

4

Modelos de Predição de Cobertura

4.1

Introdução

A predição da área de cobertura é um passo importantíssimo no planejamento de qualquer sistema de Radiodifusão. Uma grande variedade de modelos de canal têm sido utilizados para prever a perda de propagação na faixa de VHF e UHF. Esses modelos geralmente necessitam de parâmetros empíricos ou semi-empíricos bem avaliados para que possam estimar a cobertura para um determinado tipo de serviço da maneira mais realista possível.

Os modelos consideram em sua formulação informações sobre a topografia e grau de urbanização do terreno e diferem em sua aplicabilidade, sendo alguns de aplicação geral enquanto que outros úteis em situações mais específicas.

A seguir serão descritos alguns dos modelos existentes na bibliografia para essa faixa de frequência que serão analisados nesse trabalho.

4.2.

Modelo de Okumura

O modelo de Okumura [19] foi publicado em 1968 e foi desenvolvido com base em uma extensa campanha de medidas na área de Tokyo. Todos os fatores que podem influenciar na propagação da onda eletromagnética são levados em conta por esse modelo.

Esse modelo é válido para frequências entre 150 MHz e 1920 MHz, embora tenha sido extrapolado até 3000 MHz, podendo ser usado para distancias entre 1 Km e 100 Km e antenas de transmissão com alturas entre 30m e 1000m.

Inicialmente são classificadas e definidas as características do terreno. No modelo são definidos padrões de terreno: terreno quase plano (ondulações menores que 20 m); irregulares, divididos em montanhosos, montanha isolada e terreno inclinado e por último o terreno terra-água.

Depois de definidas e especificadas as características do terreno e seus parâmetros, o segundo passo é classificar a região em função da urbanização. São três os graus de urbanização:

Área aberta ou rural: um espaço aberto onde não há obstáculos como árvores grandes ou prédios no trajeto da propagação;

Área suburbana: uma região com árvores e casas, ou seja, uma região que apresenta alguns obstáculos próximos ao receptor, mas não tão congestionado;

Área urbana: uma cidade com grande concentração de prédios e árvores grandes e altas.

Foram, então, feitas inúmeras medidas em áreas urbanas com terreno quase plano. Okumura desenvolveu um conjunto de curvas que indicam a atenuação média em relação ao espaço livre (A_{mu}) em uma área urbana quase plana, com altura efetiva da antena da estação base (h_{te}) de 200m e altura da estação móvel (h_{re}) de 3m. Quando as antenas não se situam na referência de altura anterior torna-se necessário introduzir alguns fatores de correção expressos na fórmula a seguir:

$$L_{50}[dB] = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}, d) - G(h_{re}, d) - G_{AREA} \quad (4.1)$$

onde

L_{50} é o valor da perda de propagação mediana;

L_F é a perda de propagação no espaço livre;

A_{mu} é a atenuação média relativa ao espaço livre;

$G(h_{te}, d)$ é o fator de ganho da altura da antena da estação base;

$G(h_{re}, d)$ é o fator de ganho da altura da antena da estação móvel;

G_{AREA} é o ganho relativo ao tipo de ambiente.

Os gráficos relacionados aos valores de $A_{mu}(f, d)$ e G_{AREA} são mostrados nas Figuras 10 e 11 abaixo.

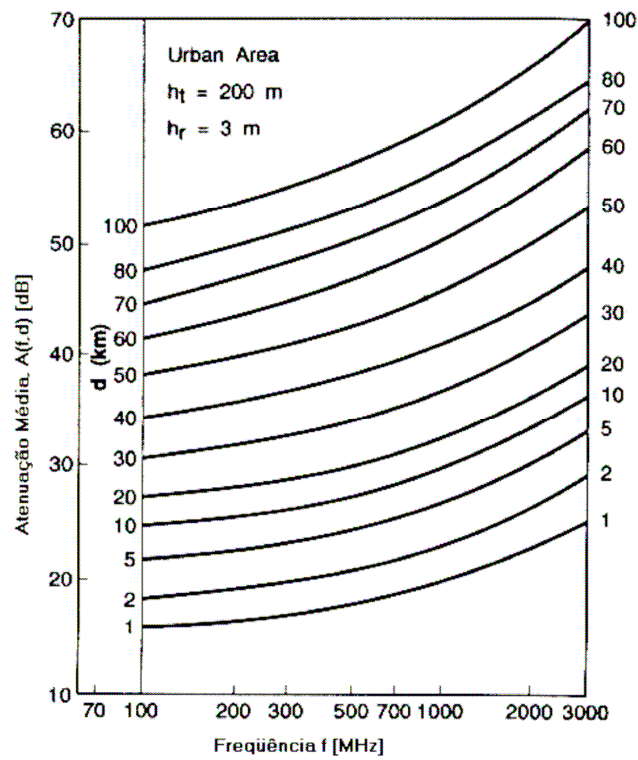


Figura 10: Curva de atenuação média relativa ao espaço livre em área urbana sobre terreno quase plano

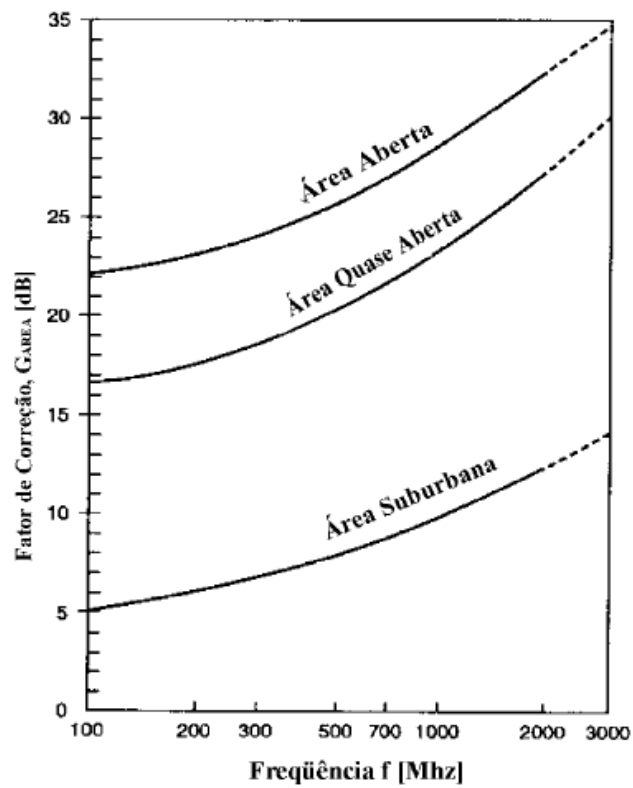


Figura 11: Fator de correção para diferentes tipos de terreno

Os fatores $G(h_{te}, d)$ e $G(h_{re}, d)$ são fatores de correção para antenas com alturas diferentes das de referência e são dadas por:

$$\begin{aligned} G(h_{te}, d) &= 20 \log \left(\frac{h_{te}}{200} \right) & 1000m > h_{te} > 30m \\ G(h_{re}, d) &= 10 \log \left(\frac{h_{re}}{3} \right) & h_{re} \leq 3m \\ G(h_{re}, d) &= 20 \log \left(\frac{h_{tr}}{3} \right) & 10m > h_{re} > 3m \end{aligned} \quad (4.2)$$

Ou também graficamente.

Outras correções como ondulação do terreno, alturas de montanhas, inclinação média do terreno, altura efetiva da antena de transmissão e parâmetro do percurso misto terra-água também são aplicadas ao modelo de Okumura.

Okumura não é um modelo muito aplicado na prática, devido a sua natureza gráfica. Para se trabalhar melhor com esse modelo em simulações computacionais utiliza-se as expressões ajustadas de Hata.

4.3. Expressão de Hata

De modo a tornar o modelo de Okumura acessível ao uso computacional, Hata desenvolveu relações matemáticas empíricas [4] que descrevem as informações contidas nos gráficos dados por Okumura. Essas formulações se limitam a certas faixas de parâmetros de entrada e são aplicáveis apenas para terrenos quase planos e são válidas para as frequências de 150 MHz e 1500 Mz.

As expressões matemáticas e suas faixas de aplicações são descritas abaixo:

Para áreas urbanas:

$$\begin{aligned} L_{50}[dB] &= 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_t - a(h_r) + \\ &+ (44,9 - 6,55 \log h_t) \log d \end{aligned} \quad (4.3)$$

Para áreas suburbanas:

$$L_{50}[dB] = L_{50}(\text{urbano}) - 2 \left[\log \left(\frac{f_c}{28} \right) \right]^2 - 5,4 \quad (4.4)$$

Para áreas abertas:

$$L_{50}[dB] = L_{50}(\text{urbano}) - 4,78(\log f_c)^2 - 18,33\log f_c - 40,94 \quad (4.5)$$

Onde o fator $a(h_r)$ é uma correção da altura da antena do receptor e é calculado da seguinte maneira:

Para cidades pequenas ou médias:

$$a(h_r) = (1,11\log f_c - 0,7)h_r - (1,56\log f_c - 0,8) \quad (4.6)$$

Para grandes cidades:

$$\begin{aligned} a(h_r) &= 8,29(\log 1,54h_r)^2 - 1,10 & f \leq 200\text{MHz} \\ a(h_r) &= 3,2(\log 11,75h_r)^2 - 4,97 & f \geq 400\text{MHz} \end{aligned} \quad (4.7)$$

onde

$$\begin{aligned} 150 \leq f_c \leq 1500 & \quad (f_c \text{ em MHz}) \\ 30 \leq h_t \leq 200 & \quad (h_t, \text{ altura da antena Tx, em m}) \\ 1 < h_r < 10 & \quad (h_r, \text{ altura da antena Rx, em m}) \\ < 1 \leq d \leq 20 & \quad (d \text{ em Km}) \end{aligned}$$

Comparações destas equações com as curvas do modelo de Okumura geram diferenças pequenas menores que 1 dB. Para áreas urbanas esse modelo se comporta com bastante precisão, deixando a desejar em áreas rurais e em terrenos irregulares, tendendo a ser mais otimista [19].

4.4. Modelo ITU-R p.1546

O modelo para cálculo de cobertura para faixa de VHF e UHF indicado pelo ITU é apresentado na Recomendação p.1546 [5]. Esse pode ser usado para estudos em frequência de 30MHz a 3000MHz. Para distâncias inferiores a 10 Km, esta recomendação produz resultados similares ao método Okumura Hata [32].

Esse método apresenta os resultados por meio de curvas de propagação ou por tabulações onde são apresentados os valores de intensidade de campo para uma potência irradiada efetiva de 1 kW (e.r.p) nas frequências nominais de 100, 600 e 2000 MHz, respectivamente, em função da distância entre as

antenas, da altura da transmissora, da altura da receptora, da variabilidade temporal e da variabilidade das localidades.

As curvas representam os valores de intensidade de campo excedidos em 50%, 10% e 1% do tempo em 50% das localidades, dentro de qualquer área de tipicamente 200m por 200m.

4.4.1.

Interpolação de intensidade de campo em função da distância

As curvas mostram a intensidade de campo plotada contra a distância, d , no intervalo de 1 km a 1000 km. Nenhuma interpolação para a distância é necessária se as intensidades de campos forem lidas diretamente destes gráficos. Para maior precisão, e para implementação computacional, as intensidades de campo devem ser obtidas das tabulações associadas. Neste caso, a menos que d coincida com uma das distâncias tabuladas, a intensidade de campo, E dB(μ V/m) deve ser linearmente interpolada para o logaritmo da distância usando-se:

$$E = E_{\text{inf}} + \frac{(E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}) \log\left(\frac{d}{d_{\text{inf}}}\right)}{\log\left(\frac{d_{\text{sup}}}{d_{\text{inf}}}\right)} \text{ dB}(\mu\text{V/m}) \quad (4.8)$$

onde:

d : distância para a qual a previsão é desejada

d_{inf} : distância de tabulação imediatamente inferior a d

d_{sup} : distância de tabulação imediatamente superior a d

E_{inf} : valor de intensidade de campo para d_{inf}

E_{sup} : valor de intensidade de campo para d_{sup}

Esta Recomendação não é válida para valores de d menores que 1 km ou maiores que 1000 km.

4.4.2.

Aplicação da altura da antena transmissora

O valor de h_1 determina que curva ou curvas serão selecionadas para obter-se os valores de intensidade de campo e a interpolação ou extrapolação porventura necessária

Para valores de h_1 entre 10m e 3000m, caso coincida com uma das oito alturas para as quais as curvas são fornecidas, nominalmente: 10; 20; 37,5; 75; 150; 300; 600 ou 1200 m, a intensidade de campo necessária pode ser obtida diretamente das curvas plotadas ou das tabulações associadas. Caso contrário, a intensidade de campo necessária deve ser interpolada ou extrapolada das intensidades de campo obtidas a partir de duas curvas usando:

$$E = E_{\text{inf}} + \frac{(E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}) \log\left(\frac{h_1}{h_{\text{inf}}}\right)}{\log\left(\frac{h_{\text{sup}}}{h_{\text{inf}}}\right)} \quad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \quad (4.9)$$

onde:

h_{inf} : 600 m se $h_1 > 1200$ m, caso contrário, a altura nominal efetiva logo abaixo de h_1 ;

h_{sup} : 1200 m se $h_1 > 1200$ m, caso contrário, a altura nominal efetiva logo acima de h_1 ;

E_{inf} : valor de intensidade de campo para h_{inf} , na distância definida;

E_{sup} : valor de intensidade de campo para h_{sup} , na distância definida.

No caso de h_1 estar na faixa de 0 e 10 m, o procedimento para a extrapolação da intensidade de campo, na distância definida de d km é baseado em distâncias do horizonte para Terra plana (km) escritas como:

$$d_H(h) = 4,1\sqrt{h} \quad \text{Eq (4.10)}$$

onde h é o valor desejado para a altura da antena transmissora h_1 (m).

Para $d < d_H(h_1)$, a intensidade de campo é dada pela curva de altura 10 m, na sua distância do horizonte, adicionando-se ΔE , onde ΔE é a diferença das intensidades de campo, na curva de altura 10 m, para a distância d e para a distância de horizonte de h_1 .

Para $d \geq d_H(h_1)$ a intensidade de campo é dada pela curva de altura 10 m, na distância Δd além de sua distância de horizonte, onde Δd é a diferença entre d e a distância de horizonte de h_1 .

Isto pode ser expresso conforme as fórmulas abaixo, onde $E_{10}(d)$ é a intensidade de campo dB($\mu\text{V/m}$) tomada da curva de altura 10 m para uma distância d (km):

$$E = E_{10}(d_H(10)) + E_{10}(d) - E_{10}(d_H(h1)) \quad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \quad \text{para } d < d_H(h1) \quad (4.11)$$

$$E = E_{10}(d_H(10) + d - d_H(h1)) \quad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \quad \text{para } d \geq d_H(h1) \quad (4.12)$$

Para percursos terrestres, é possível que as alturas efetivas das antenas transmissoras/base, $h1$, assumam valores negativos, uma vez que h_{eff} está baseada na altura média do terreno a distâncias de 3 a 15 km. Assim, $h1$ pode ser negativo.

O procedimento para valores negativos de $h1$ é obter a intensidade de campo para $h1 = 0$, como descrito anteriormente, e calcular a correção baseada no ângulo de desobstrução do terreno. O ângulo de desobstrução é calculado como se segue.

No caso de disponibilidade de dados do terreno, deve ser calculado o ângulo de desobstrução do terreno a partir da antena transmissora/base, como sendo o ângulo de elevação de uma linha que apenas libere todas as obstruções do terreno até 15 km da antena transmissora/base na direção da (mas não além disso) antena receptora/móvel, como visto na Figura 12.

A correção que deve ser adicionada à intensidade de campo correspondente a $h1 = 0$ é calculada usando-se:

$$\text{Correção} = j(v') - J(v) \quad \text{dB} \quad (4.13)$$

Onde $J(v)$ é dado por:

$$J(v) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \quad (4.14)$$

E:

$$v' = 0,036 \sqrt{f} \quad (4.15)$$

$$v = 0,065 \cdot \theta \cdot \sqrt{f} \quad (4.16)$$

Onde:

θ : ângulo de desobstrução do terreno (graus)

f : frequência (Mhz)

Pode-se observar que este método pode gerar uma descontinuidade na intensidade de campo na transição, em torno de $h1 = 0$.

A Figura 13 ilustra a correção do ângulo de desobstrução (Figura 12) do terreno para as frequências nominais.

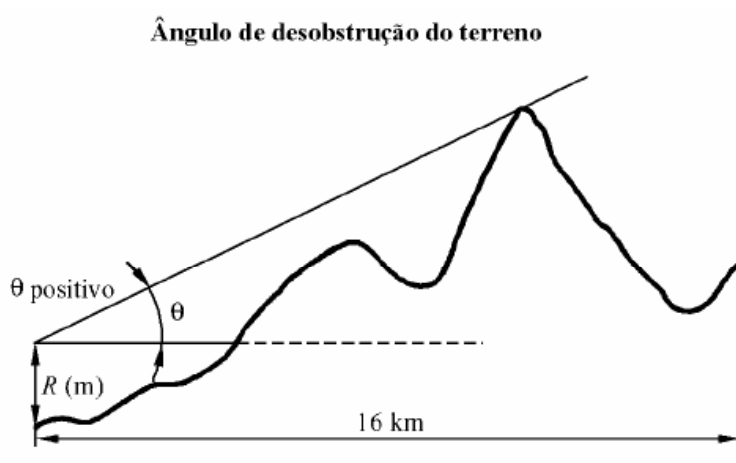


Figura 12: Ângulo de desobstrução do terreno



Figura 13: Correção para ângulo de desobstrução do terreno

4.4.3. Interpolação de intensidade de campo em função da frequência

Quando se deseja encontrar valores de intensidade de campo para qualquer outra frequência, deve-se interpolar ou extrapolar os valores obtidos para os valores nominais de frequência.

Para percursos terrestres, e para percursos sobre o mar onde a frequência desejada for maior que 100 MHz, a intensidade de campo necessária (E) deve ser calculada usando-se:

$$E = E_{\text{inf}} + \frac{(E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}) \log\left(\frac{F}{F_{\text{inf}}}\right)}{\log\left(\frac{F_{\text{sup}}}{F_{\text{inf}}}\right)} \quad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \quad (4.17)$$

onde:

F: frequência para a qual a previsão é desejada (MHz)

F_{inf} : frequência nominal inferior (100 MHz se $F < 600$ MHz, 600 MHz caso contrário)

F_{sup} : frequência nominal superior (600 MHz se $F < 600$ MHz, 2000 MHz caso contrário)

E_{inf} : valor de intensidade de campo para F_{inf}

E_{sup} : valor de intensidade de campo para F_{sup}

A norma considera a altura efetiva da antena transmissora, compreendida como a altura da antena em relação à altura média do terreno, calculada entre a distância de 3 a 15 Km, na direção da antena receptora. As curvas de propagação versus distância são fornecidas para os valores dados de altura da transmissora (h_1) de 10; 20; 37,5; 75; 150; 300; 600 e 1200 m.

4.4.4.

Interpolação de intensidade de campo em função da porcentagem de tempo

Os valores de intensidade de campo para uma dada porcentagem de tempo entre 1% e 50% do tempo devem ser calculados pela interpolação entre os valores nominais de 1% e 10% ou entre os valores nominais 10% e 50% do tempo, usando-se:

$$E = E_{\text{sup}} \frac{Q_{\text{inf}} - Q_t}{Q_{\text{inf}} - Q_{\text{sup}}} + E_{\text{inf}} \frac{Q_t - Q_{\text{sup}}}{Q_{\text{inf}} - Q_{\text{sup}}} \quad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \quad (4.18)$$

t: porcentagem de tempo para a qual a previsão é necessária

t_{inf} : porcentagem de tempo nominal inferior

t_{sup} : porcentagem de tempo nominal superior

Q_t : $Q_i (t/100)$

Q_{inf} : $Q_i (t_{\text{inf}}/100)$

Q_{sup} : $Q_i(t_{sup}/100)$

E_{inf} : valor de intensidade de campo para a porcentagem de tempo t_{inf}

E_{sup} : valor de intensidade de campo para a porcentagem de tempo t_{sup}

onde $Q_i(x)$ é a função complementar inversa da distribuição normal cumulativa.

A seguinte aproximação para a função de distribuição cumulativa normal complementar inversa, $Q_i(x)$, é válida para $0,01 < x < 0,99$:

$$Q_i(x) = T(x) - \xi(x) \quad \text{se } x \leq 0,5 \quad (4.19)$$

$$Q_i(x) = [T(1-x) - \xi(1-x)] \quad \text{se } x > 0,5 \quad (4.20)$$

onde:

$$T(x) = \sqrt{-2 \ln(x)}$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 T(x) + C_1)T(x)] + C_0}{[(D_3 T(x) + D_2)T(x) + D_1]T(x) + 1}$$

$$C_0 = 2,515517$$

$$C_1 = 0,802853$$

$$C_2 = 0,010328$$

$$D_1 = 1,432788$$

$$D_2 = 0,189269$$

$$D_3 = 0,001308$$

Os valores dados pelas fórmulas acima são fornecidos na Tabela 4.

| q % | Qi (q/100) | q % | Qi (q/100) | q % | Qi (q/100) | q % | Qi (q/100) |
|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|
| 1 | 2.327 | 26 | 0.643 | 51 | -0.025 | 76 | -0.706 |
| 2 | 2.054 | 27 | 0.612 | 52 | -0.050 | 77 | -0.739 |
| 3 | 1.881 | 28 | 0.582 | 53 | -0.075 | 78 | -0.772 |
| 4 | 1.751 | 29 | 0.553 | 54 | -0.100 | 79 | -0.806 |
| 5 | 1.645 | 30 | 0.524 | 55 | -0.125 | 80 | -0.841 |
| 6 | 1.555 | 31 | 0.495 | 56 | -0.151 | 81 | -0.878 |
| 7 | 1.476 | 32 | 0.467 | 57 | -0.176 | 82 | -0.915 |
| 8 | 1.405 | 33 | 0.439 | 58 | -0.202 | 83 | -0.954 |
| 9 | 1.341 | 34 | 0.412 | 59 | -0.227 | 84 | -0.994 |
| 10 | 1.282 | 35 | 0.385 | 60 | -0.253 | 85 | -1.036 |
| 11 | 1.227 | 36 | 0.358 | 61 | -0.279 | 86 | -1.080 |
| 12 | 1.175 | 37 | 0.331 | 62 | -0.305 | 87 | -1.126 |
| 13 | 1.126 | 38 | 0.305 | 63 | -0.331 | 88 | -1.175 |
| 14 | 1.080 | 39 | 0.279 | 64 | -0.358 | 89 | -1.227 |
| 15 | 1.036 | 40 | 0.253 | 65 | -0.385 | 90 | -1.282 |
| 16 | 0.994 | 41 | 0.227 | 66 | -0.412 | 91 | -1.341 |
| 17 | 0.954 | 42 | 0.202 | 67 | -0.439 | 92 | -1.405 |
| 18 | 0.915 | 43 | 0.176 | 68 | -0.467 | 93 | -1.476 |
| 19 | 0.878 | 44 | 0.151 | 69 | -0.495 | 94 | -1.555 |
| 20 | 0.841 | 45 | 0.125 | 70 | -0.524 | 95 | -1.645 |
| 21 | 0.806 | 46 | 0.100 | 71 | -0.553 | 96 | -1.751 |
| 22 | 0.772 | 47 | 0.075 | 72 | -0.582 | 97 | -1.881 |
| 23 | 0.739 | 48 | 0.050 | 73 | -0.612 | 98 | -2.054 |
| 24 | 0.706 | 49 | 0.025 | 74 | -0.643 | 99 | -2.327 |
| 25 | 0.674 | 50 | 0.000 | 75 | -0.674 | - | - |

Tabela 4: Valores aproximados da distribuição cumulativa normal complementar inversa

4.5. Modelo Walfish Bertoni

Para prever o nível médio do sinal recebido, o modelo desenvolvido por Walfisch e Bertoni [6] leva em consideração a difração nos topos dos prédios, bem como a influência da altura dos mesmos.

A perda total de propagação é dada pela soma de três fatores distintos: a perda do espaço livre; a perda por difração no topo dos prédios e a perda de difração em uma série de prédios no caminho entre as antenas transmissoras e receptoras.

Sendo assim, a expressão do modelo é:

$$L_{50} = L_F + L_{rts} + L_{ms} \quad (4.21)$$

Onde a perda por espaço livre (LF) é:

$$L_F (dB) = 32,44 + 20 \log fc + 20 \log R \quad (4.22)$$

A perda por difração no topo dos prédios (L_{rts}) é:

$$L_{rts} (dB) = 57,1 + \log fc + 18 \log R - 18 \log H - 18 \log \left[\frac{1 - R^2}{17H} \right] \quad (4.23)$$

E a perda devido à difração em série de prédios entre as antenas de transmissão e recepção é:

$$L_{ms} (dB) = 5 \log \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 + (h - h_r)^2 \right] - 9 \log d + 20 \log \left\{ \tan g^{-1} \left[2 \frac{(h - h_r)}{d} \right] \right\} \quad (4.24)$$

A Figura 13 ilustra a geometria usada no modelo, sendo:

- R: a distância entre a transmissora e o prédio mais próximo da receptora;
- H: a altura da antena transmissora acima dos prédios;
- h: a altura média dos edifícios;
- hr: a altura da antena receptora
- d: o espaçamento entre os prédios.

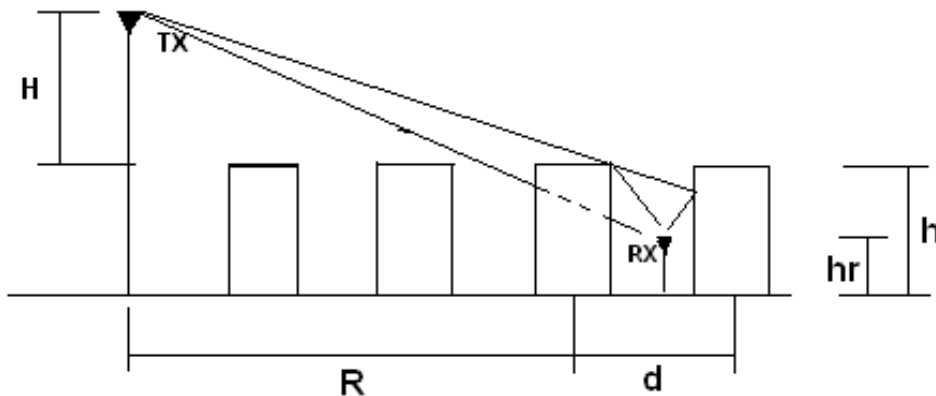


Figura 14: Geometria do modelo Walfish e Bertoni

4.6. Modelo Ibrahim Parsons

O Modelo de Ibrahim e Parsons [7] baseia-se em resultados experimentais coletados na cidade de Londres com as antenas transmissoras na altura de 46 m. As frequências usadas foram de 168, 445 e 900 MHz e os dados de medidas foram coletados em 64 quadriculas de teste de 500X500 m selecionadas em três arcos ao redor da transmissora num range de aproximadamente 2,5 e 9 Km.

Duas aproximações foram desenvolvidas que levam em consideração, além de outros fatores, os de utilização do terreno e grau de urbanização.

4.6.1.

Modelo empírico:

A expressão final obtida através de uma análise de regressão linear múltipla, que inclui os parâmetros que influenciam o valor da perda de propagação foi:

$$L_{50} = 20 \log(0,7h_t) - 8 \log h_r + \frac{f}{40} + 26 \log \frac{f}{40} - 86 \log \left(\frac{f + 100}{156} \right) + \left[40 + 14,15 \log \left(\frac{f + 100}{156} \right) \right] \log d + 0,265L - 0,37H + k_1 \quad \text{dB} \quad (4.25)$$

Onde:

$K_1 = 0,087U - 5,5$ para regiões altamente urbanizadas e

$K_1 = 0$ caso contrário

L_{50} é a perda média de percurso;

h_t e h_r são as alturas das antenas de transmissão e recepção, em metros, respectivamente;

f é a frequência de transmissão, em MHz;

d é a distância entre transmissor e receptor, em metros;

L é o fator de utilização do terreno, que representa a porcentagem da área de teste que é ocupada por prédios, independente de sua altura;

U é o grau de urbanização, que é a porcentagem da área de teste ocupada por prédios de quatro ou mais andares.

H é a diferença de altitude média entre as quadriculas onde se localizam das antenas transmissora e receptora

4.6.2.

Modelo semi-empírico

Esse modelo tem como base a equação do modelo de terra plana, apresentado na seção 3 do capítulo 3 desse trabalho. O modelo sugere que a atenuação média de percurso seja expressa como uma soma da perda teórica de terra plana e uma perda em excesso denominada β . Os valores de β estão

relacionados com os fatores do ambiente urbano e a equação de melhor ajuste para β é dada por:

$$\beta = 20 + \frac{f}{40} + 0,18L - 0,34H + k_2 \quad (4.26)$$

Onde:

$K_2=0,094U-5,9$ para o centro da cidade e;

$K_2=0$ nas demais regiões.

A equação geral do modelo semi-empírico é então:

$$L_{50} = 40 \log d - 20 \log(h_t h_r) + \beta \quad (4.27)$$