

CAPÍTULO 3

3.1 - Introdução

Uma grande variedade de modelos empíricos para predição de intensidade de sinal, com fundamentos teóricos e experimentais, têm sido desenvolvidos para aplicações em cálculo de cobertura para sistemas de comunicações rádio-móveis terrestres.

Esses modelos caracterizam o ambiente com diferentes perspectivas, e diferem na sua aplicabilidade, sobre diferentes tipos de terreno e diferentes condições ambientais.

A seguir serão discutidas as principais características de cada modelo empíricos de predição considerado neste trabalho, dando enfoque aos fatores básicos que influenciam a intensidade do sinal recebido.

Alguns fenômenos como o espalhamento e a absorção causada pela vegetação, as quais acentuam as perdas com o aumento da frequência, não são levados em consideração pelos modelos empíricos de propagação devido às dificuldades de quantizá-los, mesmo através de dados estatísticos.

A mais simples e útil forma de se implementar um modelo empírico para predição de perda de propagação é dada pelo modelo da lei da potência [8], e é dado pela seguinte expressão:

$$L(dB) = 10 \log \left(\frac{d}{d_{ref}} \right) + L_{ref} \quad (3.1)$$

sendo L_{ref} a perda medida na distância de referência (d_{ref}). O parâmetro α é denominado de expoente de perda de propagação. Esse parâmetro é utilizado como referência para implementação de vários modelos empíricos de predição e depende de parâmetros do sistema, tais como: altura das estações rádio base e móvel, frequência de operação e características do ambiente em estudo.

Um exemplo de modelo baseado na lei da potência é o modelo de perda no espaço livre, dado por

$$L_0 = 32,4 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (3.2)$$

sendo d (Km) a distância entre o transmissor e o receptor, f (MHz) a frequência de transmissão. Esse modelo possui $\alpha=2$, o que indica que a perda aumenta com o quadrado da distância e, conseqüentemente, a potência recebida diminui de 6dB quando se dobra a distância. Ou seja, este modelo apresenta uma perda de 6dB/oitava.

3.2 Modelos Empíricos de Predição para a Faixa de 800MHz

3.2.1 – Modelo de Okumura-Hata

O modelo de Okumura-Hata foi o primeiro modelo a ser implementado a partir de medidas especificamente para comunicações móveis, doravante sua publicação vários estudos sobre comunicações móveis surgiram, tanto para faixa de frequência de 900MHz quanto para 1,8GHz.

Esse modelo foi publicado em 1968 [9], como resultado das pesquisas feitas por Okumura e seus colaboradores, que realizaram nas vizinhanças da cidade de Tóquio (Japão) uma série de medições de intensidade de campo recebido em ambiente de comunicação móvel. Nesse modelo são apresentados testes de propagação detalhados, levando em consideração parâmetros como a frequência de operação, altura das antenas da estação base e a do terminal móvel, distância do enlace, e o tipo de área coberta pelo sistema.

A área de cobertura do sistema é classificada de acordo com os obstáculos encontrados no trajeto de propagação em:

- a) Urbana: caracterizada pela grande concentração de obstáculos como edifícios e árvores de grande porte.
- b) Suburbana: caracterizada pela presença não muito concentrada de casas e árvores.
- c) Área aberta ou rural: caracterizada como um espaço aberto, onde não há obstáculos como prédios e árvores de grande porte.

Okumura considera como padrão as medidas de intensidade de campo recebido realizadas num ambiente com área urbana e terreno quase plano. Suas medições tiveram como variáveis: a frequência na faixa de 453 MHz e 1920 MHz; distância entre transmissor e receptor e altura das antenas base e móvel.

Com essas medições Okumura obteve diversos gráficos de intensidade de campo recebido em função distância. Foram também realizadas medições em outros tipos de ambiente, com os parâmetros relativos a cada tipo de terreno, para a obtenção de fatores de correção.

Hata, visando fazer uso computacional das medidas e do método de Okumura, expressou matematicamente as informações contidas nos gráficos obtidos por Okumura através de equações empíricas. As equações matemáticas desenvolvidas por Hata e sua faixa de aplicação são mostradas a seguir:

Perda média de propagação para área urbana:

$$L(dB) = 69,55 + 26,16 \cdot \log(f) - 13,82 \cdot \log(h_b) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \log(h_b)] \cdot \log(d) \quad (3.3)$$

Perda média de propagação para área suburbana:

$$L_{PS}(dB) = L_P - 2 \cdot \left[\log\left(\frac{f}{28}\right) \right]^2 - 5,4 \quad (3.4)$$

Perda média de propagação para área aberta ou rural:

$$L_{PO}(dB) = L_P - 4,78 \cdot [\log(f)]^2 + 18,33 \cdot \log(f) - 40,94 \quad (3.5)$$

Sendo:

$a(h_m)$: fator de correção da altura da antena móvel

Cidade pequena-média:

$$a_m(h_m) = [1,1 \cdot \log(f) - 0,7] \cdot h_m - [1,56 \cdot \log(f) - 0,8] \quad (3.6)$$

Cidade grande:

$$a(h_m) = 8,29 \cdot [\log(1,54 \cdot h_m)]^2 - 1,10 \quad (dB) \quad f \leq 200 \text{ MHz} \quad (3.7)$$

$$a(h_m) = 3,2 \cdot [\log(11,75 \cdot h_m)]^2 - 4,97 \quad (dB) \quad f \geq 400 \text{ MHz} \quad (3.8)$$

Os parâmetros do modelo e suas faixas de validade estão mostrados na tabela 3.1.

Parâmetros	Definição	Faixa de Validade
f	Frequência de operação em MHz	100 – 1500
h_b	Altura da antena da estação rádio-base (ERB) em metros	30 – 200
h_m	Altura da antena do terminal móvel (TM) em metros	1 – 10
d	Distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em Km	1 – 20

Tabela 3.1 – Parâmetros do Modelo de Okumura-Hata e suas faixas de validade

Pode ser observado que o modelo empírico de Okumura-Hata é um modelo derivado da equação 3.1, e possui expoente de perda de percurso dados por

$$= \frac{44,9 - 6,55 \cdot \log(h_b)}{10}$$

(3.9)

substituindo-se os valores máximo e mínimo da altura da antena base dados na Tabela 3.1, obtém-se $\alpha_{\min}=2,98$ e $\alpha_{\max}=3,52$. Observa-se ainda que o parâmetro α diminui com o aumento da altura da antena base (h_b).

O modelo de Okumura-Hata, é provavelmente o modelo mais comum utilizado para projeto de sistemas reais. Várias ferramentas comerciais para predição são variações desse modelo, otimizadas para um particular ambiente.

3.2.2 – Modelo de Walfisch-Bertoni

Esse modelo caracteriza o ambiente com grande número de prédios separados por ruas [10]. Dessa forma, a comunicação nesse tipo de ambiente depende da propagação entre a antena base localizada acima da altura dos prédios e a antena móvel situada no nível das ruas.

Esse modelo leva em consideração essa dependência, considerando-se o ambiente urbano como aquele que apresenta um grande número de prédios de altura quase uniforme e que se encontram em fila, de forma que a distância entre um prédio e outro é muito menor que a sua largura, além do que, as ruas são consideradas paralelas entre si.

O sinal recebido ao nível das ruas pela unidade móvel não tem componente em linha de visada direta com a antena transmissora, situada normalmente acima

da altura dos prédios, sendo formado em grande parte por reflexões e difrações nos prédios próximos à unidade móvel, conforme mostra a Figura 3.1.

A perda total de intensidade de sinal (equação 3.12) prevista por esse modelo é composta pela soma da perda de espaço livre (equação 3.2) e por uma perda em excesso (equação 3.10), que leva em consideração a atenuação provocada pelas reflexões e difrações que ocorrem nos prédios próximos ao terminal móvel, além da curvatura da terra e da diferença entre a altura da antena transmissora da ERB e a altura média dos prédios. Essa última incorpora ainda um termo adicional (equação 3.11) onde está contida a influência da geometria dos prédios.

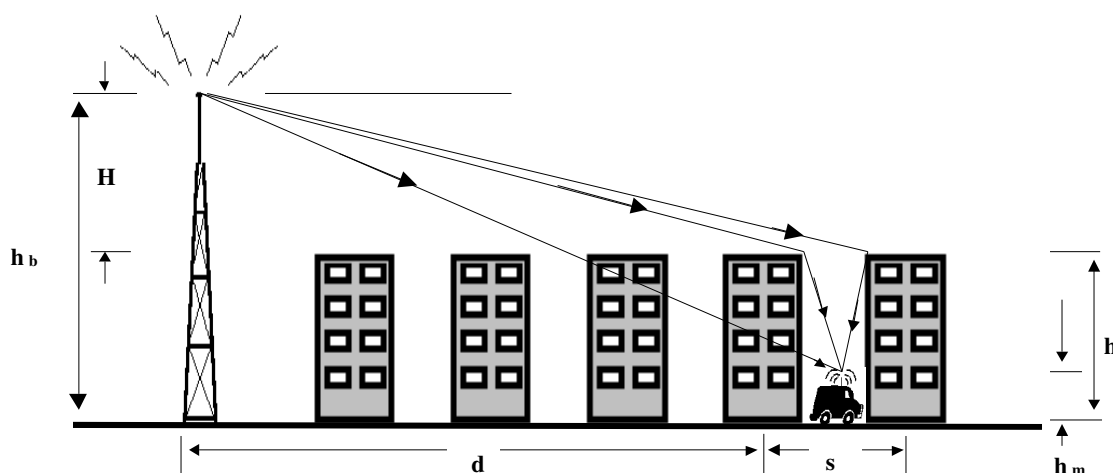


Figura 3.1 – Percurso de propagação com antena base acima dos prédios

As expressões matemáticas do modelo são mostradas a seguir:

Perda de espaço livre (já definida na equação 3.2 e repetida aqui por conveniência)

$$L_0 = 32,44 + 20 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log(d)$$

Perda em excesso:

$$L_{ex} = 57.1 + A + \log f + 18 \log d - 18 \log (h_b - h) - 18 \log \left[1 - \frac{d^2}{17(h_b - h)} \right] \quad (3.10)$$

Influência da geometria dos prédios:

$$A = 5 \cdot \log \left[\left(\frac{s}{2} \right)^2 + (h - h_m)^2 \right] - 9 \cdot \log(s) + 20 \cdot \log \left[\tan^{-1} \left[\frac{2 \cdot (h - h_m)}{s} \right] \right] \quad (3.11)$$

Perda total:

$$L_P = L_0 + L_{ex} \quad (3.12)$$

Na tabela 3.2 são mostrados os parâmetros do modelo.

Parâmetros	Definição
f	Frequência de operação em MHz
h_b	Altura efetiva da antena da estação rádio-base (ERB) em metros
h_m	Altura da antena do terminal móvel (TM) em metros
h	Altura média dos prédios em metros
s	Largura da rua em metros
d	Distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em km

Tabela 3.2 – Parâmetros do Modelo de Walfisch-Bertoni

3.2.3 – Modelo de Maciel-Bertoni-Xia

Maciel, Bertoni e Xia [11] estenderam o modelo de Walfisch-Bertoni para permitir que a antena base possa ser posicionada tanto acima (como na Figura 3.1), quanto abaixo do topo dos prédios (Figura 3.2).

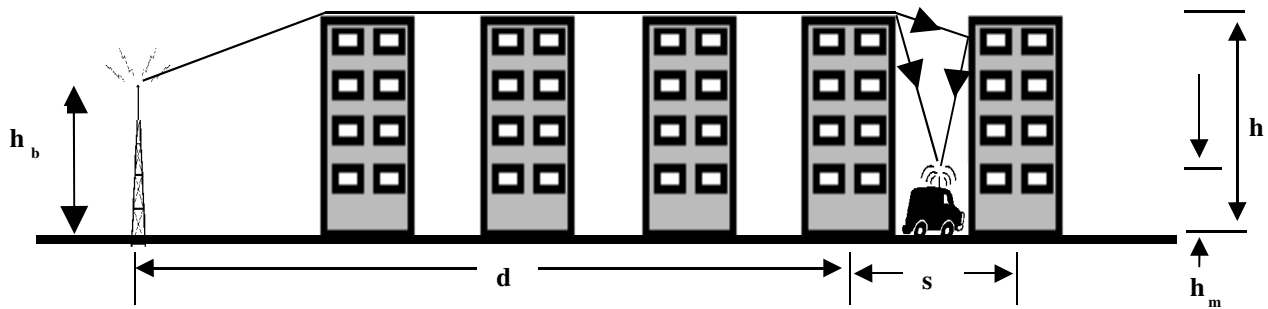


Figura 3.2 – Percurso de propagação com antena base abaixo dos prédios

A seguir são mostradas as equações matemáticas do modelo:

Perda de espaço livre (já definida na equação 3.2 e repetida aqui por conveniência)

$$L_0 = 32,44 + 20 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log(d)$$

Perda em excesso embaixo do topo dos prédios

$$L_{el} = -10 \log \left[\frac{G_m(\quad)}{k \sqrt{(h - h_m)^2 + w^2}} \right] \quad (3.13)$$

Onde $G_m(\theta)$ é o ganho da antena móvel na direção do topo dos prédios, k é o número de onda e θ é o ângulo entre o topo do prédio e o terminal móvel, conforme mostrado na Figura 3.3. O ângulo θ é calculado através da equação 3.15.

$$= \text{atan} \left[\frac{h - h_m}{w} \right]$$

(3.14)

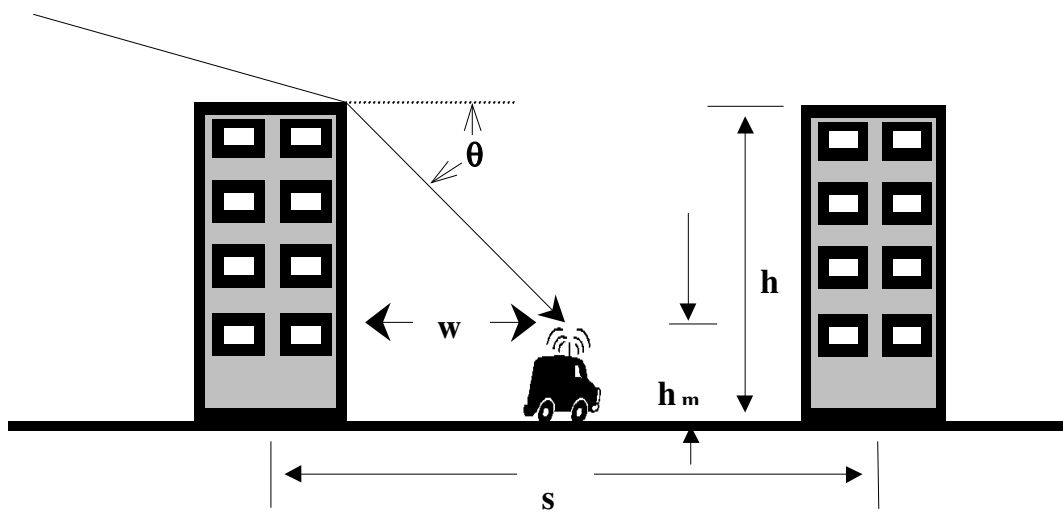


Figura 3.3 – Geometria da vizinhança do terminal móvel

Perda em excesso ao longo do topo dos prédios

$$L_{e2} = -10 \cdot \log(G_b \cdot Q^2) \quad (3.15)$$

sendo G_b é o ganho da antena base e o fator Q , de acordo com a altura da antena base em relação aos prédios, pode ser dado por:

(Q_L) – se h_B está abaixo do nível do topo dos prédios por mais do que

$$0,5 \sqrt{s}$$

$$Q_L = \frac{\frac{s}{1000d-s}}{\sqrt{2} \sqrt{(h-h_m)^2 - s^2}} \quad (3.16)$$

(Q_E) – se h_B está acima do nível do topo dos prédios por mais do que

$$\sqrt{s}$$

$$Q_e = 2,35 \cdot \left[\tan^{-1} \left(\frac{h_b}{1000d} \right) \cdot \sqrt{\frac{s}{s}} \right]^{0,9} \quad (3.17)$$

A perda média total de propagação do modelo é dada por:

$$L_{DS} = L_0 + L_{el} + L_{e2} + 18 \cdot \log \left(\frac{17 \cdot h_b + d^2}{17 \cdot h_b} \right) \quad (3.18)$$

Os parâmetros do modelo são mostrados na tabela 3.3.

Parâmetros	Definição
f	Frequência de operação em MHz
h_b	Altura efetiva da antena da estação rádio-base (ERB) em metros

h_m	Altura da antena do terminal móvel (TM) em metros
h	Altura média dos prédios em metros
s	Largura da rua em metros
w	Distância entre o TM e os prédios na rua
d	Distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em km

Tabela 3.3 – Parâmetros do Modelo de Maciel-Bertoni-Xia

3.2.4 – Modelo de Ibrahim-Parsons

O modelo Ibrahim-Parsons [12] é baseado em uma série de medidas da intensidade de campo realizada na cidade de Londres, razão pela qual esse modelo também é conhecido como “Modelo Londrino”.

Esse modelo leva em consideração que a propagação em ambientes urbanos depende de fatores como o grau de urbanização, utilização do terreno e a variação de altura entre o terminal móvel e a ERB

Com as medidas obtidas, Ibrahim e Parsons puderam descrever o ambiente urbano quantitativamente, determinando a dependência da perda de percurso com a distância e com a frequência de transmissão, utilizando os fatores já mencionados.

O melhor ajuste dos dados obtidos na cidade de Londres resultou na expressão 3.19.

$$\begin{aligned}
 L \text{ (dB)} = & -20 \cdot \log(0,7 h_b) - 8 \cdot \log(h_m) + \frac{f}{40} + 26 \cdot \log\left(\frac{f}{40}\right) - 86 \cdot \log\left(\frac{f + 100}{156}\right) + \\
 & \left[40 + 14,15 \cdot \log\left(\frac{f + 100}{156}\right) \right] \cdot \log(1000 \cdot d) + 0,265 \cdot (62,4 - 2,2 \cdot d) - \\
 & \left(\frac{0,37 \cdot (-7,475 \cdot d^2 + 85,225 \cdot d - 91,55)}{7} \right)
 \end{aligned}$$

(3.19)

Os parâmetros do modelo são mostrados na tabela 3.4.

Parâmetro s	Definição
f	Frequência de operação em MHz
h_b	Altura efetiva da antena da estação rádio-base (ERB) em metros
h_m	Altura da antena do terminal móvel (TM) em metros
d	Distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em km

Tabela 3.4 – Parâmetros do Modelo de Ibrahim-Parsons

3.3 Modelos Empíricos de Predição para a Faixa de 1,8GHZ

3.3.1 – Modelo de Okumura-Hata Modificado

As medições de Okumura foram realizadas para uma larga faixa da variação dos fatores levados em consideração nestas medições, tais como: frequência, altura das antenas base e móvel e distância, porém as equações de Hata são válidas apenas para as faixas mostradas na tabela 3.1.

Com o objetivo de validar suas equações sobre a faixa total das curvas de Okumura, Hata realizou algumas modificações no modelo de Okumura-Hata através da incorporação de novos fatores [13], especificados na tabela 3.1.

As equações modificadas de Hata são mostradas abaixo:

Funções de transição

$$F_1 = \frac{300^4}{f^4 + 300^4} \quad (3.20)$$

$$F_2 = \frac{f^4}{f^4 + 300^4} \quad (3.21)$$

Parâmetro s	Definição	Faixa de Validade
h_b	altura da antena da estação rádio-base (ERB) em metros	30 – 300
h_m	altura da antena do terminal móvel (TM) em metros	1 – 10
U	0 = cidade pequena/média, 1 = cidade grande	0 ou 1
U_r	0 = área aberta, 0.5 = suburbana, 1 = área urbana	0 – 1
B_1	Porcentagem de prédios sobre o terreno	3 – 50
d	Distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em Km	1 – 100
f	Frequência de operação em MHz	100 – 3000

Tabela 3.5 – Parâmetros do Modelo de Okumura-Hata Modificado

Fator de correção da curvatura da terra

$$S_{KS} = \left(27 + \frac{f}{230} \right) \cdot \log \left[\frac{17 \cdot (h_b + 20)}{17 \cdot (h_b + 20) + d^2} \right] + 1,3 - \frac{|f - 55|}{750} \quad (3.22)$$

Fator de correção para áreas urbanas/suburbanas

$$S_o = (1 - U_r) [(1 - 2 U_r) L_{po} + 4 U_r L_{ps}] \quad (3.23)$$

Fator geral de correção da altura da antena móvel

$$a_x = (1 - U) a_m(h_m) + U [a_2(h_m)F_1 + a_4(h_m)F_2] \quad (3.24)$$

Fator da porcentagem de prédios sobre o terreno

$$B_o = 25 \log(B_1) - 30 \quad (3.25)$$

Perda média de propagação

$$L = -(L_P + S_0 + a_x + S_{ks} + B_0) \quad (3.26)$$

Sendo L_P a perda média de propagação prevista pelo modelo de Okumura-Hata.

3.3.2 – Modelo de COST231-Hata

Esse modelo é baseado no modelo de Okumura-Hata e pode ser utilizado para frequências no intervalo de 1,5GHz – 2GHz. A seguir são mostradas as expressões deste modelo:

Perda média de propagação para área urbana:

$$L_p (dB) = 46,30 + 33,9 \log f - 13,82 \log h_b + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log d - a(h_m) \quad (3.27)$$

Sendo:

$a(h_m)$: fator de correção da altura da antena móvel

Cidade pequena-média:

$$a_m(h_m) = [1,1 \cdot \log(f) - 0,7] \cdot h_m - [1,56 \cdot \log(f) - 0,8] \quad (3.28)$$

Cidade grande:

$$a_4(h_m) = 3,2 (\log 11,75 h_m)^2 - 4,97 (dB) \quad f \geq 400 MHz \quad (3.29)$$

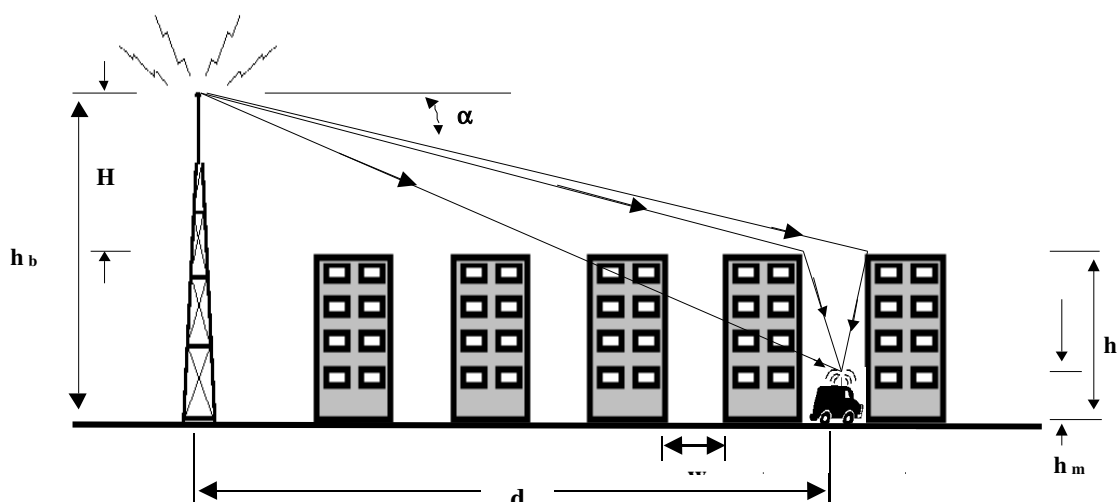
Sendo:

Parâmetro s	Definição	Faixa de Validade
h_b	altura da antena da estação rádio-base (ERB) em metros	30 – 200
h_m	altura da antena do terminal móvel (TM) em metros	1 – 10
d	Distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em Km	1 – 20
f	Frequência de operação em MHz	1500 – 2000

Tabela 3.6 – Parâmetros do Modelo de Cost231-Hata

3.3.3 – Modelo de Walfisch-Ikegami

Esse modelo foi desenvolvido pelo projeto COST231, combinando de uma forma integrada os modelos de Walfisch-Bertoni e de Ikegami para a difração [14]. Além dessa integração, esse modelo também combina alguns fatores empíricos de correção, sendo que o mesmo pode ser aplicado tanto em células grandes quanto em microcélulas, em terrenos planos ou urbanos. Os parâmetros que são considerados nesse modelo são mostrados nas figuras 3.4a e 3.4b e são descritos na tabela 3.4.



(a)

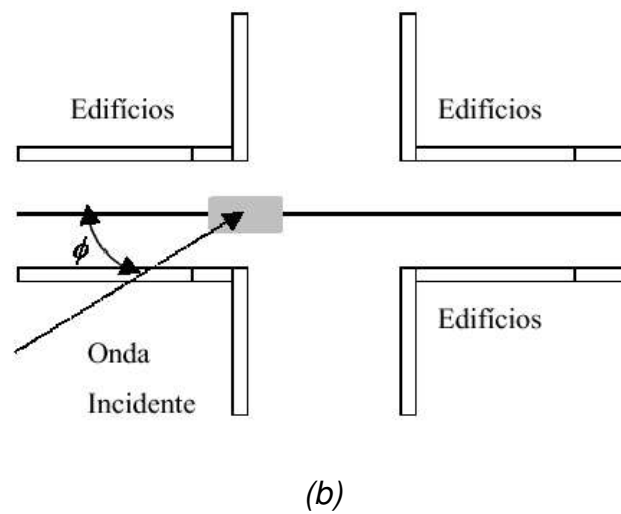


Figura 3.4 – Parâmetros do Modelo Walfisch-Ikegami

(a) Geometria do Modelo (b) Orientação do Enlace em relação a rua

Parâmetro	Definição
s	
h_b	altura da antena da estação rádio-base (ERB) em metros
h_m	altura da antena do terminal móvel (TM) em metros
d	Distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em Km
h	Altura média dos prédios em metros
w	Distância entre o TM e os prédios na rua
ϕ	Ângulo do enlace em relação a rua em graus
f	Frequência de operação em MHz

Tabela 3.7 – Parâmetros do Modelo de Walfisch-Ikegami

Se houver visada direta (propagação LOS - *line-sight*) entre o terminal móvel (TM) e a estação rádio-base (ERB), o modelo de perda se resume à equação (3.30)

$$L_{LOS}(dB) = 42,6 + 26 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(f) \quad (3.30)$$

Para propagação NLOS (*non-line-sight*), ou seja, sem linha de visada, a perda média total de propagação do modelo é expressa por:

$$L_{NLOS}(dB) = L_0 + L_{mult} + L_{diff} \quad (3.31)$$

onde

L_0 : é perda no espaço livre (dB);

L_{mult} : perda adicional devido a múltiplas difrações (dB);

L_{diff} : perda adicional por simples difração e por espalhamento (dB)

As equações pertinentes a esse modelo são mostradas abaixo:

$$L_{diff} = -16,9 + 10 \cdot \log(f) + 10 \cdot \log\left(\frac{(h-h_m)^2}{w}\right) + L(\quad) \quad (3.32)$$

$$L(\begin{matrix} -10+0.354 \\ 2.5+0.075(\\ 4.0-0.114(\end{matrix}) = \begin{matrix} -35 \\ -55 \end{matrix} \quad (3.33)$$

$$L_{mult} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log w \quad (3.34)$$

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log [1 + (h_b - h)] & \text{para } h_b > h \\ 0 & \text{para } h_b \leq h \end{cases} \quad (3.35)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_b > h \\ 54 - 0,8(h_b - h) & \text{para } d \geq 0,5 \text{ Km e } h_b \leq h \\ 54 - 0,8 \frac{(h_b - h)d}{0,5} & \text{para } d \leq 0,5 \text{ Km e } h_b \leq h \end{cases} \quad (3.36)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_b > h \\ 18 - 15 \frac{(h_b - h)}{h} & \text{para } h_b \leq h \end{cases} \quad (3.37)$$

Para cidades de tamanho médio e centros suburbanos com densidade moderada de árvores:

$$k_f = -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (3.38)$$

Para centros metropolitanos:

$$k_f = -4 + 1,5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (3.39)$$

onde k_a representa o aumento da perda de propagação devido a antena da estação rádio-base localizada abaixo do topo dos edifícios adjacentes; k_d e k_f controlam a dependência da múltipla difração com a frequência.

A tabela 3.8 apresenta as faixas de validade do modelo.

Parâmetro s	Definição	Faixa de Validade
h_b	altura da antena da estação rádio-base (ERB) em metros	4 – 50
h_m	altura da antena do terminal móvel (TM) em metros	4 – 50
d	Distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em Km	0,02 – 5
f	Frequência de operação em MHz	800 – 2000

Tabela 3.8 – Parâmetros do Modelo de Walfisch-Ikegami e suas faixas de validade

3.3.4 – Modelo de Ericsson-Hata

A Ericsson desenvolveu modelos baseados no modelo de Okumura-Hata, os quais podem ser utilizados para estimar a cobertura para os sistemas nas faixas de 900MHz e 1800MHz. As expressões de um desses modelos são mostradas a seguir:

$$L_p = A - 13,82 \log(h_b) + [44,9 - 6,55 \log(h_b)] \log(d) - a(h_m) \quad (3.40)$$

sendo

$$a(h_m) = 3,2 [\log(11,75 h_m)]^2 - 4,97 \quad (3.41)$$

A(900)=146 e A(1800)=153,8 para áreas urbanas

A(900)=136,9 e A(1800)=146,2 para áreas suburbanas

A(900)=118,3 e A(1800)=124,3 para áreas abertas

Assim como no modelo empírico de Okumura-Hata (3.3) pode ser observado que o modelo empírico de Ericsson-Hata é um modelo derivado da equação 3.1, e possui expoente de perda de percurso dados por

$$\alpha = \frac{44,9 - 6,55 \cdot \log(h_b)}{10} \quad (3.42)$$

3.4 – Cálculo do Coeficiente de Perda de Propagação (α)

Como pode ser observado diferentemente dos modelos de Okumra-Hata (3.3) e Ericsson-Hata (3.40), todos os outros modelo empíricos considerados nesse trabalho não podem ser expressos como na equação 3.1. No entanto, pode-se

