

3 EFEITOS DA CHUVA NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS MILIMÉTRICAS

A chuva é um fenômeno meteorológico com uma estrutura complexa, devido a sua grande variação no espaço e tempo. A chuva pode ser classificada como convectiva ou estratiforme. A chuva convectiva cai em forma moderada ou intensa com rápida mudança de intensidade em uma determinada área por um período de tempo relativamente curto e a estratiforme é geralmente fraca e distribuída de maneira uniforme sobre uma área maior.

O efeito da chuva no enlace de transmissão é muito relevante, sendo conhecido como o principal fator de atenuação de sinais em frequências acima de 10 GHz. A presença de hidrometeoros longo de um enlace de comunicações causa absorção e espalhamento da energia da onda incidente, tendo como resultado uma atenuação do sinal que diminui a confiabilidade e desempenho do enlace [26].

O estudo para a determinação da atenuação devida à chuva começou com pesquisas e estudos após a Segunda Guerra Mundial. As primeiras pesquisas relacionadas com a distribuição do tamanho da gota da chuva foram realizadas por Laws e Parsons em 1943 [27] e as relacionadas com a velocidade terminal da gota por Gunn e Kinzer em 1949 [28]. Mais tarde, em 1965 o cientista Medhurst comparou essa teoria existente com um conjunto de dados obtidos e produziu um modelo empírico de atenuação por chuvas [29]. Logo se desenvolveram estudos mais sofisticados usando a tecnologia, avaliando os efeitos dos fatores que contribuem para a atenuação devida à chuva: os tamanhos e formatos das gotas, taxas de precipitação, espalhamento, polarização e a frequências do sinal transmitido [30]. Outros fatores também de muita importância são a temperatura, pressão e umidade relativa do meio de propagação. Também existem estudos no campo da radiometeorologia para tentar determinar a distribuição espacial das chuvas e risco da chuva em regiões com ajuda de radares meteorológicos, que operam em altas frequências [31].

3.1 Absorção e Espalhamento Pelas Gotas De Chuva

Quando a frequência de um sinal aumenta, seu comprimento de onda do sinal diminui e se aproxima do tamanho das gotas de chuva. Nesta situação, produz-se um aumento da perda do sinal pela presença da chuva em uma ligação [32]. As gotas de chuva representam um meio dielétrico imperfeito para o campo eletromagnético incidente, provocando a absorção e espalhamento da energia, conforme mostra a Figura 3.1.

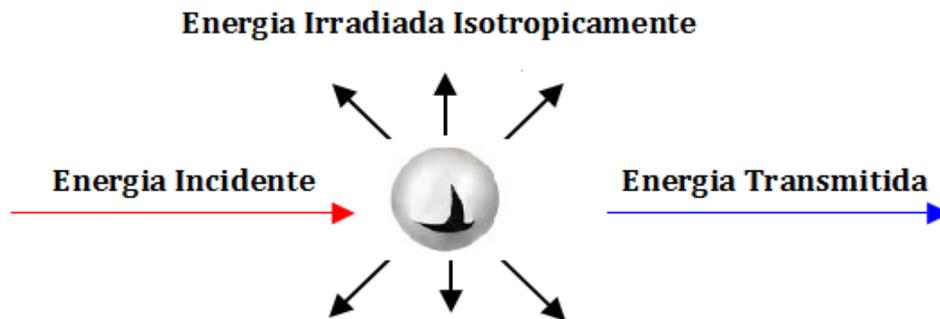


Figura 3.1: Absorção e espalhamento da gota de chuva.

3.1.1 Espalhamento pela Chuva

O espalhamento da energia incidente se deve às modificações sofridas pelas ondas eletromagnéticas para satisfazer às condições de contorno de cada gota de chuva. A direção do espalhamento da energia das gotas de chuva pode ser: retro-espalhamento (mecanismo aproveitado pelos radares monoestáticos), espalhamento lateral (a direção da onda se desvia do percurso da transmissão, aproveitado também pelos radares biestáticos) e espalhamento direto. A Figura 3.2 mostra os possíveis espalhamentos citados.

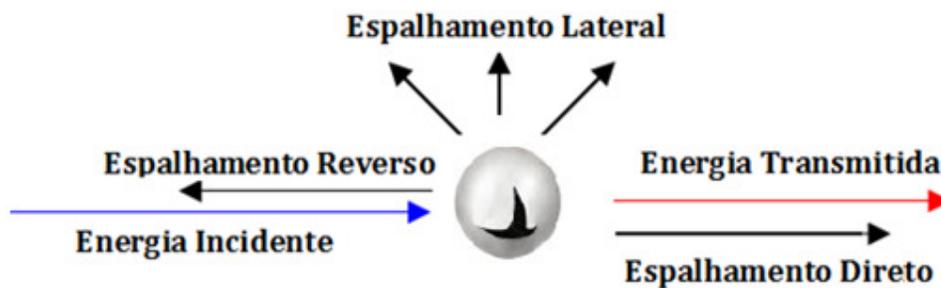


Figura 3.2: Tipos de espalhamento da gota de chuva.

As gotas de chuva dispersam e absorvem a energia das ondas eletromagnéticas incidentes. Pode-se identificar o espalhamento em função do tamanho da partícula espalhadora. O espalhamento Rayleigh é uma teoria aproximada que descreve espalhamento quando a partícula é muito menor do que o comprimento de onda [32]. De acordo com esta teoria, a energia da onda de rádio incidente é dispersa com um diagrama de espalhamento semelhante ao de um dipolo e a quantidade de energia dispersa é proporcional a D/λ , onde D é o diâmetro da partícula e λ é o comprimento de onda, se as partículas são de um tamanho semelhante ao comprimento de onda do sinal transmitido, o modelo de espalhamento Mie [33], mais complexo que o anterior, é implementado nos cálculos de espalhamento. O modelo de espalhamento Rayleigh pode ser usado na maioria dos estudos de espalhamento devido à chuva em ligações por micro-ondas. A Figura 3.3 ilustra os diagramas de espalhamento previsto pelos modelos Rayleigh e Mie.

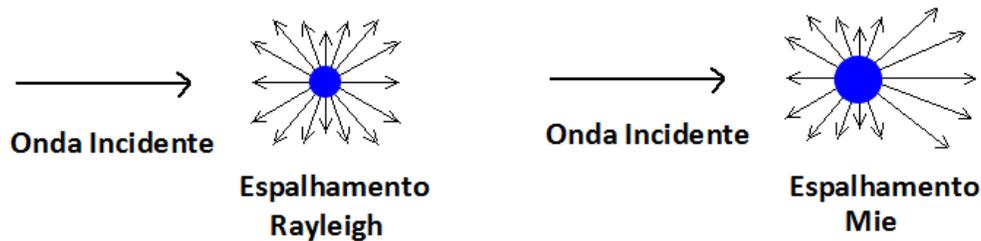


Figura 3.3: Espalhamento Rayleigh e Mie (reproduzido de [32]).

O espalhamento pode ser a causa das interferências entre sistemas fixos ou entre células de comunicações móveis vizinhas.

3.2 Interferência Devida ao Espalhamento Pela Chuva

A interferência devida ao espalhamento pela chuva ocorre quando a energia eletromagnética transmitida por uma antena é interceptada por uma célula de chuva. A célula de chuva atenua a energia eletromagnética, causando também espalhamento lateral que será convertido em um sinal interferente que possivelmente será recebido por antenas de outros sistemas fixos ou outra célula do sistema móvel. Isso afetará a relação entre as potências do sinal desejado e

interferente (S/I) no receptor. Esta interferência devida ao espalhamento da chuva é usualmente descrita usando a equação do radar biestático (BRE), que também forma parte da Recomendação ITU-R P.452-16 [4]. Estes conceitos serão detalhados no capítulo seguinte.

3.3 Fatores Relevantes na Atenuação por Chuvas

Entre os fatores mais importantes e relevantes na estimativa da atenuação por chuvas está a distribuição do tamanho das gotas de chuva [34], [35] cujo diâmetro efetivo varia entre 0,01 mm e 8 mm, aproximadamente. Se os diâmetros são menores a 0,01 mm, as gotas menores tendem a se evaporar com rapidez e facilidade. Por outro lado, não existe coesão no interior das gotas de diâmetros acima de 6 mm, que logo se fracionam em gotas pequenas. Algumas observações experimentais mostram que a distribuição do tamanho das gotas de precipitação varia com a taxa de precipitação [34], [35]. Em climas temperados, muitos trabalhos foram desenvolvidos usando a distribuição do tamanho de gotas de Laws e Parsons [27] para a predição da atenuação por chuva em frequências até 40 GHz.

Em sistemas de micro-ondas, a perda da potência no trajeto é contabilizada, principalmente, pela perda de espaço livre. No entanto, nas faixas de ondas milimétricas, perdas adicionais entram nos cálculos, tais como perdas por gases e devidas à chuva no meio de transmissão. As gotas de chuva são aproximadamente do mesmo tamanho que os comprimentos de onda de rádio e, portanto, causam absorção e espalhamento do sinal de rádio.

A taxa de precipitação é outro fator importante, sendo calculada com base no diâmetro e na velocidade terminal das gotas e expressa em mm/h. A taxa de precipitação é relevante para o desenvolvimento de modelos de previsão da atenuação devida à chuva. Para esta previsão, usa-se a distribuição cumulativa da taxa de precipitação. O comprimento e a polarização do enlace terrestre devem também ser considerados nos cálculos de atenuação devida à chuva.

3.3.1 Distribuição de Tamanhos das Gotas de Chuva

A distribuição de diferentes tamanhos de gotas de chuva foi estudada e modelada em 1943 pelos cientistas Laws e Parsons [27] e logo estudada por Marshall e Palmer em 1948 [36]. Esta última distribuição está mostrada na Figura 3.4. Inicialmente, as medidas da *Drop Size Distribution* (DSD) foram realizadas utilizando folhas de papel colocadas sobre o solo para registrar o diâmetro da gota e o espaçamento entre elas. Desde então, um equipamento mais avançado foi projetado e construído para a medição da DSD, o disdrômetro de Joss e Waldvogel em 1968 [37]. Depois de trabalhos de modelamento da distribuição do tamanho da gota, em 2001, De Wolf realizou uma aproximação dos modelos Law-Parson e Marshall-Palmer já mencionados para obter um melhor ajuste dos dados do tamanho da gota [38].

A forma da DSD é muitas vezes considerada como exponencial [36], [37], mostrada na Figura 3.4, ou uma função gama segundo Atlas et al. [30]. Ambas as distribuições têm grandes semelhanças para gotas de diâmetros maiores, mas diferem na proporção de gotas de diâmetro pequeno. Algumas das variações no tamanho da distribuição das pequenas gotas são devidas a erros de medição sistemáticos associados com os instrumentos utilizados nas medições de cada distribuição.

Seja $N(D)dD$ o número de gotas de diâmetro efetivo compreendido entre D e $D+dD$ por unidade de volume. A DSD de Marshall e Palmer está relacionada à taxa de precipitação a ao diâmetro por intermédio da representação exponencial dada por:

$$N(D)dD = N_o \exp(-\Lambda D)dD \quad \left[\frac{1}{m^3} \right] \quad (3.1)$$

nesta expressão, N_o é aproximadamente igual a $8000 [m^{-3}mm^{-1}]$, D é o diâmetro da gota de chuva [mm] e o parâmetro Λ é dado por:

$$\Lambda = 4.1 R^{-0.21} \quad \left[\frac{1}{mm} \right] \quad (3.2)$$

sendo R a taxa de precipitação [mm/h].

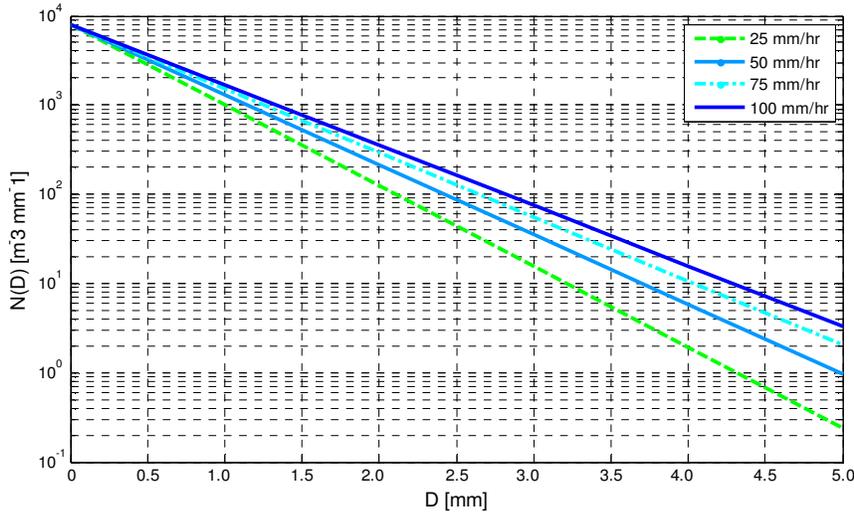


Figura 3.4: Distribuição de tamanho de gota de chuva Marshall e Palmer [36].

Uma expressão mais geral para a DSD é dada pela Distribuição Gama Modificada:

$$N(D)dD = N_o D^p \exp(-\Lambda D^q) dD \quad (3.3)$$

onde N_o , Λ , p e q são parâmetros de forma.

Também a representação lognormal é útil para algumas aplicações e pode facilitar a interpretação física do processo de distribuição de gotas. Seus parâmetros têm uma simples interpretação geométrica. Esta distribuição está representada pela seguinte equação:

$$N(D)dD = \frac{N_t}{(2\pi)^{0.5} (\ln \sigma) D} \exp\left[-\frac{\ln^2(D/D_g)}{2 \ln^2 \sigma}\right] dD \quad (3.4)$$

onde $N_t dD$ é a concentração total de gotas [m^{-3}]. Os parâmetros D_g [mm] e σ definem o valor médio e o desvio padrão da distribuição.

3.3.2 Taxa de Precipitação

Conhecida a distribuição do tamanho das gotas e sua velocidade terminal de queda, a taxa de precipitação pode ser calculada por:

$$R = 1.885 \times 10^{-3} \int_0^{\infty} N(D)D^3V(D) dD \quad \left[\frac{mm}{h} \right] \quad (3.5)$$

onde $V(D)$ é a velocidade terminal da gota de chuva [m/s], $N(D) dD$ é o número de gotas por unidade de volume [m^{-3}] e D é o diâmetro da gota [mm].

Segundo Gunn e Kinzer [28], a velocidade terminal da gota varia com a altitude e depende do seu diâmetro. Para os diâmetros de interesse, os dados experimentais podem ser bem aproximados pela seguinte equação:

$$v(D) = -0.00279686D^4 + 0.08789383D^3 - 1.01376794D^2 + 5.08201572D - 0.20586810 \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (3.6)$$

onde D é o diâmetro da gota [mm].

3.3.3 Distribuições Cumulativas da Taxa de Precipitação

O valor da taxa de precipitação é um parâmetro muito importante que pode ser obtido a partir de dados de medições locais. Quando não é possível obter os dados da taxa de precipitação local, a melhor solução seria utilizar valores já obtidos em climas semelhantes.

A Recomendação ITU-R P.837-6 [39] apresenta um método para estimativa da taxa de precipitação pontual a partir da extrapolação de medidas de precipitação acumulada em todo o mundo. Dadas a latitude e a longitude da posição de interesse, a metodologia permite estimar a taxa de precipitação excedida em uma determinada porcentagem de tempo do ano médio. A Figura 3.5 apresenta-se um mapa de taxa de precipitação excedida durante 0,01% do tempo. Deve-se observar que medidas realizadas em regiões tropicais e úmidas ainda

mostram diferenças significativas entre os resultados obtidos por este método e os dados reais.

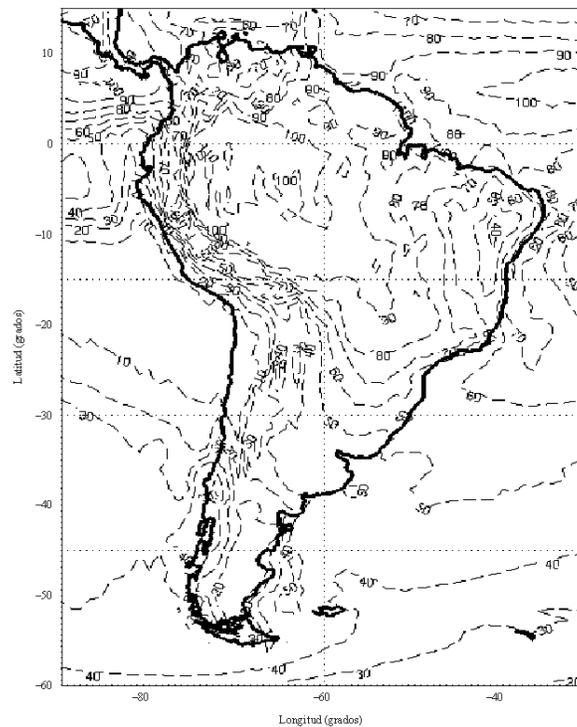


Figura 3.5: Mapa da taxa de precipitação excedida durante 0,01 % do tempo na América do Sul, de acordo com a Recomendação ITU-R P.837-6 [39].

3.4 Atenuação Atmosférica

Os fatores que mais limitam a propagação nas faixas de frequência acima de 10 GHz são a absorção e o espalhamento devidos a hidrometeoros e a atenuação devida aos gases atmosféricos. O vapor de água e oxigênio tem linhas de absorção intensas nas faixas de frequências de micro-ondas e ondas milimétricas, causando atenuação em trajetos de rádio terrestre. Especificamente, existem frequências onde ocorre alta atenuação, separadas por janelas de transmissão onde a atenuação é relativamente menor. O vapor d'água tem fortes linhas de absorção nas frequências de 22 GHz e 180 GHz, o que equivale respectivamente aos comprimentos de onda de 13,0 mm e 1,62 mm. O oxigênio apresenta picos de absorção nas frequências de 60 GHz e 120 GHz, correspondentes aos comprimentos de onda de 5,0 mm e 2,5 mm, respectivamente. A temperatura, a

pressão total e a densidade do vapor d'água são outros fatores que influenciam a atenuação por gases atmosféricos. Deve-se lembrar de que a temperatura também afeta o índice de refração das partículas de água.

Para calcular a atenuação causada pelos gases atmosféricos, será utilizado o modelo simplificado da Recomendação ITU-R P.676-10 [40]. De acordo com a Recomendação, a atenuação total A [dB] do sinal de rádio devida aos gases atmosféricos pode ser calculada como:

$$A = \gamma r = (\gamma_o + \gamma_w)r \text{ [dB]} \quad (3.7)$$

onde γ_o e γ_w são atenuações específicas [dB/km] para o oxigênio e o vapor d'água, respectivamente, e r é o comprimento do enlace rádio [km]. A atenuação devida ao efeito combinado do vapor d'água e oxigênio é aditiva.

No caso de ar seco γ_o (dB/km) para $f \leq 54$ GHz é dada pela seguinte equação:

$$\gamma_o = \left[\frac{7,2 r_t^{2,8}}{f^2 + 0,34 r_p^2 r_t^{1,6}} + \frac{0,62 \xi_3}{(54-f)^{1,16} \xi_1 + 0,83 \xi_2} \right] f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (3.8)$$

Para $54 \text{ GHz} < f \leq 60 \text{ GHz}$:

$$\gamma_o = \exp \left[\frac{\ln \gamma_{54}}{24} (f-58)(f-60) - \frac{\ln \gamma_{58}}{8} (f-54)(f-60) + \frac{\ln \gamma_{60}}{12} (f-54)(f-58) \right] \quad (3.9)$$

Para $60 \text{ GHz} < f \leq 62 \text{ GHz}$:

$$\gamma_o = \gamma_{60} + (\gamma_{62} - \gamma_{60}) \frac{f-60}{2} \quad (3.10)$$

Para $62 \text{ GHz} < f \leq 66 \text{ GHz}$:

$$\gamma_o = \exp \left[\frac{\ln \gamma_{62}}{8} (f - 64)(f - 66) - \frac{\ln \gamma_{64}}{4} (f - 62)(f - 66) + \frac{\ln \gamma_{66}}{8} (f - 62)(f - 64) \right] \quad (3.11)$$

Para 66 GHz < f ≤ 120 GHz:

$$\gamma_o = \left[\begin{array}{l} 3,02 \times 10^{-4} r_t^{3,5} + \frac{0,283 r_t^{3,8}}{(f - 118,75)^2 + 2,91 r_p^2 r_t^{1,6}} + \\ \frac{0,502 \xi_6 [1 - 0,0163 \xi_7 (f - 66)]}{(f - 66)^{1,4346 \xi_4} + 1,15 \xi_5} \end{array} \right] f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (3.12)$$

Para 120 GHz < f ≤ 350 GHz:

$$\gamma_o = \left[\frac{3,02 \times 10^{-4}}{1 + 1,9 \times 10^{-5} f^{1,5}} + \frac{0,283 r_t^{0,3}}{(f - 118,75)^2 + 2,91 r_p^2 r_t^{1,6}} \right] f^2 r_p^2 r_t^{3,5} \times 10^{-3} \quad (3.13)$$

Nas equações acima:

$$\xi_1 = \varphi(r_p; r_t; 0,0717; -1,8132; 0,0156; -1,6515)$$

$$\xi_2 = \varphi(r_p; r_t; 0,5146; -4,6368; -0,1921; -5,7416)$$

$$\xi_3 = \varphi(r_p; r_t; 0,3414; -6,5851; 0,2130; -8,5854)$$

$$\xi_4 = \varphi(r_p; r_t; -0,0112; 0,0092; -0,1033; -0,0009)$$

$$\xi_5 = \varphi(r_p; r_t; 0,2705; -2,7192; -0,3016; -4,1033)$$

$$\xi_6 = \varphi(r_p; r_t; 0,2445; -5,9191; 0,0422; -8,0719)$$

$$\xi_7 = \varphi(r_p; r_t; -0,1833; 6,5589; -0,2402; 6,131)$$

$$\gamma_{54} = 2,192 \varphi(r_p; r_t; 1,8286; -1,9487; 0,4051; -2,8509)$$

$$\gamma_{58} = 12,59 \varphi(r_p; r_t; 1,0045; 3,5610; 0,1588; 1,2834)$$

$$\gamma_{60} = 15,0 \varphi(r_p; r_t; 0,9003; 4,1335; 0,0427; 1,6088)$$

$$\gamma_{62} = 14,28 \varphi(r_p; r_t; 0,9886; 3,4176; 0,1827; 1,3429)$$

$$\gamma_{64} = 6,819 \varphi(r_p; r_t; 1,4320; 0,6258; 0,3177; -0,5914)$$

$$\gamma_{66} = 1,908 \varphi(r_p; r_t; 2,0717; -4,1404; 0,4910; -4,8718)$$

$$\delta = -0,00306 \varphi(r_p; r_t; 3,211; -14,94; 1,583; -16,37)$$

A função $\varphi(a; b; c; d; e; f)$ é definida por:

$$\varphi(r_p, r_t, a, b, c, d) = r_p^a r_t^b \exp[c(1-r_p) + d(1-r_t)] \quad (3.14)$$

onde f: frequência [GHz]

$$r_p = p/1013$$

$$r_t = 288/(273 + t)$$

p: pressão total [hPa]

t: temperatura [°C]

No caso de vapor d'água, a atenuação γ_w [dB/km] é dada por:

$$\begin{aligned} \gamma_w = & \left\{ \frac{3,98 \eta_1 \exp[2,23(1-r_t)]}{(f-22,235)^2 + 9,42 \eta_1^2} g(f,22) + \frac{11,96 \eta_1 \exp[0,7(1-r_t)]}{(f-183,31)^2 + 11,14 \eta_1^2} \right. \\ & + \frac{0,081 \eta_1 \exp[6,44(1-r_t)]}{(f-321,226)^2 + 6,29 \eta_1^2} + \frac{3,66 \eta_1 \exp[1,6(1-r_t)]}{(f-325,153)^2 + 9,22 \eta_1^2} \\ & + \frac{25,37 \eta_1 \exp[1,09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \frac{17,4 \eta_1 \exp[1,46(1-r_t)]}{(f-448)^2} \\ & + \frac{844,6 \eta_1 \exp[0,17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f,557) + \frac{290 \eta_1 \exp[0,41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f,752) \\ & \left. + \frac{8,3328 \times 10^{-4} \eta_2 \exp[0,99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f,1780) \right\} f^2 r_t^{2,5} \rho \times 10^{-4}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

onde:

$$\eta_1 = 0,955 r_p r_t^{0,68} + 0,006 p$$

$$\eta_2 = 0,735 r_p r_t^{0,5} + 0,0353 r_t^4 p$$

$$g(f, f_i) = 1 + \left(\frac{f - f_i}{f + f_i} \right)^2 \quad (3.16)$$

A Figura 3.6 apresenta um gráfico da atenuação específica [dB/km] em função da frequência de operação [GHz] para os casos do ar seco e vapor de água, assim como para a combinação das duas componentes.

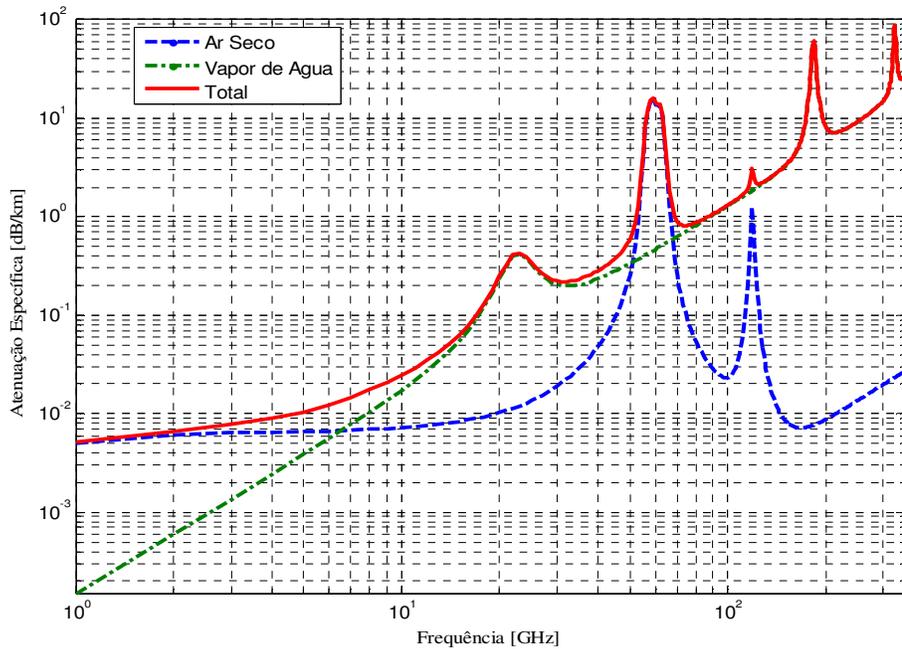


Figura 3.6: Atenuação específica devida a gases atmosféricos, de acordo com o modelo da Recomendação ITU-R P.676-10 [40], supondo valores padronizados para a temperatura, a pressão total e a densidade do vapor d'água.

Nas faixas em que a atenuação específica supera aproximadamente 10 dB/km, o alcance da comunicação torna-se muito limitado, devido à atenuação total presente. Estas faixas de frequências podem ser identificadas com a ajuda da Figura 3.6. Por exemplo, na frequência de 60 GHz, a atenuação específica é aproximadamente igual a 15 dB/km e na frequência de 180 GHz atinge 50 dB/km. Para frequências superiores a 300 GHz, a atenuação mínima é também elevada (10 dB/km ou mais). Por outro lado, na frequência de 30 GHz a atenuação é inferior a 0,25 dB/km e existem janelas de baixa absorção entre os picos já citados.

3.5 Atenuação Devida a Chuvas

Durante a propagação de ondas eletromagnéticas em enlaces terrestres ou via satélite, ocorrem atenuações do sinal devido à absorção e espalhamento causados por hidrometeoros como chuva, neve, granizo ou nevoeiro. Estes fenômenos são importantes no caso dos sistemas que operam na faixa de frequências extremamente altas (EHF ou ondas milimétricas). Nesta seção, o

procedimento para o cálculo da atenuação causada pela chuva será revisto. O conhecimento do regime de precipitação da região em que será implantado o enlace é fundamental para a determinação desta atenuação e para os cálculos de planejamento dos sistemas de radiocomunicações que operam na faixa de ondas milimétricas.

3.5.1 Modelos de Previsão da Atenuação por Chuvas

3.5.1.1 Atenuação específica

Supondo o limite do espalhamento simples, a atenuação de uma onda eletromagnética que se propaga na chuva é obtida pela soma das contribuições individuais das gotas presentes no meio. Considerando que as gotas têm dimensões diferentes, a atenuação específica da chuva [41] é calculada utilizando-se a integral das contribuições individuais das gotas que compõem um meio com chuva:

$$\gamma = 4.343 \int Q_t(D)N(D)dD \quad \left[\frac{dB}{km} \right] \quad (3.17)$$

onde $Q_t(D)$ é a seção reta total (espalhamento e absorção da gota de diâmetro D) e $N(D)dD$ é o número de gotas por unidade de volume com diâmetro entre os limites D e $D+dD$. A seção reta $Q_t(D)$ é determinada pela teoria clássica de espalhamento de Mie [29] para frequências superiores a 3 GHz, enquanto que, para frequências inferiores a 3 GHz, é usada a aproximação de Rayleigh [29]. Pela teoria de Mie para o espalhamento de uma partícula esférica, tem-se:

$$Q_t(D) = \frac{\lambda^2}{2\pi^2 D} \sum_{n=1}^{\infty} (2n + 1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (3.18)$$

onde a_n e b_n são os coeficientes de espalhamento de Mie, os quais são funções complexas de D , λ e n . Nesta expressão, Re indica a parte real da grandeza entre parênteses, D é o diâmetro da gota [mm] e λ é o comprimento de onda [mm]. Deve-se observar que a seção reta total obtida diretamente da aproximação de Rayleigh pode também ser obtida a partir da solução de Mie, no limite $D \ll \lambda$.

3.5.1.2 Modelo empírico

Um método teórico para o cálculo da atenuação a expressaria por intermédio da integral da atenuação específica ao longo do enlace. Apesar da possível precisão do método, os cálculos seriam muito complexos. Adicionalmente, seria difícil caracterizar o perfil da atenuação específica ao longo do enlace, variável no tempo. Por estes motivos, foi desenvolvida uma solução empírica ajustada ao modelo teórico em questão. Para aplicações práticas, é usada a atenuação específica empírica devida à chuva, que pode ser calculada a partir da Recomendação ITU-R P.838-3[41]. A atenuação específica γ [dB/km] é obtida a partir da taxa de precipitação R [mm/h] utilizando a seguinte equação:

$$\gamma = kR^\alpha \quad \left[\frac{dB}{km} \right] \quad (3.19)$$

onde k e α são constantes que dependem da frequência e da polarização da onda eletromagnética. As constantes k e α foram calculadas para frequências compreendidas entre 1 GHz e 1000 GHz, considerando a forma das gotas como esferóides oblatos na temperatura de 20°C, a distribuição de velocidade terminal das gotas de Gunn e Kinzer [28], a distribuição do tamanho das gotas feitas por Laws e Parsons [27] e o índice de refração da água, segundo o modelo de espalhamento Rayleigh ou Mie [29]. O cálculo dos valores de k_H , k_V , α_H e α_V (polarizações vertical e horizontal) é fornecido pela Recomendação ITU-R P.838-3 [41].

As equações utilizadas para obter os valores de k e α para as polarizações horizontal e vertical são as seguintes:

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (3.20)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (3.21)$$

onde f é a frequência [GHz] e os coeficientes a_j , b_j , c_j , m_k , c_k , m_α e c_α estão tabelados na mesma recomendação para os parâmetros k_H , k_V , α_H e para α_V , sendo mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Coeficientes para k e α (Recomendação ITU-R P.838-3 [41]).

Coeficientes para k_H					
j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5,33980	-0,10008	1,13098	-0,18961	0,71147
2	-0,35351	1,26970	0,45400		
3	-0,23789	0,86036	0,15354		
4	-0,94158	0,64552	0,16817		
Coeficientes para k_V					
j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3,80595	0,56934	0,81061	-0,16398	0,63297
2	-3,44965	-0,22911	0,51059		
3	-0,39902	0,73042	0,11899		
4	0,50167	1,07319	0,27195		
Coeficientes para α_H					
j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0,14318	1,82442	-0,55187	0,67849	-1,95537
2	0,29591	0,77564	0,19822		
3	0,32177	0,63773	0,13164		
4	-5,37610	-0,96230	1,47828		
5	16,1721	-3,29980	3,43990		
Coeficientes para α_V					
j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0,07771	2,33840	-0,76284	-0,053739	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	-0,20238	1,14520	0,26809		
4	-48,2991	0,791669	0,116226		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

Para uma polarização linear ou circular e para qualquer tipo de geometria de trajeto, os coeficientes da expressão podem ser calculados utilizando as seguintes equações:

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2 \quad (3.22)$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2k \quad (3.23)$$

onde θ é o ângulo de elevação do enlace ($^\circ$) e τ é o ângulo de polarização circular ($\tau = 0^\circ$ para polarização horizontal, $\tau = 45^\circ$ para polarização circular e $\tau = 90^\circ$ para polarização vertical). A Figura 3.7 mostra a atenuação específica para diferentes taxa de precipitação e polarização vertical.

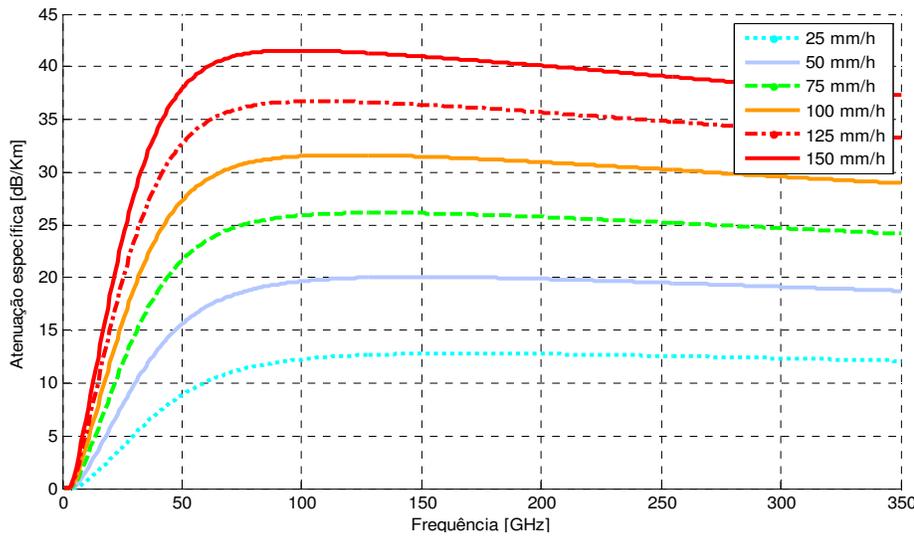


Figura 3.7: Atenuação devida a chuvas com diferentes taxas de precipitação.

3.5.1.3 Modelo Brasileiro

O modelo Brasileiro de atenuação utiliza a distribuição da taxa de precipitação e mantém o conceito de célula equivalente de chuva. Foi desenvolvido com base de dados experimentais medidos no Brasil e apresenta resultados ajustados para a previsão da atenuação por chuvas em regiões situadas em latitudes baixas [32]. A atenuação por chuvas é dada pelo produto da atenuação específica e o comprimento efetivo do enlace, com a diferença de que, neste caso, ambos os parâmetros são determinados para qualquer porcentagem de tempo p . A atenuação excedida durante esta porcentagem do tempo é dada por:

$$A_p = \gamma_p L_{ef} \quad [\text{dB}] \quad (3.24)$$

$$\gamma_p = k R_{\text{eff}}^\alpha \quad (3.25)$$

onde k e α são chamados parâmetros de regressão e dependem da frequência e do tipo de polarização, como mostrado nas equações acima e na Tabela 3.1. R_{eff} é o taxa de chuva efetiva, e esta dada por:

$$R_{\text{eff}} = 1.763 R_p^{0.753+(0.197/L_{\text{ef}})} \quad (3.26)$$

onde R_p é a taxa de precipitação excedida durante p percentagem (%) do tempo. O outro parâmetro importante é L_{ef} , que representa o comprimento efetivo em metros. Substituindo, obtém-se:

$$A_p = k (1.763 R_p^{0.753+(0.197/L_{\text{ef}})})^\alpha \quad [\text{dB}] \quad (3.27)$$

3.6 Chuva em Regiões Tropicais

As chuvas em regiões tropicais são predominantemente convectivas, caracterizadas por taxas de precipitação variáveis em intensidade e têm curta duração. As precipitações convectivas tendem a se tornar estratiformes ao longo da sua duração. Medições de célula de chuva com radares meteorológicos mostram que a dimensão das células de chuva intensa tem tipicamente entre 2 km e 5 km de raio. O conhecimento da distribuição de chuva em um ponto do percurso de propagação, ou perto deste, é fundamental para a previsão da atenuação por chuva. Para este tipo de procedimento, a ITU tem fornecido através de Atlas Mundial valores de taxa de precipitação excedidos em determinadas percentagens de tempo, como foi mencionado.

A característica de precipitação e a estrutura da célula de chuva em uma região tropical estão detalhadamente descritas nos artigos de Houze [42]. Para a região Amazônica, estudos detalhados são apresentados nos artigos de Negri et al. [43] e Anagnostou et al. [44]. Para regiões tropicais, o modelo lognormal parece ser o mais apropriado, porque acompanha melhor o comportamento dos dados medidos durante altas taxas de precipitação.