

## 5.1. INTRODUÇÃO

Nos radioenlaces digitais ponto-a-ponto em microondas que operam com visada direta, existem, fundamentalmente, duas causas para a elevação da taxa de erro devido a fenômenos relacionados com mudanças no meio de propagação: diminuição da relação sinal/ruído, por efeito de desvanecimentos não-seletivos e interferência intersimbólica provocada por desvanecimentos seletivos [1]. Enquanto os efeitos dos desvanecimentos não-seletivos são independentes da taxa de transmissão, os efeitos dos desvanecimentos seletivos são mais pronunciados na medida em que a taxa de transmissão aumenta [2][3][4][5]. A principal causa do desvanecimento seletivo é a propagação por múltiplos percursos, cuja ocorrência depende das condições geoclimáticas da região e da geometria do enlace [6].

A confiabilidade de um sistema radioenlace digital ponto-a-ponto é determinada por diversos parâmetros e significa, basicamente, a porcentagem média de tempo que um sistema permanece em operação sob determinadas condições funcionais. Entre os parâmetros que determinam a confiabilidade estão, por exemplo, os tempos médios entre falhas dos componentes do sistema e a porcentagem de tempo em que a taxa de erro de bit permanece abaixo de um determinado valor sob condições atípicas de propagação, como a propagação por múltiplos percursos.

As condições geoclimáticas da região e a geometria dos enlaces são alguns dos fatores que permitem calcular a porcentagem de tempo em que a taxa de erro de bit do sistema opera acima de um determinado valor limite. Esta taxa de erro é definida como *taxa de erro de limiar*, cujos valores se encontram, tipicamente, entre  $10^{-3}$  e  $10^{-6}$ , dependendo dos tipos de serviços e das normas ou recomendações de desempenho e qualidade adotadas. Quando as condições de propagação provocam uma elevação da taxa de erro para valores acima da taxa de erro de limiar, o sistema é levado à situação definida como “inoperância” (*outage*). Assim, a porcentagem ou a probabilidade fora de serviço está relacionada com o intervalo de tempo em que o sistema opera com uma taxa de erro acima de uma taxa de erro de limiar.

Este capítulo tem por objetivo apresentar os principais métodos para a determinação de desempenho de radioenlaces terrestres. Ele está organizado em quatro tópicos, apresentados na seguinte seqüência:

- Métodos para determinação da Inoperância enlace para frequências abaixo de 8,5 GHz;
- Técnicas de Diversidade;
- Métodos para determinação da Inoperância enlace para frequências acima de 8,5 GHz.

## 5.2. BALANÇO DE POTÊNCIA EM RADIOENLACES

O desempenho de um radioenlace devido aos desvanecimentos não seletivos (ou desvanecimentos planos) está associado diretamente ao balanço de potência do radioenlace. Conforme já apresentado no Capítulo 3, a principal atenuação apresentada entre um ponto de transmissão e um ponto de recepção, considerando-se o uso de antenas isotrópicas, é a perda no espaço livre, que pode alcançar centenas de decibéis. Além da perda no espaço livre, existem outras perdas de menor monta nos cabos coaxiais ou guias de ondas, nos conectores, derivadores, etc., conforme mostrado no Capítulo 4. No Capítulo 2 foi apresentado o conceito de ganho de antena em relação à antena isotrópica, isto é, uma vez que, por conveniência, a determinação das perdas no espaço livre admite o uso de antenas isotrópicas, então, na equação de balanço de potência do radioenlace deve-se acrescentar um *fator de correção* que leve em conta a diretividade e a eficiência da antena. Este fator de correção é o ganho das antenas em relação à antena isotrópica. .

A equação do balanço de potência de um radioenlace pode ser obtida considerando-se os níveis de potência nos terminais das antenas transmissoras e receptoras e seus respectivos ganhos em relação à antena isotrópica, bem como das perdas no espaço livre acrescida das perdas em componentes do sistema. Desta forma, a equação de balanço de potência do radioenlace pode ser escrita como:

$$P_T + \sum G = P_R + \sum A, \quad (5.1)$$

onde  $P_T$  e  $P_R$  são as potências de transmissão e de recepção nos terminais das antenas, em dBm;  $\sum G$  é a soma dos ganhos das antenas de transmissão ( $G_T$ ) e de recepção ( $G_R$ ), em dBi, ou seja,

$$\sum G = G_T + G_R; \quad (5.2)$$

e o  $\sum A$  é o somatório das perdas ou atenuações da saída do transmissor até a entrada do receptor, em dB, conforme definido a seguir.

$$\sum A = A_e + A_d + A_g + A_o, \quad (5.3)$$

onde  $A_e$  é a atenuação no espaço livre calculada por (3.6);  $A_d$  é atenuação nos derivadores, que na ausência de valores exatos pode ser determinada por (4.14), (4.15) e (4.16);  $A_g$  é a atenuação nos guias de ondas ou cabos coaxiais e  $A_o$  representa outras atenuações incluindo atenuação devido à obstáculos e devido à absorção por gases e/ou vapor d'água, quando aplicável. Geralmente, radioenlaces em microondas são radioenlaces com visada direta, ou seja, livre de obstáculos. Todas as atenuações que compõem a atenuação total têm o dB como unidade.

### 5.3. MARGEM DE DESVANECIMENTO

Conforme comentado na seção introdutória, parte da confiabilidade de um radioenlace consiste do tempo em que o sistema permanece em operação com um parâmetro de qualidade de serviço melhor ou igual a um valor de referência chamado de *limiar*. No caso de radioenlaces digitais com visada direta, geralmente este parâmetro é a *taxa de erro de limiar*. Não existe um único valor para a taxa de erro de limiar, pois o que determina o valor de limiar são as características do serviço prestado. Entretanto, é muito comum valores de taxa de erro de limiar,  $BER_L$  (*Bit Error Rate - Limiar*), entre  $10^{-3}$  e  $10^{-6}$ . Por sua vez, a taxa de erro de limiar é uma função da relação entre a energia gasta por bit transmitido,  $E_b$  e a densidade espectral de ruído térmico,  $N_0$ .

Neste ponto é importante um melhor entendimento sobre a natureza do ruído térmico. O ruído térmico está presente em todos os sistemas de comunicações e é gerado pela vibração aleatória dos elétrons devido à energia térmica recebida do ambiente. Nos sistemas de comunicações o ruído térmico tem as características de ser aditivo, branco<sup>1</sup> e com amplitude aleatória com distribuição gaussiana com média nula, além de ser completamente caracterizado pela sua variância. Por este motivo, o ruído AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), como é chamado, é o modelo mais utilizado em detecção de sinais e projeto de receptores ótimos. A potência de ruído térmico, em Watts, pode ser determinada pela expressão

$$N = k T B, \quad (5.4)$$

onde  $k$  é a constante de Boltzmann que vale  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K,  $T$  é a temperatura em K e  $B$  é a largura de faixa em Hz. A densidade espectral de ruído  $N_0$ , obtida a partir de (5.4) é dada por

$$N_0 = \frac{N}{B} = k T \quad \text{W/Hz.} \quad (5.5)$$

Considerando que a taxa de erro de bit ou a probabilidade de erro de bit depende da relação  $E_b/N_0$ , que por sua vez, é uma função da relação sinal/ruído, largura de faixa do sistema e do fator de ruído do equipamento de recepção, é possível determinar a potência de recepção para a qual a taxa de erro de bit é igual à taxa de erro de bit de limiar. Normalmente este dado é fornecido pelos fabricantes de equipamentos. Entretanto, na ausência de dados, uma forma de estimá-la é apresentada a seguir.

$$P_L = 10 \log \left( \frac{E_b}{N_0} \right)_L + 10 \log \frac{R_b}{B} + 10 \log \frac{k.T.B}{10^{-3}} + F + C, \quad (5.6)$$

onde  $(E_b/N_0)_L$  é o valor de  $E_b/N_0$  correspondente à probabilidade de erro de bit de limiar,  $R_b$  é a taxa de transmissão de bit,  $B$  é a largura de faixa do canal,  $k$  é a constante de Boltzmann, que vale  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K,  $T$  é a temperatura ambiente em graus Kelvin,  $F$  é a figura do equipamento de recepção em dB e  $C$  é um fator de degradação introduzido pelas imperfeições do processo de demodulação/decisão do equipamento.

<sup>1</sup> O termo *branco* refere-se à característica do ruído possuir componentes espectrais com mesma energia em todo o espectro radioelétrico, isto é, a energia do espectro do ruído é uniforme ao longo do espectro radioelétrico.

## 5. Análise de Desempenho e Dimensionamento de Radioenlaces Terrestres

A relação entre a potência recebida na ausência de desvanecimento e a potência de limiar é definida como margem,  $M$ , conforme ilustrado na Figura 5.1, que em dB, é determinada por

$$M = P_R - P_L \quad (5.7)$$

sendo que tanto  $P_R$  quanto  $P_L$  devem estar em dBm (ou em dBW).

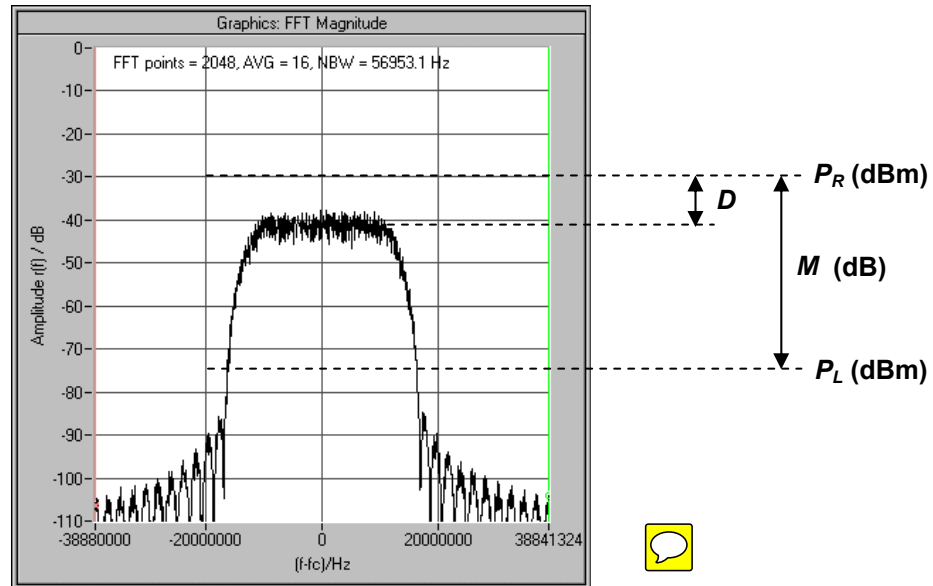


Figura 5.1 - Definição de margem de desvanecimento.

Conforme será mostrado posteriormente, a margem para desvanecimento afeta diretamente a probabilidade de inoperância devido ao desvanecimento não seletivo, ou desvanecimento plano. Neste caso, a margem é um parâmetro associado à robustez do sistema quanto à ocorrência dos desvanecimentos não seletivos. No entanto, a margem não tem qualquer influência sobre a probabilidade de inoperância devido ao desvanecimento seletivo. O parâmetro associado à robustez do sistema quanto à ocorrência dos desvanecimentos seletivos é a *área de assinatura*, apresentada na próxima seção.

### 5.4. ÁREA DE ASSINATURA

A área de assinatura é um parâmetro obtido da curva de assinatura. A curva de assinatura é uma característica do equipamento de recepção que traduz sua robustez quanto às degradações de desempenho provocadas por desvanecimentos seletivos, próximos ou dentro da faixa de passagem do canal, sob condições específicas [5]. Esta curva é obtida a partir de medições utilizando-se um simulador de canal com desvanecimento, conforme mostrado na Figura 5.2.

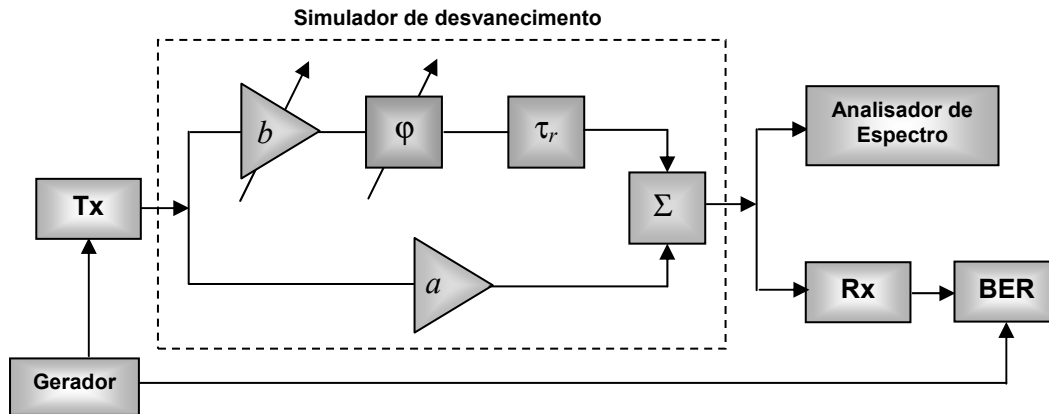


Figura 5.2 - Simulador de desvanecimento.

De acordo com a Figura 5.2, o sinal de um gerador é aplicado simultaneamente ao transmissor e ao medidor de taxa de erro de bit. O transmissor gera o sinal de transmissão que é aplicado à entrada do simulador de desvanecimento. No simulador o sinal percorre dois caminhos paralelos. Os dois caminhos simulam a propagação por dois raios.

O primeiro caminho possui três blocos e representa o percurso percorrido pelo raio secundário. No primeiro bloco, pode-se variar a amplitude do sinal secundário através do ajuste de  $b$ . O segundo e o terceiro bloco mostram, respectivamente, um deslocador de fase, cuja fase  $\varphi$  pode ser ajustada e uma linha de retardo que produz um atraso fixo  $\tau_r$ .

O segundo caminho representa o percurso percorrido pelo sinal principal e só possui um ajuste de ganho, que, por conveniência, pode ser ajustado para  $a = 1$ . O tempo de atraso entre os dois raios,  $\tau_r$ , é fixado, tipicamente, para um valor igual a 6,3 ns. Este valor foi escolhido, originalmente, como sendo o recíproco de seis vezes a largura de faixa ocupada pelo sinal. Com o passar do tempo este valor passou ser adotado como padrão [1].

A fase,  $\varphi$ , do sinal do raio secundário é variada de forma que um *notch* percorra o espectro, varrendo toda a extensão da largura do canal e suas imediações. A profundidade do *notch*  $D$ , em dB, é ajustada dinamicamente, através da relação de amplitudes,  $b$ , entre os raios, de acordo com a relação

$$D = -20 \log(1 - b). \quad (5.8)$$

Para o levantamento da curva, procede-se da seguinte forma:

- a) O sinal modulado é aplicado à entrada do simulador e na saída é ligado um analisador de espectro e um medidor de taxa de erro.
- b) O valor de  $a$  é ajustado para 1, e para um valor de atraso especificado, geralmente, 6,3 ns, um *notch* é posicionado nas vizinhanças do flanco anterior do espectro do sinal modulado, através do ajuste da diferença de fase,  $\varphi$ , entre o sinal do percurso secundário em relação ao do percurso principal.
- c) O valor de  $b$  é ajustado até que se obtenha a taxa de erros para a qual se deseja conhecer a curva de assinatura, que é definida como sendo a taxa de erro de limiar.

- d) O *notch* é deslocado passo a passo para dentro do espectro de frequências do sinal modulado e, para cada passo o valor de  $b$  é ajustado para a taxa de erro de limiar, até que o *notch* alcance as vizinhanças do flanco posterior do espectro de frequências do sinal modulado.
- e) A curva de assinatura deve ser levantada tanto para as condições de fase mínima quanto para fase não-mínima. Para cada valor de  $b$  registrado, correspondente a um valor de frequência do espectro, haverá um valor de  $D$ , determinado por (5.8) que em um plano cartesiano assume o aspecto apresentado na Figura (5.3).

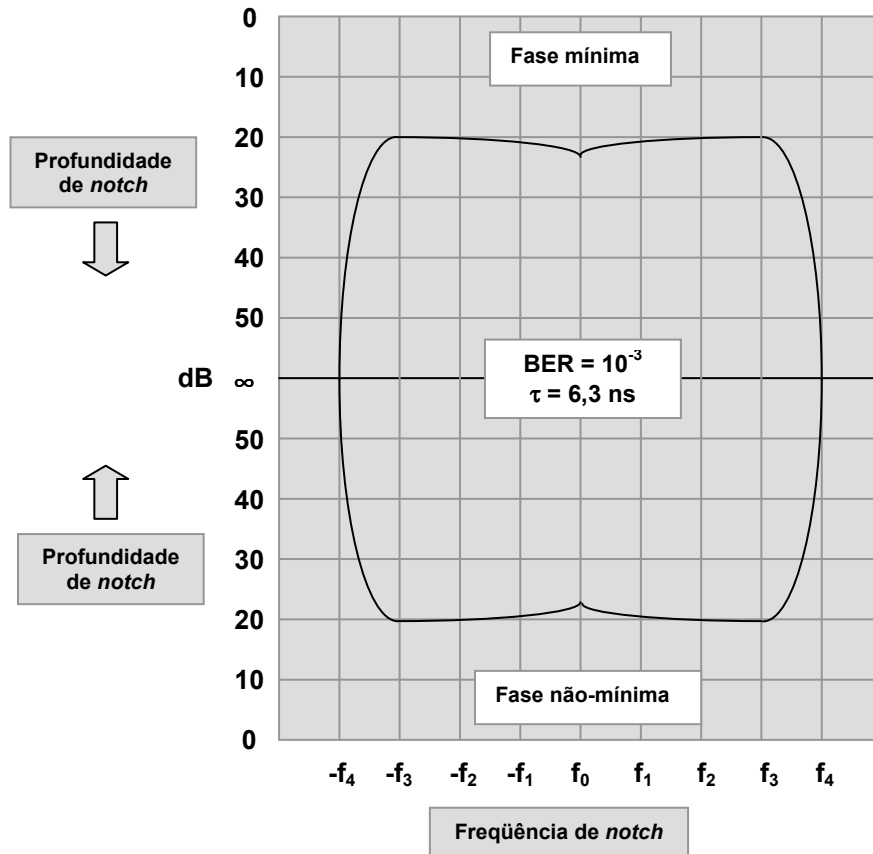


Figura 5.3 – Aspecto das curvas de assinatura para fase mínima e não-mínima.

A área de assinatura é a área sob a curva de assinatura. A área  $S$  é a média das áreas sob as curvas de assinatura para fase mínima e não-mínima, conforme (5.9). De acordo com a ITU-R F.1093 [10], as áreas de assinatura para distorção por fase mínima e por fase não mínima podem ser determinadas pelas equações (5.10a) e (5.10b).

$$S = \frac{S_M + S_{NM}}{2} \quad (5.9)$$

$$S_M = \frac{\lambda_M \times B_S \times 10^{-3}}{\tau_r} \quad (5.10a)$$

$$S_{NM} = \frac{\lambda_{NM} \times B_S \times 10^{-3}}{\tau_r} \quad (5.10b)$$

## 5. Análise de Desempenho e Dimensionamento de Radioenlaces Terrestres

Em (5.9), (5.10a) e (5.10b),  $S_M$  e  $S_{NM}$  são as áreas de assinatura para fase mínima e não mínima respectivamente;  $B_S$  é a largura de faixa das áreas de assinaturas em MHz;  $\tau_r$  é o atraso de referência em ns; e  $\lambda_M$  e  $\lambda_{NM}$  são as profundidades médias de *notch*, obtidas a partir de  $D_M$  e  $D_{NM}$ , com o auxílio de (5.11a) e (5.11b). Note que o uso (5.10a) e (5.10b) pressupõe uma aproximação retangular da curva de assinatura, conforme apresentado na Figura 5.4.

$$\lambda_M = 10^{\frac{-D_M}{20}} \quad (5.11a)$$

$$\lambda_{NM} = 10^{\frac{-D_{NM}}{20}} \quad (5.11b)$$

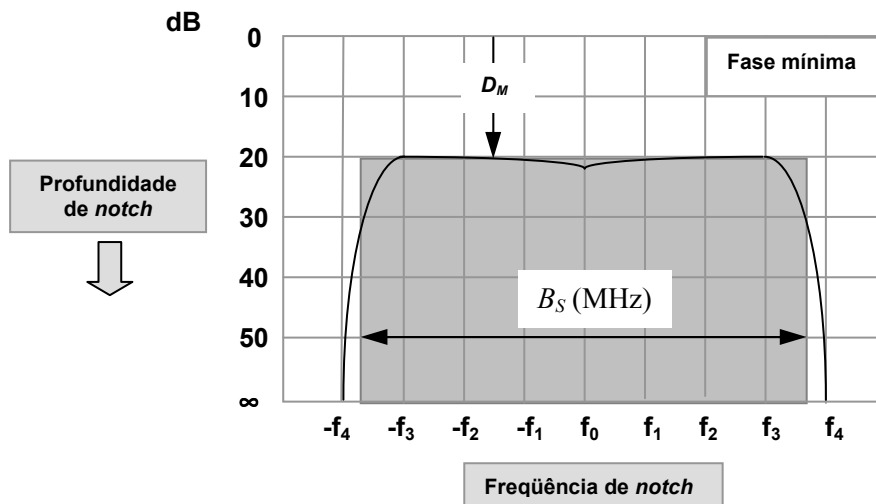


Figura 5.4 – Aproximação retangular para uma curva de assinatura.

Se as curvas forem irregulares, a área pode ser obtida pela soma das áreas de retângulos menores, conforme mostrado na Figura 5.5.

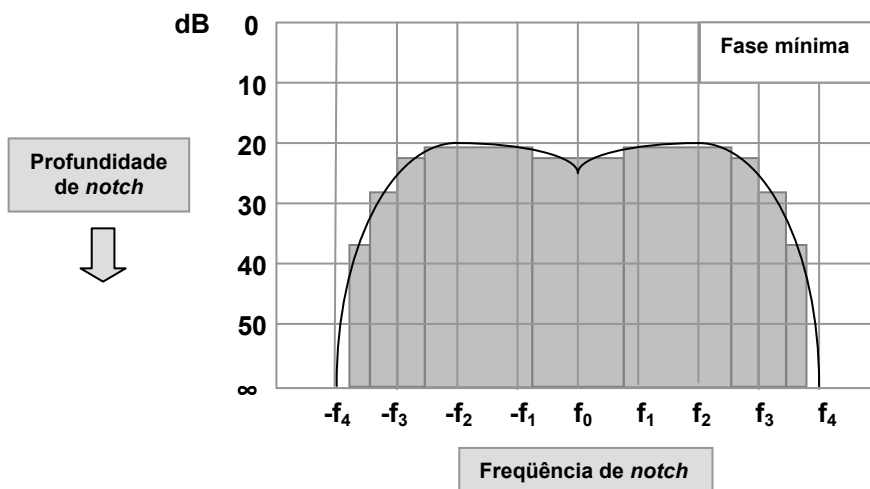


Figura 5.5 – Aproximação da área de assinatura pela soma de retângulos para uma curva de assinatura.

**EXEMPLO 5.1**

A partir da curva de assinatura apresentada na Figura 5.6 determine sua área de assinatura.

Solução:

Observa-se que tanto a curva para distorção do tipo fase mínima quanto não- mínima, tem formato muito próximo de um retângulo. Uma aproximação retangular para as curvas pode ser feita considerando-se uma profundidade média de *notch* para ambas. A Tabela 5.1 apresenta os valores da profundidade de *notch* ao longo da banda para as duas curvas de assinatura apresentadas na Figura 5.6. A média dos valores para cada caso é a média dos valores absolutos obtidos por meio de (5.11a) e (5.11b).

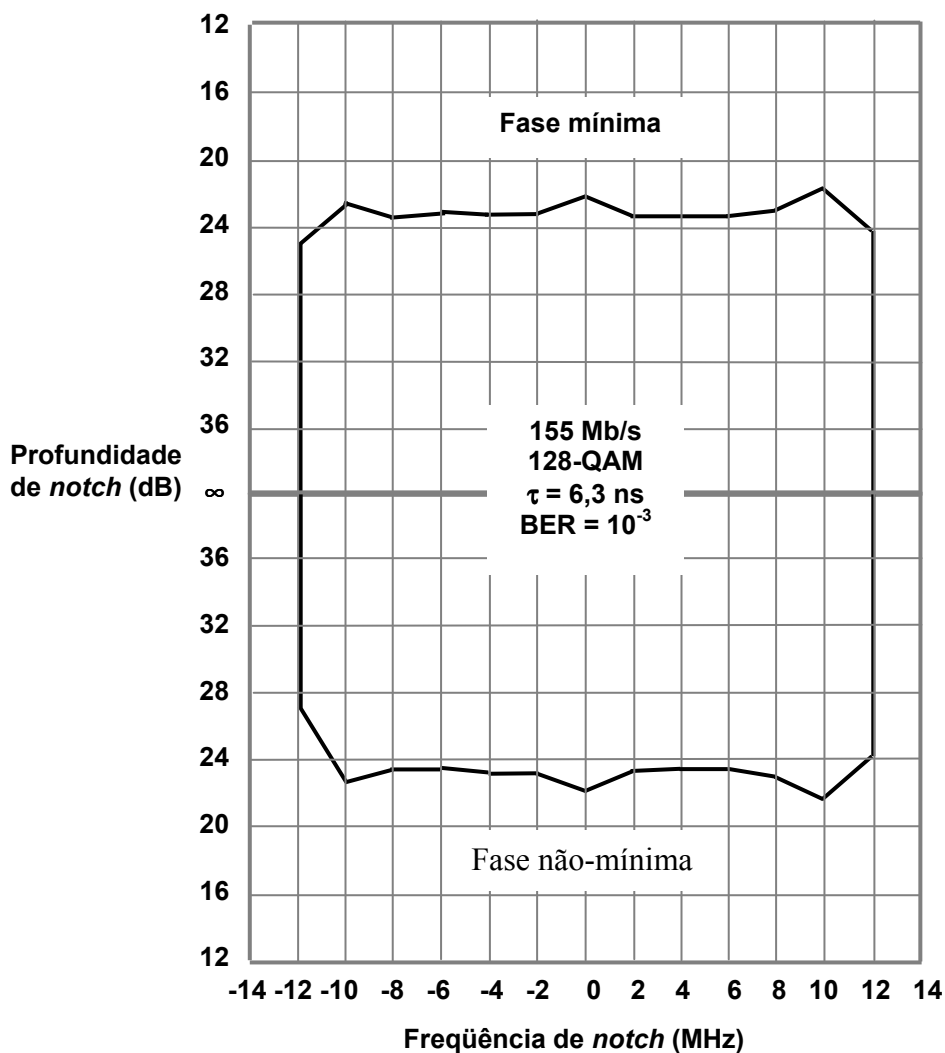


Figura 5.6 - Curva de assinatura medida em laboratório, reproduzida a partir de [12].



Tabela 5.1 – Profundidades de *notch* em função da freqüência para as curva da Figura 5.6.

Freqüência (MHz)	D <sub>M</sub> (dB)	λ <sub>M</sub>	D <sub>NM</sub> (dB)	λ <sub>NM</sub>
-12	25	0,056	27	0,045
-10	22,5	0,075	23	0,071
-8	23	0,071	23,5	0,067
-6	23	0,071	23,5	0,067
-4	23	0,071	23	0,071
-2	23	0,071	23	0,071
0	22	0,079	22	0,079
2	23	0,071	23,5	0,067
4	23	0,071	23,5	0,067
6	23	0,071	23,5	0,067
8	23	0,071	23	0,071
10	22	0,079	22	0,079
12	24	0,063	24	0,063
	λ <sub>M</sub> médio	0,071	λ <sub>NM</sub> médio	0,068

A partir da Figura 5.6 obtêm-se as larguras de faixas de assinatura,  $B_S = 24$  MHz e atraso de referência,  $\tau_r$  igual a 6,3 ns que, com as profundidades médias de *notch* obtidas, permitem determinar os valores das áreas de assinatura a partir de (5.10).

$$S_M = \frac{\lambda_M \times B_S \times 10^{-3}}{\tau_r} = \frac{0,071 \times 24 \times 10^{-3}}{6,3}$$

$$S_M = 270,5 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-2}$$

$$S_{NM} = \frac{\lambda_{NM} \times B_S \times 10^{-3}}{\tau_r} = \frac{0,068 \times 24 \times 10^{-3}}{6,3}$$

$$S_{NM} = 259 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-2}$$

Finalmente, a área de assinatura para o sistema de recepção é a média das áreas de assinatura determinadas acima, ou seja,

$$S = \frac{S_M + S_{NM}}{2} = \frac{(270,5 + 259) \times 10^{-6}}{2}$$

$$S \cong 265 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-2}$$

\* \* \*

▪ **MARGEM DE DESVANECIMENTO DISPERSIVO**

A *margem de desvanecimento dispersivo* ou *DFM* (*Dispersive Fading Margin*), ao contrário do que pode parecer, não está associada ao nível de potência recebida por um receptor. Este parâmetro *transforma* os erros devidos às distorções provocadas por múltiplos percursos em um *desvanecimento plano adicional equivalente*, para fins de determinação da inoperância e/ou indisponibilidade. A *DFM* é também obtida a partir da curva de assinatura, conforme o documento Bellcore Technical Reference TR-TSY-000752 [11], por meio das seguintes expressões:

$$DFM = 17,6 - \log \frac{S_w}{158,4} \quad (5.12)$$

e

$$S_w = e^{\frac{-D}{3,8}} \times B_s, \quad (5.13)$$

onde  $S_w$  é a área de assinatura,  $D$  é o valor médio da profundidade de desvanecimento (em dB) para fase mínima e não-mínima e  $B_s$  é a largura de faixa da curva de assinatura em MHz [11], que é um valor muito próximo do inverso da taxa de transmissão de símbolo. Geralmente o valor da *DFM* é fornecido pelo fabricante do equipamento rádio. Note que a área de assinatura calculada por (5.13) é diferente da área calculada por (5.10a) e (5.10b), ou seja, o Bellcore e a ITU utilizam abordagens diferentes para a determinação da área de assinatura, que são incompatíveis entre si.

▪ **ÁREA DE ASSINATURA X MARGEM DE DESVANECIMENTO DISPERSIVO**

Usualmente, os fabricantes dos equipamentos de rádio digital para sistemas fixos em microondas não fornecem livremente a curva de assinatura ou a área de assinatura conforme definida pela Rec. ITU-R P.530-11 [9] e ITU-R F.1093 [10]. Entretanto, conforme comentado no item anterior, alguns fabricantes fornecem a *DFM*. Entretanto, a partir de (5.10), (5.11), (5.12) e (5.13), é possível estabelecer uma relação entre a área de assinatura,  $S$  e a margem de desvanecimento dispersivo, *DFM*, da forma como se segue.

Sem perda de generalidade, pode-se substituir (5.11) em (5.10), considerando que as distorções por fase mínima e não mínima são iguais, obtendo-se desta forma,

$$S = \frac{10^{\frac{-D}{20}} \times B_s}{\tau_r \times 10^3}. \quad (5.14)$$

De (5.12) obtém-se

$$S_w = 10^{19,8-DFM}. \quad (5.15)$$

Substituindo (5.15) em (5.13), após algumas manipulações algébricas, chega-se a

$$10^{\frac{-D}{20}} = 10^{8,662-0,438DFM} \cdot B_s^{9,75}. \quad (5.16)$$

Finalmente, substituindo (5.16) em (5.14), obtém-se

$$S = \frac{10^{8,662-0,438DFM} \cdot B_s^{9,75}}{6,3 \times 10^3} \quad (5.17)$$

Note que (5.17) só é válida se a área de assinatura e a margem de desvanecimento seletivo forem obtidas a partir da mesma curva de assinatura e com atraso de referência igual a 6,3 ns.

#### **EXEMPLO 5.4**

Um sistema de recepção na faixa de microondas, com capacidade STM-1 e modulação 128-QAM com FEC (*Forward Error Correction*), apresenta uma margem de desvanecimento dispersivo igual a 50 dB (BER =  $10^{-3}$ ). A taxa de transmissão bruta do sistema do sistema é igual a 167,48 Mbit/s. Determine o valor da área de assinatura, segundo a definição apresentada nas Recomendações ITU-R P.530-11 e ITU-R F.1093.

Solução:

Como a largura de faixa da área de assinatura não é conhecida, pode-se obtê-la, sem perda apreciável de precisão, por meio da taxa de transmissão de símbolos,  $R_s$ , da forma como se segue.

$$B_s \cong R_s$$

$$R_s = \frac{R_b}{\log_2 M}$$

Onde  $R_b$  é a taxa de transmissão de bits e  $M$  é o número de símbolos da constelação. Logo,

$$R_s = \frac{167,48 \times 10^6}{\log_2 128} = 23,93 \times 10^6 \text{ bauds}$$

$$S = \frac{10^{8,662-0,438 \times 50} \cdot 23,93^{9,75}}{6,3 \times 10^3}$$

$$S = 255,5 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-2}$$

\* \* \*

### 5.5. INOPERÂNCIAS PELO MÉTODO DA REC. ITU-R P.530-11 [9]

A análise de desempenho de radioenlaces digitais baseia-se na estimativa da probabilidade de inoperância. Diversos métodos foram desenvolvidos para a determinação da inoperância, quando o enlace fica submetido às condições anômalas de propagação. O método utilizado neste trabalho é o método apresentado pela União Internacional de Telecomunicações, através da Recomendação ITU-R P.530-11 [9]. Para a utilização deste método deve-se dispor de um fator geoclimático ( $K$ ) para a área geográfica de interesse. A forma de obtenção do valor de  $K$ , com precisão, é feita através de prospecções, que consistem da monitoração do nível do sinal recebido por um período de tempo não menor do que um ano na região geográfica de interesse. Na ausência de dados precisos, recomenda-se que o valor de  $K$  seja estimado através da relação empírica [9]

$$K = 10^{-3.9 - 0,003dN_1 s_a^{-0,42}} \quad (5.18)$$

onde  $dN_1$  é um valor estatístico do gradiente de refratividade definido como sendo o valor, nos 65 metros mais baixos da atmosfera, que não é excedido por mais que de 1% de um ano e  $s_a$  é o fator de rugosidade do terreno na região do enlace. Valores de  $dN_1$  podem ser obtidos através da Recomendação ITU-R P.453-8<sup>1</sup> [14]. O Anexo 5.1 à este capítulo apresenta valores de  $dN_1$ , em função das coordenadas geográficas, para o território brasileiro.

Por sua vez,  $s_a$  é definido como o desvio padrão das altitudes do terreno, tomadas com resolução de 30 segundos de arco, dentro de uma área de 110 km × 110 km, sendo que o centro desta área deve coincidir com o ponto que divide a trajetória do enlace em duas metades [9], conforme mostrado na Figura 5.7.

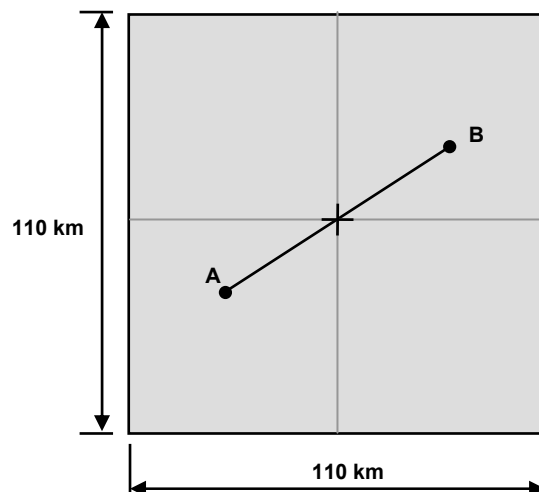


Figura 5.7 - Área e posição do enlace para a determinação do desvio padrão das altitudes.

<sup>1</sup> Essa recomendação apresenta valores característicos para diversas macro-regiões do mundo que, em geral, estão compreendidos entre -100 unidades-N/km até -700 unidades-N/km. Para o Brasil, os valores de  $dN_1$  estão compreendidos na faixa de -100 unidades-N/km até -400 unidades-N/km. O valor de  $dN_1$  mais negativo encontrado neste documento é -1200 unidades-N/km, para o litoral do Mar Mediterrâneo ao norte da África, próximo das costas da Líbia e do Egito, e também na região do Mar Vermelho, entre as costas do Sudão e da Arábia Saudita.

O desvio padrão do terreno pode ser calculado de acordo com

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2} \quad (5.19)$$

onde  $h_i$  é a altitude do terreno no ponto  $i$  e  $\bar{h}$  é a média das altitudes dentro da área considerada e  $n$  é igual ao número de amostras correspondentes às altitudes obtidas.

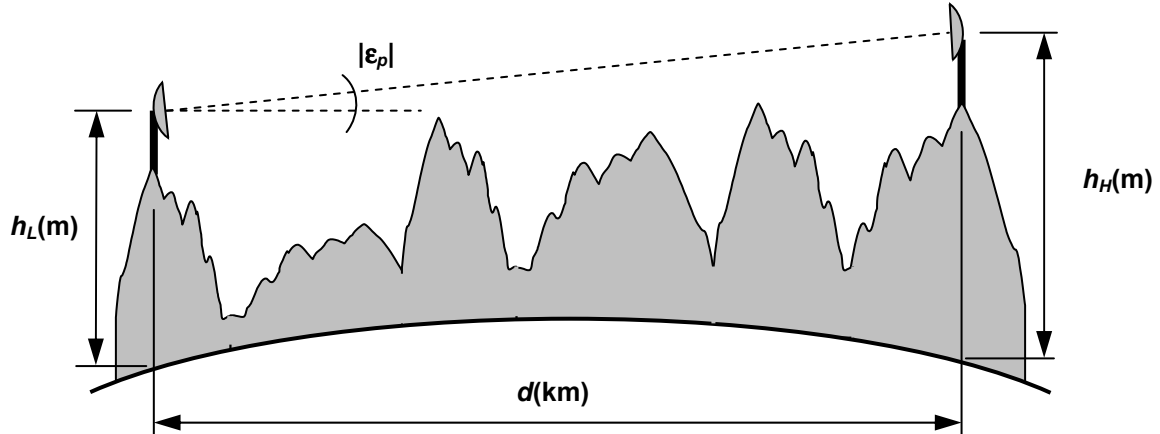
Se uma estimativa de  $K$  é necessária, para fins de planejamento rápido, a seguinte expressão pode ser usada [9]:

$$K = 10^{-4.2-0,0029dN_1} \quad (5.20)$$

onde  $d$  é a extensão do percurso em km,  $h_H$  é a altitude da antena de maior altitude e  $h_L$  é a altitude da antena de menor altitude, conforme mostrado na Figura 5.8. Outro dado necessário, para o uso do método apresentado em [9], é a inclinação da linha de visada,  $|\epsilon_p|$ , em mrad a partir de

$$|\epsilon_p| \cong \tan|\epsilon_p| = \frac{h_H - h_L}{d} \quad (5.21)$$

Figura 5.8 - Referência para a determinação da inclinação da linha de visada.



### 5.5.1. DETERMINAÇÃO DO FATOR DE OCORRÊNCIA DE PROPAGAÇÃO POR MÚLTIPLOS PERCURSOS<sup>2</sup>

O fator de ocorrência de propagação por múltiplos percursos,  $p_0$ , permite determinar a porcentagem de tempo em que a profundidade de desvanecimento é maior do que um determinado valor, para o pior mês do ano. Para pequenas porcentagens de tempo, o fator de ocorrência de múltiplos percursos pode ser determinado, para fins de dimensionamento detalhado, através da expressão empírica

$$p_0 = K \cdot d^{3,2} \left(1 + |\varepsilon_p|\right)^{-0,97} 10^{0,032 \cdot f - 0,00085 \cdot h_L} \quad (\%), \quad (5.22)$$

onde  $f$  é a frequência da portadora em GHz. O uso de (5.13) implica na determinação de  $K$  através de (5.20) [9]. Para fins de planejamento rápido, quando  $K$  é determinado por (5.14),  $p_0$  deve ser determinado por

$$p_0 = K \cdot d^{3,0} \left(1 + |\varepsilon_p|\right)^{-1,2} 10^{0,033 \cdot f - 0,001 \cdot h_L} \quad (\%). \quad (5.23)$$

Uma inspeção nas Equações (5.22) e (5.23), permite verificar que:

- o valor de  $p_0$  é diretamente proporcional, e muito sensível, à extensão do enlace;
- quanto mais negativo é o valor de  $dN_1$ , maior é o valor da constante geoclimática  $K$  e, conseqüentemente, maior é o valor de  $p_0$ , sendo  $K$  razoavelmente sensível para a faixa  $-700$  unidades-N/km  $< dN_1 < -100$  unidades-N/km;
- $p_0$  é inversamente proporcional à inclinação da linha de visada,  $|\varepsilon_p|$ , mas a melhoria obtida em função da inclinação da linha de visada, pode ser considerada casual, pois enlaces extensos com grandes inclinações não representam o caso geral; e o valor de  $p_0$  é menos sensível à frequência de operação,  $f$ , em conjunto com a altitude da antena mais baixa,  $h_L$ , principalmente se for considerada a estreita faixa de frequências de microondas utilizadas para os enlaces em linha de visada de longo alcance, i.e., a faixa compreendida entre 1,5 GHz e 8,5 GHz.

Se houver interesse na determinação do fator de ocorrência de propagação por múltiplos percursos para um ano, isso pode ser feito a partir do *fator de conversão geoclimático logarítmico*,  $\Delta G$ , determinado por

$$\Delta G = 10,5 - 5,6 \left(1,1 \pm |\cos 2\theta|^{0,7}\right) - 2,7 \log d + 1,7 \log \left(1 + |\varepsilon_p|\right) \quad (\text{dB}). \quad (5.24)$$

<sup>2</sup> As equações (5.15) e (5.17), e as equações associadas (5.19) e (5.20) para o fator geoclimático  $K$ , foram obtidas a partir de múltiplas regressões de dados de desvanecimento para 251 enlaces em várias regiões geoclimáticas do mundo, com percursos com extensão  $d$  de 7,5 km até 185 km, frequências  $f$  na faixa de 450 MHz até 37 GHz, inclinações da linha de visada  $|\varepsilon_p|$  até 37 mrad, altitudes de antenas  $h_L$  na faixa de 17 m até 2300 m, gradientes de refratividade na faixa de  $-860$  até  $-150$  unidades-N/km e rugosidade da superfície  $S_a$  na faixa de 6 m até 850 m [9].

## 5. Análise de Desempenho e Dimensionamento de Radioenlaces Terrestres

sendo que  $\Delta G \leq 10,8$  dB e o sinal  $\pm$  deve ser positivo quando  $\theta \leq 45^\circ$  e negativo quando  $\theta > 45^\circ$ , onde  $\theta$  é a latitude ( $^\circ$ N ou  $^\circ$ S). Com o valor de  $\Delta G$  o valor do fator de ocorrência de propagação por múltiplos percursos para um ano pode ser determinado por

$$p = 10^{\frac{-\Delta G}{10}} \times p_0 \quad (\%). \quad (5.25)$$

### **EXEMPLO 5.5**

Traçar as curvas do fator geoclimático,  $K$ , para  $dN_1$ , variando de  $-860$  unidades-N/km até  $-150$  unidades-N/km e fatores de rugosidade  $S_a$  iguais a 6 m e 850 m.

Solução:

Substituindo-se os valores de  $dN_1$  em (5.18), para  $S_a = 6$  m e novamente para  $S_a = 850$  m, obtém-se as curvas apresentadas na Figura 5.12

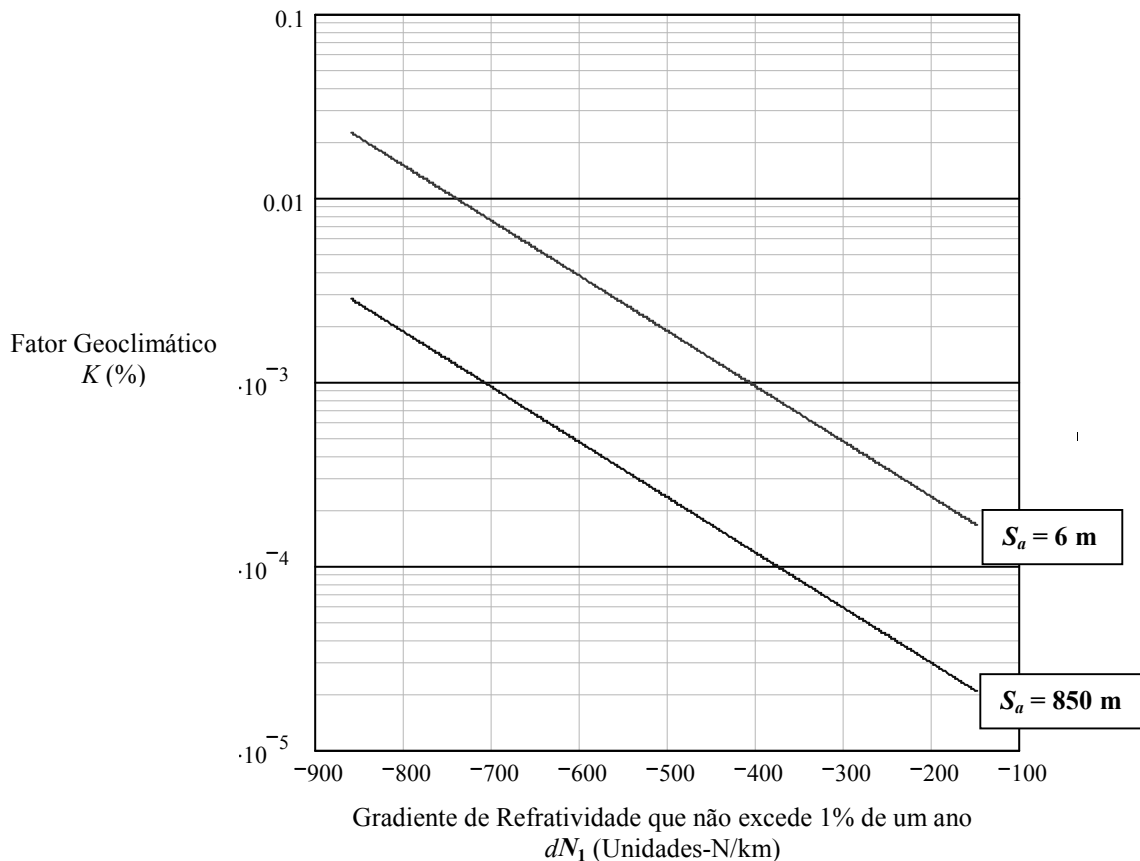


Figura 5.9 – Fator Geoclimático,  $K$ , em função do Gradiente de Refratividade que não excede 1% de um ano,  $dN_1$ .

\* \* \*

### 5.5.2. DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE INOPERÂNCIA DEVIDO AOS DESVANECIMENTOS NÃO-SELETIVOS

A porcentagem de tempo que uma profundidade de desvanecimento não-seletivo  $A$ , em dB, é excedida é determinada através da expressão

$$p_w = p_0 \cdot 10^{\frac{-A}{10}} \quad (\%). \quad (5.26)$$

Se a margem de desvanecimento,  $M$  é igual a  $A$ , a probabilidade do desvanecimento não-seletivo,  $P_{ns}$ , exceder a margem, para o mês do ano é

$$P_{ns} = P_0 \cdot 10^{\frac{-M}{10}}, \quad (5.27)$$

onde

$$P_0 = \frac{p_0}{100}. \quad (5.28)$$

#### **EXEMPLO 5.6**

Considere três radioenlaces distintos cujas potências de recepção são -50,5 dBm, -40,5 dBm e -30,5 dBm. Admita que nos três sistemas a potência de limiar de recepção seja igual a -80,5 dBm para uma taxa de erro igual a  $10^{-3}$ . Admita também que o fator de ocorrência de propagação por múltiplos percursos para os três enlaces seja igual a 50%. Determine os tempos de inoperância para os três dentro do período de um mês.

Solução:

As margens para os valores acima são determinadas por (5.23), conforme mostrado a seguir.

$$\begin{aligned} M &= P_R - P_L \\ M_1 &= -50,5 - (-80,5) = 30 \text{ dB} \\ M_2 &= -40,5 - (-80,5) = 40 \text{ dB} \\ M_3 &= -30,5 - (-80,5) = 50 \text{ dB} \end{aligned}$$

Substituindo-se o valor de  $p_0$  de (5.22) em (5.26), obtém-se:

$$P_{ns} = \frac{p_o}{100} 10^{\frac{-M}{10}}. \quad (5.29)$$



Para cada um dos valores de margem em (5.29) obtém-se:

$$P_{ns1} = \frac{50}{100} 10^{\frac{-30}{10}} = 5 \times 10^{-4}$$

$$P_{ns2} = \frac{50}{100} 10^{\frac{-40}{10}} = 5 \times 10^{-5}$$

$$P_{ns3} = \frac{50}{100} 10^{\frac{-50}{10}} = 5 \times 10^{-6}$$

O período de referência ou observação,  $T_o$ , em minutos é

$$T_o = 1 \text{ mês} = 30 \text{ dias} \times 24 \text{ horas} \times 60 \text{ minutos} = 43.200 \text{ minutos.}$$

Assim, o período de inoperância devido ao desvanecimento não-seletivo pode ser calculado da forma

$$\Delta t_{ns} = P_{ns} \times T_o. \quad (5.30)$$

Que resulta em:

$$\Delta t_{ns1} = 5 \times 10^{-4} \times 43.200 = 21,6 \text{ min}$$

$$\Delta t_{ns2} = 5 \times 10^{-5} \times 43.200 = 2,16 \text{ min}$$

$$\Delta t_{ns3} = 5 \times 10^{-6} \times 43.200 = 0,216 \text{ min}$$

\* \* \*

### **IMPORTANTE:**

Apesar da dependência óbvia entre a inoperância devido ao desvanecimento plano e a margem, mostrada por (5.29), verifica-se, pelos resultados apresentados no Exemplo 5.6 que para cada 10 dB que se aumenta na margem, o período de inoperância devido ao desvanecimento plano diminui 10 vezes.

### **5.5.3. DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE INOPERÂNCIA DEVIDO AOS DESVANECIMENTOS SELETIVOS**

A determinação da probabilidade de inoperância devido aos desvanecimentos seletivos, sugeridos pela referência [9], é baseado no Método B da Recomendação ITU-R F.1093-1 [10]. Assim, a probabilidade de inoperância,  $P_s$ , é a de um *notch* penetrar nos limites da área de assinatura do equipamento de recepção e pode ser determinada por

$$P_s = 4,32 \times \eta \times S \times \tau_m^2, \quad (5.31)$$

onde  $\eta$  é uma variável auxiliar obtida a partir do fator de ocorrência de propagação por múltiplos percursos,  $P_0$ , através da relação empírica

$$\eta = 1 - \exp(-0,2 \times P_0^{0,75}), \quad (5.32)$$

sendo  $\tau_m$  o atraso médio entre dois percursos, em ns, determinado por [9]

$$\tau_m = 0,7 \times \left(\frac{d}{50}\right)^{1,3}, \quad (5.33)$$

onde  $d$  é a extensão do enlace, e  $S$  é a área de assinatura obtida a partir da curva de assinatura do receptor, conforme procedimento apresentado anteriormente.

Através da expressão (5.33) observa-se que a probabilidade de inoperância, devido aos efeitos do desvanecimento seletivo, depende diretamente da variável auxiliar  $\eta$ , função do fator de ocorrência de propagação por múltiplos percursos,  $p_0$ , da área de assinatura do sistema de recepção,  $S$ , e do quadrado do tempo médio de atraso entre os percursos,  $\tau_m^2$ .

### **EXEMPLO 5.7**

Determine o tempo de inoperância, para o pior mês do ano, devido ao desvanecimento seletivo para um enlace com 50 km de extensão e que apresenta um fator de ocorrência de múltiplos percursos igual a 50 %. O sistema de recepção possui uma área de assinatura igual a  $265 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-2}$ .

Solução:

A partir de  $p_0 = 50 \%$ , obtêm-se, através de (5.28) e (5.32):

$$\eta = 1 - \exp\left[-0,2 \times \left(\frac{p_0}{100}\right)^{0,75}\right] = 1 - \exp\left[-0,2 \times \left(\frac{50}{100}\right)^{0,75}\right]$$

$$\eta = 0,112$$

O atraso médio no percurso, obtido por (5.33)

$$\tau_m = 0,7 \times \left(\frac{d}{50}\right)^{1,3} = 0,7 \times \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3}$$

$$\tau_m = 0,7 \text{ ns}$$

Assim, a probabilidade de inoperância pode ser calculada por (5.31).

$$P_s = 4,32 \times \eta \times S \times \tau_m^2 = 4,32 \times 0,112 \times 265 \times 10^{-6} \times 0,7^2$$

$$P_s = 62,89 \times 10^{-6}$$

Para o período de referência ou observação,  $T_o = 1$  mês = 43.200 minutos, de forma idêntica a (5.30):

$$\Delta t_s = P_s \times T_o . \quad (5.34)$$

$$\Delta t_s = P_s \times T_o = 62,89 \times 10^{-6} \times 43.200$$

$$\Delta t_s \cong 2,72 \text{ min}$$

\* \* \*

#### 5.5.4. DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE INOPERÂNCIA DEVIDO AO DESVANECIMENTO SELETIVO E NÃO-SELETIVO

A probabilidade de inoperância total,  $P_{tot}$ , é a soma das probabilidades de inoperância devido ao desvanecimento não-seletivo,  $P_{ns}$ , e devido ao desvanecimento seletivo,  $P_s$ , ou seja,

$$P_{tot} = P_{ns} + P_s . \quad (5.35)$$

Conseqüentemente, o período de inoperância total é

$$\Delta t_{tot} = P_{tot} \times T_o . \quad (5.36)$$

#### 5.5.5. PROBABILIDADE DE INOPERÂNCIA PARA MÚLTIPLOS ENLACES

Evidências experimentais indicam que, em condições de tempo claro, eventos de desvanecimentos que excedem 20 dB em lances adjacentes de um radioenlace, são quase completamente descorrelacionados. Isso sugere que, para sistemas com grandes margens de desvanecimento, o período total de inoperância é aproximadamente igual a soma dos períodos de inoperância de cada lance individual. Em outras palavras, a soma dos períodos de inoperância é um limitante superior. Isso se aplica para o desvanecimento plano, seletivo ou uma combinação de ambos.

Entretanto, um limitante superior mais preciso pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^{n-1} (P_i P_{i+1})^C \quad (5.37)$$

onde  $P_i$  é a probabilidade de inoperância para o  $i$ -ésimo do total de  $n$  lances, e

$$C = \begin{cases} 0,8 & \text{para } A \leq 10 \text{ dB} \\ 1 & \text{para } A \geq 20 \text{ dB} \end{cases} . \quad (5.38)$$

Para profundidades de desvanecimentos entre 10 e 20 dB sugere-se que o expoente  $C$  seja o resultado de uma interpolação linear entre 0,8 e 1.

### 5.5.6. CONFIABILIDADE

A confiabilidade do enlace, exclusivamente devido aos efeitos dos desvanecimentos plano e seletivo, pode ser determinada segundo a expressão

$$C\% = 100 - P_{tot} \times 100. \quad (5.39)$$

Note que a expressão (5.39) pode ser aplicada à qualquer método com ou sem diversidade.

\* \* \*

### EXEMPLO 5.8

#### DIMENSIONAMENTO DE RADIOENLACE DIGITAL SEM O USO DE DIVERSIDADE ESPACIAL (veja fluxograma no Anexo 5.2)

#### Dados geoclimáticos:

Localidades: Sta. Rita do Sapucaí (MG) e Maria da Fé (MG)  
Altitudes: 1400 m e 1625 m (respectivamente)  
Gradiente de refratividade que excede 1% do tempo: -250 unidades  $N/km$   
Fator de rugosidade: 21 m  
Extensão do radioenlace: 40 km

#### Infraestrutura:

Altura das antenas em relação às estações: 50 m (para ambas)

#### Transmissão:

Frequência: 6 GHz (1+1)  
Potência do transmissor: 30 dBm  
Taxa de transmissão: 155 Mbit/s  
Modulação: 128-QAM (codificada)

#### Recepção:

Potência de limiar: -75 dBm ( $BER = 10^{-3}$ )  
Área de assinatura:  $270 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-2}$

#### Perdas (total por item):

Guias de onda: 4 dB  
Circuladores: 0,75 dB  
Filtros: 6 dB

#### Objetivo de desempenho:

Confiabilidade = 99,9995 %

#### Solução:

##### 1. Determinação do fator geoclimático

$$K = 10^{-3.9 - 0,003dN_1} s_a^{-0,42} \quad K = 1,971 \times 10^{-4} \%$$

##### 2. Determinação do fator de ocorrência de múltiplos percursos

$$|\epsilon_p| \cong \tan|\epsilon_p| = \frac{h_H - h_L}{d} \quad |\epsilon_p| = 5,625 \text{ mrad} \quad \text{☺}$$

$$p_0 = K \cdot d^{3,2} \left(1 + |\epsilon_p|\right)^{-0,97} 10^{0,032 \cdot f - 0,00085 \cdot h_L} \quad p_0 = 0,423 \%$$

3. Determinação da probabilidade de inoperância por desvanecimento seletivo

$$P_0 = \frac{p_0}{100} \quad P_0 = 4,23 \times 10^{-3}$$

$$\eta = 1 - \exp(-0,2 \times P_0^{0,75}) \quad \eta = 3,314 \times 10^{-3}$$

$$\tau_m = 0,7 \times \left(\frac{d}{50}\right)^{1,3} \quad \tau_m = 0,524 \text{ ns}$$

$$P_s = 4,32 \times \eta \times S \times \tau_m^2 \quad P_s = 1,06 \times 10^{-6} \quad \text{☺}$$

4. Determinação da probabilidade de inoperância devido ao desvanecimento não seletivo.

☺

$$C\% = 100 - P_{tot} \times 100 \Rightarrow P_{tot} = \frac{100 - C\%}{100} \quad P_{tot} = 5 \times 10^{-6}$$

Como o valor de  $P_s$  é menor do que o valor do objetivo de desempenho, não é necessário o uso da diversidade.

$$P_{tot} = P_{ns} + P_s \Rightarrow P_{ns} = P_{tot} - P_s \quad P_{ns} = 3,94 \times 10^{-6}$$

5. Determinação da margem de desvanecimento

$$P_{ns} = P_0 \cdot 10^{\frac{-M}{10}} \Rightarrow M = 10 \log \frac{P_0}{P_{ns}} \quad M = 30,31 \text{ dB}$$

6. Determinação do ganho e diâmetro estimado das antenas

$$A_e = 92,44 + 20 \log(d \cdot f) \quad A_e = 140,04 \text{ dB} \quad \text{☺}$$

$$\sum A = A_e + A_d + A_g + A_o \quad \Sigma A = 150,79 \text{ dB}$$


$$M = P_R - P_L \Rightarrow P_R = P_L + M \quad P_R = -44,7 \text{ dBm} \quad \text{☺}$$

$$P_T + \sum G = P_R + \sum A \Rightarrow \sum G = P_R - P_T + \sum A \quad \Sigma G = 76,12 \text{ dBi}$$

Para antenas com ganhos iguais,  $G = 38,05 \text{ dBi}$

$$G = 17,8 + 20 \log(\phi f) \Rightarrow \phi = \frac{10^{\frac{G-17,8}{20}}}{f} \quad \phi = 1,72 \text{ m} \quad \text{☺}$$

### 7. Especificação das antenas

Antenas Andrew com refletor sólido e polarização única PL6-59D.   
 $G = 38,9 \text{ dBi}$ ,  $\varnothing \cong 1,8 \text{ m}$ .

**OBSERVAÇÃO:** Note que, de acordo com o fluxograma do Anexo 5.1, a partir deste ponto a seqüência de cálculo é a seqüência da análise de desempenho para um radioenlace sem diversidade espacial, ou seja, as antenas são conhecidas e deseja-se conhecer o desempenho a partir do ganho das antenas especificadas. Esta seqüência de cálculo é apresentada no Exemplo 5.9.

\* \* \*

### EXEMPLO 5.9

#### **ANÁLISE DE DESEMPENHO DE RADIOENLACE DIGITAL SEM O USO DE DIVERSIDADE ESPACIAL** (veja fluxograma no Anexo 5.2)

##### **Dados geoclimáticos:**

Localidades: Sta. Rita do Sapucaí (MG) e Maria da Fé (MG)  
Altitudes: 1400 m e 1625 m (respectivamente)  
Gradiente de refratividade que excede 1% do tempo: -250 unidades  $N/\text{km}$   
Fator de rugosidade: 21 m  
Extensão do radioenlace: 40 km

##### **Infraestrutura:**

Altura das antenas em relação às estações: 50 m (para ambas)

##### **Transmissão:**

Frequência: 6 GHz (1+1)  
Potência do transmissor: 30 dBm  
Taxa de transmissão: 155 Mbit/s  
Modulação: 128-QAM (codificada)

##### **Recepção:**

Potência de limiar: -75 dBm ( $\text{BER} = 10^{-3}$ )  
Área de assinatura:  $270 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-2}$

##### **Perdas (total por item):**

Guias de onda: 4 dB  
Circuladores: 0,75 dB  
Filtros: 6 dB

##### **Antenas:**

Antenas parabólicas com refletor sólido, PL6-59D.  
 $G_1 = G_2 = 38,9 \text{ dBi}$ ;  $\varnothing \cong 1,8 \text{ m}$ .

Solução:

Conforme o fluxograma do Anexo 5.2, a solução deste problema é idêntica à do exemplo anterior, até o item 3, repetida a seguir por conveniência.

1. Determinação do fator geoclimático

$$K = 10^{-3.9 - 0,003dN_1} s_a^{-0,42} \quad K = 1,971 \times 10^{-4} \%$$

2. Determinação do fator de ocorrência de múltiplos percursos

$$|\epsilon_p| \cong \tan|\epsilon_p| = \frac{h_H - h_L}{d} \quad |\epsilon_p| = 5,625 \text{ mrad}$$

$$p_0 = K \cdot d^{3,2} \left(1 + |\epsilon_p|\right)^{-0,97} 10^{0,032 \cdot f - 0,00085 \cdot h_L} \quad p_0 = 0,423 \%$$

3. Determinação da probabilidade de inoperância por desvanecimento seletivo

$$P_0 = \frac{p_0}{100} \quad P_0 = 4,23 \times 10^{-3}$$

$$\eta = 1 - \exp(-0,2 \times P_0^{0,75}) \quad \eta = 3,314 \times 10^{-3}$$

$$\tau_m = 0,7 \times \left(\frac{d}{50}\right)^{1,3} \quad \tau_m = 0,524 \text{ ns}$$

$$P_s = 4,32 \times \eta \times S \times \tau_m^2 \quad P_s = 1,06 \times 10^{-6}$$

4. Determinação da margem instalada

$$A_e = 92,44 + 20 \log(d \cdot f) \quad A_e = 140,04 \text{ dB}$$

$$\sum A = A_e + A_d + A_g + A_o \quad \Sigma A = 150,79 \text{ dB}$$

$$P_T + \sum G = P_R + \sum A \Rightarrow P_R = P_T + \sum G - \sum A \quad P_R = -42,99 \text{ dBm}$$

5. Determinação da probabilidade de inoperância devido ao desvanecimento não seletivo

$$M = P_R - P_L \quad P_{ns} = P_0 \cdot 10^{\frac{-M}{10}} \quad P_{ns} = 2,67 \times 10^{-6}$$

6. Determinação da probabilidade de inoperância total e a confiabilidade do sistema

$$P_{tot} = P_{ns} + P_s \quad P_{tot} = 3,73 \times 10^{-6}$$

$$C\% = 100 - P_{tot} \times 100 \quad C\% = 99,9996 \%$$

\* \* \*

## 5.6. INOPERÂNCIAS POR OUTROS MÉTODOS CONHECIDOS

Além dos métodos para determinação da probabilidade de inoperância devido aos desvanecimentos não-seletivos e seletivos, apresentados na Rec. ITU-R P.530-11, outros métodos bem conhecidos são bastante utilizados devido à suas simplicidades. Os métodos apresentados a seguir são, geralmente, usados em conjunto para a determinação da probabilidade de inoperância total. O primeiro, de Barnett-Vigants, permite determinar a probabilidade de inoperância devido ao desvanecimento não seletivo. O segundo permite a determinação da probabilidade de inoperância através da *Margem de Desvanecimento Dispersivo*. Ambos os métodos são apresentados a seguir.

### 5.6.1. PROBABILIDADE DE INOPERÂNCIA DEVIDO AO DESVANECIMENTO NÃO-SELETIVO DE BARNETT-VIGANTS

A probabilidade de ocorrência de desvanecimento não-seletivo  $P_{ns}$  é calculada por (5.27), entretanto o valor de  $P_0$ , de acordo com o método Barnett-Vigants, é calculada pela expressão

$$P_0 = \frac{K \cdot 10^{-5}}{S_a} \cdot f \cdot d^3 . \quad (5.40)$$

onde  $K$  é um fator geoclimático que depende da região e seus valores são apresentados na Tabela 5.2,  $f$  é a frequência em GHz,  $d$  é a extensão do enlace em km e  $S_a$  é o fator de rugosidade definido como sendo o desvio padrão da altitude do terreno a cada 1 km ao longo de rota, excluindo-se a altitude das estações. Para esta expressão deve-se considerar  $6 \text{ m} < S_a < 42 \text{ m}$ .

Tabela 5.2 - Valor do fator geoclimático para o método Barnett-Vigants.

Tipo de região	Valor de $K$
Marítima temperada, Mediterrâneo, costeira ou clima temperado de alta umidade	4,1
Marítima subtropical	3,1
Continental, clima temperado	2,1
Região montanhosa, seco	1,0

### 5.6.2. PROBABILIDADE DE INOPERÂNCIA DEVIDO AO DESVANECIMENTO SELETIVO POR MEIO DA MARGEM DE DESVANECIMENTO DISPERSIVO

A probabilidade de inoperância em função da margem de desvanecimento dispersivo é calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$P_s = P_0 \cdot 10^{\frac{-DFM}{10}} . \quad (5.41)$$



### 5.6.3. DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE INOPERÂNCIA DEVIDO AO DESVANECIMENTO SELETIVO E NÃO-SELETIVO

A probabilidade de inoperância total,  $P_{tot}$ , quando o método Barnett-Vigants e o método da margem de desvanecimento dispersivo são usados, a soma das probabilidades de inoperância devido ao desvanecimento não-seletivo  $P_{ns}$  e ao desvanecimento seletivo  $P_s$  é determinado por

$$P_{tot} = P_{ns} + P_s = P_0 \cdot \left( 10^{\frac{-M}{10}} + 10^{\frac{-DFM}{10}} \right). \quad (5.42)$$

## 5.7. TÉCNICAS DE DIVERSIDADE

A melhoria do desempenho de enlaces rádio digitais pode ser obtida com o uso de técnicas de diversidade. As três técnicas de diversidades mais comumente utilizadas em enlaces rádio digitais são

- Diversidade em espaço;
- Diversidade em ângulo e
- Diversidade em frequência.

Para todas elas a eficácia depende do grau de decorrelação, dos efeitos da propagação por múltiplos percursos, obtida entre os feixes das ondas em cada tipo de diversidade.

A técnica de diversidade em espaço, cuja geometria está apresentada na Figura 5.10, é a mais popular por produzir bons resultados em termos de *fator de melhoria*. Entretanto o uso da diversidade em espaço depende das seguintes condições:

- a) Necessidade de visada direta pela antena mais baixa;
- b) Necessidade de espaçamento entre antenas que produza um adequado fator de melhoria;
- c) Necessidade de posicionamento das antenas de modo que nenhuma das duas produza percursos com reflexão na superfície.

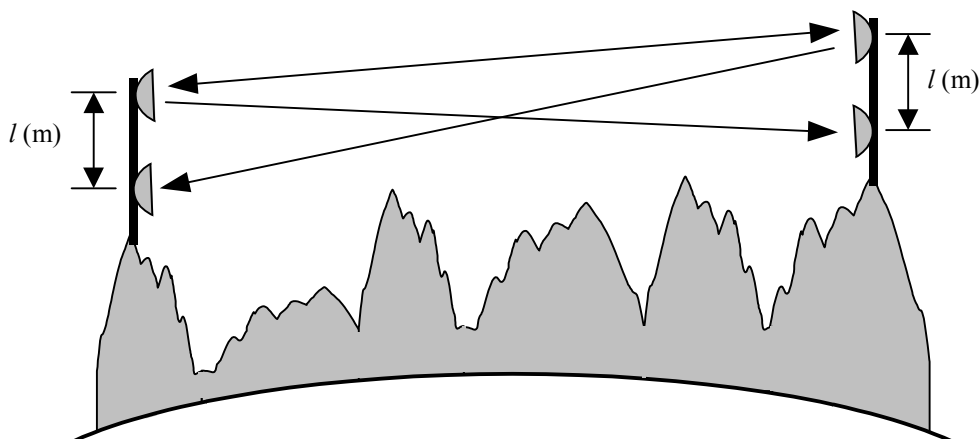


Figura 5.10 - Diversidade em espaço.

A diversidade em ângulo pode ser utilizada em conjunto com a diversidade em espaço ou isoladamente. Entretanto, essa diversidade produz fatores de melhorias modestos quando comparado com os obtidos pela diversidade em espaço. A Figura 5.11 mostra a diversidade em ângulo quando usada isoladamente ou em conjunto com a diversidade em espaço.

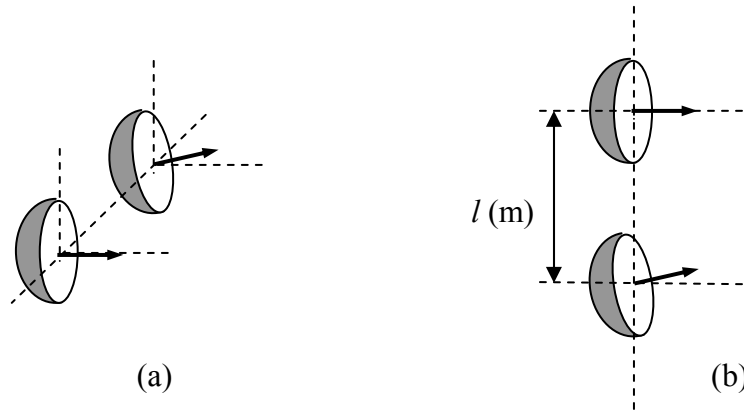


Figura 5.11 – (a) Diversidade em ângulo e (b) diversidade em ângulo combinada com a diversidade em espaço.

A diversidade em frequência consiste na transmissão simultânea da mesma informação através de duas portadoras com frequências diferentes. Ela deve ser evitada quando é necessário otimizar a utilização do espectro. De fato, atualmente seu uso é quase proibitivo devido à disputa pelo uso do espectro radioelétrico disponível para enlaces de rádio digital a partir de 900 MHz.

### 5.7.1. MELHORIAS OBTIDAS COM O USO DA DIVERSIDADE EM ESPAÇO

As expressões apresentadas a seguir foram obtidas a partir da Recomendação ITU-R P.530-11 [9]. Pode-se definir um fator de melhoria,  $M_{ns}$ , para os efeitos de desvanecimento não-seletivo como

$$M_{ns} = \frac{P_{ns}}{P_{dns}} \quad (5.43)$$

onde  $P_{ns}$  é a probabilidade de inoperância devido aos efeitos do desvanecimento não-seletivo sem o uso da diversidade e  $P_{dns}$  é a probabilidade de inoperância devido aos efeitos do desvanecimento não-seletivo com o uso da diversidade. Este fator de melhoria pode ser calculado por

$$M_{ns} = \gamma \times 10^{\frac{M-V}{10}} \quad (5.44)$$

onde  $\gamma$  é uma variável auxiliar, definida por conveniência a partir das variáveis que dependem apenas da geometria do enlace e suas características geoclimáticas;  $M$  é a margem em dB e  $V$  é o módulo da diferença de ganho (em dB) entre as antenas em diversidade, ou seja,

$$V = |G_1 - G_2| \quad (5.45)$$

Para dimensionamento de enlaces é conveniente que a margem seja um valor a ser determinado em função do desempenho desejado. Assim, considerando que as antenas usadas na diversidade espacial tenham o mesmo ganho e substituindo (5.43) em (5.44), obtém-se

$$\frac{P_{ns}}{P_{dns}} = \gamma \times 10^{\frac{M}{10}}$$

Por outro lado, conforme já apresentado, o valor de  $P_{ns}$  é dado por

$$P_{ns} = P_0 \cdot 10^{\frac{-M}{10}}.$$

Substituindo o valor de  $P_{ns}$  acima na expressão anterior, obtém-se

$$\frac{P_0 \cdot 10^{\frac{-M}{10}}}{P_{dns}} = \gamma \cdot 10^{\frac{M}{10}} \Rightarrow \frac{P_0}{P_{dns} \cdot \gamma} = \frac{10^{\frac{M}{10}}}{10^{\frac{-M}{10}}} \Rightarrow \frac{P_0}{P_{dns} \cdot \gamma} = 10^{\frac{M}{5}}$$

$$M = 5 \cdot \log\left(\frac{P_0}{P_{dns} \cdot \gamma}\right) \quad (5.46)$$

Por sua vez, a variável auxiliar  $\gamma^3$  pode ser definida como um *fator de mérito da diversidade espacial* e é calculada por meio da expressão

$$\gamma = \left[1 - \exp\left(-0,04 \times l^{0,87} \times f^{-0,12} \times d^{0,48} \times p_0^{-1,04}\right)\right], \quad (5.47)$$

onde  $l$  é o espaçamento vertical entre as antenas em metros, conforme apresentado na Figura 5.10;  $f$  é a frequência em GHz,  $d$  é a extensão do enlace em km e  $p_0$  é o fator de ocorrência de multipercurso em %. O fator de melhoria para os efeitos do desvanecimento seletivo é definido como

$$M_s = \frac{P_s}{P_{ds}} \quad (5.48)$$

onde  $P_s$  é a probabilidade de inoperância devido aos efeitos do desvanecimento seletivo sem o uso da diversidade e  $P_{ds}$  é a probabilidade de inoperância devido aos efeitos do desvanecimento seletivo com o uso da diversidade. Este fator de melhoria,  $M_s$ , pode ser calculado por

$$M_s = \frac{\eta(1 - k_s^2)}{P_s} \quad (5.49)$$

onde  $k_s^2$  é o fator de correlação para o desvanecimento seletivo elevado ao quadrado, determinado de acordo com as condições apresentadas a seguir.

<sup>3</sup> A Equação (5.47) foi obtida a partir do banco de dados do Grupo de Estudos de Radiocomunicações nº 3 do ITU para as seguintes faixas de variáveis:  $43 \leq d \leq 240$  km,  $2 \leq f \leq 11$  GHz, e  $3 \leq l \leq 23$  m. Entretanto ela pode ser usada com razoável precisão para extensões a partir de 25 km.

$$k_s^2 = \begin{cases} 0,8238 & \text{para } r_w \leq 0,5 \\ 1 - 0,195(1 - r_w)^{0,109 - 0,13 \log(1 - r_w)} & \text{para } 0,5 < r_w \leq 0,9628 \\ 1 - 0,3957(1 - r_w)^{0,5136} & \text{para } r_w > 0,9628 \end{cases} \quad \begin{matrix} (5.50a) \\ (5.50b) \\ (5.50c) \end{matrix}$$



onde o coeficiente de correlação das amplitudes relativas,  $r_w$ , é dada por

$$r_w = \begin{cases} 1 - 0,9746(1 - k_{ns}^2)^{2,17} & \text{para } k_{ns}^2 \leq 0,26 \\ 1 - 0,6921(1 - k_{ns}^2)^{1,034} & \text{para } k_{ns}^2 > 0,26 \end{cases} \quad \begin{matrix} (5.51a) \\ (5.51b) \end{matrix}$$

onde  $k_{ns}$  é o fator de correlação para os desvanecimentos não-seletivos obtido a partir de

$$k_{ns}^2 = 1 - \frac{\gamma \times P_0}{\eta} \quad (5.52)$$

A probabilidade de inoperância total,  $P_d$ , obtida com o uso da diversidade em espaço é obtida fazendo

$$P_d = (P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75})^{4/3} \quad (5.53)$$

\* \* \*

### **EXEMPLO 5.10**

#### **DIMENSIONAMENTO DE RADIOENLACE DIGITAL COM O USO DE DIVERSIDADE ESPACIAL** (veja fluxograma no Anexo 5.2)

##### **Dados geoclimáticos:**

Localidades: Pouso Alegre (MG) e Maria da Fé (MG)  
Altitudes: 1250 m e 1625 m (respectivamente)  
Gradiente de refratividade que excede 1% do tempo: -250 unidades N/km  
Fator de rugosidade: 20 m  
Extensão do radioenlace: 62 km

##### **Infraestrutura:**

Altura das antenas em relação às estações: 50 m (para ambas)

##### **Transmissão:**

Frequência: 6 GHz (1+1)  
Potência do transmissor: 30 dBm  
Taxa de transmissão: 155 Mbit/s  
Modulação: 128-QAM (codificada)

##### **Recepção:**

Potência de limiar: -75 dBm (BER =  $10^{-3}$ )  
Área de assinatura:  $270 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-2}$

##### **Perdas (total por item):**

Guias de onda: 4 dB  
Circuladores: 0,75 dB  
Filtros: 6 dB

##### **Objetivo de desempenho:**

Confiabilidade = 99,9995 %

Solução:

1. Determinação do fator geoclimático

$$K = 10^{-3.9-0,003dN_1 s_a^{-0,42}} \quad K = 2,01172 \times 10^{-4} \%$$

2. Determinação do fator de ocorrência de múltiplos percursos

$$|\epsilon_p| \cong \tan|\epsilon_p| = \frac{h_H - h_L}{d} \quad |\epsilon_p| = 6,04839 \text{ mrad}$$

$$p_0 = K \cdot d^{3,2} \left(1 + |\epsilon_p|\right)^{-0,97} 10^{0,032 \cdot f - 0,00085 \cdot h_L} \quad p_0 = 2,21857 \%$$

3. Determinação da probabilidade de inoperância por desvanecimento seletivo

$$P_0 = \frac{p_0}{100} \quad P_0 = 2,21857 \times 10^{-2}$$

$$\eta = 1 - \exp(-0,2 \times P_0^{0,75}) \quad \eta = 0,01143$$

$$\tau_m = 0,7 \times \left(\frac{d}{50}\right)^{1,3} \quad \tau_m = 0,92586 \text{ ns}$$

$$P_s = 4,32 \times \eta \times S \times \tau_m^2 \quad P_s = 1,14296 \times 10^{-5}$$

4. Determinação da probabilidade de inoperância devido ao desvanecimento não seletivo.

$$C\% = 100 - P_{tot} \times 100 \Rightarrow P_{tot} = \frac{100 - C\%}{100} \quad P_{tot} = 5 \times 10^{-6}$$

Como o valor de  $P_s$  é menor do que o valor do objetivo de desempenho, não é necessário o uso da diversidade.

$$P_{tot} = P_{ns} + P_s \Rightarrow P_{ns} = P_{tot} - P_s \quad P_{ns} = -6,4296 \times 10^{-6} \quad \text{🗨️}$$

**Observação:** Não há como dimensionar o enlace para o desempenho requerido sem o uso de diversidade.

5. Determinação do fator de melhoria para o desvanecimento seletivo

Admitindo que um espaçamento de 10 metros entre as antenas é tecnicamente viável, ou seja, para  $l = 10$  m:

$$\gamma = \left[1 - \exp\left(-0,04 \times l^{0,87} \times f^{-0,12} \times d^{0,48} \times p_0^{-1,04}\right)\right] \quad \gamma = 0,53094 \quad \text{🗨️}$$

$$k_{ns}^2 = 1 - \frac{\gamma \times P_0}{\eta} \quad k_{ns}^2 = -0,03046 \quad \text{🗨️}$$

## 5. Análise de Desempenho e Dimensionamento de Radioenlaces Terrestres

---

$$r_w = 1 - 0,9746(1 - k_{ns}^2)^{2,17} \qquad r_w = -0,04016$$

Consequentemente,  $k_s^2 = 0,8238$

$$M_s = \frac{\eta(1 - k_s^2)}{P_s} \qquad M_s = 176,22$$

6. Determinação da probabilidade de inoperância devido ao desvanecimento seletivo com o uso da diversidade espacial

$$M_s = \frac{P_s}{P_{ds}} \quad \Rightarrow \quad P_{ds} = \frac{P_s}{M_s} \qquad P_{ds} = 6,48582 \times 10^{-8}$$

7. Determinação da probabilidade de inoperância devido ao desvanecimento não seletivo com o uso da diversidade espacial

$$P_d = (P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75})^{4/3} \quad \Rightarrow \quad P_{dns} = (P_{ds}^{0,75} - P_d^{0,75})^{4/3} \qquad P_{dns} = 4,74541 \times 10^{-6}$$

8. Determinação da Margem

$$M = 5 \cdot \log\left(\frac{P_0}{P_{dns} \cdot \gamma}\right) \qquad M = 19,72 \text{ dB}$$

9. Determinação do ganho e diâmetro estimado das antenas

$$A_e = 92,44 + 20 \log(d \cdot f) \qquad A_e = 143,85 \text{ dB}$$

$$\sum A = A_e + A_d + A_g + A_o \qquad \Sigma A = 154,60 \text{ dB}$$

$$M = P_R - P_L \quad \Rightarrow \quad P_R = P_L + M \qquad P_R = -55,28 \text{ dBm}$$

$$P_T + \sum G = P_R + \sum A \quad \Rightarrow \quad \sum G = P_R - P_T + \sum A \qquad \Sigma G = 69,32 \text{ dBi}$$

Para antenas com ganhos iguais,  $G = 34,66 \text{ dBi}$

$$G = 17,8 + 20 \log(\phi f) \quad \Rightarrow \quad \phi = \frac{10^{\frac{G-17,8}{20}}}{f} \qquad \phi = 1,16 \text{ m}$$

10. Especificação das antenas

Antenas Andrew com refletor sólido e polarização única PL4-59D.

$G = 35,4 \text{ dBi}$ ,  $\varnothing \cong 1,2 \text{ m}$ .

\* \* \*

**EXEMPLO 5.11**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE RADIOENLACE DIGITAL COM O USO DE DIVERSIDADE ESPACIAL**

(veja fluxograma no Anexo 5.2)

**Dados geoclimáticos:**

Localidades: Pouso Alegre (MG) e Maria da Fé (MG)  
 Altitudes: 1250 m e 1625 m (respectivamente)  
 Gradiente de refratividade que excede 1% do tempo: -250 unidades  $N/km$   
 Fator de rugosidade: 20 m  
 Extensão do radioenlace: 62 km

**Infraestrutura:**

Altura das antenas em relação às estações: 50 m (para ambas)

**Transmissão:**

Frequência: 6 GHz (1+1)  
 Potência do transmissor: 30 dBm  
 Taxa de transmissão: 155 Mbit/s  
 Modulação: 128-QAM (codificada)

**Recepção:**

Potência de limiar: -75 dBm ( $BER = 10^{-3}$ )  
 Área de assinatura:  $270 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-2}$

**Diversidade:**

Espacial  $l = 10 \text{ m}$

**Perdas (total por item):**

Guias de onda: 4 dB  
 Circuladores: 0,75 dB  
 Filtros: 6 dB

**Antenas:**

Antenas parabólicas com refletor sólido, PL4-59D.  
 $G_1 = G_2 = 35,4 \text{ dBi}$ ;  $\varnothing \cong 1,2 \text{ m}$ .

**Solução:**

1. Determinação do fator geoclimático

$$K = 10^{-3.9-0,003dN_1 s_a^{-0,42}} \quad K = 2,01172 \times 10^{-4} \%$$

2. Determinação do fator de ocorrência de múltiplos percursos

$$\begin{aligned} |\epsilon_p| &\cong \tan|\epsilon_p| = \frac{h_H - h_L}{d} & |\epsilon_p| &= 6,04839 \text{ mrad} \\ p_0 &= K \cdot d^{3,2} \left(1 + |\epsilon_p|\right)^{-0,97} 10^{0,032 \cdot f - 0,00085 \cdot h_L} & p_0 &= 2,21857 \% \end{aligned}$$

3. Determinação da probabilidade de inoperância por desvanecimento seletivo

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{p_0}{100} & P_0 &= 2,21857 \times 10^{-2} \\ \eta &= 1 - \exp\left(-0,2 \times P_0^{0,75}\right) & \eta &= 0,01143 \end{aligned}$$

$$\tau_m = 0,7 \times \left( \frac{d}{50} \right)^{1,3} \quad \tau_m = 0,92586 \text{ ns}$$

$$P_s = 4,32 \times \eta \times S \times \tau_m^2 \quad P_s = 1,14296 \times 10^{-5}$$

4. Determinação da Margem instalada

$$A_e = 92,44 + 20 \log(d \cdot f) \quad A_e = 143,85 \text{ dB}$$

$$\sum A = A_e + A_d + A_g + A_o \quad \Sigma A = 154,60 \text{ dB}$$

$$P_T + \sum G = P_R + \sum A \Rightarrow P_R = P_T + \sum G - \sum A \quad P_R = -53,80 \text{ dBm}$$

$$M = P_R - P_L \quad M = 21,20 \text{ dB}$$

5. Determinação da probabilidade de inoperância por desvanecimento não seletivo

$$P_{ns} = P_0 \cdot 10^{\frac{-M}{10}} \quad P_{ns} = 1,68329 \times 10^{-4}$$

6. Determinação da probabilidade de inoperância total e da confiabilidade considerando as melhorias obtidas pelo uso da diversidade espacial

$$\gamma = \left[ 1 - \exp\left(-0,04 \times l^{0,87} \times f^{-0,12} \times d^{0,48} \times p_0^{-1,04}\right) \right] \quad \gamma = 0,53094$$

$$M_{ns} = \gamma \times 10^{\frac{M-V}{10}} \quad M_{ns} = 69,98$$

$$M_{ns} = \frac{P_{ns}}{P_{dns}} \Rightarrow P_{dns} = \frac{P_{ns}}{M_{ns}} \quad P_{dns} = 2,40546 \times 10^{-6}$$

$$k_{ns}^2 = 1 - \frac{\gamma \times P_0}{\eta} \quad k_{ns}^2 = -0,03046$$

$$r_w = 1 - 0,9746(1 - k_{ns}^2)^{2,17} \quad r_w = -0,04016$$

Consequentemente,  $k_s^2 = 0,8238$

$$M_s = \frac{\eta(1 - k_s^2)}{P_s} \quad M_s = 176,22$$

$$M_s = \frac{P_s}{P_{ds}} \Rightarrow P_{ds} = \frac{P_s}{M_s} \quad P_{ds} = 6,48582 \times 10^{-8}$$



$$P_d = (P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75})^{4/3} \quad P_d = 2,62964 \times 10^{-6}$$

$$C\% = 100 - P_{tot} \times 100 \quad C\% = 99,99974 \%$$

\* \* \*

### 5.8. PROBABILIDADE DE INOPERÂNCIA DEVIDO À CHUVA (REC. ITU-R P.838)

A partir da determinação da atenuação devido à chuva, que pode ser levada a cabo com o auxílio das equações (3.71) até (3.77), é possível determinar a margem de desvanecimento necessária para manter um radioenlace em operação. Essa margem pode ser obtida para uma porcentagem de inoperância arbitrária,  $p_{ch}$ , desde que

$$0,001\% \leq p_{ch} \leq 1\% \quad (5.54)$$

Pode-se determinar a margem para a chuva, para uma porcentagem de tempo de inoperância arbitrária, modificando as Equações (3.76) e (3.77) para

$$M = 0,12 \cdot A_{0,01} \cdot p^{-(0,546+0,043 \cdot \log_{10} p)} \quad \text{para latitudes } \geq 30^\circ \text{ N ou S} \quad (5.55)$$

$$M = 0,07 \cdot A_{0,01} \cdot p^{-(0,855+0,139 \cdot \log_{10} p)} \quad \text{para latitudes } < 30^\circ \text{ N ou S} \quad (5.56)$$

A porcentagem de tempo de inoperância devido à chuva, em função da margem, pode ser determinada a partir das Equações (5.55) e (5.56), de onde se obtém:

$$p_{ch} = 10^{-6,349 + \sqrt{40,31 - 23,26 \cdot \log_{10} \left( \frac{8,33 \cdot M}{A_{0,01}} \right)}} \quad \text{para latitudes } \geq 30^\circ \text{ N ou S} \quad (5.57)$$

$$p_{ch} = 10^{-3,0755 + \sqrt{9,459 - 7,194 \cdot \log_{10} \left( \frac{14,29 \cdot M}{A_{0,01}} \right)}} \quad \text{para latitudes } < 30^\circ \text{ N ou S} \quad (5.58)$$

onde  $M$  é a margem em dB.

#### EXEMPLO 5.12

Determine a margem de desvanecimento para chuva para um radioenlace com 8 km de extensão que opera em 15 GHz com polarização horizontal. A taxa de chuva que excede 0,01 do tempo é igual a 65 mm/h em uma região cuja latitude é menor do que  $30^\circ$  S. A confiabilidade esperada para este radioenlace é 99,999%.

Solução:

1. Determinação das constantes  $k$  e  $\alpha$

A partir da frequência e da polarização da onda obtém-se os valores das constantes por meio da Tabela 3.8, no Capítulo 3.

$$k_H = 0,03689$$

$$\alpha_H = 1,1549$$

2. Determinação da atenuação específica

$$\gamma_R = kR_p^\alpha$$

$$\gamma_R = 4,578 \text{ dB/km}$$

3. Determinação da distância efetiva

$$d_0 = 35 \cdot e^{-0,015 \cdot R_{0,01}}$$

$$d_0 = 13,202 \text{ km}$$

$$r = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}}$$

$$r = 0,623$$

$$d_{ef} = d \cdot r$$

$$d_{ef} = 4,981 \text{ km}$$

4. Determinação da atenuação por chuva

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot d_{ef}$$

$$A_{0,01} = 22,803 \text{ dB}$$

5. Determinação da margem

Como a confiabilidade esperada é de 99,999 % então a porcentagem de tempo de inoperância devido à chuva correspondente é

$$p_{ch} = 100 - 99,999$$

$$p_{ch} = 0,001 \%$$

Como a latitude da região é menor do que 30 S, então a margem deve ser calculada por meio de (5.56).

$$M = 0,07 \cdot A_{0,01} \cdot p^{-(0,855+0,139 \cdot \log_{10} p)}$$

$$M = 32,89 \text{ dB}$$

\* \* \*

## ANEXO 5.1

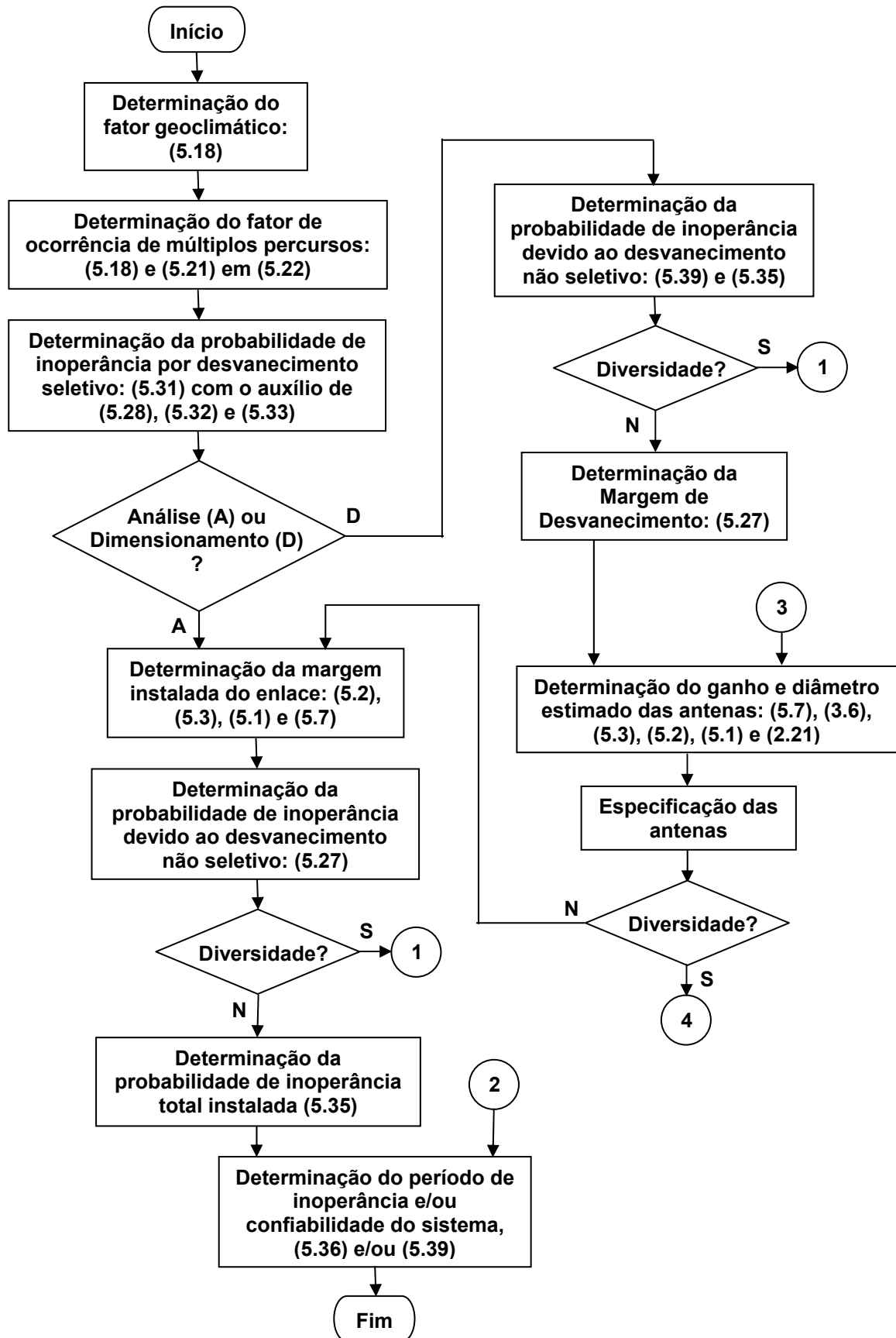
VALORES DE  $dN_1$  EM FUNÇÃO DAS COORDENADAS GEOGRÁFICASTABELA A.5.1 - VALORES DE  $dN_1$  EM TERRITÓRIO BRASILEIRO PARA LONGITUDES MENORES QUE  $53^\circ$  O.

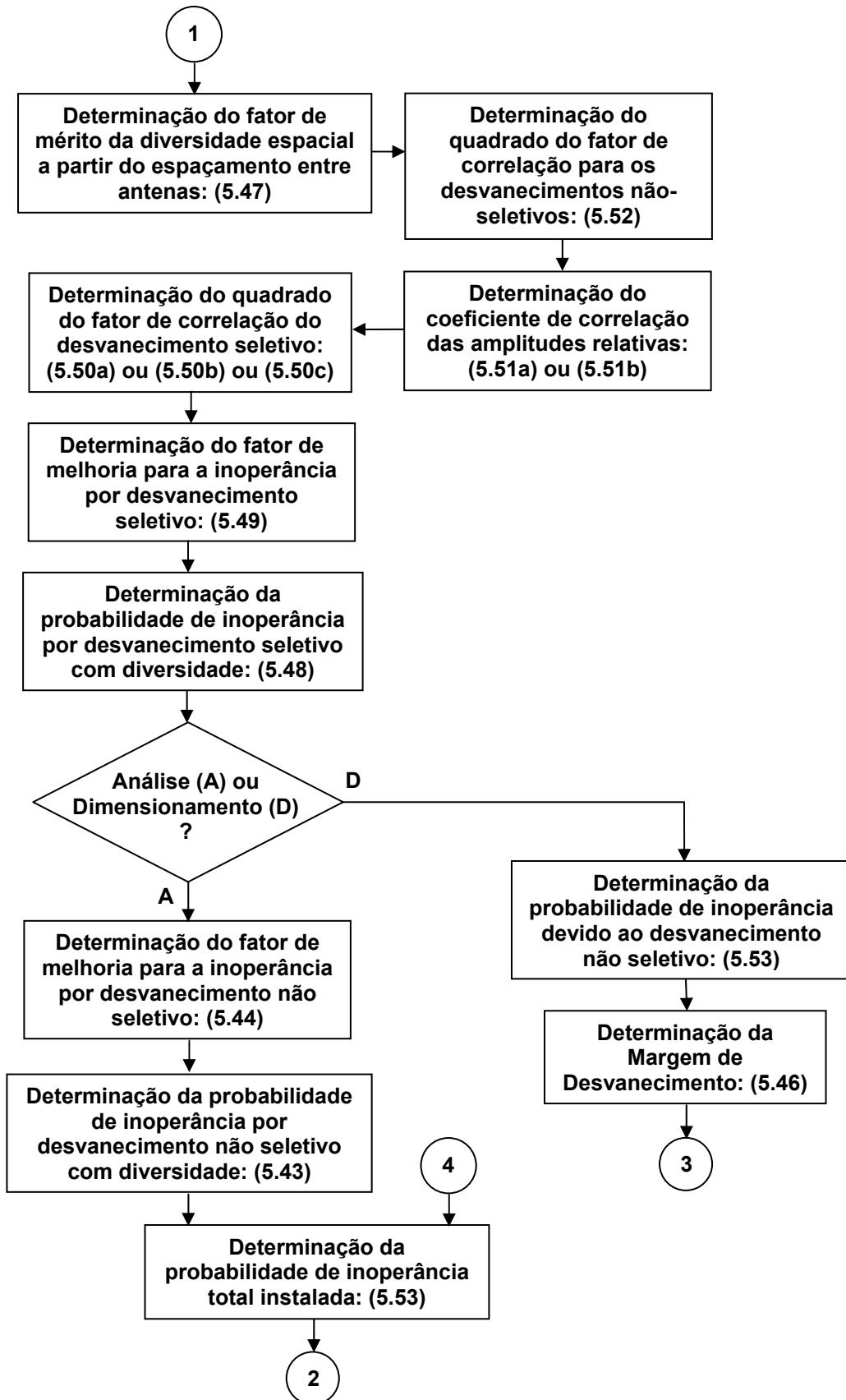
	-52,5	-51	-49,5	-48	-46,5	-45	-43,5	-42	-40,5	-39	-37,5	-36	-34,5
4,5	-210,8												
3,0	-171,4	-190,1											
1,5	-181,4	-220,5											
0	-199,7	-240,9	-201,1										
-1,5	-225,4	-239,9	-257,4	-280,2	-249,2	-150,7							
-3,0	-267,1	-252,1	-268	-255,4	-238,5	-242,7	-219,2	-232,6	-151,4				
-4,5	-280,6	-247,9	-296,6	-307,4	-290,3	-299,1	-296,3	-252,1	-142,5	-125,4			
-6,0	-310	-303,4	-333,6	-342,1	-315,2	-347,7	-372,7	-302,8	-183,3	-163,7	-134,3	-94,1	
-7,5	-345	-348,6	-356,9	-388,9	-361	-373,8	-357,1	-320,3	-235,8	-188,9	-111,4	-86,5	-140,2
-9,0	-366,1	-338,7	-355,3	-388,9	-369,6	-366,5	-309,9	-261,5	-208,3	-180	-113	-120,5	-96,7
-10,5	-362,5	-346,9	-362,2	-370,8	-339,7	-319,5	-280,3	-200	-162,9	-124,8	-143,6	-155,6	
-12,0	-356,9	-342,5	-342	-364,9	-311,3	-296,7	-267,3	-143,9	-135,8	-145,7	-152,2		
-13,5	-365,9	-377,6	-370,9	-348,5	-326,2	-309,3	-271	-128,8	-109,5	-152,2			
-15,0	-390,9	-401,7	-355,6	-295,8	-301,2	-298,7	-249,4	-150,1	-110,3	-167,1			
-16,5	-380,3	-389,7	-362,1	-294,2	-301,9	-298,5	-181,9	-159,4	-124,5	-179,3			
-18,0	-392,3	-388,7	-373,9	-323,5	-284,8	-260,9	-151,5	-156,1	-177,1				
-19,5	-407,5	-422,6	-411,1	-328,1	-249,8	-233,4	-153,4	-129,7	-180				
-21,0	-446,6	-445,6	-420	-358	-272,2	-215,3	-195	-179,8					
-22,5	-459,3	-450,3	-403,4	-389,8	-258,8	-249,1	-330,7	-387,7					
-24,0	-400,4	-394,2	-335	-391,8	-507,8								
-25,5	-338,1	-312,6	-280,1										
-27,0	-376,4	-274,2	-284,6										
-28,5	-350,3	-262	-312,7										
-30,0	-350,9	-368,9											
-31,5	-327,7	-482,9											
-33,0	-371,5												

**TABELA A.5.2 - VALORES DE  $dN_1$  EM TERRITÓRIO BRASILEIRO PARA LONGITUDES MAIORES QUE 53° O.**

	-72,0	-70,5	-69,0	-67,5	-66,0	-64,5	-63,0	-61,5	-60,0	-58,5	-57,0	-55,5	-54
4,5					-225,8	-182,5	-201,8	-215,3	-171,5	-185,8	-199,1	-188,9	-171,9
3,0			-300,5	-300	-268,5	-209,5	-194,8	-248,2	-217,7	-234	-292,2	-186,5	-191,4
1,5		-277,1	-297,3	-283,6	-292,3	-195,2	-266,2	-291,1	-292	-285,3	-334,6	-261,2	-220,4
0		-276,1	-275,7	-280,3	-261,4	-273,1	-305,3	-311,6	-309,8	-339,7	-352,8	-302,4	-219,6
-1,5		-293,1	-273,1	-301	-300,3	-296,8	-295,7	-332,8	-312,8	-336,1	-335,2	-315,4	-256,3
-3,0		-327,7	-278,8	-284,3	-303,9	-287,5	-308	-304,8	-304,3	-350,9	-331,9	-305,1	-282,7
-4,5	-359,9	-353,6	-295,2	-284,6	-308,9	-297,6	-309,3	-304,4	-310,1	-325,5	-332,3	-309,6	-300
-6,0	-362	-348,2	-288,6	-297,2	-307,8	-315,6	-306,9	-314,9	-319,6	-333,7	-310	-316,7	-311,9
-7,5	-355,7	-331,5	-289,3	-300,7	-341,8	-363,9	-350,1	-344,9	-343	-348,8	-341,3	-304	-329,4
-9,0	-338,4	-327,2	-337,5	-320,9	-339,4	-356	-357,5	-359,9	-366	-360,6	-375,4	-347,4	-347,5
-10,5		-342,3	-346,1	-307,7	-292,9	-334,1	-331,2	-342,2	-350,9	-353,7	-374,7	-348,1	-347,4
-12,0					-282,7	-288,5	-321,7	-314,1	-332	-335,2	-356	-359,7	-374,7
-13,5							-317	-329,4	-329	-311,3	-306	-367,9	-371,6
-15,0									-350,6	-316,1	-317,7	-378	-388,6
-16,5									-323,5	-327	-337,1	-373,1	-395,5
-18,0										-297,3	-358,8	-385,2	-423,7
-19,5										-341,9	-385,3	-427,4	-406,6
-21,0										-371,2	-390,6	-398,3	-425,8
-22,5											-448,6	-392,3	-476,9
-24,0												-483,9	-485,4
-25,5													-428,8
-27,0												-497,5	-436,4
-28,5											-448,8	-486,7	-451,7
-30,0											-358,7	-389	-388
-31,5												-335	-334,8
-33,0													-323,9

**ANEXO 5.2 - FLUXOGRAMA PARA ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE UM RADIOENLACE DIGITAL (REC. ITU-R P.530-11)**





**ANEXO 5.3 - RESUMO DAS EXPRESSÕES UTILIZADAS NO FLUXOGRAMA DO ANEXO 5.2**

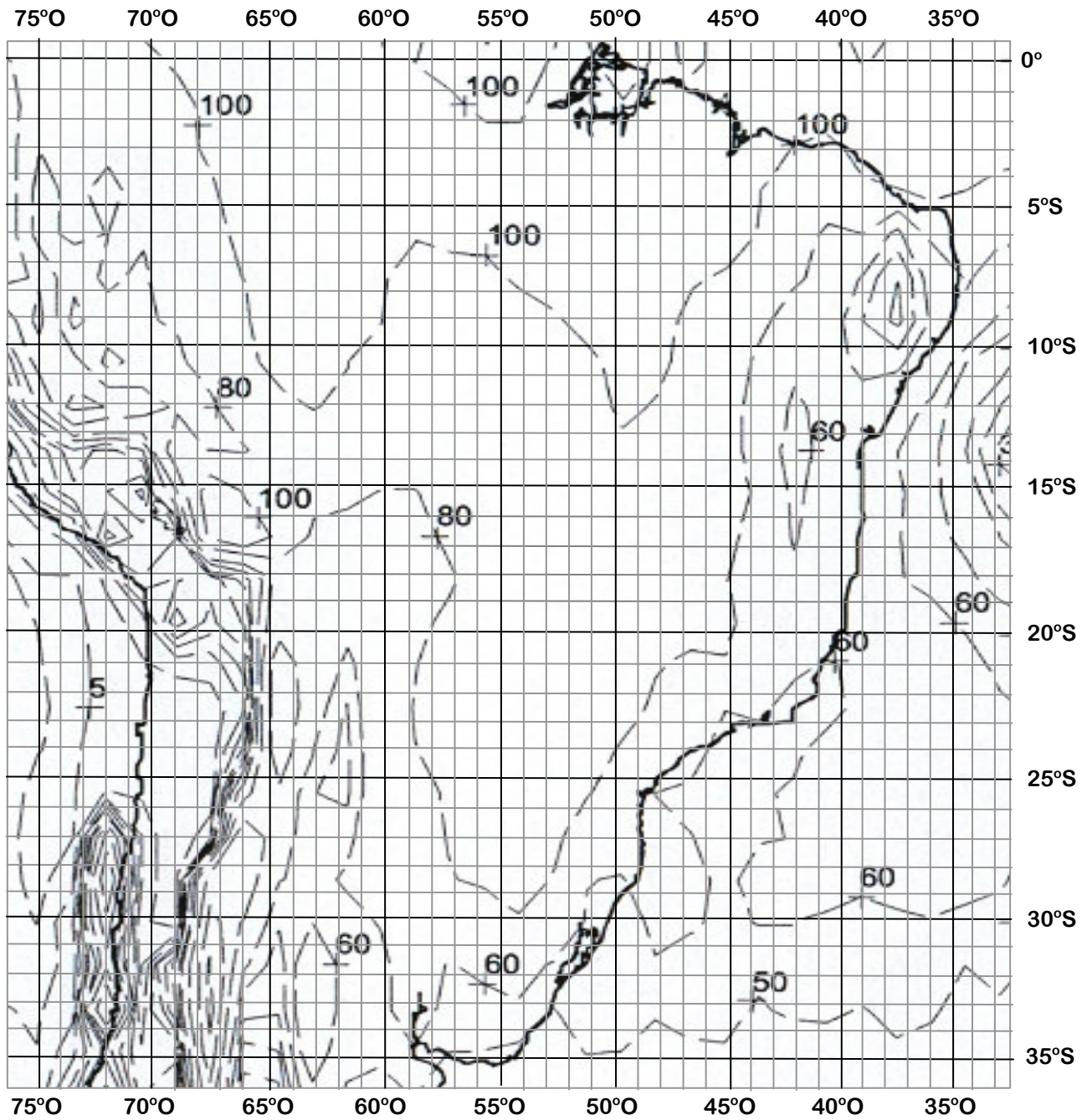
REFERÊNCIA	EXPRESSÃO
(2.21)	$G = 17,8 + 20 \log(\phi f)$
(3.6)	$A_e = 92,44 + 20 \log(d \cdot f)$
(5.1)	$P_T + \sum G = P_R + \sum A$
(5.2)	$\sum G = G_T + G_R$
(5.3)	$\sum A = A_e + A_d + A_g + A_o$
(5.7)	$M = P_R - P_L$
(5.18)	$K = 10^{-3.9 - 0,003 d N_1} S_a^{-0,42}$
(5.21)	$ \epsilon_p  \cong \tan \epsilon_p  = \frac{h_H - h_L}{d}$
(5.22)	$p_0 = K \cdot d^{3,2} (1 +  \epsilon_p )^{-0,97} 10^{0,032 \cdot f - 0,00085 \cdot h_L}$
(5.27)	$P_{ns} = P_0 \cdot 10^{\frac{-M}{10}}$
(5.28)	$P_0 = \frac{P_0}{100}$
(5.31)	$P_s = 4,32 \times \eta \times S \times \tau_m^2$
(5.32)	$\eta = 1 - \exp(-0,2 \times P_0^{0,75})$
(5.33)	$\tau_m = 0,7 \times \left(\frac{d}{50}\right)^{1,3}$
(5.35)	$P_{tot} = P_{ns} + P_s$
(5.36)	$\Delta t_{tot} = P_{tot} \times T_o$
(5.39)	$C\% = 100 - P_{tot} \times 100$
(5.43)	$M_{ns} = \frac{P_{ns}}{P_{dns}}$
(5.44)	$M_{ns} = \gamma \times 10^{\frac{M-V}{10}}$
(5.45)	$V =  G_1 - G_2 $
(5.46)	$M = 5 \cdot \log\left(\frac{P_0}{P_{dns} \cdot \gamma}\right)$
(5.47)	$\gamma = \left[1 - \exp\left(-0,04 \times l^{0,87} \times f^{-0,12} \times d^{0,48} \times p_0^{-1,04}\right)\right]$
(5.48)	$M_s = \frac{P_s}{P_{ds}}$

## 5. Análise de Desempenho e Dimensionamento de Radioenlaces Terrestres

REFERÊNCIA	EXPRESSÃO
(5.49)	$M_s = \frac{\eta(1 - k_s^2)}{P_s}$
(5.50a) (5.50b) (5.50c)	$k_s^2 = \begin{cases} 0,8238 & \text{para } r_w \leq 0,5 \\ 1 - 0,195(1 - r_w)^{0,109 - 0,13 \log(1 - r_w)} & \text{para } 0,5 < r_w \leq 0,9628 \\ 1 - 0,3957(1 - r_w)^{0,5136} & \text{para } r_w > 0,9628 \end{cases}$
(5.51a) (5.51b)	$r_w = \begin{cases} 1 - 0,9746(1 - k_{ns}^2)^{2,17} & \text{para } k_{ns}^2 \leq 0,26 \\ 1 - 0,6921(1 - k_{ns}^2)^{1,034} & \text{para } k_{ns}^2 > 0,26 \end{cases}$
(5.52)	$k_{ns}^2 = 1 - \frac{\gamma \times P_0}{\eta}$
(5.53)	$P_d = (P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75})^{4/3}$



**ANEXO 5.4 - TAXA DE CHUVA QUE EXCEDE EM 0,01% A MÉDIA DO ANO [13].**



### EXERCÍCIOS

5.1. Especifique as antenas parabólicas para um radioenlace cujos dados são apresentadas a seguir e a partir da especificação das antenas, analise o desempenho do enlace calculando a confiabilidade instalada. Siga o fluxograma apresentado no Anexo 5.2.

**Dados geoclimáticos:**

Localidades: Pouso Alegre (MG) e Maria da Fé (MG)  
Altitudes: 1400 m e 1625 m (respectivamente)  
Gradiente de refratividade que excede 1% do tempo: -250 unidades  $N/km$   
Fator de rugosidade: 21 m  
Extensão do radioenlace: 62 km

**Infraestrutura:**

Altura das antenas em relação às estações: 50 m (para ambas).  
Espaçamento entre antenas na diversidade espacial (se necessário): 10 m.

**Transmissão:**

Frequência: 6 GHz (1+1)  
Potência do transmissor: 30 dBm  
Taxa de transmissão: 155 Mbit/s  
Modulação: 64-QAM (codificada)

**Recepção:**

Potência de limiar: -73 dBm (BER =  $10^{-3}$ )  
Área de assinatura:  $250 \times 10^{-3} \text{ ns}^{-2}$

**Perdas (total por item):**

Guias de onda: 5 dB  
Circuladores: 0,75 dB  
Filtros: 6 dB

**Objetivo de desempenho:**

Confiabilidade = 99,9995 %

5.2. Determine a confiabilidade de um radioenlace com diversidade espacial cujos dados são apresentados a seguir.

**Dados geoclimáticos:**

Localidades: Barra Mansa (RJ) e Itatiaia (RJ)  
Altitudes: 540 m e 1066 m (respectivamente)  
Gradiente de refratividade que excede 1% do tempo: -330 unidades  $N/km$   
Fator de rugosidade: 16 m  
Extensão do radioenlace: 46 km

**Infraestrutura:**

Altura das antenas em relação às estações: 50 m (para ambas).  
Espaçamento entre antenas na diversidade espacial: 6 m.

**Transmissão:**

Frequência: 7,5 GHz (1+1)  
Potência do transmissor: 29 dBm  
Taxa de transmissão: 155 Mbit/s  
Modulação: 128-QAM (codificada)  
Ganho das antenas: 40,7 dBi

**Recepção:**

Potência de limiar: -75 dBm (BER =  $10^{-3}$ )  
Área de assinatura:  $200 \times 10^{-3} \text{ ns}^{-2}$

**Perdas (total por item):**

Guias de onda: 5 dB  
Circuladores: 1,5 dB  
Filtros: 8 dB

## 5. Análise de Desempenho e Dimensionamento de Radioenlaces Terrestres

---

- 5.3. Determine a confiabilidade do enlace do Problema 5.2 supondo que não houvesse diversidade espacial e que as antenas possuíssem ganhos iguais a 42,8 dBi.
- 5.4. Determine a confiabilidade em função da chuva para um radioenlace com 10 km de extensão que opera em 18 GHz com polarização vertical. A taxa de chuva que excede 0,01 do tempo é igual a 75 mm/h em uma região cuja latitude é menor do que 30° S. A margem instalada é igual a 50 dB.

\* \* \*

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RUMMLER, W. D. et alii – Multipath fading channel models for microwave digital radio. *IEEE Communications Magazine*, 24 (11) : 30-42, November, 1988.
- [2] IVANEK, Ferdo ed. – *Terrestrial digital microwave communications*. Norwood, MA, Artech House, 1989.
- [3] MANNING, Trevor – *Microwave radio transmission – design guide*. Norwood, MA, Artech House, 1999.
- [4] FREEMAN, Roger L. – *Radio system design for telecommunications*. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1997.
- [5] DOBLE, John – *Introduction to radio propagation for fixed and mobile communications* - Norwood, MA, Artech House, 1998.
- [6] ITU – Recommendation ITU-R PN.310-9 – *Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media*. Geneva, International Telecommunication Union, 1994.
- [7] ITU – Recommendation ITU-R P.834-3 – *Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation*. Geneva, International Telecommunication Union, 1999.
- [8] SIEMENS – *Digital telecommunication Part 4 – Radio relay and Satellite Communication* – Berlin; Munich, Siemens Aktiengesellschaft, 1993.
- [9] ITU – Recommendation ITU-R P.530-13 – *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*. Geneva, International Telecommunication Union, 2009.
- [10] ITU – Recommendation ITU-R F.1093-1 – *Effects of multipath propagation on the design and operation of line-of-sight digital radio-relay systems*. Geneva, International Telecommunication Union, 1997.
- [11] BELLCORE - Bellcore Technical Reference TR-TSY-000752 - *Microwave digital radio systems criteria*. Telcordia, Piscataway, NJ, 1989.
- [12] HARRIS – *Especificação técnica da série MegaStar 155*. Barueri, Harris do Brasil, 1999. [www.harris.com/communications](http://www.harris.com/communications)
- [13] ITU – Recommendation ITU-R P.838-3 - *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*. Geneva, International Telecommunication Union, 2005.