

2

EFEITOS E MODELOS DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS

Devido à grande demanda por sistemas de comunicações de dados nas faixas de UHF e microondas, existe a necessidade de implementar novos sistemas de banda larga que permitam prover serviços de dados, vídeo, áudio, hipertexto, etc. São vários os sistemas deste tipo que tem sido e estão sendo desenvolvidos para operação acima de 20 GHz, inclusive no início da faixa de ondas milimétricas. Exemplos destes sistemas são o LMDS, que opera em faixas entre 26 e 31 GHz, dependendo da regulamentação do país considerado, e o MVDS, que opera na Europa na faixa de 40 GHz.

Diferentemente dos sistemas operando nas faixas de UHF e na faixa mais baixa de microondas, nas bandas de frequência acima dos 10 GHz devem ser considerados, além dos efeitos de difração, reflexão e espalhamento do sinal, os da atenuação por chuvas e pela vegetação. Acima de 10 GHz, a absorção por gases atmosféricos e a cintilação (variações de pequena a média amplitude, provocadas pelas irregularidades locais do índice de refração da atmosfera) são também relevantes. Garantindo-se que o enlace opere em visibilidade, com mais de 60% de folga na primeira zona de Fresnel em relação a obstruções, as perdas causadas pela folhagem, pela difração e por reflexões podem ser desprezadas, devendo-se considerar predominantemente as perdas causadas pelo vapor de água (em torno dos 23 GHz), pelo oxigênio (em torno dos 60 GHz) e pela precipitação, além da atenuação em espaço livre. As perdas por absorção podem ser calculadas, com boa precisão, pelo método recomendado pelo ITU-R [9], enquanto que o efeito da precipitação no desempenho do enlace pode ser estimado a partir dos métodos de previsão da atenuação por chuvas que serão analisados na seção 2.3.

2.1. ABSORÇÃO E ESPALHAMENTO DAS GOTAS DE ÁGUA

À medida em que a frequência aumenta, o comprimento de onda do sinal propagado aproxima-se do tamanho das gotas de chuva, produzindo um aumento na atenuação do sinal pela presença da chuva. As gotas de chuva apresentam-se como um meio dielétrico imperfeito para o campo elétrico incidente, provocando a absorção e espalhamento da energia que se propaga no meio [10].

A absorção acontece pela dissipação da energia da onda incidente aquecendo, desta maneira, a gota. Quando a gota alcança a temperatura do meio ao seu redor a energia será isotropicamente re-radiada, como mostra a Fig. 3. Portanto, a absorção é devida à condutividade da água, que ocasiona uma dissipação térmica.

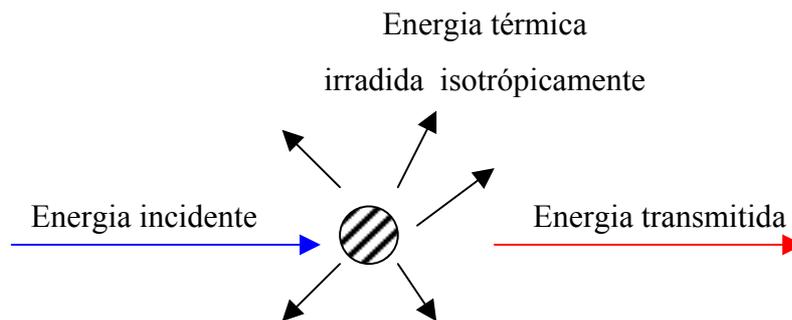


Figura 3 Atenuação por absorção.

Por sua vez, o espalhamento é provocado pelas modificações sofridas pela onda para satisfazer às condições de contorno em cada gota de chuva. Neste caso, não há perda de energia. A direção do espalhamento da energia pode ser qualquer uma: espalhamento reverso (mecanismo aproveitado pelos radares), espalhamento lateral (a direção da onda se desvia do percurso da transmissão) e espalhamento direito (energia re-dirigida no percurso da transmissão). A Fig. 4 ilustra os possíveis espalhamentos citados.

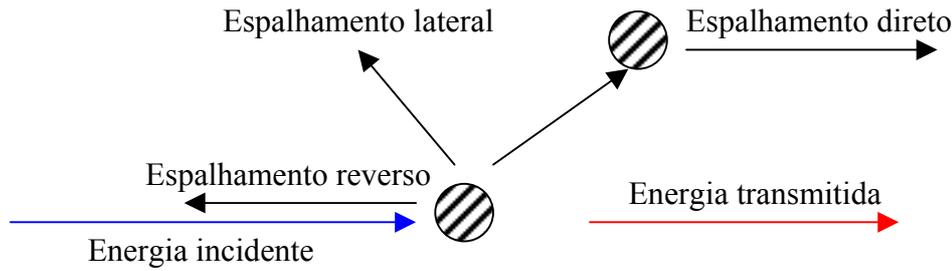


Figura 4 Atenuação por espalhamento.

2.2. FATORES QUE INFLUEM NA ATENUAÇÃO POR CHUVAS

Devido à ação da força de gravidade e dos ventos, a gota em queda assume a forma de um esferóide oblato, inclinado em relação à direção de queda, diferindo da sua forma esférica original na formação da precipitação. A orientação do eixo maior da seção reta da gota é mais próxima da horizontal, razão pela qual uma onda com campo elétrico com polarização linear horizontal sofre maior atenuação do que uma onda com polarização linear vertical [10-12]. Para uma onda circularmente polarizada a atenuação não depende da inclinação da gota, já que neste caso a onda é uma composição de duas ondas linearmente polarizadas.

Um fator importante a ser considerado na estimativa da atenuação por chuvas é o tamanho das gotas [10-12] cujo diâmetro varia, geralmente, entre 0,01 e 6 mm. Para diâmetros menores a 0,01 mm as gotas evaporam-se com rapidez. Para diâmetros acima de 6 mm, a tensão superficial não é suficiente para manter a coesão e a gota se fraciona em gotas menores. Observações experimentais mostram que a distribuição do tamanho das gotas de chuva varia, basicamente, com a taxa de precipitação [10-12]. Para climas temperados, tem sido utilizada a distribuição do tamanho de gotas de Laws e Parsons [10-12] para a predição da atenuação por chuva em frequências até 40 GHz.

A distribuição de pequenas gotas, relevante na faixa de ondas milimétricas, é melhor descrita pela distribuição exponencial negativa de Marshall-Palmer [10-12]. Assim, nesta faixa de frequências, recomenda-se a utilização de mais de uma distribuição, de acordo com a faixa de tamanho de gotas considerada.

Para climas tropicais, onde as taxas de precipitação são muito altas, uma distribuição log-normal também descreve bem a distribuição de gotas [10]. Este modelo produz maiores valores de atenuação específica que os produzidos quando se usa a distribuição Law e Parsons e seu uso, nestes climas, é recomendado para aplicações em frequências acima de 30 GHz.

A velocidade terminal das gotas, cuja dependência foi associada ao tamanho das gotas por Gunn e Kinzer, vai depender da densidade do ar variando, portanto, com a altitude [11-12]. Devido à resistência oferecida pelo ar, que ocasiona o fracionamento das gotas, seu número cresce a medida que a chuva cai mas o conteúdo de água continua sendo o mesmo. Dado que a atenuação do sinal que passa por um meio com chuva depende principalmente do conteúdo de água, a atenuação específica varia pouco com a altura abaixo da linha de altura de chuva.

A taxa de precipitação é calculada em função do diâmetro e da velocidade terminal das gotas, sendo expressa em mm/h. A precisão da medida da distribuição da taxa de precipitação é de capital importância para o desenvolvimento dos modelos de previsão de atenuação por chuvas.

Para a previsão da atenuação por chuvas é necessário também conhecer a distribuição espacial da chuvas [11-12]. Especialmente, a chuva consiste em um conjunto de gotas de água que se estende horizontalmente por alguns quilômetros e cujo limite superior é denominado *altura de chuva*. A célula de chuva possui um núcleo, no qual existe a precipitação mais intensa. Seu diâmetro total varia inversamente com a taxa de precipitação. Medições feitas com radares mostram que o diâmetro das células de chuva intensa estão limitados, tipicamente, entre 2 e 5 km.

A temperatura também é outro fator que influencia a atenuação por chuvas, pois afeta o índice de refração da água [10]. Enquanto a parte real do índice de refração da água decresce com a temperatura, sua parte imaginária apresenta um pico entre 10 e 100 GHz. Conseqüentemente, atenuação de um sinal que atravessa uma célula de chuva também apresentará um pico entre 10 e 100 GHz.

A maior parte dos modelos de previsão utiliza a distribuição cumulativa pontual da taxa de precipitação num ponto do percurso e fatores de correção para levar em conta a não uniformidade espacial da taxa de precipitação [10-11]. Sempre que for possível, deve-se utilizar dados de taxa de precipitação medidos localmente. Caso não se possua esta informação é necessário utilizar valores

obtidos em regiões climaticamente semelhantes. O ITU-R apresenta o conceito de região-climática, que consiste numa região com uma determinada curva característica de taxa de precipitação por percentagem de tempo. Entretanto, medidas feitas em regiões tropicais indicam diferenças marcantes em relação aos valores recomendados para região-climática N, estipulada pelo ITU-R para este tipo de clima.

Finalmente, o comprimento do enlace, para enlaces terrestres, e o ângulo de elevação, para enlaces via satélite, também devem ser considerados no cálculo da atenuação por chuvas, já que destes parâmetros vai depender o comprimento do enlace que efetivamente está sendo atravessado pela célula de chuva [10-11].

2.3. MODELOS DE PREVISÃO DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS

2.3.1. Cálculo da Atenuação Específica

A fim de determinar a atenuação por chuvas é necessário, inicialmente, determinar a atenuação por unidade de comprimento, também conhecida como atenuação específica (γ).

Uma onda radioelétrica que passa por um meio preenchido com chuva sofre uma atenuação que é obtida pela soma das contribuições individuais de cada gota. A atenuação por unidade de comprimento pode ser obtida através da integral [10]:

$$\gamma(\text{dB/km}) = 4,343 \int_0^{\infty} Q(D) N(D) dD \quad (2.1)$$

onde:

$Q(D)$ = Seção reta de espalhamento e absorção da gota, de diâmetro D , em cm^2

$N(D)$ = Distribuição de tamanho de gotas em $\frac{1}{\text{m}^3 \text{mm}}$

A seção reta $Q(D)$ é determinada pela teoria clássica de espalhamento de Mie [10] para frequências superiores a 3 GHz, enquanto que para frequências entre 1 e 3 GHz é usada a aproximação de Rayleigh [10].

A integral da expressão (2.1) é de solução numérica laboriosa. Para objetivos práticos a atenuação específica γ é determinada aproximadamente a partir da taxa de precipitação R , como segue [13]:

$$\gamma(\text{dB/km}) = kR^\alpha \quad (2.2)$$

onde k e α são chamados parâmetros de regressão e dependem da frequência e do tipo de polarização [13].

Para polarização linear e circular, e para qualquer enlace (terrestre o satélite), os parâmetros k e α podem ser determinados a partir de [10,13]:

$$k = \frac{1}{2} \left[k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau \right] \quad (2.3)$$

$$\alpha = \frac{1}{2k} \left[k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau \right] \quad (2.4)$$

onde θ é o ângulo de elevação e τ é o ângulo de inclinação de polarização com respeito à horizontal e igual a 45° para polarização circular. Os valores dos parâmetros para enlaces terrestres e as polarizações vertical (k_V e α_V) e horizontal (k_H e α_H), são dados na Tabela 2.

Para obter k_h , k_v , α_h , α_v numa frequência f não disponível na tabela é utilizada a interpolação logarítmica para f e k , e linear para α . Se k_1 , k_2 , α_1 e α_2 correspondem aos valores nas frequências f_1 e f_2 a serem interpolados os valores na frequência f são dados por:

$$k(f) = \log^{-1} \left\{ \log \frac{k_2}{k_1} \left[\frac{\log \frac{f}{f_1}}{\log \frac{f_2}{f_1}} \right] + \log k_1 \right\}$$

$$\alpha(f) = \left\{ [\alpha_1 - \alpha_2] \left[\frac{\log \frac{f}{f_1}}{\log \frac{f_2}{f_1}} \right] + \alpha_2 \right\}$$

Tabela 2 Coeficientes para cálculo da atenuação específica.

Frequência (GHz)	k_H	k_v	α_H	α_v
1	0,0000387	0,0000352	0,912	0,880
2	0,000154	0,000138	0,963	0,923
4	0,000650	0,000591	1,121	1,075
6	0,00175	0,00155	1,308	1,265
7	0,00301	0,00265	1,332	1,312
8	0,00454	0,00395	1,327	1,310
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264
12	0,0188	0,0168	1,217	1,200
15	0,0367	0,0335	1,154	1,128
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
25	0,124	0,113	1,061	1,030
30	0,187	0,167	1,021	1,000
35	0,263	0,233	0,979	0,963
40	0,350	0,310	0,939	0,929

Uma vez calculada a atenuação específica de acordo à expressão (2.2), a atenuação total devido à chuva (A_c), para um enlace de comprimento L sujeito a uma precipitação de taxa uniforme, é dada por:

$$A_c(\text{dB}) = \gamma L \quad (2.5)$$

Entretanto, dado que a chuva varia espacial e temporalmente, a equação (2.5) não tem validade em casos reais, já que é necessário integrar a atenuação específica ao longo do percurso atravessado no meio de chuva. Portanto, a atenuação por chuva é dada por:

$$A_c(\text{dB}) = \int_0^L kR^\alpha(l)dl \quad (2.6)$$

onde:

l = Comprimento medido a partir da antena ao longo do enlace.

L = Comprimento do enlace que passa pelo meio com chuva.

R = Taxa de precipitação ao longo do percurso.

2.3.2.

Modelo de ITU-R (Recomendação P.530-10)

O modelo de previsão da atenuação por chuvas proposto pelo ITU-R [14], baseia-se no conceito de comprimento efetivo de chuva ($L_{\text{ef},0,01}$). O comprimento efetivo é aquele que, considerada uma taxa de precipitação uniforme igual à taxa de precipitação pontual (medida em um ponto do enlace), provoca a mesma atenuação que a precipitação real não uniforme ao longo do comprimento “ L ” do enlace. A definição é válida para a taxa de precipitação pontual excedida durante 0,01% do tempo ($R_{0,01}$), que será utilizada para o cálculo da atenuação excedida durante a mesma percentagem de tempo ($A_{0,01}$). A relação entre o comprimento efetivo do enlace e o comprimento real e é o fator de redução de percurso, $r_{0,01}$, dado por:

$$L_{\text{ef},0,01} (\text{km}) = r_{0,01} L \quad (2.7)$$

onde $r_{0,01}$ é dado por:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + \frac{L}{L_0}} \quad (2.8)$$

com:

$$L_0 = 35 e^{-0,015 R_{0,01}} \text{ km} ; \text{ para } R_{0,01} \leq 100 \text{ mm/h} \quad (2.9a)$$

$$L_0 = 35 e^{-1,5} = 7,8 \text{ km} ; \text{ para } R_{0,01} > 100 \text{ mm/h} \quad (2.9b)$$

A atenuação por chuva excedida durante 0.01% do tempo é dada por:

$$A_{0,01}(\text{dB}) = \gamma_{0,01} L_{\text{ef},0,01} = k R_{0,01}^{\alpha} L_{\text{ef},0,01} = k R_{0,01}^{\alpha} r_{0,01} L \quad (2.10)$$

Para outras percentagens de tempo p , no intervalo de 0,001% a 1%, atenuação por chuva pode ser determinada através de:

$$\begin{aligned} A_p(\text{dB}) &= A_{0,01} 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \\ &= k R_{0,01}^{\alpha} 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} r_{0,01} L \\ &= k R_{0,01}^{\alpha} 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \frac{L_0}{L_0 + L} L \end{aligned} \quad (2.11)$$

A expressão acima é válida para locais com latitudes iguais ou maiores do que 30° . Caso a latitude seja menor do que 30° a conversão para outras percentagens de tempo é dada pela seguinte expressão:

$$A_p(\text{dB}) = k R_{0,01}^{\alpha} 0,07 p^{-(0,855 + 0,139 \log p)} \frac{L_0}{L_0 + L} L \quad (2.12)$$

O Fator de Redução do Modelo de ITU-R

A expressão (2.8) para o fator de redução é baseada na consideração geométrica de uma célula de chuva equivalente cujo corte no plano do enlace tem forma retangular. Assim, considera-se o enlace da Fig. 5 com comprimento igual a L situado em direção do eixo x . Na Fig. 5, considera-se também que o comprimento da célula de chuva equivalente é igual a $L_0 < L$, e que todas as posições que a célula pode assumir em relação ao enlace são equiprováveis. Considerada uma posição qualquer da célula seja D o comprimento de percurso do enlace afetado pela precipitação uniforme. Para um período de tempo suficientemente longo, todas as posições possíveis serão ocupadas pelas células de chuva de tal forma que o valor médio do comprimento de enlace sujeito à chuva é dado por:

$$\bar{L} = \frac{1}{L + L_0} \int_0^{L+L_0} D \, dx \quad (2.13)$$

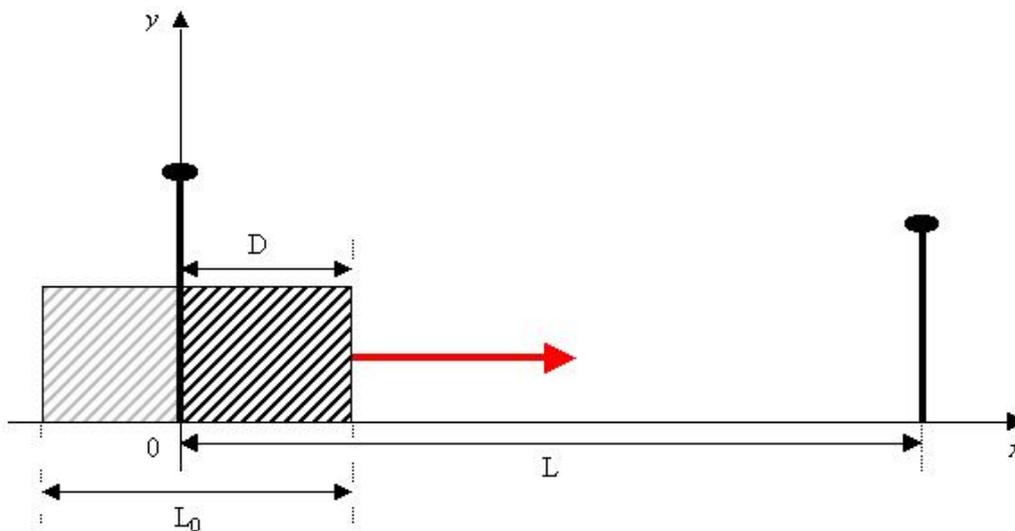


Figura 5 Geometria para a determinação do fator de redução do modelo de ITU-R.

A integral da expressão (2.13) deve ser dividida em três, dependendo da posição da célula de chuva dentro do percurso do enlace. As três integrais em questão são:

- $I_1 = \int_0^{L_0} x \, dx$; para o caso da Fig. 5 (extremo direito da célula de chuva dentro do percurso do enlace)
- $I_2 = \int_{L_0}^L L_0 \, dx$; célula de chuva totalmente dentro do percurso do enlace
- $I_3 = \int_L^{L+L_0} [L_0 - (x - L)] \, dx$; extremo direito da célula de chuva saindo do percurso do enlace

Portanto, o percurso médio \bar{L} será determinado por:

$$\bar{L} = \frac{1}{L + L_0} \left\{ \int_0^{L_0} x \, dx + \int_{L_0}^L L_0 \, dx + \int_L^{L+L_0} [L_0 - (x - L)] \, dx \right\}$$

$$= \frac{L_0 L}{L + L_0} = \frac{L}{1 + \frac{L}{L_0}} = r L \Rightarrow r = \frac{1}{1 + \frac{L}{L_0}} \quad (2.14)$$

É possível mostrar que, para $L_0 > L$, se obtém a mesma expressão para o fator de redução r .

2.3.3. Modelo de Crane

O modelo de previsão da atenuação por chuvas de Crane [15-16] emprega informação meteorológica sobre a intensidade e a estrutura espacial das chuvas. Trata-se também de um modelo baseado em ajustes de atenuações por chuvas medidas e pode ser aplicado em regiões climáticas diferentes, com diferentes geometrias e sobre uma ampla variedade de frequências.

O modelo de Crane resulta da utilização de duas funções exponenciais na faixa de comprimentos de enlace D compreendidos entre 0 e 22,5 km: uma desde 0 até uma distância “ L ”, e a outra desde a distância “ L ” até 22,5 km. Assim, a atenuação por chuvas é dada por:

$$A(\text{dB}) = kR_p^\alpha \left[\frac{e^{\mu\alpha d} - 1}{\mu\alpha} - \frac{b^\alpha e^{c\alpha d}}{c\alpha} + \frac{b^\alpha e^{c\alpha D}}{c\alpha} \right]; \quad L \leq D \leq 22,5 \quad (2.15)$$

$$A(\text{dB}) = kR_p^\alpha \left[\frac{e^{\mu\alpha D} - 1}{\mu\alpha} \right]; \quad \text{para } 0 < D \leq L \quad (2.16)$$

onde R_p é a taxa de precipitação para uma percentagem de tempo “ p ” e os restantes coeficientes são dados por:

$$\mu = \frac{\ln(b e^{cd})}{2}; \quad d \text{ em km} \quad (2.17)$$

$$b = 2,3R_p^{-0,17} \quad (2.18)$$

$$c = 0,026 - 0,03 \ln R_p \quad (2.19)$$

$$d = 3,8 - 0,6 \ln R_p \quad (2.20)$$

Caso $D \geq 22,5$ km, deve-se utilizar uma nova taxa de precipitação R_p' dada por:

$$R_p' = R_p \left(\frac{22,5}{D} \right) \quad (2.21)$$

2.3.4.**Modelo Australiano (Documento 3M/38-E, de ITU-R)**

Baseado numa campanha de medidas de 11 meses na Austrália, utilizando 34 enlaces operando a 11 GHz com comprimentos entre 5,1 e 58 Km, e utilizando ainda os resultados disponíveis no banco de dados do ITU-R, o modelo Australiano [17] foi desenvolvido reajustando o valor do comprimento efetivo do modelo de ITU-R, da seguinte forma:

$$L_0 = 67 e^{-0,0111 R_{0,01}} \text{ km}; \quad \text{para } R_{0,01} \leq 100 \text{ mm/h} \quad (2.22)$$

$$L_0 = 67 e^{-1,11} = 22,08 \text{ km}; \quad \text{para } R_{0,01} > 100 \text{ mm/h} \quad (2.23)$$

$$A_p(\text{dB}) = k R_{0,01}^\alpha 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \frac{L_0}{L_0 + L} L \quad (2.24)$$

2.3.5.**Modelo CETUC-98**

O modelo CETUC-98 [12,18] utiliza a distribuição completa da taxa de precipitação e mantém o conceito de célula equivalente de chuva. Foi desenvolvido com base em dados experimentais medidos no Brasil e apresenta bons resultados na predição da atenuação por chuvas em regiões situadas em baixas latitudes.

Mais uma vez, a atenuação por chuvas é dada pelo produto da atenuação específica e o comprimento efetivo, com a diferença de que neste caso ambos os parâmetros são determinados para qualquer percentagem de tempo p . Enquanto o modelo de ITU-R parte da taxa de precipitação para uma percentagem de tempo de 0,01%, utilizando um fator de extrapolação para as outras percentagens de tempo, neste modelo é considerada a taxa de precipitação pontual para a percentagem de tempo requerida. A atenuação excedida durante $p\%$ do tempo é dada por:

$$A_p = \gamma R_p L_{ef} \quad (2.25)$$

onde:

$$\gamma_{R_p} = k R_p^\alpha \quad (2.26)$$

$$L_{ef} = r_p d \quad (2.27)$$

$$r_p = 5 R_p^b \quad (2.28)$$

$$b = -0,182 - 0,284 \log L \quad (2.29)$$

Portanto:

$$\begin{aligned} A_p &= k R_p^\alpha 5 R_p^{(-0,182 - 0,284 \log L)} L \\ &= 5k R_p^{(\alpha - 0,182 - 0,284 \log L)} L \end{aligned} \quad (2.30)$$

A Fig. 6 mostra a distribuição cumulativa da atenuação por chuvas obtida de forma experimental no enlace Barueri-RIS em São Paulo, Brasil, comparada com as obtidas usando os modelos de ITU-R e do CETUC-98.

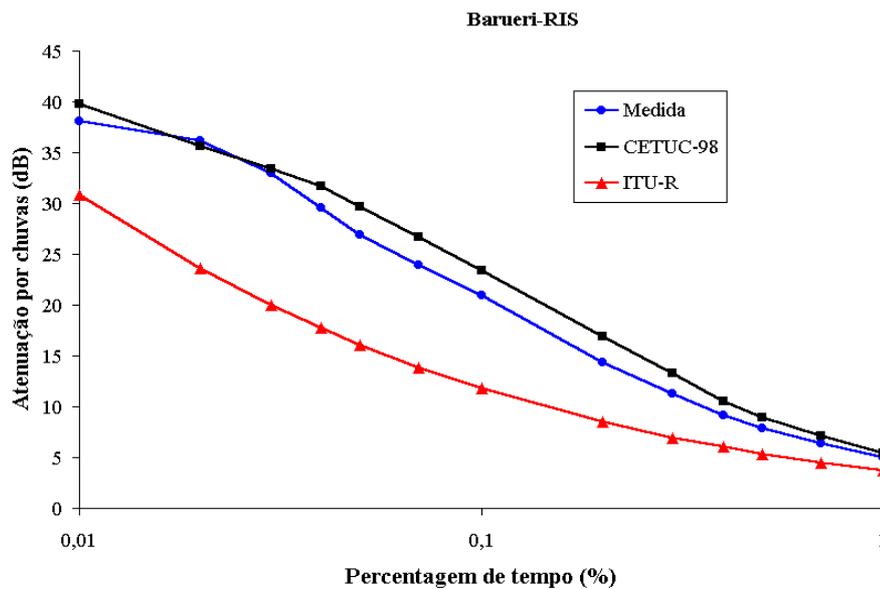


Figura 6 Distribuição cumulativa da atenuação por chuva no enlace Barueri-RIS.

Na Fig. 6, se observa claramente a melhor concordância entre o resultado obtido utilizando o modelo do CETUC e o obtido com os dados experimentais, enquanto que o modelo de ITU-R subestima fortemente a atenuação.

2.4. DISTRIBUIÇÕES DA TAXA DE PRECIPITAÇÃO

Conforme foi dito na seção 2.2, quando este dado for disponível, o mais apropriado é utilizar dados de taxa de precipitação medidos localmente. Não obstante, caso não exista esta informação, é necessário usar valores obtidos em lugares climaticamente semelhantes.

O ITU-R utiliza o conceito de região-climática [19], que consiste numa região que tem uma determinada curva característica de taxa de precipitação por percentagem de tempo. Desta forma, o mundo todo é dividido em quinze (15) regiões climáticas, cujas distribuições cumulativas de taxa de precipitação são dadas na Tabela 3.

Tabela 3 Regiões climáticas de ITU-R.

p(%)	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1,0	< 0,1	0,5	0,7	2,1	0,6	1,7	3	2	8	1,5	2	4	5	12	24
0,3	0,8	2	2,8	4,5	2,4	4,5	7	4	13	4,2	7	11	15	34	49
0,1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0,03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	96
0,01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0,003	14	21	26	29	41	54	45	55	55	70	105	95	140	200	142
0,001	22	32	42	42	70	78	65	83	83	100	150	120	180	250	170

Para determinar qual a região climática correspondente a um determinado sítio, o ITU-R apresenta mapas [19], que correspondem a macro-regiões e cuja precisão se mostra bastante limitada quando se comparam os valores recomendados com dados medidos.

Um método que fornece estimativas um pouco mais precisas da taxa de precipitação foi desenvolvido recentemente pelo próprio ITU-R [20] a partir da extrapolação de medidas de precipitação acumulada em 6 horas em todo o mundo, realizadas pela Organização Meteorológica Mundial. O novo método permite

estimar a taxa de precipitação excedida para uma determinada percentagem de tempo no ano em função da latitude e longitude da localidade. A título de exemplo, a Fig. 7 apresenta um mapa de $R_{0,01}$ obtido a partir deste método. Entretanto, medidas feitas em regiões tropicais ainda apresentam diferenças significativas quando são comparadas com os resultados obtidos com a aplicação de [20].

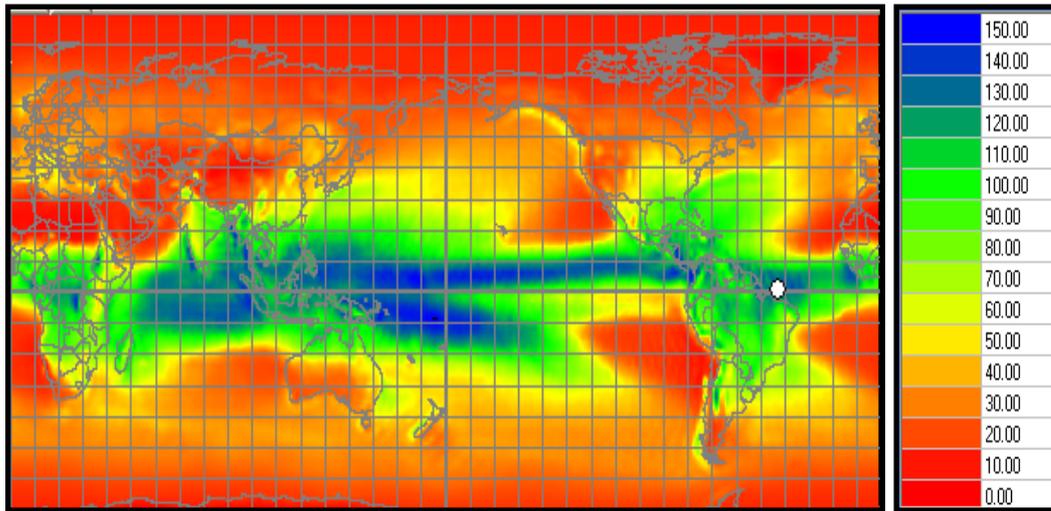


Figura 7 Taxa de precipitação excedida durante 0,01% do tempo.

2.5. ATENUAÇÃO DIFERENCIAL POR CHUVAS

Durante eventos de chuva dois enlaces convergentes operando na mesma frequência estarão sujeitos a diferentes níveis de atenuação, devido não somente às diferenças entre seus comprimentos (atenuações em espaço livre diferentes) mas também à não uniformidade espacial da chuva, como ilustrado na Fig. 8. Isso afetará a relação sinal-interferência (S/I) no receptor.

Para dois enlaces convergentes 1 e 2 sujeitos a atenuações A_1 e A_2 , a relação S/I no receptor do enlace 1, em condições de chuva, será dada por [21]:

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{\text{chuva}} = \frac{S}{I} - (A_1 - A_2) = \frac{S}{I} - A_{12} \quad (2.31)$$

onde S/I é a relação sinal-interferência no enlace no receptor do enlace 1 durante condições de céu claro e A_{12} é atenuação diferencial de chuva do enlace 1 em relação ao 2, sendo todas as quantidades dadas em dB.

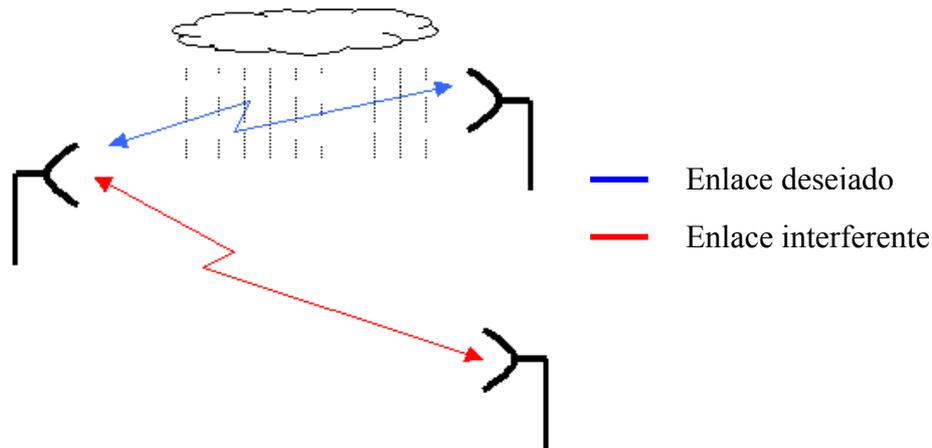


Figura 8 Situação de atenuação diferencial por chuvas.

É importante ressaltar que, no caso dos dois enlaces convergentes da Fig. 8, o evento de chuva presente no percurso do enlace desejado produzirá uma degradação considerável na relação S/I no receptor (comum) desses enlaces. Porém, caso a célula da chuva esteja afetando apenas o enlace interferente, a relação S/I do enlace desejado melhorará consideravelmente, pois o sinal interferente estará mais ainda atenuado. O fenômeno da atenuação diferencial por chuvas tem sido pouco estudado na literatura. Os resultados disponíveis são iniciais e exploratórios [22-25] mas o problema é de grande importância no dimensionamento de enlaces ponto-multiponto utilizados em sistemas de rádio acesso.

2.6. DURAÇÃO E NÚMERO DE EVENTOS DE CHUVA

Um outro aspecto importante relacionado com a presença de eventos de chuva ao longo de enlaces operando acima de 10 GHz é a duração e o número de eventos de chuva, que caracterizam em parte o comportamento dinâmico da atenuação por chuva.

A tendência de implementar sistemas de banda larga em frequências superiores a 10 GHz a fim de poder satisfazer o crescimento da demanda por

serviços de dados a alta velocidade torna necessário o conhecimento adequado não apenas da distribuição dos níveis de atenuação do sinal por chuvas, mas também o número de ocorrências de eventos de atenuação acima de um determinado nível e a distribuição das durações individuais destes eventos ao longo do período de interesse (diário, mensal, anual).

A Fig. 9 mostra um registro típico de uma série temporal de um sinal em um enlace operando em 15 GHz sujeito aos efeitos das chuvas. Escolhido o nível de atenuação a considerar, no exemplo igual a 10 dB, a duração de eventos de chuva é definida como o conjunto de intervalos de tempo em que o sinal permanece abaixo deste nível, durante um determinado período de observação. Por outro lado, o número de eventos de chuva é definido como o número de vezes que o sinal cruza esse nível num só sentido.

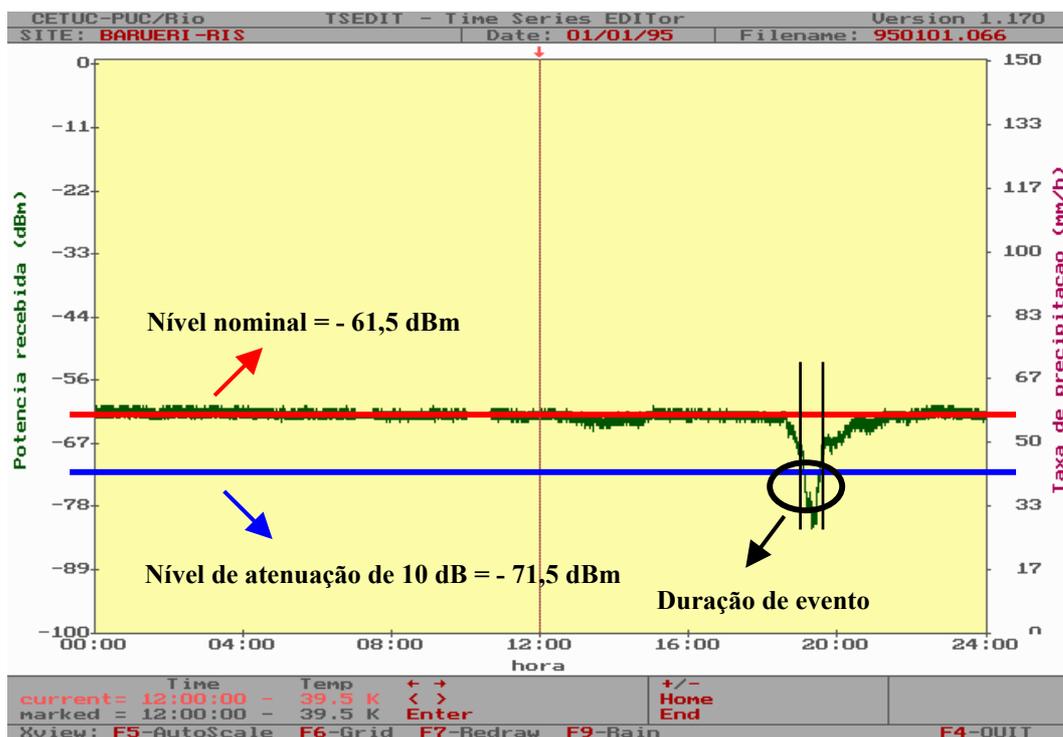


Figura 9 Serie temporal de atenuação por chuvas.

A maior parte da literatura existente sobre as distribuições de duração e número de eventos de chuva caracteriza os resultados experimentais segundo uma lei lognormal [26-30]. Uma pequena parte considera a distribuição de Weibull para o tratamento dos resultados obtidos em enlaces terrestre e satélite [31-32].

Por outro lado, não existe nenhum trabalho relacionado com o modelamento destes efeitos em enlaces terrestres para climas tropicais e equatoriais.

2.7. DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Dado que os eventos de atenuação por chuvas em enlaces de radio que operam em frequências superiores a 10 GHz podem ser considerados como falhas do sinal com graus variáveis de severidade e tempos de recomposição também variáveis, é possível aplicar a “teoria da confiabilidade” [33] para a análise das estatísticas da atenuação por chuvas.

Na “teoria da confiabilidade” é amplamente utilizada a distribuição de Weibull para modelar as durações de tempo e o número de falhas dos sistemas. A distribuição de Weibull [34-35], que pode ser de dois ou três parâmetros, é uma forma generalizada da distribuição exponencial.

2.7.1. Distribuição de Weibull de Três Parâmetros

A função de distribuição de probabilidade (*fdp*) de Weibull de três parâmetros é dada por [34]:

$$p(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (2.32)$$

onde

η = Parâmetro de escala.

β = Parâmetro de envelope.

γ = Parâmetro de local.

Por sua vez, a função de distribuição cumulativa (*fdc*) de Weibull, para três parâmetros só, é dada por [34]:

$$P(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.33)$$

2.7.2. Distribuição de Weibull de Dois Parâmetros

A *fdp* de Weibull de dois parâmetros se obtém fazendo $\gamma = 0$ na expressão (2.32), e é dada por:

$$p(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.34)$$

A *fdc* de Weibull de dois parâmetros é dada por:

$$P(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.35)$$

Observe-se que, no caso de um parâmetro, se assume, a priori, o valor de β . Adicionalmente, as expressões das *fdc* de Weibull mostram que esta distribuição é de fácil tratamento matemático. Isto representa uma vantagem da distribuição de Weibull com respeito à distribuição log-normal [36], que é mais difícil de ser tratada desde o ponto de vista matemático.