

6

APLICAÇÃO DOS MODELOS DESENVOLVIDOS

Os modelos desenvolvidos neste trabalho têm aplicação importante no planejamento e dimensionamento de sistemas sem fio que operam em frequências superiores a 10 GHz como, por exemplo, os sistemas LMDS e MVDS.

Neste capítulo serão apresentados exemplos da aplicação dos modelos desenvolvidos ao cálculo de cobertura de um sistema LMDS, assim como um estudo da degradação da relação sinal-interferência (S/I) em configurações celulares deste sistema em condições de chuva.

6.1. SISTEMA LMDS

Os sistemas LMDS operam, originalmente, na faixa de frequência de 28 GHz, com uma banda original de 1,3 GHz, designada pela FCC nos EUA. No Brasil, a ANATEL designou uma banda total de 3,3 GHz para estes sistemas, subdividida em faixas de 500 MHz e 75 MHz. Inicialmente implementado para a distribuição de TV analógica, o sistema LMDS é uma solução conveniente para atender à demanda por serviços de banda larga, tais como áudio, vídeo, dados a alta velocidade e aplicações multimídia.

Conforme indicado no Capítulo 1, o sistema LMDS baseia-se numa topologia celular, com células cujos raios variam tipicamente de 2 a 10 km e antenas setorizadas nas ERBs (é típica a utilização de quatro setores de 90⁰ cada). Para minimizar os efeitos de interferência, utiliza-se a técnica de polarização alternada.

Finalmente, devido à elevada frequência de operação, a cobertura e o desempenho do sistema LMDS/LMCS é seriamente afetada pela ocorrência de eventos de atenuação por chuvas nos diferentes enlaces do sistema.

6.2. PREVISÃO DA COBERTURA EM SISTEMAS LMDS

O raio da célula de um sistema LMDS pode ser determinado a partir da solução numérica de uma expressão que depende do desempenho requerido para o sistema, das características do equipamento utilizado e dos parâmetros de propagação da região onde o sistema é planejado [6,12,54-55].

6.2.1. Perdas de Propagação

As perdas de propagação, em sistemas operando em visibilidade em frequências acima de 20 GHz, são dadas por [6,12,54-55]:

$$L(\text{dB}) = L_{\text{el}}(\text{dB}) + A_{\text{chuva}}(\text{dB}) + A_{\text{gases}}(\text{dB}) \quad (6.1)$$

onde:

L_{el} = Perda no espaço livre.

A_{chuva} = Atenuação por chuvas.

A_{gases} = Atenuação por gases atmosféricos.

A perda no espaço livre é dada pela conhecida expressão:

$$L_{\text{el}}(\text{dB}) = 92,44 + 20 \log d(\text{km}) + 20 \log f(\text{GHz}) \quad (6.2)$$

onde:

d = Comprimento do enlace.

f = Frequência do enlace.

Por sua vez, a atenuação devida aos gases atmosféricos é dada por:

$$A_{\text{gases}} = \gamma_g d \quad (6.3)$$

onde γ_g é a atenuação específica por gases, que pode ser obtida a partir da Recomendação P.676-5 do ITU-R [9]. Na faixa de frequência de 28 GHz, a atenuação específica por gases é de aproximadamente 0,1 dB/km.

Finalmente, a atenuação por chuvas é obtida a partir de diversos modelos de previsão. Nesta aplicação serão considerados o modelo do ITU-R (Recomendação P.530-10) e o modelo Pérez-Mello, desenvolvido neste trabalho.

A atenuação por chuvas, utilizando o modelo de ITU-R, é dada pela expressão (2.11):

$$A_{\text{chuva}} = k R_{0,01}^{\alpha} 0,12 p^{-\left(0,546 + 0,043 \log p\right)} \frac{d_0}{d_0 + d} d \quad (6.4)$$

cujos parâmetros foram descritos na seção 2.3.2.

Por sua vez, quando utilizado o modelo Pérez-Mello, a atenuação por chuvas é dada pela expressão (4.7) da forma que segue:

$$A(\text{dB}) = 3,386 k R_p \left(\alpha - 0,356 + \frac{0,107}{d} \right) d^{0,822} \quad (6.5)$$

cujos parâmetros foram descritos na seção 4.2.1.

6.2.2.

Perda Máxima de Propagação

A perda máxima de propagação para um sistema digital é dada por [6,12,54-55]:

$$L_{\max} = P_T + G_T + G_R - L_T - L_R - \text{SNR}_{\min} - F + 114 - \log b_n \quad (6.6)$$

onde:

P_T = Potência transmitida, em dBm.

$G_{T,R}$ = Ganho da antena transmissora (receptora), em dBi

$L_{T,R}$ = Perda de alimentação no transmissor (receptor), em dB.

SNR_{min} = Relação sinal-ruído mínima, em dB.

F = Figura de ruído do receptor, em dB.

b_n = Largura de banda Nyquist, em MHz.

6.2.3.

Determinação do Raio da Célula

O raio da célula no sistema LMDS digital, pode ser obtido a partir da solução numérica, na variável d , de uma das seguintes expressões:

$$20 \log d + \gamma_g d + k R_{0,01}^\alpha 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \frac{d_0}{d_0 + d} d = \quad (6.7)$$

$$= P_T + G_T + G_R - L_T - L_R - SNR_{min} - F + 51,56 - \log b_n - 20 \log f$$

obtida a partir de (6.1), (6.2), (6.3), (6.4) e (6.6), para o modelo de ITU-R, e

$$20 \log d + \gamma_g d + 3,386 k R_p \left(\alpha - 0,356 + \frac{0,107}{d} \right) d^{0,822} = \quad (6.8)$$

$$= P_T + G_T + G_R - L_T - L_R - SNR_{min} - F + 51,56 - \log b_n - 20 \log f$$

obtida a partir de (6.1), (6.2), (6.3), (6.5) e (6.6), para o modelo Pérez-Mello.

6.2.4.

Exemplo de Cálculo de Cobertura em Sistemas LMDS

Considerando os valores típicos de equipamento do sistema LMDS digital [6,12,54-55], e resolvendo as expressões (6.7) e (6.8), pode-se determinar o raio máximo das células. Como exemplo de aplicação foi considerado um sistema operando em São Paulo (Brasil), utilizando os modelos de previsão da atenuação por chuvas de ITU-R e Pérez-Mello e as medidas da taxa de precipitação de São Paulo (seção 3.3.4). Os resultados obtidos são resumidos na Tabela 42.

Tabela 42 Comparação do raio da célula no sistema LMDS\LMCS, para os modelos de ITU-R e Pérez-Mello.

Parâmetros de entrada	Sistema LMDS
P_T (dBm)	50
G_T (dBi)	22
G_R (dBi)	38
L_T (dB)	1
L_R (dB)	1
SNR_{min} (dB)	47
F (dB)	8
b_n (MHz)	36
f (GHz)	28
Polarização	Horizontal
p (%)	0,1
$R_{0,01}$ (mm/h) (para o modelo de ITU-R)	73,9
R_p (mm/h) (para o modelo Pérez-Mello)	28,2
A_{chuva} (ITU-R) (dB)	16,4
A_{chuva} (Pérez-Mello) (dB)	17,7
Raio (ITU-R) (km)	4,55
Raio (Pérez-Mello) (km)	3,95

Na Tabela 42, pode se observar que o raio de cobertura é menor quando é utilizado o modelo Pérez-Mello. Embora mais pessimista, este modelo é mais preciso na previsão da atenuações por chuvas, como mostrado no capítulo 4. Especificamente para climas tropicais no Brasil, o modelo CETUC-98 fornece um raio de cobertura ainda menor, da ordem de 2,3 Km.

6.3. DEGRADAÇÃO DA RELAÇÃO S/I DEVIDO À CHUVA

Um parâmetro diretamente relacionado com o desempenho de sistemas LMDS é a relação sinal-interferência (S/I). A banda de frequência disponível para o sistema LMDS é dividido em sub-bandas. Com o objetivo de aumentar a capacidade do sistema utiliza-se o reuso de frequência, como mostrado nas Figs. 102a e 102b. Nessas figuras, F_R é o fator de reuso de frequência, definido como o número de vezes que a banda total é utilizada numa célula.

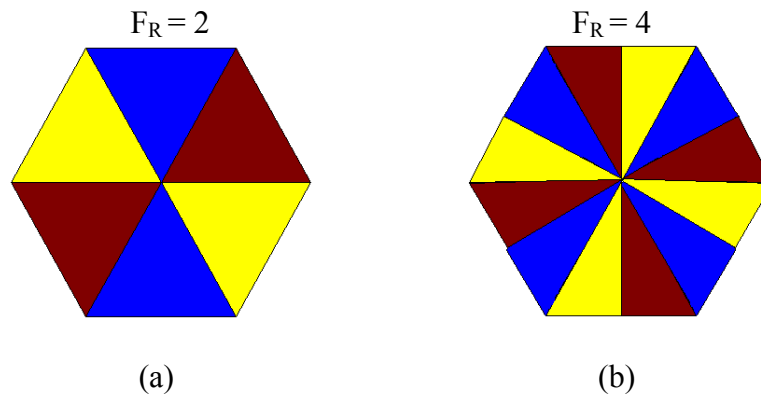


Figura 102 Fator de reuso numa célula.

Para reduzir a interferência entre setores, pode-se utilizar ainda a técnica de polarização alternada em setores adjacentes, como mostrado na Fig. 103.

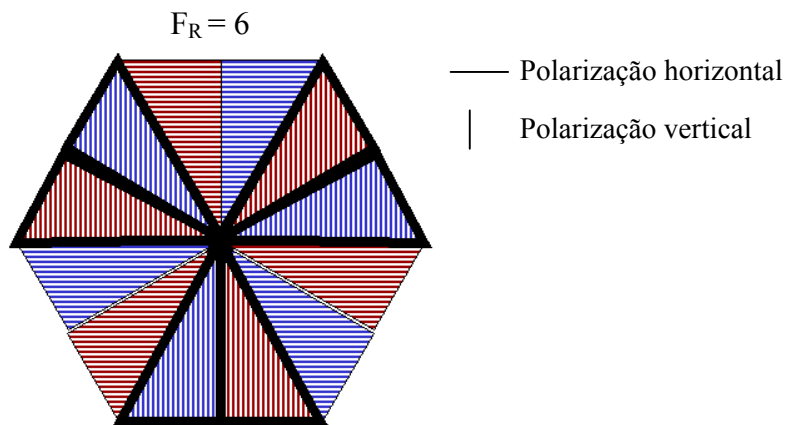


Figura 103 Fator de reuso numa célula aplicando a polarização alternada.

Nestas condições, e considerando características similares de equipamento nos transmissores e nas unidades de usuário, a relação S/I pode ser escrita como [56]:

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{\alpha(N_1 + p_d N_2)} \quad (6.9)$$

onde:

α = Atenuação dos lóbulos laterais na antena receptora (típicamente, 25 dB).

N_1 = Número de setores com a mesma polarização.

N_2 = Número de setores com a polarização cruzada.

p_d = Nível de polarização cruzada (típicamente, 7 dB).

Considerando esses valores típicos, a relação S/I em condições de céu claro, para os exemplos das Figs. 102a e 102b, é da ordem de 25 dB. Em situações reais, para cobrir uma determinada área, é necessário replicar células e setores, conforme mostrado nas Figs. 104a e 104b. Dependendo da posição do usuário a relação S/I pode se manter elevada (da ordem de 33 dB, no caso do usuário 1) ou reduzir-se sensivelmente num caso desfavorável, mesmo em condições de céu claro (da ordem de 18 dB, no caso da unidade 2) [56].

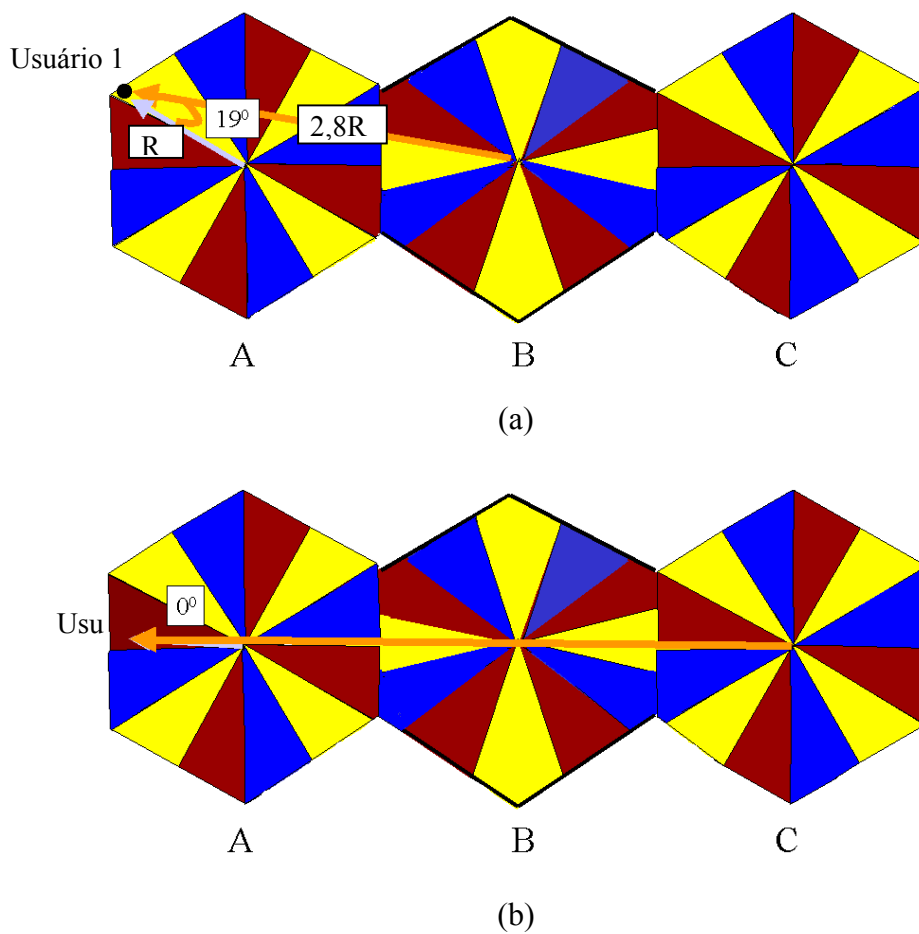


Figura 104 Cenário de interferência no sistema LMDS.

Sob condições de chuva, a relação S/I pode ser degradada significativamente caso o sinal do enlace desejado seja mais atenuado do que os sinais interferentes. Considerando o caso de um sinal interferente principal (do enlace 2) sobre o sinal desejado (do enlace 1), a degradação da relação sinal ruído em condições de chuva será dada pela atenuação diferencial, ou seja [21]:

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{\text{chuva}} = \frac{S}{I} - (A_1 - A_2) = \frac{S}{I} - A_{12} \quad (6.10)$$

onde $\frac{S}{I}$ corresponde à relação sinal-interferência na unidade de usuário do enlace 1, em condições de céu claro, e A_{12} é atenuação diferencial por chuvas entre o enlace desejado (enlace 1) e o enlace interferente (enlace 2).

Da expressão (4.8) obtém-se, de acordo ao modelo 1 de previsão da atenuação diferencial por chuvas, a relação $\left(\frac{S}{I}\right)_{\text{chuva}}$ dada por:

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{\text{chuva}} = \frac{S}{I} - (0,67 A_1 - 0,08 A_2) \left(0,58 |\theta|^{0,27} + 0,43 |\Delta d|^{0,12} \right) \quad (6.11)$$

Por outro lado, quando utilizado o modelo 2 para a previsão da atenuação diferencial por chuvas, a relação $\left(\frac{S}{I}\right)_{\text{chuva}}$ é dada por:

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{\text{chuva}} = \frac{S}{I} - (0,67 A_1 - 0,08 A_2) \left(0,58 |\theta|^{0,27} + 0,43 |\Delta d|^{0,12} \right) \quad (6.12)$$

onde o parâmetro η é dado pela expressão (4.10) e a Tabela 27, o parâmetro β é dado pela expressão (4.11) e a Tabela 28, e “p” é a percentagem de tempo.

Portanto, os níveis da relação S/I dependem a atenuação por chuvas em cada enlace (no caso do modelo 1), da frequência de operação do enlaces, do comprimento dos enlaces e do ângulo entre eles (no caso de ambos os modelos).

Utilizando as expressões (6.11) e (6.12), assim como um raio típico de 3,95 km para regiões de climas tropicais e equatoriais (seção 6.2.4), obtém-se os valores da relação S/I entre 0,01 e 1 % do tempo, conforme mostrado na Fig. 105. Para a determinação da relação sinal-interferência em condições de céu claro foi utilizada a configuração da Fig. 104a.

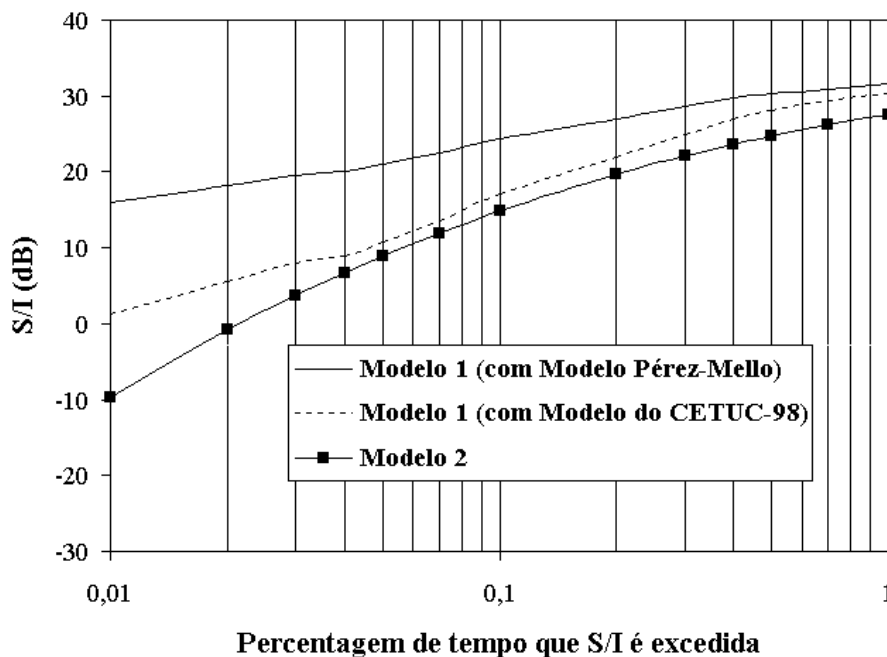


Figura 105 Valores da relação S/I no sistema LMDS\LMCS, sob condições de chuva.

Na Fig. 105 pode ser observado que para baixas porcentagens de tempo menores que 0,1% a relação S/I pode ser menor que o usual requisito de 14 dB [56], o que torna indisponível um sistema que estaria operacional sob condições de céu claro.

Adicionalmente observa-se, na Fig. 105, uma significativa diferença entre os resultados obtidos com a aplicação do modelo 1 ou o modelo 2, assim como uma significativa diferença nos resultados obtidos com o modelo 1 quando diferentes modelos de atenuação por chuvas são aplicados. A menor diferença ocorre entre a aplicação do modelo 1 com as atenuações calculadas pelo modelo do CETUC-98

e o modelo 2. isto se deve ao fato de que o modelo do CETUC-98 fornece uma melhor previsão para as atenuações individuais dos enlaces utilizadas no modelo 1.

6.4. APLICAÇÃO DO MODELO DEC-PM Modificado

Na seção (6.2.4) foi implementado um exemplo de aplicação do modelo Pérez-Mello no cálculo da cobertura de um sistema LMDS digital, assumindo uma indisponibilidade anual do sistema de 0,1 %. A margem para atenuação por chuvas obtida nesse caso foi de 17,7 dB (para o modelo Pérez-Mello), que resultou num raio de célula de 3,95 km (Tabela 42).

Entretanto, essa margem é dada pela distribuição anual da atenuação por chuvas e como visto neste trabalho, as características dinâmicas da chuva fazem com que, em determinados intervalos de tempo, a atenuação por chuvas seja instantaneamente maior do que este valor, resultando em um raio de cobertura inferior ao raio da célula obtido na seção (6.2.4).

Em muitas aplicações, o tempo das interrupções individuais do sistema é mais relevante do que o tempo anual acumulado de interrupção. É possível determinar um novo raio de célula, associado à probabilidade de que uma determinada duração máxima de eventos individuais não seja excedida. O exemplo abaixo ilustra este conceito.

Pelo modelo DEC-PM modificado, desenvolvido no capítulo 5, tem-se que a probabilidade cumulativa da duração máxima de eventos de chuva é dada por:

$$P = e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta} \quad (6.13)$$

onde o parâmetro η é dado pela expressão (5.7) e a Tabela 34, o parâmetro β é dado pela expressão (5.8) e a Tabela 35, e o tempo T é dado em minutos.

Escolhendo, a título de exemplo, uma duração máxima de 60 segundos (1 min), assumida a probabilidade de 99,9 % e considerando uma margem para

atenuação por chuvas de 17,7 dB, um novo raio de célula será obtido a partir do cálculo do parâmetro d na expressão:

$$0,999 = e^{-\left(\frac{1}{0,41 d - 21,42}\right)^{\left(3,93 d^{-0,26} - 0,93\right)}} \quad (6.14)$$

Da expressão (6.14) obtém-se, mediante uma solução numérica, um raio de célula de 2,68 km, inferior ao valor de 3,95 Km obtido quando não se impõe requisitos sobre a duração de eventos individuais.