

2

Modelos empíricos para estudo de propagação

No estudo dos mecanismos de propagação, encontramos uma grande variedade de modelos de predição de atenuação, sendo a maior parte obtida empiricamente. Em contraste com os modelos empíricos, existem os modelos determinísticos (teóricos) e modelos mistos, conhecidos por semi-determinísticos.

Isto ocorre devido a grande variação de morfologia e topologia das regiões onde foram feitas as análises e principalmente a variação das características climáticas pode também interferir decisivamente neste estudo e em cada local.

Os modelos empíricos são obtidos a partir de uma campanha de medições em uma ou mais regiões, modelamento dos resultados obtidos e apresentação do resultado final (modelo) através de ábacos (como o modelo de Okumura, por exemplo) ou expressões que fornecem o valor mediano da atenuação. Modelos dessa categoria, em especial os modelos dados por uma expressão final (e não por ábacos), apresentam a vantagem de serem, em geral, de fácil aplicação e de necessitarem de um tempo de execução (computacional) relativamente baixo.

Por outro lado, por serem baseados em medições realizadas em locais específicos, modelos empíricos tendem a não fornecer resultados muito confiáveis quando aplicados a regiões que difiram significativamente da região original.

Embora certos modelos apresentem adaptações para a predição em áreas de características globais distintas da original (como, por exemplo, o modelo de Hata-Okumura), os modelos empíricos são melhores adaptados a regiões de mesmas características da região onde foram realizadas as medidas.

Modelos determinísticos (teóricos) utilizam alguma formulação da teoria eletromagnética, como a **GTD (Geometrical Theory of Diffraction - Teoria Geométrica da Difração)** e a **UTD (Uniform Theory of Diffraction - Teoria Uniforme da Difração)**, por exemplo, para realizar o cálculo de cobertura de uma região. A teoria escolhida pode, então, ser inserida em uma técnica denominada **Técnica de Traçado de Raios**, que consiste no rastreamento do campo eletromagnético ao longo de raios que têm suas trajetórias (ortogonais às frentes de onda) e interações com o ambiente, investigadas. O uso da teoria eletromagnética confere aos modelos teóricos grande vantagem em termos de confiabilidade dos valores preditos. Além disso, outra característica favorável é o fato de que modelos dessa forma, pela sua própria natureza, podem ser aplicados sem maiores restrições aos mais variados tipos de ambientes. As maiores desvantagens que podem ser citadas são a maior dificuldade de implementação em relação a modelos empíricos e a exigência de recursos computacionais significativamente maiores, em termos de memória e tempo de processamento. Como uma terceira alternativa, existem os modelos semi-determinísticos (ou semi-empíricos), caracterizados por mesclar teoria e dados estatísticos derivados de medições.

Conforme vários estudos mostraram, as características particulares de **microcélulas** - áreas de cobertura menores (com antenas situadas no nível de postes de iluminação) fazem com que alguns detalhes do ambiente passem a ser relevantes, como o cruzamento entre ruas, altura da antena da estação base em relação aos prédios vizinhos, e canalização da energia nas proximidades da base - e também de **picocélulas indoor** (meio confinado, com presença de teto e partições), fazem com que os modelos empíricos e semi-empíricos empregados em **macrocélulas** não mais sejam adequados para a predição.

Alie-se a isto a tendência cada vez maior de progressão em frequência (faixas de 1,8 a 2,5 GHz, aproximadamente), tanto para o descongestionamento da faixa atual, como para a provisão dos futuros serviços em banda larga, e fica clara a necessidade de desenvolvimento de novos modelos de predição de propagação.

Os modelos empíricos mostrados a seguir podem ser utilizados para uso em micro e picocélulas e classificados para aplicações *indoor* e *outdoor*.

Na maior parte dos casos, a descrição dos modelos será feita através da apresentação dos valores de cada parâmetro de uma expressão generalizada. Porém, há alguns modelos que diferem da regra geral, apresentando outras parcelas além das descritas na expressão. Esses modelos estão presentes em menor número e suas particularidades em relação à expressão geral serão detalhadas. Os modelos listados fornecem a atenuação mediana, L_{50} (atenuação não excedida em 50% do tempo). Temos que salientar que cada modelo pode ter uma interpretação diferente que dependerá das características do local de sua aplicação.

2.1. Modelos de Propagação em ambientes internos

De uma forma geral, os modelos de propagação em ambientes internos (indoor) podem ser representados por uma expressão geral :

$$L = a + b \log f + c \log d_0 + e \log d + L_p + L_a \quad (\text{dB}) \quad (2.1)$$

Onde :

a = constante (dB), determinada de forma empírica ou por modelos canônicos ;

b => fator de atenuação com a frequência (perda com a frequência);

c => fator representado de um modelo com distancia de referencia, d_0 ;

d => fator de atenuação com a distância (perda com a distância);

L_p => Atenuação (dB) pela travessia de paredes (ou outras estruturas);

L_a => Atenuação (dB) pela travessia de andares;

f => Frequência em MHz;

d => distancia entre transmissor (Tx) e receptor (Rx) em (m);

d_0 => distância de referencia (m).

Podemos fazer uma classificação dos modelos em relação à frequência, através de uma subdivisão em dois grupos :

a) **Faixa larga de frequências** => Dependentes da expressão acima (fator b é não nulo);

b) **Faixa estreita de frequências** (Específica) => Neste caso (fator b é nulo).

Como muitos modelos não tem uma denominação específica, eles são referenciados através do nome de seus criadores, separando os grupos em *modelos para faixa larga de frequências e modelos para frequência única ou uma faixa estreita de frequências*

2.1.1. Modelos para uma faixa larga de frequências

A grande característica destes modelos é o fato de se basearem na expressão de atenuação de espaço livre.

Os modelos descritos a seguir de Chan & Razaqpur [30] e Seidel & Rapaport [31], baseiam-se na expressão descrita anteriormente pela aplicação de um modelo interno (indoor), temos os seguintes valores para as constantes:

$$c = 0 \quad ; \quad a = 20 \quad ; \quad b = 20 \quad ;$$

Considerando-se também a frequência em MHz e a distância em metros, conseguimos mostrar que o fator constante na expressão (a) = - 27,56.

a) Chan & Razaqpur [30]

Este modelo faz um estudo mais apurado em relação à propagação do sinal entre paredes , não considerando a extensão entre andares

L_p => função linear do número p de paredes, partições sólidas ou colunas de concreto atravessadas. Em média indica um valor pessimista de 10 dB para cada obstáculo atravessado.

L_a => Não considera o cálculo de andares

f => Não sugere uma faixa de frequências de referências, podendo ser utilizado numa ampla faixa (900 MHz; 1,7 GHz; 2.4 GHz; 18 GHz; e 60 GHz)

d – Também não indica limites de distância, mas pode-se considerar como referência um modelo com andares de dimensões de 55,5 x 25,5 m.

b) Seidel e Rapaport I [31]

Esse modelo constitui-se em uma variação do modelo Chan & Razaqpur [30], onde a atenuação L_p é subdividida entre atenuação devida a partições, atenuação devida a paredes ou colunas de concreto (valores mais altos que partições).

Podem-se considerar estes valores como uma estimativa inicial se não houver informações específicas do local. Utilizando-se na expressão indoor padrão, podemos obter:

L_p - é subdividido em duas classes:

- $AFSp$ => atenuação devida à travessia de p partições, função linear do número de obstáculos, p , atravessados;

- $AFCq$ => atenuação devida à travessia de q paredes ou colunas de concreto, função linear do número de obstáculos, q , atravessados.

Os valores para AFS e AFC unitários (para a travessia de cada obstáculo) devem ser obtidos em tabelas. Caso não haja disponibilidade de informação, temos uma referência que sugere os valores abaixo, somente para a faixa de 900 MHz, onde: $AFS = 1,39$ dB; $AFC = 2,38$ dB.

$L_a = 0$ – não considera o cálculo de andares

f - não é feita referência à faixa de frequências, somente utilizando o modelo padrão de 900 MHz.

d - Também não indica limites de distância, mas pode-se considerar como referência um modelo com andares de dimensões de 61 x 52 m.

Obs: No cálculo de potência dos modelos de atenuação em espaço livre é inserida uma margem de desvanecimento, f_m , de 20 dB para contabilizar multipercursos.

Os modelos apresentados a seguir (ITU-R / 1238 [23]; Seidel & Rapaport II e III [31] e Tornevik [33]), embora também tenham como base o modelo de espaço livre, apresentam o fator de atenuação com a distância dependente do tipo de ambiente, ao contrário do valor fixo de 20, encontrado na expressão de atenuação no espaço livre.

Dessa forma, na expressão padrão indoor, terá as seguintes variações:

a = - 27.56, com exceção do modelo do ITU , que trabalha com a = - 28 ;

b = 20;

c = 0, com exceção dos modelos Seidel & Rapaport II e III.

c) ITU-R Rec. P.1238 [23]

Esse modelo é apresentado na Recomendação P.1238, da ITU-R (*International Telecommunications Union - Radio Communication Sector - União Internacional de Telecomunicações - Rádio Propagação*), e é melhor adaptado à predição de propagação entre andares, para estimativa de reuso de frequência em sistemas celulares instalados no interior de edifícios. A atenuação devida a obstáculos em um mesmo andar (paredes, partições, colunas, etc.) está incluída no próprio fator de atenuação com a distância. O modelo não representa, portanto, cada ambiente particular de forma individualizada (no que diz respeito à atenuação com a distância em um mesmo andar), e sim, através de valores genéricos de fator de atenuação, conforme a Tabela abaixo. Consideramos para a expressão indoor:

e - valores para esse fator devem ser obtidos da Tabela 2

$L_p = 0$ => a travessia de paredes, partições ou colunas não é representada explicitamente nesse modelo. O modelo foi concebido de forma que L_p esteja contabilizado no próprio fator.

L_a - valores para a atenuação devida à travessia de andares devem ser obtidos da Tabela 1

f - o modelo é aplicável à faixa de 900 MHz a 100 GHz

d - não é feita referência explícita quanto ao limite de distância, porém é mencionada a aplicabilidade do modelo a sistemas com distâncias de até 1 km

Frequência	Residencial	Escritório	Comercial
900 MHz	-	33	20
1.2 a 1.3 GHz	-	32	22
1.8 a 2.4 GHz	28	30	22
4 GHz	-	28	22

Tabela 1 Valores para coeficiente de atenuação (e) em relação à distância

Obs: Onde não houver referência, residencial será igual a escritório.

Frequência	Residencial	Escritório	Comercial
900 MHz	-	9 (1 andar) 19 (2 andares) 24 (3 andares)	-
1.8 a 2.4 GHz	4 n	15 + 4 (n - 1)	6 + 3 (n - 1)

Tabela 2 Valores para atenuação por penetração de andares (L_a)

(n => número de andares atravessados)

d) Seidel & Rapaport II [31]

Este modelo também terá como referência a expressão indoor, onde:

$$c = (20-10n) \quad ; \quad e = 10n$$

$L_p = L_a = 0 \Rightarrow$ a travessia de paredes, partições, colunas e andares não são representados explicitamente nesse modelo.

O modelo foi concebido de forma que $L_{p,a}$ esteja contabilizado na atenuação com a distância

f – Usa como referência o modelo para a frequência de 900 MHz

d – Usa como referência o modelo para distância aplicado a andares de dimensões de até 61 x 52 m

d_0 – na referência foi escolhido 1m

Obs: O valor de n depende, naturalmente, do conhecimento das características do ambiente, e pode ser obtido de tabelas. Se não há nenhuma informação disponível e as antenas transmissora e receptora estão no mesmo andar, a referência recomenda o valor $n = 2,76$ para frequência de 900 MHz.

e) Seidel & Rapaport III [31]

Este modelo é semelhante ao anterior, exceto por :

L_a = FAF (fator de atenuação entre andares) => Considera todos os andares atravessados (não é uma função linear do número de andares atravessados) e deve ser obtido de tabela, ou, alternativamente, é função linear do número p de andares atravessados .

Obs :

- fator n inclui apenas a atenuação no mesmo andar, uma vez que agora existe o fator FAF para a atenuação entre andares;

- permanece a estimativa de $n = 2,76$ quando não há informação mais detalhada do ambiente e a frequência utilizada é de 900 MHz;

- valores apropriados de n e FAF podem ser obtidos de tabelas. Segundo estudo de Owen & Pudney, onde FAF é uma função linear do número de pisos atravessados, os seguintes valores foram obtidos:

- para a frequência de 900 MHz - 10 a 12 dB de perda por andar

- para a frequência de 1700 MHz - 14,8 a 16 dB de perda por andar

- para a frequência de 2400 MHz - 18,8 a 21 dB de perda por andar

f) Tornevik [33]

Também se baseia na expressão indoor para analisar, que :

e - o modelo propõe dois valores para a atenuação com a distância, para duas faixas de distância entre a antena transmissora e a receptora. Para ambas as faixas de distância, $e = 20$ e, para $d > d_1$, deve ser acrescido ainda o fator $(\Gamma.d)$, ficando a dependência da atenuação com a distância da seguinte forma :

$(e \log d + \Gamma.d)$

L_p - função linear do número p de paredes atravessadas

L_a - função linear do número a de andares atravessados

f - o modelo tem aplicação em qualquer faixa de frequências. Porém, os valores dependentes de medições foram obtidos apenas para a frequência de 900 MHz

d - na referência é citado que foram feitas medições e aplicações do modelo para distâncias de até 175 metros

Valores de d_1 e Γ devem ser obtidos para cada ambiente específico. A referência apresenta os seguintes valores, para a frequência de 900 MHz :

prédio de aeroporto : $d_1 = 65$ m ; $\Gamma = 0,2$ dB/m

cassino : $d_1 = 25$ m ; $\Gamma = 0,5$ dB/m

Para um ambiente qualquer, diferente dos dois apresentados, valores aproximados de d_1 e Γ podem ser estimados, a partir dos valores mencionados. Uma estimativa inicial pode ser feita pela análise da concentração de objetos e concentração média de pessoas no ambiente e pelas dimensões do ambiente, da seguinte forma:

- quanto menor a concentração (de pessoas e objetos) e maiores as dimensões do ambiente, maior será o valor de d_1 e menor o de Γ ;
- quanto maior a concentração (de pessoas e objetos) e menores as dimensões do ambiente, menor será o valor de d_1 e maior o de Γ .

Embora não seja feita referência explícita no estudo de Tornevik, uma sugestão para a determinação de d_1 , inclusive para outras frequências, seria através do uso da expressão de distância de ponto de quebra, vista anterior no estudo da propagação por traçado de raios.

A Tabela abaixo fornece valores de atenuação unitária (atenuação por cada obstáculo atravessado), para paredes e andares, em alguns ambientes medidos por Tornevik.

Ambiente	Atenuação parede (dB)	Atenuação andar (dB)
Escritório	2,1	15-25
Aeroporto	4,0	15
Centro de convenção	3,7	31
Cassino	3,0	-
Hospital	3,6	11
Estacionamento	4,3	12

Tabela 3 Valores de atenuação unitária (paredes e andar) em 900 MHz

2.1.2.**Modelos para uma faixa estreita de frequências ou frequência única**

Nestes modelos a frequência não é um fator de entrada ($b = 0$)

a) Bartolomé & Vallejo [34]

Nesta pesquisa foram desenvolvidos 3 modelos : Propagação em corredores (efeito do guiamento), propagação em obstrução e propagação em regiões onde a difração pode ser relevante.

Num caso geral para os 3 modelos, temos:

$$c = 0$$

f - os modelos foram obtidos para a frequência de 1,9 GHz

d - os modelos foram obtidos através de medições entre distâncias de 3 a 100 metros

Propagação em corredores

$$a = 41,5 \quad ; \quad e = 12$$

$L_p = L_a = 0 \Rightarrow$ a travessia de andares, paredes, partições ou colunas não é representada nesse modelo, somente em corredor.

Propagação em obstrução

$$a = 38 \quad ; \quad e = 20$$

L_p - é subdividido em duas classes de atenuação

L_i - atenuação devida a paredes finas (de tijolo, madeira e vidro, por exemplo). O modelo propõe $L_i = 3,7$ como um valor básico.

L_j - atenuação devida a paredes grossas (concreto, geralmente). O modelo propõe $L_j = 9,7$ também como um valor básico

Como os valores propostos são unitários (para cada parede), a atenuação total é função linear do número de obstáculos atravessados.

Portanto, para sabermos o valor de L_p , iremos analisar da seguinte forma :

$L_p = 3,7k_i + 9,7k_j$, onde k_i e k_j são o número de paredes finas e grossas atravessadas, respectivamente.

$$L_a = 24,8k_s, \text{ onde } k_s \text{ é o número de andares atravessados.}$$

Uma observação a ser feita é de que o número de andares atravessados para se determinar o valor unitário de L_a , será de até dois andares acima e abaixo do transmissor.

Propagação com difração

Esse modelo é usado em cruzamentos entre dois corredores, onde o mecanismo de difração pode ser importante.

Uma observação importante é de que a distância d a ser usada no modelo é a distância entre o observador e o ponto denominado “fonte virtual”, que está localizado no meio do cruzamento entre os corredores considerados.

Fatores => $a = 11,7$; $e = 21$

$L_p = L_a = 0$ => a travessia de andares, paredes, partições ou colunas não é representada nesse modelo. A propagação é ao longo de corredores que se cruzam.

b) Sheikh [35]

Este modelo segue o padrão da expressão indoor, porém apresenta duas parcelas adicionais: uma dependente da altura do ponto de acesso e do terminal móvel, e uma outra parcela dependente do expoente de perda com a distância, n .

Além disso, o modelo tem expressões distintas conforme a distância d , conforme mostrados abaixo considerando as faixas distintas de distância :

Para qualquer valor de distância

$c = 0$

L_p – função linear do número p de paredes atravessadas. A referência sugere o valor de 8,5 dB como perda unitária

$L_a = 0$ => a travessia de andares não é representada nesse modelo

f – o modelo foi obtido para a frequência de 946 MHz

d – não é feita referência ao limite de distância.

Para $d < 17$ metros

$a = 0$; $e = 25$

Para $d > 17$ metros

$a = 25 \log 17$; $e = 10n$. O valor de n deve ser obtido de tabelas

Existem outras duas parcelas adicionais à expressão indoor da forma :

$$[-10n \cdot \log_{17} - 10 \log (h_b / h_m)] \quad (2.2)$$

onde :

h_b e h_m são as alturas do Tx e do móvel, respectivamente, e em metros

Obs: Na equação de cálculo da potência recebida, o valor de potência transmitida deve ser o obtido a 1 metro da antena transmissora.

2.2.

Modelos de propagação em ambientes externos

Nestes modelos encontramos uma infinidade de soluções devido à utilização de um ambiente externo onde os fatores ligados à morfologia, topografia e tipo de construções, podem vir a interferir efetivamente na maior abrangência da propagação do sinal.

São usados também modelos empíricos na predição da propagação em micro e macrocélulas, que dependerão da cobertura e poderão ser expressos pela seguinte fórmula:

$$L = a + b \log f + c \log d' + e \log d \quad (\text{dB}) \quad (2.3)$$

onde :

a => constante (dB) de forma empírica ou canônica

b => fator de atenuação com a frequência (perda com a frequência)

c => fator que utiliza uma distância de referencia ($d' = d_0$) e/ou mais de um valor para (e) - (modelos de 2 slopes)

onde $d' =$ distância de ponto de quebra (d_{bp}).

e => fator de atenuação com a distância (perda com a distância)

f => frequência da portadora (MHz)

d => distância entre Tx e Rx (m)

$d' =$ distância de referência (d_0) ou distância do ponto de quebra (d_{bp}) em relação ao fator c (m).

Quanto à faixa de frequência, é feito uma divisão entre sistemas de faixa larga e estreita de frequências, semelhantes àqueles utilizados no modelo interno (indoor).

2.2.1. Modelos para faixa larga de frequências

Estes modelos descritos a seguir são os mais utilizados em diversas faixas de frequência e mais aplicados para planejamento de redes com propagação outdoor em diversos países.

São modelos que foram elaborados em determinada cidade e sob determinadas circunstâncias e por isto pode ter pequenas variações quando utilizados em outros locais onde ocorra alguma obstrução na transmissão dos sinais eletromagnéticos.

Nos casos específicos citados, utilizei as referencias de distâncias em quilômetros.

Em todas as análises , foram consideradas as margens de adaptação necessárias , a fim de adequar os programas em questão ao ambientes onde foram implementados na elaboração dos testes de propagação e atenuação dos sinais eletromagnéticos.

a) Modelo estendido de Hata para PCS (COST 231) [22]

Este modelo tem como base o referencial outdoor, tendo diferenças quanto às alturas entre as antenas do transmissor e do receptor, e também uma dependência em relação à localidade que será feita a análise da cobertura.

É uma extensão do modelo Hata para faixa de PCS (Personal Communication System), desenvolvido pelo programa COST (Comunidade Européia nas áreas de ciência e tecnologia)

Chega-se então a seguinte expressão baseada na equação do modelo externo (outdoor) :

$$a = 46,3 + C_M$$

Onde:

$$C_M = 0, \quad \text{cidades médias e áreas suburbanas;}$$

$$C_M = 3, \quad \text{metrópoles;} \quad b = 33,9; \quad c = 0;$$

$$e = 44,9 + 6,55 \log h_b \quad , \quad h_b \Rightarrow \text{altura da estação base (m);}$$

f => modelo desenvolvido na faixa de 1500 a 2000 MHz;

d => distância de análise de 1 a 20 km (km)

Neste modelo, existem 2 fatores adicionais que irão depender e diretamente na análise das alturas das antenas transmissora (h_b - base) e receptora (h_m - móvel), onde teremos também um fator específico $a(h_m)$ que irá variar em relação ao tamanho da área de abrangência:

⇒ $[-13,82 \log h_b - a(h_m)]$, que será determinado a seguir:

$a(h_m) = (1,1 \log f - 0,7)h_m - (1,56 \log f - 0,8)$ => cidades médias e pequenas;

$a(h_m) = 3,2[\log(11,75h_m)]^2 - 4,97$ => cidades grandes ($f > 300$ MHz);

alturas das antenas => $30 \leq h_b \leq 200$ (m) e

$1 \leq h_m \leq 10$ (m)

b) Walfish-Ikegami (COST 231) [37]

Este modelo considera como abordagem, expressões em situações onde encontramos uma visada direta (LOS – Line of Sight) e quando ocorre o caso de obstrução (NLOS – No LOS) na propagação das ondas no referido ambiente. A seguir descrevemos as expressões para os modelos descritos:

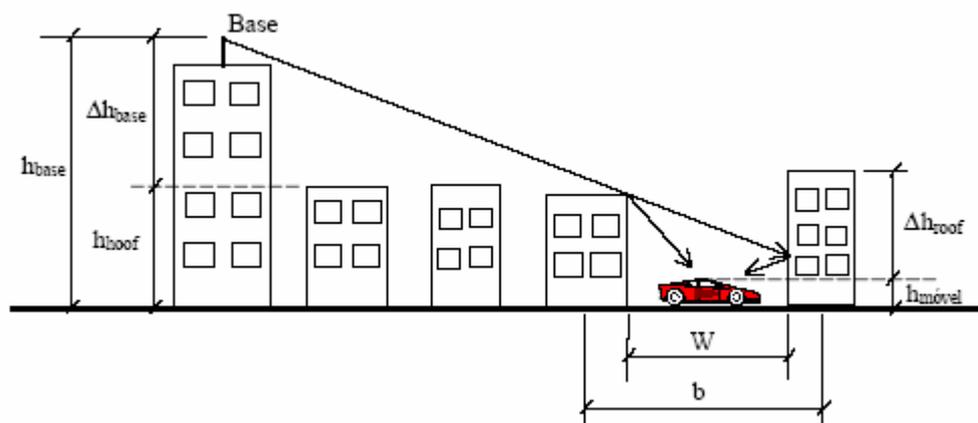


Figura 1 Modelo Walfish-Ikegami com vista ao longo da rua

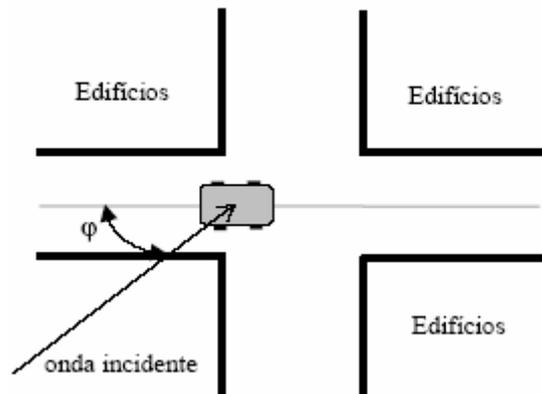


Figura 2 Modelo Walfish-Ikegami com vista superior da rua

Onde:

h_{roof} => altura média dos edifícios (m);

$h_{\text{móvel}}$ => altura da antena do móvel (m);

W => Largura média da rua (m);

b => separação média entre os edifícios (m);

φ => orientação da rua em relação ao enlace (graus).

- Modelo LOS

Utilizamos como base a expressão outdoor e encontramos :

$a = 42,6$; $b = 20$; $c = 0$; $e = 26$

f => modelo analisado entre as frequências de 800 e 2000 MHz;

d => distância do modelo (km) em análise será entre 20 m e 5 km

- Modelo NLOS

Neste modelo não utilizamos a forma padrão pois o mesmo envolve diversas expressões com parâmetros diferentes descritos na Figura 1 e na Figura 2.

Assim como no modelo LOS, nas expressões que se seguem a frequência é dada em MHz e a distância em km.

$$L(\text{NLOS}) = L_0 + L_{\text{rts}} + L_{\text{msd}} \text{ para } L_{\text{rts}} + L_{\text{msd}} \geq 0$$

$$L(\text{NLOS}) = L_0, \text{ para } L_{\text{rts}} + L_{\text{msd}} < 0$$

onde :

L_0 - atenuação de espaço livre, em dB

L_{rts} - atenuação devida à difração e espalhamento, em dB

L_{msd} - atenuação devida à difração múltipla, em dB

$$L_0 = 32,4 + 20\log d + 20\log f$$

$$L_{rts} = -16,9 - 10\log W + 10\log f + 20\log \Delta h_{m\acute{o}vel} + L_{ori}$$

$$\text{se } L_{rts} < 0 \rightarrow L_{rts} = 0$$

$$\Delta h_{m\acute{o}vel} = h_{roof} - h_{m\acute{o}vel}$$

$$\Delta h_{base} = h_{base} - h_{roof}$$

$$L_{ori} = -10 + 0,354\varphi \text{ para } 0 \leq \varphi \leq 35^\circ$$

$$L_{ori} = 2,5 + 0,075(\varphi - 35) \text{ para } 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ$$

$$L_{ori} = 4 - 0,114(\varphi - 55) \text{ para } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$$

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b$$

$$\text{se } L_{msd} < 0 \rightarrow L_{msd} = 0$$

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + \Delta h_{base}) \text{ para } h_{base} > h_{roof}$$

$$L_{bsh} = 0 \text{ para } h_{base} \leq h_{roof}$$

$$k_a = 54 \text{ para } h_{base} > h_{roof}$$

$$k_a = 54 - 0,8 \Delta h_{base} \text{ para } d \geq 0,5 \text{ km e } h_{base} \leq h_{roof}$$

$$k_a = 54 - 1,6 \Delta h_{base} \cdot d \text{ para } d < 0,5 \text{ km e } h_{base} \leq h_{roof}$$

$$k_d = 18 \text{ para } h_{base} > h_{roof}$$

$$k_d = 18 - 15 \frac{\Delta h_{base}}{h_{roof}} \text{ para } h_{base} \leq h_{roof}$$

- para cidades de tamanho médio e centros urbanos com densidade moderada de árvores :

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

- para centros metropolitanos

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

k_a é um parâmetro que contabiliza o aumento da atenuação de propagação devido ao fato de as antenas de estações base estarem localizadas abaixo do topo dos edifícios adjacentes; k_d e k_f determinam a dependência da difração múltipla com a frequência.

Observação

A altura da base e do móvel é restrita aos seguintes limites :

$$4 \text{ m} \leq h_{\text{base}} \leq 50 \text{ m} \quad ; \quad 1 \text{ m} \leq h_{\text{móvel}} \leq 3 \text{ m}$$

2.2.2.

Modelos de uma frequência única ou faixa estreita de frequências

Nessa classe de modelos, assim como para modelos *indoor*, a frequência não é um dado de entrada, então se considera ($b = 0$).

a) *Dual Slope*

As referências propõem um mesmo modelo, que subdivide a dependência da atenuação com a distância em duas faixas: uma anterior ao ponto de quebra (d_{bp}) e outra posterior a esse ponto.

Esse modelo é denominado *dual slope*.

- Modelo de Cheung [24 e 25]

Este modelo utiliza como base a expressão de referência outdoor, utilizando os seguintes parâmetros:

Para as duas faixas de distância =>

$f \Rightarrow$ o modelo foi obtido para a frequência de 1,87 GHz

$d \Rightarrow$ o modelo foi obtido para distâncias de até 400 m

Para $d_0 < d \leq d_{bp}$ =>

$a \Rightarrow$ atenuação obtida na distância de referência d_0 . Na ausência de valores, (a) pode ser calculado pela expressão de atenuação em espaço livre.

$$c = -10n_1 \quad ; \quad e = 10n_1$$

d' - o modelo não faz referência ao valor utilizado (o valor usual é de 1 metro)

Para $d > d_{bp}$ \Rightarrow

a - atenuação calculada em $d = d_{bp}$, usando a expressão outdoor para o intervalo anterior ($d_0 < d \leq d_{bp}$)

$$c = -10n_2 \quad ; \quad e = 10n_2$$

d' - é a própria distância d_{bp}

Observações

- Utilizam-se como valores típicos para n_1 , n_2 e d_{bp} , para a frequência de 1,87 GHz : $n_1 = 1,19$; $n_2 = 2,93$; $d_{pq} = 55$ m

À distância d_{pq} , onde se localiza o ponto de quebra, é dada por :

$$d_{pq} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{16h_t^2 h_r^2 - \lambda^2 (h_t^2 + h_r^2) + \frac{\lambda^2}{16}}$$

Onde :

$$\lambda = \frac{300}{f(MHz)} \text{ (m)} \Rightarrow \text{comprimento de onda}$$

$h_{b,m}$ (m) \Rightarrow altura do transmissor (base) e do receptor (móvel), respectivamente

Alternativamente, pode ser utilizada para o cálculo de d_{pq} , uma expressão que se baseia numa aproximação para pequenos valores de comprimento de onda (alta frequência).

- Modelos Cátedra & Perez-Arriaga / Rapaport [20]

O primeiro modelo é semelhante ao de Cheung e trabalha na faixa de frequências entre 1.8 e 1.9 GHz, mostrando os seguintes valores :

n_1 - de 2 a 2,3

n_2 - em torno de 3,3

$d \Rightarrow$ faz uso da distância de referência $d_0 = 1$ m.

O segundo modelo trabalha também baseado em Cheung e apresenta um formato específico para situações de obstrução, em que modifica os parâmetros para distâncias $d_0 < d \leq d_{pq}$, com a substituição de n_1 por um outro fator, n . A distância usada é a distância de referência $d_0 = 1$ m.

A tabela abaixo mostra os valores dos coeficientes n_1 , n_2 e n (que substitui n_1 , em obstrução), para a frequência de 1900 MHz :

Altura da antena de TX (m)	n_1 (visada direta)	n_2 (visada direta)	n (obstrução)
Baixa (3,7)	2,18	3,29	2,58
Média (8,5)	2,17	3,36	2,56
Alta (13,3)	2,07	4,16	2,69

Tabela 4 valores de coeficientes de atenuação com a distância (1900 MHz)

b) Cátedra e Pérez-Arriaga [20]

Este modelo também é baseado na expressão outdoor sendo decomposto para três regiões distintas de distância d

- Para as três decomposições do modelo

f - o modelo foi obtido para a frequência de 2,2 GHz, aproximadamente

d - não é feita referência aos limites de distância de validade do modelo

Para $d < d_{pq}/2 \Rightarrow$

$$a = 40 \quad ; \quad c = 0 \quad ; \quad e = 25$$

Para $d_{pq}/2 \leq d < 4d_{pq} \Rightarrow$

$$a = 40 + 15\log_2 d' \quad ; \quad c = -15 \quad ; \quad e = 40$$

d' - é a própria distância d_{pq}

Para $d \geq 4d_{pq} \Rightarrow$

$$a = 40 - 25\log_2 d' - 20\log_4 d' \quad ; \quad c = 5 \quad ; \quad e = 60$$

d' - é a própria distância d_{pq}

Observação:

Para o cálculo de d_{pq} é utilizada a expressão da aproximação de pequenos valores de comprimento de onda.

O gráfico apresentado na Figura 3 é uma comparação entre modelos *indoor* apresentados :

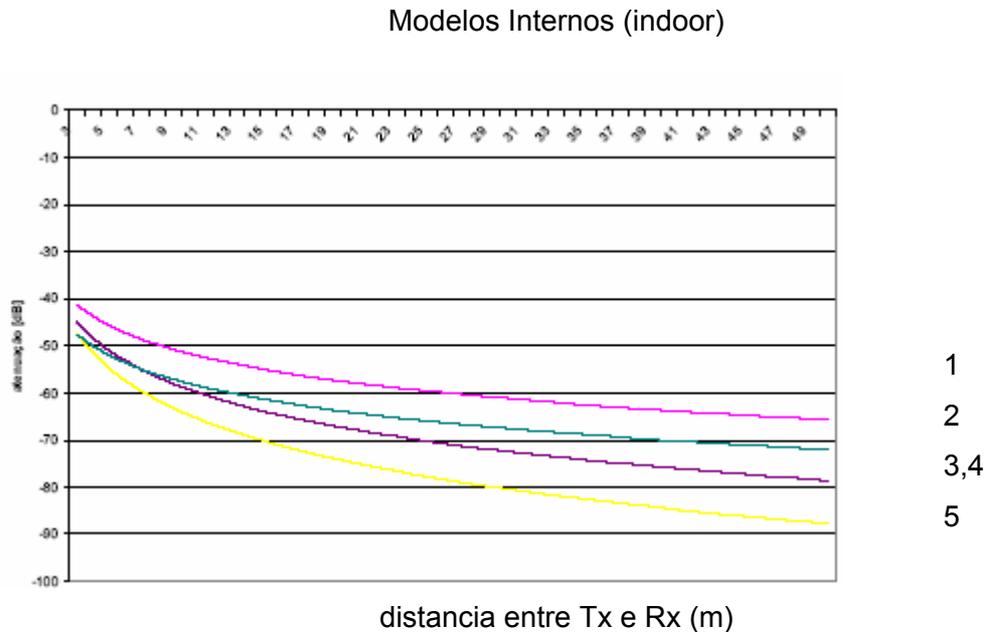


Figura 3 – comparação entre alguns dos modelos no ambiente indoor (sem análise de travessia de paredes ou andares)

Simbologia =>

- 1) Seidel & Rapaport I ; 2) Bartolomé & Vallejo ; 3) Seidel & Rapaport II ;
4) Seidel & Rapaport III ; 5) ITU-R – P.1238

Quanto às curvas apresentadas na Figura 3, devem ser feitas duas observações.

- Os modelos 3 e 4 produzem o mesmo resultado se não há travessia de andares (FAF = 0 em 4), de forma que as curvas de ambos se superpõem na figura;

- O modelo 2 está calculado para a frequência de 1,9 GHz, para a qual é válido, ao contrário de todos os outros modelos, calculados para a frequência de 900 MHz.