ( $\lambda/2$ ). No caso do telefone celular, isso equivale a cerca de 17,8 cm de separação em 800 MHz. Este tipo de desvanecimento é conhecido como Desvanecimento rápido ou ainda por desvanecimento Rayleigh, Fast Fading e Rayleigh Fading. A causa principal são as múltiplas reflexões dos sinais recebidos de várias vias que se alternam em fase e fora de fase

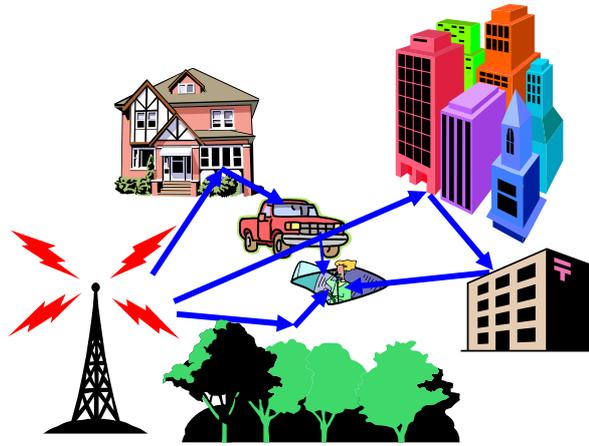
Quando grandes obstáculos, como morros e edifícios por exemplo, se situam entre o transmissor e o receptor de um sistema de comunicação móvel, aparece o efeito denominado sombreamento (*shadowing*), que pode provocar consideráveis “vales” na potência recebida e interromper instantaneamente a comunicação.

## **2 – Multipercurso e Efeito Doppler**

Os canais associados a sistemas de comunicação móvel podem ser agrupados em dois tipos: o canal via satélite e o canal terrestre.

O canal de comunicação via satélite é um canal onde predominam fortes atenuações e na maioria das vezes atrasos de propagação do sinal.

O canal de comunicação terrestre tem como características principais a propagação por multipercurso e o efeito Doppler. O sinal recebido pelo terminal móvel é composto pela soma (vetorial) dos vários sinais oriundos de diferentes caminhos entre o transmissor e o receptor. Estes multipercursos são formados pela reflexão e/ou difração e/ou espalhamento do sinal transmitido em estruturas próximas ao receptor, tais como edifícios, árvores, postes, morros, etc.



**Figura 5 : Efeitos da Propagação de Multipercurso**

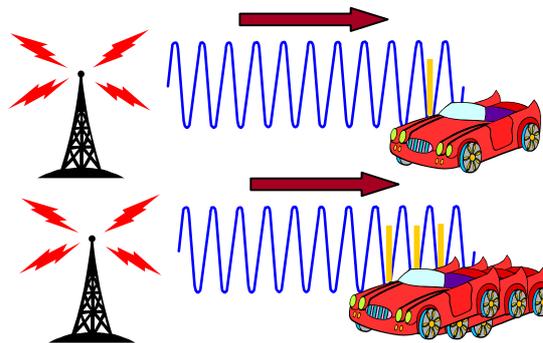
O sinal propagado pela estação base chega à estação móvel na forma de múltiplos sinais espalhados pelos diversos objetos encontrados pelo caminho, constituindo-se este fenômeno de multipercurso. A soma dos vários sinais do multipercurso pode resultar em uma interferência construtiva ou destrutiva do sinal recebido. Com o movimento, as estruturas em torno do receptor vão se modificando e, por consequência, as interferências passam constantemente da situação construtiva para a destrutiva, fazendo com que a intensidade do sinal recebido varie rapidamente.

O espalhamento destes atrasos, conhecido como *delay spread*, varia de décimos de microssegundos a alguns microssegundos, dependendo da quantidade de espalhadores encontrados no caminho. Em ambientes urbanos, o *delay spread* é da ordem de 2,5 – 5  $\mu$ s, enquanto em ambientes suburbanos, ele é da ordem de 0,2-0,5  $\mu$ s. Note que sinais chegando dentro deste intervalo são detectados como fazendo parte do mesmo sinal, ou seja, sinais dentro destes intervalos guardam uma certa correlação (grau de similaridade)

entre si. O inverso do *delay spread* define a largura de banda, conhecida como *largura de banda coerente*, dada em radianos por segundo, em que os sinais são considerados os mesmos.

A banda coerente, dada em hertz, é, assim igual a  $1/(2\pi T)$ , onde  $T$  é o *delay spread*. Sinais dentro da largura de banda coerente sofrem desvanecimento não seletivo, enquanto sinais fora da largura de banda coerente sofrem desvanecimento seletivo. No primeiro caso, todas as frequências compoendo o sinal são igualmente afetadas pelo desvanecimento. Já no segundo caso, as frequências são afetadas diferentemente pelo desvanecimento.

O Efeito Doppler é outro fenômeno fonte de distorção no sinal de rádio de sistemas móveis. Caracteriza-se pelo desvio de frequência devido à velocidade relativa entre o transmissor e o receptor. Quando o usuário se aproxima da ERB, ele capta um número maior de oscilações em um período de tempo, ou seja, o mesmo sinal é captado com uma frequência um pouco maior.



**Figura 6 : Efeito Doppler devido a propagação**

Exemplo: Um móvel se afastando com velocidade 36 km/h (10 m/s) capta um sinal na faixa de 900MHz com um desvio de 30Hz.

$$f_D = f \cdot \frac{v}{c} \quad \text{Eq. 2}$$

onde  $c$  é a velocidade de propagação,  $v$  é a velocidade de deslocamento da EM,  $f$  é a frequência do sinal transmitido e  $f_D$  é o desvio de frequência.

Quanto maior a velocidade de movimentação, mais rápidas serão as variações do sinal recebido. Esse fenômeno de alteração na intensidade do sinal recebido é chamado desvanecimento por multipercursos (desvanecimento de Rayleigh).

### **4.3 Modelos Teóricos de Propagação (Cálculo da Média do Sinal)**

A cobertura provida por uma célula depende de parâmetros pré-definidos como, potência de transmissão, altura, ganho e localização de antena. Vários outros fatores como, presença de montanhas, túneis, vegetação e prédios afetam de forma considerável a cobertura RF de uma base. Esses últimos fatores, obviamente, não são definidos pelo projetista de sistema e variam de uma região para outra.

Devido às características variáveis e complexas das diversas regiões a serem cobertas por sistemas celulares, vários modelos de predição de propagação foram e têm sido desenvolvidos, com a intenção de fornecer estimativas de atenuação de sinal nos diversos ambientes.

A perda de propagação predita pelos modelos pode ser, de forma geral, representada pela seguinte expressão:

$$L \text{ (dB)} = L_0 \text{ (dB)} - \alpha 10 \log (d/d_0) \quad \text{Eq. 3}$$

onde:

$d_0$  - é uma distância de referência

$d$  - é a distância total de cobertura

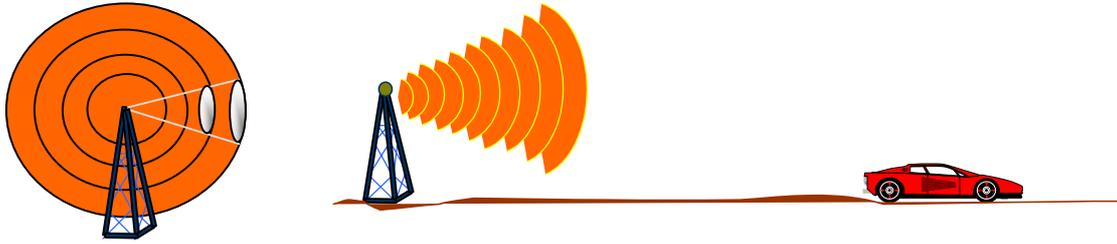
$\alpha$  - é a constante de perda de propagação (função do ambiente)

$L_0$  - é a perda na distância de referência  $d_0$

$L$  - é a perda de propagação

#### **4.3.1 Modelo do Espaço Livre:**

Uma fonte isotrópica emite ondas de rádio com a mesma intensidade em todas as direções, que carregam uma determinada quantidade de energia. Quando não há obstáculos (espaço livre), pode-se imaginar que esta energia fica distribuída uniformemente na superfície de uma esfera formada pelas frentes de onda.



**Figura 7 – Modelo de Espaço Livre**

Pode-se dizer que na propagação por espaço livre:

- Ocorre sem reflexões ou obstruções
- Espalhamento do sinal é o único mecanismo
- Energia se conserva
- Sinal degrada 20 dB/década

Como já foi mencionado a propagação de ondas eletromagnéticas no espaço livre é feita sem obstáculos. Para esta situação ideal, pode-se calcular as perdas de potência do sinal em decibéis a partir da equação:

$$L = -10\log(G_t) - 10\log(G_r) + 20\log(f) + 20\log(d) + 32,44 \quad \text{Eq. 4}$$

onde  $L$  é a perda calculada em dB,  $f$  é a frequência do sinal transmitido em MHz,  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor em Km e  $G_t$  e  $G_r$  são os ganhos das antenas transmissora e receptora respectivamente.

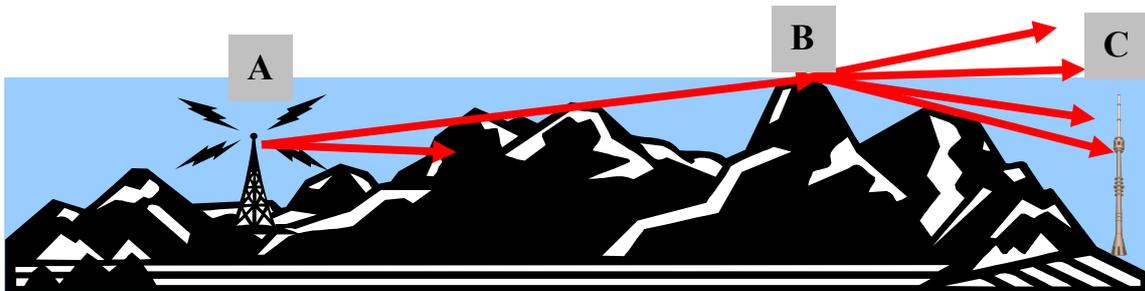
#### **4.3.2 Modelo de Perda por Difração**

Quando as ondas eletromagnéticas, em propagação encontram-se com um obstáculo ela o contorna através da extremidade superior daquele anteparo. A este fenômeno, dá-se o nome de difração e desempenha papel importante na área de radiocomunicação, em particular.

Na figura 9 sugere-se, em A, a existência de uma estação de radiodifusão, operando em onda médias e seu respectivo sistema irradiante. Em face do obstáculo (C), a recepção em B está sendo feita, por difração. Se, em A, em lugar da estação de ondas médias,

houvesse um sistema transmissor operando em microondas, talvez a recepção desses sinais, em B, não seria possível.

Explica-se que o "encurvamento" das ondas em presença de anteparos (difração por obstáculos) é menor, quando maior for a frequência de operação da fonte.

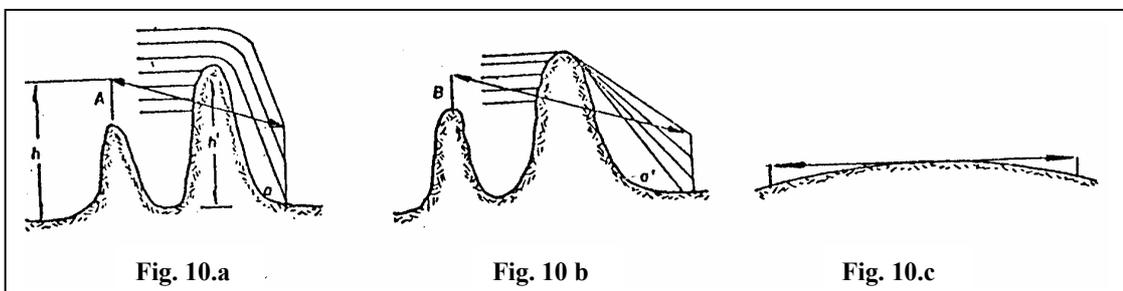


**Figura 9**

Sejam, por hipótese, duas estações retransmissoras de sinais de televisão, situados num mesmo local, tais que:

- a estação A opera no canal 2 (54 a 60 MHz) (figura 3.8.a);
- a estação B opera no canal 20 (156 a 162 MHz) (figura 3.8.b);
- as potências irradiadas pelas estações são tais, que as distâncias convenientes produzem campos idênticos;
- seus sistemas irradiantes estão afastados um do outro, em poucos metros;
- as alturas de seus respectivos centros de irradiação são iguais;
- as cotas das respectivas bases de suas torres de sustentação das antenas são iguais.

Assim, pode-se verificar, através das figuras 10.a e 10.b que a cobertura, como um todo, é menor para a estação B, face a sua frequência mais alta. A curvatura terrestre também pode concorrer para a formação de área de sombra (figura 10.c).



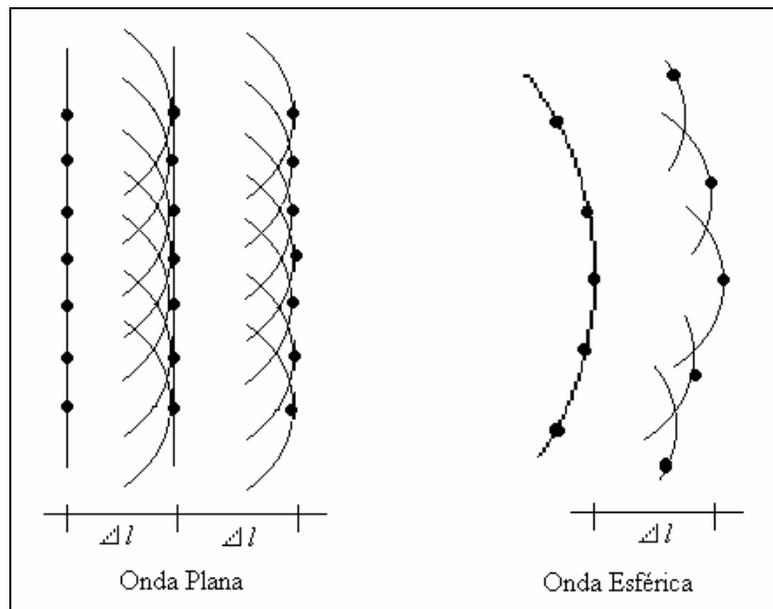
**Figura: 10**

Como foi dito anteriormente a difração ocorre quando no caminho da propagação há

obstáculos cuja superfície contém irregularidades pontiagudas. As ondas após a difração se espalham, permitindo o sinal encontrar o receptor, mesmo que não haja visada direta, por exemplo. Em altas frequências, assim como na reflexão, a difração depende da geometria do obstáculo e da amplitude, fase e polarização da onda incidente.

Devido ao efeito da difração, certas frequências de ondas de rádio podem ser transmitidas além da visada e com isso vencer a curvatura natural da Terra. Porém há uma perda considerável da amplitude.

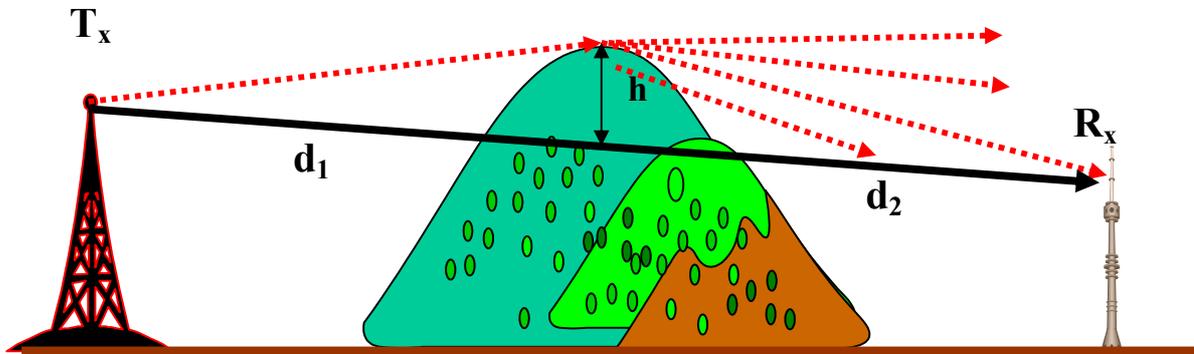
O efeito da difração pode ser explicado com o princípio de Huygens, segundo o qual cada ponto de uma onda é também a fonte de uma nova onda, secundária, e as novas frentes de onda são combinações de todas as ondas produzidas. Ver figura abaixo onde o princípio demonstra uma frente de onda plana e uma circular.



**Figura 11** - Propagação de onda plana e onda esférica segundo o princípio de Huygens.

Quando há uma obstrução entre o Transmissor e o Receptor (um prédio ou uma montanha, por exemplo), a atenuação causada pela difração pode ser calculada considerando a obstrução como sendo uma lâmina pontiaguda ou “gume-de-faca” (*knife-edge diffraction*

model), como exemplificado no desenho abaixo, Fig.12



**Figura. 12**

O campo resultante junto ao receptor é a soma vetorial de todas as ondas secundárias de Huygens geradas sobre a lâmina.

O parâmetro de difração de Fresnel-Kirchoff é dado por:

$$v = -h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda(d_1 \cdot d_2)}} \quad \text{Eq. 5}$$

onde:

$d_1$  – distância do transmissor até a obstrução (m);

$d_2$  – distância da obstrução até o receptor (m);

$h$  – altura da obstrução (ou da “lâmina”) (m);

$\lambda$  – comprimento de onda (m).

O ganho da difração é dado em dB e é uma função da integral de Fresnel, de difícil solução matemática. Assim, uma solução aproximada, apresentada por Lee em 1985, a perda por difração ( $L_{\text{dif}}$ ) é dada por:

$$\begin{aligned}
 G_d &= 0 && \text{para } 1 \leq v \\
 G_d &= -20 \log_{10}(0,5 + 0,62v) && \text{para } 0 \leq v \leq 1 \\
 G_d &= -20 \log_{10}(0,5 \exp(0,95v)) && \text{para } -1 \leq v \leq 0 \\
 G_d &= -20 \log_{10}(0,4 - \sqrt{0,1184 - (0,1v + 0,38)^2}) && \text{para } -2,4 \leq v \leq -1 \\
 G_d &= -20 \log_{10}(-0,225 / v) && \text{para } v \leq -2,4
 \end{aligned}
 \tag{Eq's. 6}$$

O problema prático é que em geral há mais do que um obstáculo no caminho da propagação. Alguns modelos simplificados podem ser adotados, porém o cálculo de vários obstáculos é um grande problema matemático, e talvez a modelagem numérica possa ser a ferramenta apropriada.

### Zonas De Fresnel - Efeito de Obstáculos

A teoria de Fresnel-Kirchoff foi desenvolvida originalmente para explicar a difração da luz em presença de anteparos ou sua propagação através de orifícios de diversos tamanhos.

Uma vez que as ondas de rádio nas faixas de VHF e UHF, no que se relaciona à propagação, comportam-se analogamente à luz, aquela teoria é usada também neste particular.

Fresnel estabeleceu que a quantidade de energia transmitida ao longo do espaço livre e recebida num determinado ponto, ao longo da trajetória, está contida no volume de um elipsóide cujo tamanho depende do comprimento da onda e da distância entre o transmissor e o receptor.

Elipse de Fresnel é a curva que delimita a região do plano, em cujos focos situam-se, respectivamente, as antenas transmissora e receptora (Tx e Rx) e, cuja seção reta é um círculo de raio R, calculado no ponto de interesse, pela seguinte expressão:

$$R_f = 547,72 \sqrt{d_1 \cdot d_2 / d \cdot f}, \tag{Eq. 7}$$

onde:

$d_1$  => distância do ponto considerado até o Tx (km);

$d_2$  => distância do ponto considerado até o Rx (km);

$d$  => distância do Tx até o Rx (km);

$f$  => frequência de operação (MHz);

$R_f$  => raio do elipsóide de fresnel no ponto de análise (metros).

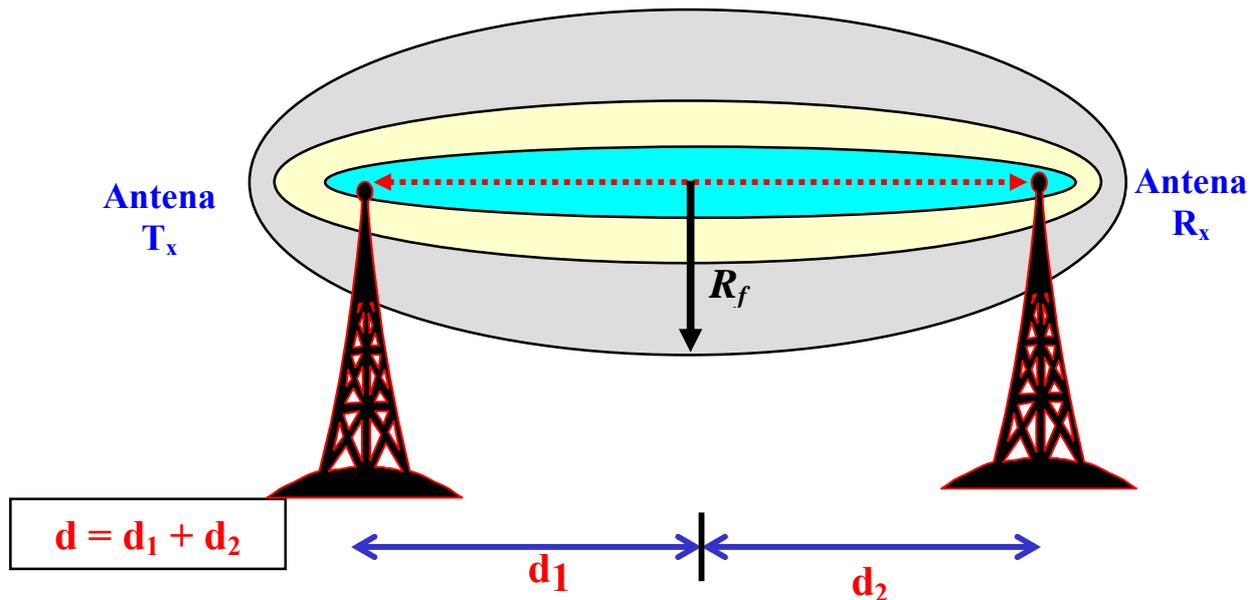
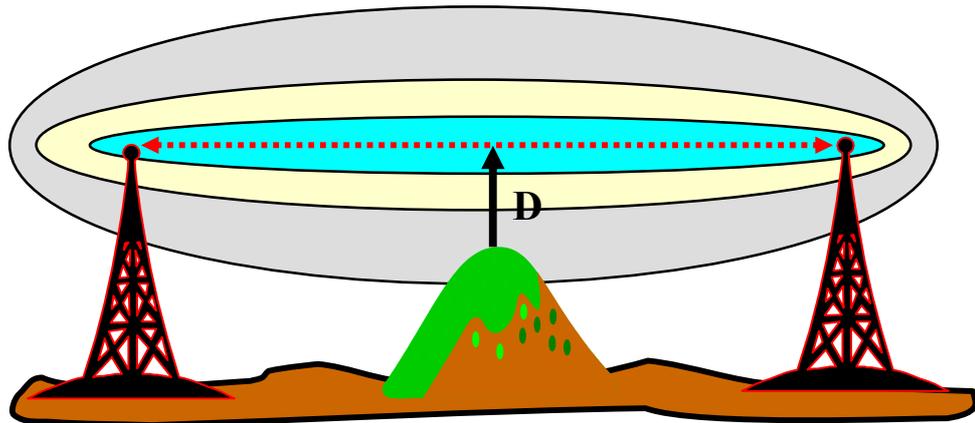


Figura. 13

Características:

- A energia carregada por uma onda eletromagnética fica espalhada por todo espaço ao redor da linha visada, em regiões chamadas zonas de Fresnel.
- As zona adjacentes estão sempre em oposição de fase, este aspecto é interessante pois as zonas de Fresnel são alternadamente construtivas e destrutivas, ou seja, o sinal na primeira zona está em oposição de fase com o sinal da segunda. Desta forma, quando a obstrução bloqueia a segunda zona de Fresnel, acontece um ganho no sinal pois o sinal em oposição de fase é barrado.

**Resumindo:** “A energia carregada por uma onda eletromagnética não está contida apenas na linha de visada direta. Esta fica espalhada por todo espaço ao redor dessa linha, em regiões chamadas zonas de Fresnel”.



**Figura 14**

No interior do volume da elipsóide está contida a energia transmitida, e obstáculos nesse caminho são considerados obstruções se impedem até aproximadamente 40% da “visibilidade”. A partir daí as obstruções passam a ser fatores de atenuação consideráveis.

O ponto crítico da obstrução pode ser medido pela relação:

$$\frac{D}{R_f} \geq 0,6 \quad \text{percurso livre}$$

$$\frac{D}{R_f} \leq 0,6 \quad \text{percurso com obstrução}$$

onde:

$D$  – distância entre o eixo central da elipsóide e a superfície em análise.

Exemplo: Para um circuito de radiocomunicação, onde a frequência utilizada é de 900 MHz, a distância total entre a antena Tx e Rx é de 120 km, determinar o raio do elipsóide de Fresnel nos pontos:

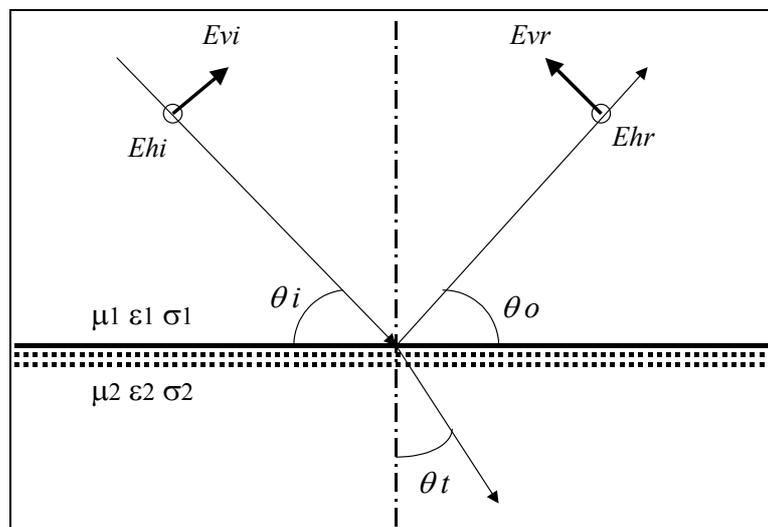
- a)  $d_1 = 60$  km      b)  $d_1 = 100$  km      c)  $d_1 = 80$  km      d)  $d_2 = 30$  km      e)  
 $d_1 = 30$  km

### 4.3.3 – Modelo Perda por Reflexão.

A reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética incide em um obstáculo cujas dimensões são bem maiores do que o seu próprio comprimento de onda. Reflexões ocorrem na superfície da terra, na água, em edificações, e podem interferir construtiva ou destrutivamente na recepção.

Quando uma onda se propaga em um meio com determinada permissividade ( $\epsilon$ ), permeabilidade ( $\mu$ ) ou condutividade ( $\sigma$ ), e incide sobre outro meio com diferentes características, parte da onda é refletida e parte é transmitida, Fig. 14.

Se o meio onde a onda incide é um **condutor perfeito**, a onda reflete totalmente e não há perda de energia. No entanto, se o meio é um dielétrico, parte da energia é refletida e parte é transmitida. A relação entre a intensidade de campo elétrico refletida e a incidente é dada pelo coeficiente de reflexão de Fresnel.



**Figura.15**

Para o caso onde o primeiro meio é o espaço livre, o coeficiente de reflexão para o campo elétrico com polarização vertical é dado por:

$$\Gamma_v = \frac{E_{vr}}{E_{vi}} = \frac{-\varepsilon_{2r} \operatorname{sen} \theta_i - \sqrt{\varepsilon_{2r} - \cos^2 \theta_i}}{\varepsilon_{2r} \operatorname{sen} \theta_i + \sqrt{\varepsilon_{2r} - \cos^2 \theta_i}} \quad \text{Eq. 8}$$

e quando o campo elétrico tem polarização horizontal, o coeficiente é dado por:

$$\Gamma_h = \frac{E_{hr}}{E_{hi}} = \frac{\operatorname{sen} \theta_i - \sqrt{\varepsilon_{2r} - \cos^2 \theta_i}}{\operatorname{sen} \theta_i + \sqrt{\varepsilon_{2r} - \cos^2 \theta_i}} \quad \text{Eq. 9}$$

onde:

$\Gamma$  – coeficiente de reflexão;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – permissividade do meio 1 e 2;

$\mu_1, \mu_2$  – permeabilidade do meio 1 e 2;

$\sigma_1, \sigma_2$  – condutividade do meio 1 e 2;

$\varepsilon_{2r}$  – permissividade relativa do meio 2;

$E_{vr}$  – campo elétrico refletido, polarização vertical;

$E_{hr}$  – campo elétrico refletido, polarização horizontal;

$E_{vi}$  – campo elétrico incidente, polarização vertical;

$E_{hi}$  – campo elétrico incidente, polarização horizontal;

$\theta_i$  – ângulo de incidência;

$\theta_r$  – ângulo de reflexão;

O coeficiente de reflexão para onda com polarização vertical pode ser igual a zero dependendo do ângulo de incidência e conforme a permissividade relativa do meio. A esse ângulo é dado o nome de Brewster, e deve satisfazer a seguinte equação:

$$\operatorname{sen} \theta_i = \frac{\sqrt{\varepsilon_{2r} - 1}}{\sqrt{\varepsilon_{2r}^2 - 1}} \quad \text{Eq. 10}$$

Alguns parâmetros de meios comuns.

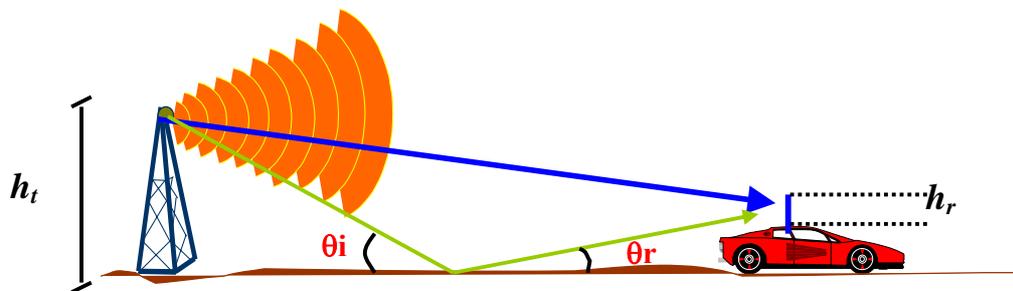
Material	Permissividade relativa	Condutividade (S/m)
Solo pobre	4	0,001
Solo típico	15	0,005
Água salgada	81	5,0
Água doce	81	0,01

### **Modelo do Terreno Plano:**

Um modelo para o cálculo de perdas do sinal em terrenos planos ou quase planos é aquele que considera o sinal no receptor como uma combinação de uma onda que se propaga por um caminho direto, e uma onda refletida no solo. A equação que determina as perdas de potência do sinal em decibéis é a seguinte:

$$L = -10 \log(G_t) - 10 \log(G_r) - 20 \log(h_t h_r) + 40 \log(d) \quad \text{Eq. 11}$$

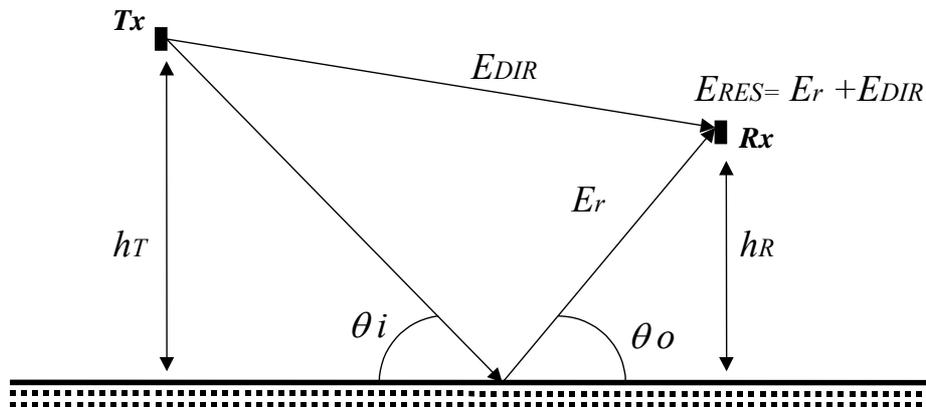
onde  $h_t$  e  $h_r$  são as alturas das antenas transmissora e receptora dadas em metros e  $d$  é a distância entre as antenas em metros.



**Figura 16– Modelo de Terreno Plano**

### **Modelo com reflexão no solo (two-ray).**

É um modelo que considera uma reflexão no solo e é baseado em geometria ótica. Considera ainda que o comprimento de onda é muito menor do que qualquer integrante do conjunto.



**Figura 3.17**

Os parâmetros definidos são:

$E_{DIR}$  – componente de campo elétrico direto;

$E_r$  – componente de campo elétrico refletido;

$E_{RES}$  – campo elétrico resultante;

$\theta_i$  – ângulo de incidência;

$\theta_r$  – ângulo de reflexão;

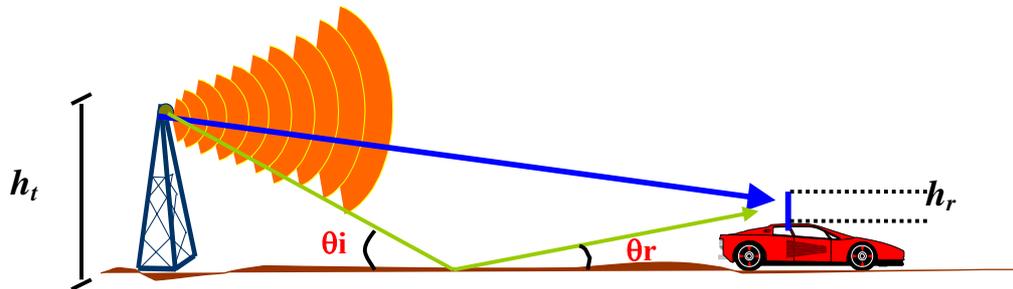
$h_T$  – altura do transmissor;

$h_R$  – altura do receptor;

Um modelo para o cálculo de perdas do sinal em terrenos planos ou quase planos é aquele que considera o sinal no receptor como uma combinação de uma onda que se propaga por um caminho direto, e uma onda refletida no solo. A equação que determina as perdas de potência do sinal em decibéis é a seguinte:

$$L = -10 \log(G_t) - 10 \log(G_r) - 20 \log(h_t h_r) + 40 \log(d) \quad \text{Eq. 12}$$

onde  $h_t$  e  $h_r$  são as alturas das antenas transmissora e receptora dadas em metros e  $d$  é a distância entre as antenas em metros.



**Figura 18 – Modelo de Terreno Plano**

A potência recebida em  $R$  pode ser expressa por:

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad \text{Eq. 13}$$

#### 4.3.4 - ESPALHAMENTO (SCATTERING).

O espalhamento ocorre quando o meio onde a onda se propaga é constituído por objetos cuja dimensão é pequena se comparada ao comprimento da onda, e o número de obstáculos por unidade de volume é grande.

Quando a onda atinge uma superfície rugosa, por exemplo, a onda reflete para diversas direções, ocorrendo a difusão da energia devido ao fenômeno do espalhamento.

A rugosidade de uma superfície é determinada pela altura crítica da protuberância ( $h_c$ ) para um determinado ângulo de incidência ( $\theta_i$ ).

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i} \quad \text{Eq. 14}$$

Uma superfície é considerada lisa se a altura típica da protuberância ( $h$ ) é menor que  $h_c$ , e rugosa se for maior.

#### **4. MODELOS DE PREDIÇÃO DE COBERTURA**

A propagação de energia em um ambiente rádio móvel é fortemente influenciada por diversos fatores, que incluem os relevos naturais e artificiais, a frequência de operação, alturas das antenas, e muitos outros. A caracterização precisa da variabilidade do sinal nestes ambientes é impossível. Métodos determinísticos, como aqueles descritos pelos modelos do espaço livre, terreno plano e difração, são muito restritos, não encontrando aplicação imediata em comunicações móveis.

Os modelos de predição em uso surgiram como combinação dos métodos determinísticos e medidas de campo. Os modelos empíricos resultantes incluem diversos parâmetros, muitos dos quais carecendo de justificativas teóricas, que deverão ser ajustados com medidas de campo.

No caso de antenas que são montadas acima das edificações, a propagação é determinada pelos fenômenos da difração e espalhamento da onda no topo dos edifícios e na vizinhança da estação móvel. Para antenas situadas abaixo das edificações, a propagação é determinada por difração e espalhamento em volta dos edifícios. De acordo com a posição da antena da estação base e tamanho da área coberta, as células podem ser classificadas em macrocélulas, minicélulas, e microcélulas. Macrocélulas e minicélulas são determinadas por antenas montadas acima das edificações, e seus raios ficam na ordem de vários quilômetros para as macros, e poucos (1 a 3) para as minis. microcélulas são definidas para antenas montadas abaixo das edificações e possuem raios de algumas centenas de metros.

Os diversos modelos de predição variam grandemente entre si. Desta forma, modelos de predição diferentes aplicados à mesma região certamente darão resultados diversos. Da mesma maneira, os mesmos modelos, porém implementados por companhias distintas, também darão resultados diversos mesmo aplicados ao mesmo ambiente. Em outras palavras, uma região dita coberta por algum algoritmo (ou companhia). Só medidas de campo poderão efetivamente comprovar os diversos métodos.

A perda de percurso varia com a distância  $d$  na forma  $d^\alpha$ , com  $2 \leq \alpha \leq 6$ , assumindo tipicamente o valor 4. Da mesma forma, a perda é proporcional a

$f^x$ , onde  $2 \leq x \leq 3$  e  $f$  é a frequência de operação. Ainda, contasse um ganho proporcional à altura das antenas da estação rádio base e do móvel, sendo que com relação

a primeira, este ganho varia ao quadrado e com a segunda, o comportamento assume forma linear. Diversos outros fatores, como tipos de área (urbana, suburbana, aberta, rural, etc.), parâmetro de urbanização (altura média dos edifícios, distância entre edifícios, porcentagem da área ocupada por edifícios, largura das ruas, etc.), presença de túneis, área verde, água, e outros, influenciam sobremaneira os cálculos de predição.

Dos modelos disponíveis, os mais utilizados são o de Okumura / Hata e o de Lee, ambos para macrocélulas, e menos especificamente para minicélulas, e o COST 231, para minicélulas e microcélulas. A seguir veremos resumidamente estes modelos de predição.

#### **4.1 Modelo de Okumura / Hata**

O modelo de Okumura é baseado em medidas de campo tomadas na área de Tóquio, Japão. Através destes dados experimentais, Okumura fez um modelo baseado em gráficos relacionando perda de percurso com a distância, frequência de operação, altura da antena transmissora, altura da antena receptora e outros. O modelo de Okumura é certamente o mais completo de predição e tem se tornado uma referência de comparação para os demais métodos (como por exemplo o COST 231).

Devido ao modelo de Okumura basear-se totalmente em ábacos (gráficos), a sua forma automatizada em computador torna-se muito complexa. Com o intuito de facilitar a implementação computacional do modelo de Okumura, Hata desenvolveu uma série de fórmulas empíricas que descrevem com boa precisão as principais informações gráficas contidas no modelo de Okumura, e o método resultante passou a ser conhecido como Okumura / Hata. Estas fórmulas apresentam desvios que nunca ultrapassam 1 dB, mas existem restrições quanto a faixa de aplicabilidade dos parâmetros de entrada, como será mostrado a seguir.

##### **Áreas Urbanas:**

$$L_{HATA} = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_t) - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log(h_t)) \log(d) \quad \text{Eq.6}$$

Onde:

$$150 \text{ MHz} \leq f \leq 1500 \text{ MHz} ; 30 \text{ m} \leq h_t \leq 300 \text{ m} \quad \text{e} \quad 1 \text{ Km} \leq d \leq 20 \text{ Km}$$

##### **Áreas Suburbanas:**

$$L_{HATA} = L_{HATA}(Urbana) - 2 \log^2 \left( \frac{f}{28} \right) - 5,4 \quad \text{Eq.7}$$

**Áreas Abertas (ou Rurais):**

$$L_{HATA} = L_{HATA}(Urbana) - 4,78 \log^2(f) + 18,33 \lg(f) - 40,94 \quad \text{Eq.8}$$

**Cálculo do  $a(h_r)$  (Fator de correção)**

**Cidade Pequena / Média:**

$$a(h_r) = (1,1 \log(f) - 0,7)h_r - (1,56 \log(f) - 0,8) \quad \text{dB} \quad \text{Eq.9}$$

$$1 \leq h_r \leq 10 \text{ m}$$

**Cidade Grande:**

$$a(h_r) = 8,29 \log^2(1,54h_r) - 1,1 \quad f \leq 300 \text{MHz} \quad \text{Eq.10}$$

$$a(h_r) = 3,2 \log^2(11,75h_r) - 4,97 \quad f \geq 300 \text{MHz} \quad \text{Eq.11}$$

onde:

$h_t$  = altura da antena transmissora (**obs: a altura da antena inclui a torre, ou seja, é a altura total**)

$h_r$  = altura da antena receptora

$f$  = frequência de operação

$d$  = distância a ser coberta

Com o conjunto de fórmulas apresentadas por Hata, pode-se observar que estas tem uma boa aplicabilidade prática, pois permite uma implementação bastante simples computacionalmente.

**3.2 COST 231 e Hess**

Devido a grande difusão da formulação de predição de propagação de sinais de rádio de Okumura / Hata, alguns trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de ampliar a faixa de aplicabilidade do modelo. Uma destas extensões apresentada é um trabalho desenvolvido por um grupo Euro-COST 231 que propôs um fator de correção para ampliar a faixa de frequência.

$$K_{COST231} = -23,25 + 7,74 \log(f) \quad \text{Eq.12}$$

O fator  $K_{COST231}$  deve ser somado às perdas calculadas pela formulação de Hata original quando o sistema opera em frequências na faixa de 1,5 a 2,0 GHz.

Outra extensão do modelo de Okumura / Hata é apresentada por Hess, que amplia a faixa de aplicabilidade na distância:

$$K_{20Km} = (d - 20) \left[ 0,31082 + 0,1865 \log\left(\frac{h_t}{100}\right) \right] \quad \text{Eq.13}$$

O fator acima é somado quando  $d > 20 \text{ Km}$ , e

$$K_{64Km} = -0,174(d - 64,36) \quad \text{Eq.14}$$

é somado quando  $d > 64,36 \text{ Km}$ .

### 3.3 Modelo de Lee

O modelo de Lee é baseado na bem aceita hipótese pela qual a razão entre as potências recebidas em dois pontos distintos é proporcional ao inverso da razão entre as distâncias respectivas destes pontos à estação base elevada ao fator  $\tilde{\alpha}$

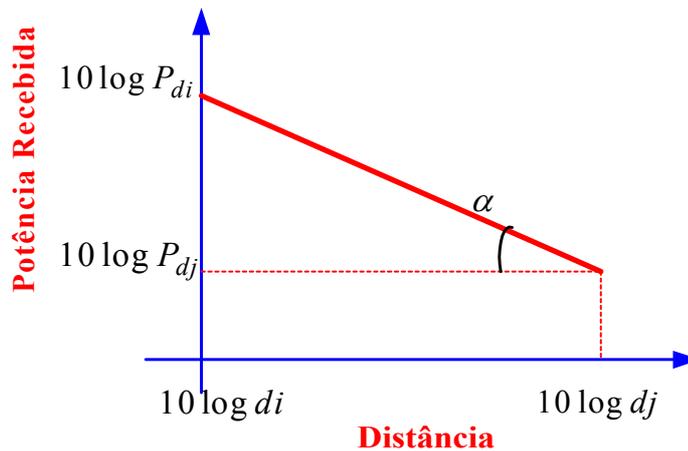
$$\frac{P_{di}}{P_{dj}} = \left(\frac{d_i}{d_j}\right)^{-\alpha} \quad \text{Eq.15}$$

Expressa em decibels, temos:

$$10 \log\left(\frac{P_{di}}{P_{dj}}\right) = -\alpha 10 \log\left(\frac{d_i}{d_j}\right) \quad \text{Eq.16}$$

Note que a curva  $10 \log (P_{di} / P_{dj})$  versus  $10 \log (d_i / d_j)$  é uma linha reta com inclinação  $-\alpha$ . Desta maneira, o parâmetro  $\alpha$  é definido como coeficiente angular da reta de perdas em uma morfologia. O termo morfologia é aplicado na designação dos obstáculos de propagação não relacionados à topografia do terreno (elevações). Como exemplo podem-se citar as construções feitas pelo homem (edificações em geral) e pela natureza (vegetação, rios lagos). A morfologia de uma determinada região pode ser descrita em vários níveis de precisão. Pode-se, por exemplo, descrever uma cidade prédio por prédio, casa por casa, rua por rua. Outra forma de descrever a mesma cidade seria através de área urbana, área

suburbana, área urbana densa, etc. Quanto maior o grau de precisão destas informações melhor será a precisão da predição da área de cobertura de uma antena.



**Figura 9: Uma típica curva de perda por distância**

Desta forma tendo-se a potência a uma determinada distância, a potência a uma outra distância é determinada pela proporção citada. O fator  $\alpha$  pode ser obtido através de medidas de campo utilizando a mesma proporção mencionada anteriormente, isto é, medem-se as potências em dois pontos cujas distâncias à estação base são conhecidas e procede-se à razão para se determinar o fator  $\alpha$ .

De fato uma série de medidas deve ser realizada para, através de um processo de regressão linear, determinar o valor médio deste fator. Alternativamente pode-se utilizar alguns valores já conhecidos para certas localidades e publicados na literatura. Alguns exemplos são apresentados na Tabela a seguir.

<i>LOCAL (Morfologia)</i>	<i>FATOR <math>\alpha</math></i>
<i>Espaço livre</i>	2,0
<i>Área Aberta</i>	4,35
<i>Área Suburbana</i>	3,84
<i>Área Urbana( cidade Newark)</i>	4,31
<i>Área Urbana( cidade Filadélfia)</i>	3,68
<i>Área Urbana( cidade Tóquio)</i>	3,05
<i>Área Urbana( cidade Nova Iorque)</i>	4,8

**Tabela 2: Medidas de campo do fator  $\alpha$  para algumas Áreas**

O expressão geral do modelo de Lee, incluem fatores de compensação de frequências, que são calculados empiricamente e que resultados experimentais sugerem valores entre 20 a 30 dB. Existem também os fatores de ajustes para as condições de operação, como por exemplo altura das antenas transmissora e receptora bem como o ganho delas, que juntos estes fatores se somam a para o cálculo total da perda de propagação.

**Conclusão:**

De fato, cada empresa, após o procedimento de rádio *survey* no projeto celular, passa a formar sua própria base de dados. Além do cálculo básico da perda de percurso, como descrito anteriormente deve-se acrescentar as perdas por difração, na presença de obstáculos, ou por reflexão, na ausência de obstáculos.

Cabe aqui uma definição de método:

*“Um método consiste em um procedimento ou programa que regula previamente uma série de operações que devem ser realizadas em vista de um resultado determinado”*

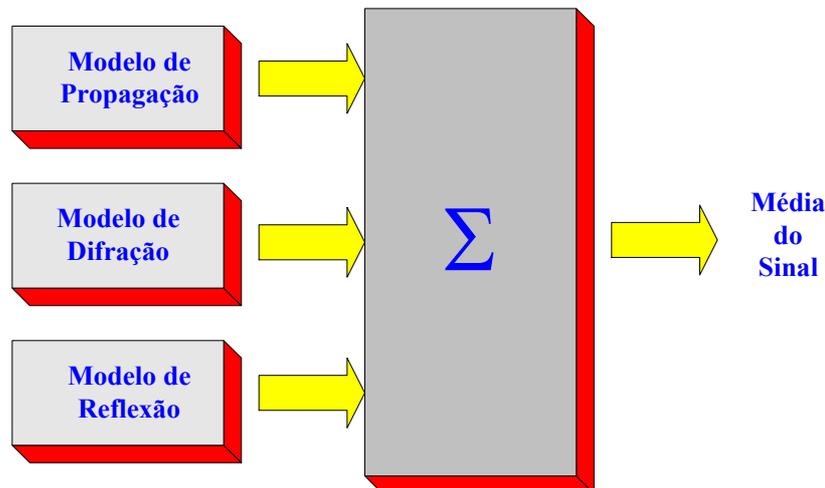
E a definição de modelo:

*“Um modelo é um conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou comportamento de um sistema físico, pelo qual se procura explicar ou prever, dentro de uma teoria científica, as propriedades do sistema”*

Desta forma pode-se concluir, que um método usa modelos para implementar um determinado procedimento.

No caso dos métodos empíricos de predição estes são compostos pela combinação de três modelos, claro que também empíricos:

- de propagação
- de difração
- de reflexão



**Figura 10 – Método de Predição de Cobertura**

### Exercícios

- 1) Pesquisa: qual a influência do handoff na capacidade de tráfego de um sistema celular?
- 2) Que tipos de desvanecimento estão presentes no ambiente móvel? Explique.
- 3) Como varia a atenuação do sinal no ambiente móvel em função da distância? E em função da frequência?