

## 3

### Métodos para cálculo de cobertura e interferências.

#### 3.1

##### Introdução.

Os modelos do canal são essenciais para a análise, projeção e implantação do sistema de comunicação com uma confiável transferência de informações entre duas partes. O desempenho e complexidade dos algoritmos de processamento de sinais, o projeto de transceptores e antenas inteligentes atualmente utilizados em sistemas de comunicações móveis são altamente dependentes dos métodos utilizados para modelar os canais rádio móveis com desvanecimento. Dentro dos mecanismos básicos de propagação, citamos os seguintes:

- Propagação em espaço livre ou linha de visada;
- Reflexão especular devido à interação das ondas eletromagnéticas com superfícies planas e lisas, que têm grandes dimensões em comparação com o comprimento de onda eletromagnética interagindo;
- Difração causada quando uma onda eletromagnética contorna os obstáculos.
- Reflexão ou espalhamento devido à incidência em objetos de superfícies irregulares ou formas com tamanhos da ordem do comprimento de onda.
- Refração através de objetos que causa absorção parcial da energia.

## 3.2

### Modelos para cálculo da perda de propagação.

#### 3.2.1

##### Okumura-Hata.

O modelo de Okumura-Hata é amplamente utilizado como modelo de propagação em redes celulares e pode prever a perda no canal na faixa de 400-2200 MHz [35]. Cobre distâncias de 1 a 20 Km. O modelo apresenta formulas para três ambientes:

- Urbano Típico:

$$L_{P(Urbana)} = 69.55 + 26.16 \log f_c + [44.9 - 6.55 \log h_{BS}] \log d - 13.82 \log h_{BS} - a(h_{UE})(dB) \quad (3-1)$$

Onde:

- $L_{P(Urbana)}$  é a perda para propagação em ambiente urbano.
- $f_c$  é a frequência de portadora ( $400 \leq f_c \leq 2200$  MHz).
- $h_{BS}$  é a altura da antena da estação base (30 a 200 m).
- $h_{UE}$  é a altura da antena da estação móvel (1 a 10 m).
- $d$  é a distância entre a BS e a UE (1 a 20 Km).
- $a(h_{UE})$  é o fator de correção da altura da antena UE. Para  $f_c \geq 400 MHz$ ,  $a(h_{UE})$  é dado por:
- Para urbana densa:

$$a(h_{UE}) = 3.2[\log 11.75 * h_{UE}]^2 - 4.97 \quad (3-2)$$

- Para Urbana:

$$a(h_{UE}) = [1.1 \log f_c - 0.7] h_{UE} - [1.56 \log f_c - 0.8] \quad (3-3)$$

- Suburbana Típica:

$$L_{p(Suburbana)} = L_{p(Urbana)} - 2[\log(\frac{f_c}{28})^2 - 5.4](dB) \quad (3-4)$$

- Rural:

$$L_{p(Rural)} = L_{p(Urbana)} + 18.33 \log f_c - 4.78[\log(f_c)^2] - 40.94(dB) \quad (3-5)$$

## 3.2.2

**COST-231.**

O modelo desenvolvido no projeto Europeu, Cooperação em Ciência e Tecnologia (COST-231) é um dos modelos previstos para ser usado para previsão do canal LTE [44]. Ele cobre frequências de 800 a 2000 MHz, e distâncias da BS a partir de 20 m até 5 km. É amplamente utilizado na Europa para o sistema GSM em 1800 MHz. O modelo é válido para  $h_{BS}$  entre 4 a 50 metros e  $h_{UE}$  entre 1 a 3 metros. A fórmula de perda por percurso é dada por:

$$L_p = 32.4 + 20\log f_c + L_{rts} + L_m(\text{dB}) \quad (3-6)$$

onde  $L_{rts}$  e  $L_m$  são as difrações do topo do telhado para a rua e o fator de dispersão e múltipla perda, respectivamente. As fórmulas para esses dois fatores são dadas por:

$$L_{rts} = 10\log(f_c) + 20\log(h_r - h_{UE}) + L_\Phi - 10\log(W) - 16.9 \quad (3-7)$$

$$L_m = L_{BS2B} + K_a + K_d\log(d) + K_f\log(f_c) - 9\log(b) \quad (3-8)$$

onde,  $h_r$  é a altura de construção média,  $W$  é a largura de rua,  $b$  é a distância entre os edifícios adjacentes,  $L_\Phi$  é a perda devido ao ângulo de incidência em relação à rua, e  $L_{BS2B}$  é o fator de perda devido à diferença entre a altura da BS e a altura média dos edifícios. As várias relações são dadas por (todos em dB)[44]:

$$L_\Phi = \begin{cases} -10 + 0.354\phi, & 0^\circ \leq \phi \leq 35^\circ \\ 2.5 + 0.0075(\phi - 35), & 35^\circ \leq \phi \leq 55^\circ \\ 4 - 0.114(\phi - 55), & 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \end{cases}$$

$$L_{BS2B} = \begin{cases} -18\log(11 + h_{BS} - h_r), & h_{BS} \geq h_r \\ 0, & h_{BS} < h_r \end{cases}$$

$$K_a = \begin{cases} 54, & h_{BS} > h_r \\ 54 - 0.8h_{BS}, & d \geq 500m; h_{BS} \leq h_r \\ 54 - 0.8h_{BS}(\frac{d}{500}), & d < 500m; h_{BS} \leq h_r \end{cases}$$

$$K_d = \begin{cases} 18, & h_{BS} < h_r \\ 18 - \frac{15(h_{BS} - h_r)}{h_{UE} - h_r}, & h_{BS} \geq h_r \end{cases}$$

$$K_f = \begin{cases} 4 + 0.7(\frac{f_c}{925} - 1), & \text{Cidade de Porte Médio/Subúrbio} \\ 4 + 1.5(\frac{f_c}{925} - 1), & \text{Área Metropolitana} \end{cases}$$

### 3.2.3

#### IMT-2000.

*International Mobile Telecommunications* (IMT-2000) é o padrão que inclui os requisitos para sistemas celulares 3G. Este padrão tem os seguintes modelos de propagação para os ambientes interiores e exteriores.

#### Ambiente Interior.

Esse modelo cobre cenários interiores com células pequenas e níveis de baixa potência de transmissão. É adequado para valores de atraso na RMS de 35 a 460 ns. Considera uma perda aleatória de sombreamento log-normal, com um desvio padrão de 12 dB. A perda de percurso é dada por [44]:

$$L_{p(\text{interior})} = 37 + 30\log(d) + 18.3n^{\left[\frac{n+2}{n+1} - 0.46\right]} (dB) \quad (3-9)$$

onde  $d$  é a distância entre o transmissor e receptor e  $n$  é o número de andares.

#### Pedestres e Ambiente exterior ou interior.

O modelo considera células pequenas, com níveis de baixa potência de transmissão e com atraso na propagação RMS de 100 a 800 ns. Cobre apenas cenários sem linha de visada (NLOS: *Non Line of Sight*) e considera uma perda aleatória de sombreamento log-normal, com um desvio padrão de 10 dB. A perda de percurso é dada por:

$$L_{p(\text{ped-ext2in})} = 40\log(d) + 30\log(f_c) + 49dB \quad (3-10)$$

onde  $d$  é a distância  $T_x - R_x$  e  $f_c$  é a frequência da portadora.

#### Ambiente Veicular.

O modelo cobre grandes células e utiliza níveis elevados de potência na transmissão, com um atraso na propagação RMS de 4 a 12  $\mu s$ . Uma perda aleatória de sombreamento log-normal com um desvio padrão de 10 dB é considerada. A fórmula da perda de percurso é dada por:

$$L_{p(\text{veicular})} = 40(1 - 4 \times 10^{-2} \Delta h_{BS}) \log(d) - 18 \log \Delta h_{BS} + 21 \log(f_c) + 80dB \quad (3-11)$$

onde  $\Delta h_{BS}$  é a altura da antena ERB medida a partir do nível médio do teto do veículo em metros,  $d$  é a distância  $T_x - R_x$  e  $f_c$  é a frequência da portadora.

### 3.2.4

#### Modelo Winner.

Os modelos de canais de rádio WINNER foram desenvolvidos nas duas fases do projeto IST-WINNER [25]. Desde que o modelo SCME (*Spatial Channel Model Extended*) inicial não foi adequado para simulações mais avançadas, novos modelos baseados em medições foram desenvolvidos. Os modelos são baseados em modelos de multi-conexão e raios duplo-direcionais, que são antenas independentes, escaláveis e capazes de criar geometrias arbitrárias, baseadas em modelos de canais MIMO. Distribuições estatísticas e os parâmetros do canal são extraídos a partir de medições em quaisquer situações de propagação e podem ser ajustados. O último modelo, conhecido como o modelo de Fase II, constitui a base para os modelos UIT *IMT-Advanced*. Cobre a faixa de frequência de 2 a 6 GHz e cobre 13 cenários de propagação incluindo interior, exterior-a-interiores (e vice-versa), micro e macro urbanos, macro células suburbanas e rurais, e redes móveis. É possível fazer variar o número de antenas, as configurações de antenas, a geometria e o padrão de feixe da antena, sem alterar o modelo básico de propagação. Os modelos também incluem os modelos CDL (*Clustered Delay Line*) para calibração do sistema. A perda no percurso foi especificada para todos os cenários, divididos em dois subcenários, de acordo com as condições de propagação (LOS / NLOS). A estrutura geral da perda é dada por:

$$PL = A \log_{10}(d) + B + C \log_{10}\left(\frac{f_c}{5}\right) + X \quad (3-12)$$

onde  $d$  é a distância em metros e  $f_c$  é a frequência de portadora em GHz. Para cada cenário (subcenário), as constantes A, B e C são definidas pela tabela 3.1.

| Scenario | Path loss [dB]                                                                                                                                                                                                                                                                     | Shadow fading std [dB]       | Applicability range, antenna height default values                                                                                                                                                                |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LOS      | $A = 18.7, B = 46.8, C = 20$                                                                                                                                                                                                                                                       | $\sigma = 3$                 | $3\text{m} < d < 100\text{m}$ ,<br>$h_{BS} = h_{MS} = 1 \dots 2.5\text{m}$                                                                                                                                        |
| A1       | NLOS <sup>1)</sup><br>$A = 36.8, B = 43.8, C = 20$ and<br>$X = 5(n_w - 1)$ (light walls)<br>or<br>$X = 12(n_w - 1)$ (heavy walls)                                                                                                                                                  | $\sigma = 4$                 | same as A1 LOS,<br>$n_w$ is the number of walls between the BS and the MS ( $n_w > 0$ for NLOS)                                                                                                                   |
|          | NLOS <sup>2)</sup><br>light walls:                                                                                                                                                                                                                                                 | $\sigma = 6$                 | same as A1 LOS,<br>$n_w$ is the number of walls between BS and MS                                                                                                                                                 |
|          | heavy walls:                                                                                                                                                                                                                                                                       | $\sigma = 8$                 |                                                                                                                                                                                                                   |
|          | FL<br>For any of the cases above, add the floor loss (FL), if the BS and MS are in different floors:<br>$FL = 17 + 4(n_f - 1), n_f > 0$                                                                                                                                            |                              | $n_f$ is the number of floors between the BS and the MS ( $n_f > 0$ )                                                                                                                                             |
| A2 NLOS  | $PL = PL_b + PL_{rw} + PL_{in}$ ,<br>$\begin{cases} PL_b = PL_{B1}(d_{out} + d_{in}) \\ PL_{rw} = 14 + 15(1 - \cos(\theta))^2 \\ PL_{in} = 0.5d_{in} \end{cases}$                                                                                                                  | $\sigma = 7$                 | $3\text{m} < d_{out} + d_{in} < 1000\text{m}$ ,<br>$h_{BS} = 3(n_F - 1) + 2\text{m}$<br>$h_{MS} = 1.5$ ,<br>See <sup>3)</sup> for explanation of parameters                                                       |
| B1       | LOS<br>$A = 22.7, B = 41.0, C = 20$<br>$PL = 40.0 \log_{10}(d_1) + 9.45 - 17.3 \log_{10}(h'_{BS}) - 17.3 \log_{10}(h'_{MS}) + 2.7 \log_{10}(f_c/5.0)$                                                                                                                              | $\sigma = 3$<br>$\sigma = 3$ | $10\text{m} < d_1 < d'_{BP}$ <sup>4)</sup><br>$d'_{BP} < d_1 < 5\text{km}$<br>$h_{BS} = 10\text{m}, h_{MS} = 1.5\text{m}$                                                                                         |
|          | NLOS<br>$PL = \min(PL(d_1, d_2), PL(d_2, d_1))$<br>where<br>$PL(d_k, d_i) =$<br>$PL_{LOS}(d_k) + 20 - 12.5n_j + 10n_j \log_{10}(d_i) + 3 \log_{10}(f_c/5.0)$<br>and $n_j = \max(2.8 - 0.0024d_k, 1.84)$ , $PL_{LOS}$ is the path loss of B1 LOS scenario and $k, l \in \{1, 2\}$ . | $\sigma = 4$                 | $10\text{m} < d_1 < 5\text{km}$ ,<br>$w/2 < d_2 < 2\text{km}$ <sup>5)</sup><br>$w = 20\text{m}$ (street width)<br>$h_{BS} = 10\text{m}, h_{MS} = 1.5\text{m}$<br>When<br>$0 < d_2 < w/2$ , the LOS PL is applied. |
| B2 NLOS  | Same as B1.                                                                                                                                                                                                                                                                        | $\sigma = 4$                 |                                                                                                                                                                                                                   |

|     |      |                                                                                                                                                                                                |                              |                                                                                                                              |
|-----|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| B3  | LOS  | $A = 13.9, B = 64.4, C = 20$                                                                                                                                                                   | $\sigma = 3$                 | $5\text{m} < d < 100\text{m}$ ,<br>$h_{BS} = 6\text{m}, h_{MS} = 1.5\text{m}$                                                |
|     | NLOS | $A = 37.8, B = 36.5, C = 23$                                                                                                                                                                   | $\sigma = 4$                 | Same as B3 LOS                                                                                                               |
| B4  | NLOS | Same as A2, except antenna heights.                                                                                                                                                            |                              | $3\text{m} < d_{out} + d_m < 1000\text{m}$ ,<br>$h_{BS} = 10\text{m}, h_{MS} = 3(n_{FI} - 1) + 1.5\text{m}$                  |
| B5a | LOS  | $A = 23.5, B = 42.5, C = 20$                                                                                                                                                                   | $\sigma = 4$                 | $30\text{m} < d < 8\text{km}$<br>$h_{BS} = 25\text{m}, h_{RS} = 25\text{m}$                                                  |
| B5c | LOS  | Same as B1 LOS, except antenna heights ( $h_{RS}$ is the relay antenna height).                                                                                                                | $\sigma = 3$                 | $10\text{m} < d < 2000\text{m}$<br>$h_{BS} = 10\text{m}, h_{MS} (=h_{RS}) = 5\text{m}$                                       |
| B5f | NLOS | $A = 23.5, B = 57.5, C = 23$                                                                                                                                                                   | $\sigma = 8$                 | $30\text{m} < d < 1.5\text{km}$<br>$h_{BS} = 25\text{m}, h_{RS} = 15\text{m}$                                                |
| C1  | LOS  | $A = 23.8, B = 41.2, C = 20$<br>$PL = 40.0 \log_{10}(d) + 11.65 - 16.2 \log_{10}(h_{BS})$<br>$- 16.2 \log_{10}(h_{MS}) + 3.8 \log_{10}(f_c/5.0)$                                               | $\sigma = 4$<br>$\sigma = 6$ | $30\text{m} < d < d_{BP}$ ,<br>$d_{BP} < d < 5\text{km}$ ,<br>$h_{BS} = 25\text{m}, h_{MS} = 1.5\text{m}$                    |
|     | NLOS | $PL = (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d) + 31.46$<br>$+ 5.83 \log_{10}(h_{BS}) + 23 \log_{10}(f_c/5.0)$                                                                              | $\sigma = 8$                 | $50\text{m} < d < 5\text{km}$ ,<br>$h_{BS} = 25\text{m}, h_{MS} = 1.5\text{m}$                                               |
| C2  | LOS  | $A = 26, B = 39, C = 20$<br>$PL = 40.0 \log_{10}(d) + 13.47 - 14.0 \log_{10}(h'_{BS})$<br>$- 14.0 \log_{10}(h'_{MS}) + 6.0 \log_{10}(f_c/5.0)$                                                 | $\sigma = 4$<br>$\sigma = 6$ | $10\text{m} < d < d'_{BP}$ <sup>4)</sup><br>$d'_{BP} < d < 5\text{km}$<br>$h_{BS} = 25\text{m}, h_{MS} = 1.5\text{m}$        |
|     | NLOS | $PL = (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d) + 34.46$<br>$+ 5.83 \log_{10}(h_{BS}) + 23 \log_{10}(f_c/5.0)$                                                                              | $\sigma = 8$                 | Same as C1 NLOS                                                                                                              |
| C3  | NLOS | Same as C2 NLOS                                                                                                                                                                                |                              | Same as C2 NLOS                                                                                                              |
| C4  | NLOS | $PL = PL_{C2}(d_{out} + d_m) + 17.4 + 0.5d_m - 0.8h_{MS}$<br>where $PL_{C2}$ is the path-loss function of C2 LOS/NLOS scenario. (Use LOS, if BS to wall connection is LOS, otherwise use NLOS) | $\sigma = 10$                | Same as C2 NLOS<br>See <sup>3)</sup> for explanation of parameters.<br>$h_{BS} = 25\text{m}, h_{MS} = 3n_{FI} + 1.5\text{m}$ |
| D1  | LOS  | $A = 21.5, B = 44.2, C = 20$<br>$PL = 40.0 \log_{10}(d) + 10.5 - 18.5 \log_{10}(h_{BS})$<br>$- 18.5 \log_{10}(h_{MS}) + 1.5 \log_{10}(f_c/5.0)$                                                | $\sigma = 4$<br>$\sigma = 6$ | $30\text{m} < d < d_{BP}$ , <sup>6)</sup><br>$d_{BP} < d < 10\text{km}$ ,<br>$h_{BS} = 32\text{m}, h_{MS} = 1.5\text{m}$     |
|     | NLOS | $PL = (25.1 \log_{10}(d) + 55.4$<br>$- 0.13 \log_{10}(h_{BS} - 25)) \log_{10}(d/100)$<br>$- 0.9 \log_{10}(h_{MS} - 1.5) + 21.3 \log_{10}(f_c/5.0)$                                             | $\sigma = 8$                 | $50\text{m} < d < 5\text{km}$ ,<br>$h_{BS} = 32\text{m}, h_{MS} = 1.5\text{m}$                                               |
| D2a | LOS  | Same as D1 LOS                                                                                                                                                                                 |                              |                                                                                                                              |

Tabela 3.1: Constantes A,B e C do Modelo Winner.

Legenda da Tabela 3.1 é especificada a seguir:

1. Cenário real A1 NLOS (Corredor -a- Quarto).
2. Cenário opcional A1 NLOS (Quarto -a- Quarto através da parede).

3.  $P_{LB1}$  é a perda no caminho B1,  $PL_{C2}$  é a perda no caminho C2,  $d_{out}$  é a distância entre o terminal no exterior e o ponto da parede que está mais próxima a do terminal interior,  $d_{in}$  é a distância da parede até o terminal interior,  $\theta$  é o ângulo entre o caminho exterior e a normal da parede;  $n_{F1}$  é o índice do chão.
4.  $d'_{BP} = 4h'_{BS}h'_{MS}f_c/c$ , onde  $f_c$  é a frequência central em Hz,  $c = 3 \times 10^8 m/s$  é a velocidade de propagação no espaço livre, e  $h'_{BS}$  e  $h'_{MS}$  são as alturas efetivas das antenas na BS (*Base Station*) e MS (*Mobile Station*), respectivamente o cálculo de  $h'_{BS}$  e  $h'_{MS}$  são feitos da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} - h'_{BS} &= h_{BS} - 1m \\ - h'_{MS} &= h_{MS} - 1m \end{aligned}$$

onde  $h_{BS}$  e  $h_{MS}$  são as alturas reais das antenas, e a altura eficaz em ambientes urbanos é assumido igual a 1.

5. As distâncias  $d_1$  e  $d_2$  são definidas na seguinte figura:

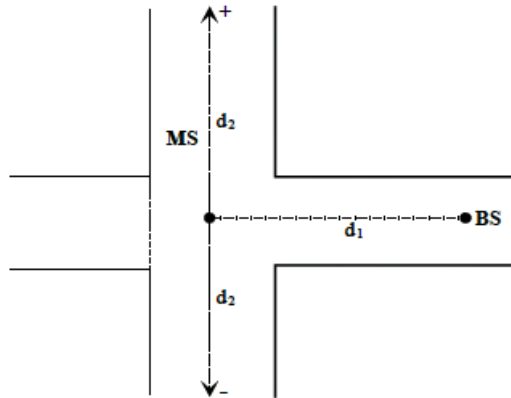


Figura 3.1: Modelo da Geometria para  $d_1$  e  $d_2$  na perda de percurso.

onde  $d_1$  e  $d_2$  são definidas em relação a uma grade retangular da rua, e MS é mostrado ao longo de uma rua perpendicular à rua em que o BS está localizado, então,  $d_1$  é a distância a partir da BS para o centro da rua perpendicular, e  $d_2$  é a distância da MS a longo da rua perpendicular, medida a partir do centro da rua LOS.

6. A distância do ponto de interrupção,  $d_{BP}$ , é dada por:

$$d_{BP} = 4h_{BS}h_{MS}f_c/c \quad (3-13)$$

Onde  $h_{BS}$ ,  $h_{MS}$ ,  $f_c$  e  $c$  têm as mesmas definições que as do item 4.

| Scenario                   | Definition                                                 | LOS/<br>NLOS          | Mob.<br>km/h | Frequ<br>ency<br>(GHz) | CG        | Note                                                                                          |
|----------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------|------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| A1<br>In building          | Indoor office /<br>residential                             | LOS/<br>NLOS          | 0-5          | 2 - 6                  | LA        |                                                                                               |
| A2                         | Indoor to outdoor                                          | NLOS                  | 0-5          | 2 - 6                  | LA        | AP inside UT<br>outside. Outdoor<br>environment urban                                         |
| B1<br>Hotspot              | Typical urban micro-<br>cell                               | LOS<br><br>NLOS       | 0-70         | 2 - 6                  | LA,<br>MA |                                                                                               |
| B2                         | Bad Urban<br>micro-cell                                    | NLOS                  | 0-70         | 2 - 6                  | MA        | Same as B1 +<br>long delays                                                                   |
| B3<br>Hotspot              | Large indoor hall                                          | LOS/<br>NLOS          | 0-5          | 2 - 6                  | LA        |                                                                                               |
| B4                         | Outdoor to indoor.<br>micro-cell                           | NLOS                  | 0-5          | 2 - 6                  | MA        | -Outdoor typical<br>urban B1.<br>-Indoor A1                                                   |
| B5a<br>Hotspot<br>Metropol | LOS stat. feeder,<br>rooftop to rooftop                    | LOS                   | 0            | 2 - 6                  | MA        | Same channel<br>model for hot spot<br>and metropol.                                           |
| B5b<br>Hotspot<br>Metropol | LOS stat. feeder,<br>street-level to street-<br>level      | LOS                   | 0            | 2 - 6                  | MA        |                                                                                               |
| B5c<br>Hotspot<br>Metropol | LOS stat. feeder,<br>below- rooftop to<br>street-level     | LOS                   | 0            | 2 - 6                  | MA        | Extended B1                                                                                   |
| B5d<br>Hotspot<br>Metropol | NLOS stat. feeder,<br>above rooftop to<br>street-level     | NLOS                  | 0            | 2 - 6                  | MA        | Extended C2                                                                                   |
| B5f                        | Feeder link BS -><br>FRS. Approximately<br>RT to RT level. | LOS/<br>OLOS/<br>NLOS | 0            | 2 - 6                  | WA        | Desired link: LOS<br>or OLOS,<br>Interfering links:<br>LOS/(OLOS)<br>/NLOS<br>FRS -> MS = B1* |

| Scenario       | Definition                                | LOS/<br>NLOS           | Mob.<br>km/h | Frequ<br>ency<br>(GHz) | CG       | Note                                        |
|----------------|-------------------------------------------|------------------------|--------------|------------------------|----------|---------------------------------------------|
| C1<br>Metropol | Suburban                                  | LOS/<br>NLOS           | 0–120        | 2 - 6                  | WA       |                                             |
| C2<br>Metropol | Typical urban<br>macro-cell               | LOS/<br>NLOS           | 0–120        | 2 - 6                  | MA<br>WA |                                             |
| C3             | Bad Urban macro-<br>cell                  | NLOS                   | 0–70         | 2 - 6                  | -        | Same as C2 + long<br>delays                 |
| C4             | Outdoor to indoor<br>macro-cell           | NLOS                   | 0-5          | 2 - 6                  | MA       | -Outdoor typical<br>urban C2.<br>-Indoor A1 |
| D1<br>Rural    | Rural macro-cell                          | LOS/<br>NLOS           | 0–200        | 2 - 6                  | WA       |                                             |
| D2             | a) Moving<br>networks:<br>BS – MRS, rural | LOS                    | 0 –350       | 2 - 6                  | WA       | Very large Doppler<br>variability.          |
|                | b) Moving<br>networks:<br>MRS – MS, rural | LOS /<br>OLOS/<br>NLOS | 0 – 5        | 2 - 6                  | LA       | Same as A1 NLOS                             |

Tabela 3.2: Cenários Específicos de propagação no modelo WINNER.[25]

Legenda da Tabela 3.2:

- CG: *Concept Groups*.
- CG: *Concept Groups*.
- AP: *Access Point*.
- LA: *Local Area*.
- MA: *Metropolitan Area*.
- WA: *Wide Area*.
- UT: *User Equipment*.
- MRS: *Mobile Relay Station*.
- MS: *Mobile Station*.
- OLOS: *Obstructed Line of Sight*.
- FRS: *Fixed Relay Station*.
- RT: *Roof Top*.

### 3.2.5

#### IEEE 802.16j Model.

IEEE *Relay Task Group* 802.16j está trabalhando ativamente para desenvolver as normas técnicas para sistemas fixos de acesso sem fio [21].

Um modelo de perda de caminho foi proposto para conexões em ambiente urbano NLOS. A equação básica da perda de caminho com fatores de correção é dada por:

$$PL = A + 10 * \gamma * \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + \Delta PL_f + \Delta PL_h + SdB \quad (3-14)$$

Onde:

- $d_0$ : 100 m.
- $d > d_0$ .
- $A = 20 \log(4\pi d_0 / \lambda)$ .
- $\gamma = (a - b h_b + c / h_b)$ .
- $\lambda$  é o comprimento de onda em metros.
- $h_b$  é a altura da antena da BS, que está entre 10 e 80 m.
- Os fatores de correção são [22]:

$$\Delta PL_f = 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right) dB \quad (3-15)$$

$f$  é a frequência de portadora em MHz

$$\Delta PL_h = -10.8 \log\left(\frac{h}{2}\right) dB \quad (3-16)$$

Para terrenos tipo A e B

$$\Delta PL_h = -20 \log\left(\frac{h}{2}\right) dB \quad (3-17)$$

Para terreno tipo C

onde  $h$  é a altura da antena receptora MS (*Mobile Station*) entre 2 e 10 m.

- S: Fator de atenuação com distribuição log-normal, que leva em consideração o sombreamento por árvores e estruturas em geral. O valor está na faixa de 8.2 a 10.6 dB, dependendo do tipo de terreno [37].
- Terreno tipo A: Terreno montanhoso com densidade moderada a forte de árvores.
- Terreno tipo B: Condição intermediária de perda de percurso.
- Terreno Tipo C: Terreno plano com densidade leve de árvores.

| Parâmetro do Modelo | Terreno tipo A | Terreno tipo B | Terreno tipo C |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>a</b>            | 4.6            | 4              | 3.6            |
| <b>b</b>            | 0.0075         | 0.0065         | 0.005          |
| <b>c</b>            | 12.6           | 17.1           | 20             |

Tabela 3.3: Parâmetros pelo tipo A/B/C.[21]

### 3.3

#### Modelos para Caracterização de Canais em Banda Larga.

Na caracterização em banda larga, o canal de rádio propagação móvel é considerado como um sistema linear. Canais lineares com mobilidade são canais lineares variantes no tempo. No que diz respeito à caracterização do canal de banda larga sujeito a multipercursos, o trabalho de Turin, em 1972, serviu de base para outros importantes trabalhos na área. Extensas análises dos vários modelos de canal banda larga podem ser encontradas em trabalhos de revisão.

#### 3.3.1

##### Modelo de Turin.

O modelo de Turin considera um ambiente urbano e fez o uso de um modelo matemático para propagação multipercursos de longas distâncias, via ionosfera ou troposfera [49]. Neste modelo é suposto que o meio de propagação atua como um filtro. Se  $R_e = \{s(t)e^{iw_0t}\}$ ,  $t \in (-\infty, \infty)$  é enviado, onde  $S(\cdot)$  é um valor complexo com forma de onda passa-baixa e  $W_0$  é a frequência de portadora, então  $R_e = \{p(t)e^{iw_0t}\}$ ,  $t \in (-\infty, \infty)$  é recebida, onde:

$$p(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k s(t - t_k) e^{i\Theta_k} + n(t) \quad (3-18)$$

Onde:

- $a_k$  é a amplitude da k-ésima componente de multipercurso recebida.
- $t_k$  é o atraso do k-ésimo multipercurso.
- $\Theta_k$  é a fase do k-ésimo multipercurso (variável aleatória independente e uniformemente distribuída entre  $(0, 2\pi]$ ).
- $p(t)$  é a taxa média de chegada no tempo  $(t)$ .
- $n(t)$  é o ruído, modelado de forma Gaussiana para o projeto.

### 3.3.2

#### Modelo de Saleh-Valenzuela.

O modelo de Saleh e Valenzuela é base dos modelos de canal formados por *clusters* de multipercursos. O modelo é baseado no fenômeno de agrupamento de tempos de chegada observados dos dados experimentais [38]. Em todas as observações feitas pelos autores, as chegadas ocorriam em um ou dois grandes grupos dentro de uma janela de observação de 200 ns. Foi observado que o segundo grupo era atenuado em amplitude e que os raios chegando dentro de um dado *cluster* tinham amplitudes que decaíam com relação ao tempo. O modelo de Saleh e Valenzuela propõe que ambos os decaimentos sejam exponenciais no tempo e controlados por duas constantes temporais:

- Constante de decaimento temporal da potência para o *cluster* ( $\Gamma$ ).
- Constante de decaimento temporal da potência para os raios no *cluster* ( $\gamma$ ).

A figura 3.2 apresenta o conceito de *cluster* de multipercursos e o significado das constantes de tempo listadas acima. Na figura, são observados os *clusters* de multipercursos, cada um com decaimento dado por  $e^{-\tau/\Gamma}$ . Também é observado que os clusters formam um envelope com decaimento exponencial dado por  $e^{-\tau/\Gamma}$ .

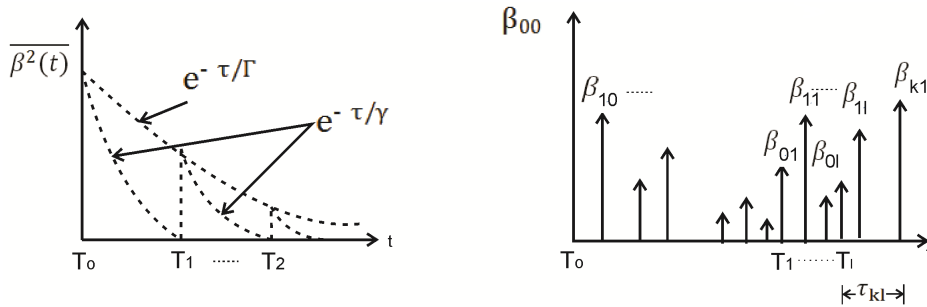


Figura 3.2: Decaimento exponencial e perfil de retardos.[38]

A resposta impulsiva do canal, à luz deste modelo, é dada por:

$$h(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{kl} e^{j\varphi_{kl}} \delta(t - T_l - \tau_{kl}) \quad (3-19)$$

Com somatório em  $l$  representando os *clusters* e o somatório em  $k$  representando os tempos de chegada de cada raio dentro de cada *cluster*. O termo  $e^{j\varphi_{kl}}$  representa uma fase aleatória estatisticamente independente associada com cada chegada. A variável aleatória  $\varphi_{kl}$  é distribuída de

forma uniforme em  $[0, 2\pi]$ .  $T_l$  representa o tempo de chegada do  $l$ -ésimo *cluster* e  $\tau_{kl}$ , o tempo de chegada do  $k$ -ésimo raio dentro do  $l$ -ésimo *cluster*. A amplitude de cada raio é dada por  $\beta_{kl}$ , cuja distribuição é assumida como sendo de Rayleigh com valor RMS dado pelo decaimento exponencial duplo:

$$\overline{\beta_{kl}^2} = \overline{\beta^2(T_l, \tau_{kl})} = \overline{\beta^2(0, 0)} e^{-T_l/\Gamma} e^{-\tau_{kl}/\gamma} \quad (3-20)$$

onde:

- $\Gamma$  é a taxa de chegada do processo Poisson dos *clusters*.
- $\gamma$  é a taxa de chegada do processo de Poisson dos raios de cada *cluster*.
- $\beta^2(0, 0)$  é a potência média do primeiro raio que chega dentro do primeiro *cluster*. Esta potência média é função da distância entre o transmissor e o receptor.

O tempo de chegada é descrito por dois processos de Poisson que modelam os tempos de chegada dos *clusters* e dos raios chegando dentro de cada *cluster*. O tempo de chegada de cada *cluster* é dado por uma variável aleatória de distribuição exponencial condicionada ao tempo de chegada do *cluster* imediatamente anterior.

A caracterização é a mesma para cada raio que chega dentro de um determinado *cluster*. O tempo de chegada do raio se refere à chegada dentro de um *cluster*. O termo taxa de chegada de *clusters* se refere ao parâmetro de tempo entre as chegadas de raios dentro de um mesmo *cluster* ( $\lambda$ ). As distribuições destes tempos de chegada estão apresentadas abaixo:

$$p(T_l | T_{l-1}) = \Lambda e^{-\Lambda(T_l - T_{l-1})}, \quad (3-21)$$

para  $T_{l-1} < T_l < \infty$

$$p(\tau_{kl} | \tau_{(k-1)l}) = \lambda e^{-\lambda(\tau_{kl} - \tau_{(k-1)l})}, \quad (3-22)$$

para  $\tau_{(k-1)l} < \tau_{kl} < \infty$

Estas distribuições são independentes. Além disto, por definição o valor para o primeiro *cluster* é  $T_0 = 0$  e para o primeiro raio do  $l$ -ésimo *cluster* é  $\tau_{0l} = 0$ . Isto implica que os tempos de chegada de cada raio são relativos ao tempo de chegada do primeiro raio no  $l$ -ésimo *cluster*.

No modelo de Saleh e Valenzuela, os parâmetros  $\Gamma$  e  $\gamma$  são estimados pela superposição de *clusters* com amplitudes e retardos normalizados e pela seleção de uma taxa média de retardo.

### 3.4

#### Cálculo de Enlace.

O cálculo de enlace é uma das principais etapas realizadas no planejamento celular. Com o cálculo de enlace é obtida a máxima perda de propagação permitida para que os usuários alocados nas bordas das células tenham condições de utilizar o sistema. Através do cálculo de enlace podem-se determinar a área de cobertura e o raio da célula, permitindo estimar a quantidade de estações rádio base necessárias para cobrir a região onde se pretende oferecer o serviço. Vale ressaltar que as características do ambiente (urbano denso, urbano, suburbano, etc.) no qual a rede será instalada influenciam o resultado do cálculo de enlace devido às múltiplas reflexões que o sinal propagado irá sofrer. O cálculo de enlace também varia de acordo com o objetivo de cobertura desejado, seja ela *indoor*, *incar* ou *outdoor*, pois para cada uma destas as perdas de propagação do sinal são diferentes. A potência de transmissão, o ganho das antenas e as perdas do sistema são alguns dos parâmetros que devem ser levados em consideração no cálculo de enlace. Cálculos independentes para o *uplink* e para o *downlink* são realizados, com distinção dos parâmetros em cada sentido de transmissão. O sistema celular é raramente limitado pelo *downlink*, pois, a potência transmitida pela estação rádio base é maior que a potência que o móvel é capaz de transmitir. A equação básica para o cálculo de enlace em dB, é [52]:

$$L_{MAX} = P_T + G_T - L_T - SNR_{Requerida} - S_R + G_R - L_R + G_{div} + M \quad (3-23)$$

Onde:

- $L_{MAX}$ : Máxima Perda de *Downlink/Uplink* [dB].
- $P_T$ : Potência de Transmissão [dBm].
- $G_T$ : Ganho da antena transmissora [dBi].
- $L_T$ : Perdas na transmissão [dB].
- $SNR_{Requerida}$ : Relação Sinal Ruído Requerida [dB].
- $S_R$ : Sensibilidade Requerida na Recepção [dBm].
- $G_R$ : Ganho da antena receptora [dBi].
- $L_R$ : Perdas na Recepção [dB].
- $G_{div}$ : Ganho por Diversidade [dBi].
- $M$ : Margem de Desvanecimento [dB].

Também se sabe que:

$$RSL_{MIN}[dBm] = S_R[dBm] - G_R[dBi] + L_R[dB]$$

onde:

- $RSL_{MIN}$ : Receiver Signal Level.
- $S_R$ : Sensibilidade Requerida na Recepção [dBm].
- $G_R$ : Ganho da antena receptora [dBi].
- $L_R$ : Perdas na Recepção [dB].

Logo:

$$EiRP[dBm] = P_T[dBm] - L_T[dB] + G_T[dBi]$$

Onde:

- $EiRP$ : Potência Irradiada Isotropicamente Efetiva.
- $P_T$ : Potência de Transmissão [dBm].
- $G_T$ : Ganho da antena transmissora [dBi].
- $L_T$ : Perdas na transmissão [dB].

Por último a equação fica da forma:

$$L_{MAX}[dB] = EiRP[dBm] - RSL_{min}[dBm] - SNR_{Requerida}[dB] \quad (3-24)$$

### 3.4.1

#### Especificações de equipamento.

Na tabela 3.4 estas especificações mínimas dos níveis de potência para transmitir e receber para os UE e os eNodeB, no modo de operação FDD.

|             |                                | Usuário | BS     | Nível |
|-------------|--------------------------------|---------|--------|-------|
| Transmissão | Potência de Transmissão Máxima | 23      | 43     | dBm   |
|             | Perdas por Cabo/Interconexão   | 0.5-2   | 0.5-2  | dB    |
|             | Figura de Ruído                | 9       | 5      | dB    |
|             | Ganho da Antena                | 0       | 12-15  | dB    |
| Recepção    | Ganho da Antena                | 0       | 12-15  | dB    |
|             | Figura de Ruído                | 9       | 5      | dB    |
|             | Perdas por Cabo/Interconexão   | 0.5-2   | 0.5-2  | dB    |
|             | Sensibilidade                  | -94     | -101.5 | dBm   |

Tabela 3.4: Níveis de Potência para o Cálculo de Enlace.

### Margens e tipos de cobertura.

Se for considerada apenas a perda média de propagação, só 50% dos pontos na célula terão cobertura, para poder garantir a PCA (Porcentagem de Área de Cobertura) requerida é necessário incluir uma margem (M), que depende do tipo de cobertura desejada (*outdoor*, *incar* ou *indoor*). No caso de cobertura *incar* ou *indoor*, é necessário também incluir uma perda de penetração no ambiente. Finalmente, é preciso incluir uma perda adicional de bloqueio do terminal móvel pelo corpo humano.

### Perdas Adicionais e Margem.

- Perda devido ao bloqueio do corpo humano (BL) = 4dB.
- Perda por Penetração em carros = 10 dB.
- Perda por penetração em edifícios = 20 dB.
- Para obter a margem temos que calcular o desvio padrão, que varia de acordo com a área de cobertura:

\* Cobertura *Outdoor*:

$$\sigma = 8 \text{ dB}(\text{Áreas Urbanas})$$

\* Cobertura *Incar* ( $\sigma_{Incar} = 3\text{dB}$ ):

$$\sigma_{IncarTotal} = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_{Incar}^2} = \sqrt{8^2 + 3^2} = 8.5\text{dB}$$

\* Cobertura *Indoor* ( $\sigma_{Indoor} = 8\text{dB}$ ):

$$\sigma_{IncarTotal} = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_{Indoor}^2} = \sqrt{8^2 + 8^2} = 11.3\text{dB}$$

- A percentagem de cobertura de área requerida (PCA) em um canal com desvanecimento log-normal é:

$$CPA = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \text{erf}(a) + e^{\frac{2ab+1}{b^2}} [1 - \text{erf}(\frac{ab+1}{b})] \right\}$$

onde:

$$a = \frac{M}{\sigma\sqrt{2}}$$

$$b = \frac{10\gamma \log e}{\sigma\sqrt{2}}$$

- $\sigma$  é a desviação estándar.
- $\gamma$  é a constante de propagação.

- Margem: A margem para um percentagem de cobertura de área requerida (PCA) de 90% é mostrado na tabela 3.5 e 3.6.

| CAP 90%                        |              |              |              |              |              |              |              |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Desvio<br>padrão $\sigma$ (dB) | Margem M     |              |              |              |              |              |              |
|                                | $\gamma=2.5$ | $\gamma=2.7$ | $\gamma=2.9$ | $\gamma=3.1$ | $\gamma=3.3$ | $\gamma=3.5$ | $\gamma=3.7$ |
| 6                              | 4.2          | 4.0          | 3.8          | 3.7          | 3.5          | 3.3          | 3.2          |
| 6.5                            | 4.8          | 4.6          | 4.4          | 4.2          | 4.0          | 3.9          | 3.7          |
| 7                              | 5.3          | 5.1          | 4.9          | 4.7          | 4.6          | 4.4          | 4.2          |
| 7.5                            | 5.9          | 5.7          | 5.5          | 5.3          | 5.1          | 4.9          | 4.7          |
| 8                              | 6.5          | 6.2          | 6.0          | 5.8          | 5.6          | 5.5          | 5.3          |
| 8.5                            | 7.0          | 6.8          | 6.6          | 6.4          | 6.2          | 6.0          | 5.8          |
| 9                              | 7.6          | 7.4          | 7.2          | 7.0          | 6.7          | 6.6          | 6.4          |
| 9.5                            | 8.2          | 8.0          | 7.7          | 7.5          | 7.3          | 7.1          | 6.9          |
| 10                             | 8.8          | 8.6          | 8.3          | 8.1          | 7.9          | 7.7          | 7.5          |
| 10.5                           | 9.4          | 9.1          | 8.9          | 8.7          | 8.5          | 8.2          | 8.0          |
| 11                             | 10.0         | 9.7          | 9.5          | 9.3          | 9.0          | 8.8          | 8.6          |
| 11.5                           | 10.6         | 10.3         | 10.1         | 9.8          | 9.6          | 9.4          | 9.2          |
| 12                             | 11.2         | 10.9         | 10.7         | 10.4         | 10.2         | 10.0         | 9.7          |

Tabela 3.5: Margens para PCA= 90% utilizando o desvio padrão.

| CAP 90%              |              |              |              |              |              |              |              |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Tipo de<br>Cobertura | Margem M     |              |              |              |              |              |              |
|                      | $\gamma=2.5$ | $\gamma=2.7$ | $\gamma=2.9$ | $\gamma=3.1$ | $\gamma=3.3$ | $\gamma=3.5$ | $\gamma=3.7$ |
| Outdoor              | 6.5          | 6.2          | 6.0          | 5.8          | 5.6          | 5.5          | 5.3          |
| Incar                | 7.0          | 6.8          | 6.6          | 6.4          | 6.2          | 6.0          | 5.8          |
| Indoor               | 10.6         | 10.3         | 10.1         | 9.8          | 9.6          | 9.4          | 9.2          |

Tabela 3.6: Margens para PCA= 90% utilizando o tipo de cobertura.

- Então o cálculo da perda de propagação máxima fica, agora, da seguinte forma:

$$L_{P_{max}} = L_{MAX}[dB] - L_{Penetracao}[dB] - BL[dB] - M[dB] \quad (3-25)$$