

## 4 Aspectos de Propagação nas Bandas Ka e Ku

### 4.1. Introdução

A ocorrência de chuvas nos percursos de subida e descida implicam em perturbações do desempenho de um enlace via satélite que se tornam mais preocupantes em frequências acima de 10 GHz nas Bandas Ku e Ka. A maior preocupação reside em possíveis períodos com *indisponibilidade* ou interrupção dos serviços do enlace via satélite devida a ocorrência de chuvas mais intensas nestes percursos. Embora com intensidade menor, as atenuações adicionais causadas por nuvens e pela absorção de moléculas de oxigênio e vapor d'água também devem ser consideradas nestas bandas.

A atenuação por chuvas é devida à absorção e espalhamento da energia propagante pelas partículas de água. As gotas de chuva comportam-se como um meio dielétrico dissipativo e refletor para o campo elétrico incidente, absorvendo energia ou espalhando-a em diversas direções. A absorção corresponde à dissipação térmica, sendo função da condutividade da água. O espalhamento está associado às múltiplas reflexões da onda, de modo a satisfazer as condições de contorno sobre cada gota.

Um campo elétrico linearmente polarizado que atinge uma gota de chuva sofre maior ou menor atenuação conforme sua orientação coincidir ou não com o maior eixo da seção reta da gota. Isto porque a gota possui a forma de um esferóide oblato com a orientação do seu maior eixo quase horizontal, por causa da ação gravidade com achatamento pela resistência do ar e a ação de ventos. Quanto maior a gota, mais elíptica ela se torna durante a queda, bem diferente de sua forma esférica do início da precipitação. No caso da polarização linear e considerando para a gota de chuva o modelo de esferóide oblato, o ângulo entre o campo elétrico da onda incidente e o maior eixo da elipse de seção reta que é atingida por esta onda, são fatores que a atenuação produzida por uma única gota depende. Esta seção reta considerada é normal à direção de propagação da onda

incidente. A atenuação é maior para sinais polarizados paralelamente ao maior eixo da seção reta, e menor para sinais polarizados na direção do menor eixo da seção. A inclinação do maior eixo da gota relativamente à horizontal é chamada de "tilt angle" ou "drop canting angle". A atenuação de sinais circularmente polarizados independe da inclinação da gota, pois se assemelha à atenuação dos sinais polarizados com  $45^\circ$  relativamente aos eixos da seção reta, como, por exemplo, incidindo  $45^\circ$  com a horizontal.

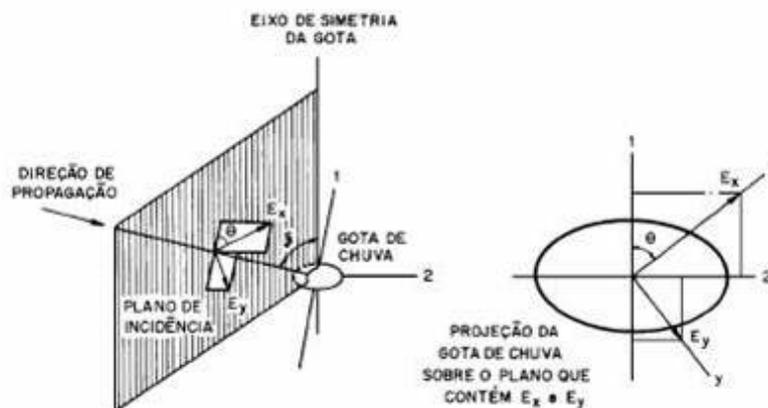


Figura 4.1: Incidência do campo elétrico sobre a seção reta da gota da chuva

A distribuição de tamanho das gotas varia normalmente entre 0,01 e 6,0 mm. Gotas com diâmetros inferiores a 0,01 mm evaporam-se rapidamente, e acima de 6,0 mm a tensão superficial não é suficiente para mantê-la, havendo fracionamento. Observações mostram que, na média, a distribuição do tamanho de gotas é relativamente estável, variando principalmente com a taxa de precipitação. Em climas temperados a distribuição do tamanho de gotas de acordo com Laws e Parsons (1943) tem sido utilizada para a estimativa da atenuação da chuva em frequências até 40 GHz. As concentrações relativas de pequenas gotas, cujo diâmetro é menor que 0,5 mm, não são bem modeladas pela distribuição de Laws e Parsons, sendo utilizada neste caso a função exponencial negativa proposta por Marshall-Palmer (1948) ou um método apresentado no encontro WP3J em Budapeste (2001). A concentração de pequenas gotas pode variar bastante e o uso de uma única distribuição pode não ser adequada para todas as localidades.

Para regiões tropicais o modelo lognormal parece ser o mais apropriado, porque acompanha melhor o comportamento dos dados medidos durante altas taxas de chuva. Neste clima a distribuição de Marshall & Palmer superestima tanto as pequenas quanto as grandes gotas, para diversas taxas de precipitação. Em uma comparação feita entre o modelamento lognormal e a distribuição Laws e Parsons da atenuação específica para as polarizações horizontal e vertical, é mostrado que, entre 10 e 20 GHz, não há diferença entre os dois modelos. Acima de 30 GHz a diferença entre eles cresce, indicando maiores valores calculados de atenuação específica pela lognormal. O uso da distribuição de Laws e Parsons para determinar a atenuação específica nestas frequências pode resultar em valores subestimados

Outro parâmetro utilizado na previsão de atenuação, a velocidade terminal das gotas, teve sua distribuição avaliada por Gunn e Kinzer em 1949 como sendo função do tamanho das gotas de chuva. A velocidade das gotas depende da densidade do ar e conseqüentemente é função da altura. As gotas aumentam em número ao cair porque se partem devido à resistência do ar, porém o conteúdo líquido envolvido desde o início da queda se mantém constante. Desde que a atenuação de uma onda que atravessa um meio com chuva depende principalmente do conteúdo líquido, a atenuação específica varia pouco com a altura abaixo da linha de altura de chuva.

Resumindo, para o desenvolvimento do modelo para previsão de atenuação por chuva devem ser considerados vários itens tais como:

- Distribuição do tamanho das gotas;
- Efeito da distorção da forma esférica das gotas;
- Taxa de precipitação, que representa a altura que atingiria a água coletada por unidade de tempo caso não houvesse evaporação nem absorção pelo solo;
- Cintilações causadas por efeitos de multipercursos.

A taxa de precipitação é expressa usualmente em mm/h sendo uma função da dimensão (diâmetro) e da velocidade terminal das gotas. A precisão da medida

da distribuição estatística da taxa de precipitação é de fundamental importância no estabelecimento de modelos para a previsão da atenuação por chuva.

#### **4.2. Características das Chuvas em Climas Tropicais e Equatoriais**

A chuva é um fenômeno meteorológico com uma estrutura complexa, devido a sua grande variação no espaço, tempo e frequência de ocorrência, principalmente se tratando de regiões com climas equatoriais ou tropicais. A chuva pode ser classificada como *convectiva* ou *estratiforme*.

As precipitações estratiformes se espalham por uma ampla região, duram longo tempo e a intensidade da chuva é média ou baixa. Resultam da formação de pequenas partículas de gelo nas camadas elevadas da troposfera. Ao cair, estas partículas agregam-se umas às outras, formando núcleos cada vez maiores. Estes núcleos tornam-se instáveis e, ao passar por uma faixa de altitude ("melting layer") que se estende por cerca de 500 m a 1 km abaixo da isoterma de 0°C, transformam-se em gotas de chuva que se precipitam em direção à superfície da terra.

As precipitações convectivas estão associadas a nuvens formadas, geralmente, abaixo da isoterma de 0°C, que são impelidas para cima por fortes movimentos de massas de ar devidos a diferenças de pressão na troposfera. A chuva atinge intensidade bastante alta e há ocorrência de trovões e relâmpagos. Nuvens convectivas podem ocorrer individualmente ou, mais tipicamente, em grupos formando um conjunto de células. No pior caso, a estrutura da nuvem consiste em uma larga camada de *nimbostratus* com torres *cumulonimbus* sobre esta camada. A distância média entre as torres é 20 a 25 km. Neste processo formam-se gotas de água que crescem de tamanho, até o momento em que a força da gravidade as precipite em direção ao solo.

As chuvas tropicais, em particular, são predominantemente convectivas, caracterizadas por altas taxas de precipitação que ocorrem geralmente em áreas pouco extensas e têm curta duração. No entanto, ao longo deste tempo desenvolve-se uma estrutura de precipitação estratiforme, que se estende sobre áreas mais extensas com menor intensidade que aquelas observadas nas

precipitações convectivas, Isto é, precipitações convectivas tendem a se tornar estratiformes ao longo da sua duração.

Medidas de célula de chuva com radares mostram que a dimensão das células de chuva intensa estão tipicamente entre 2 e 5 Km. A duração de células de chuva individuais é geralmente baixa, entre 10 e 20 minutos; no entanto chuvas intensas podem persistir por mais tempo, porque se observa uma tendência de formação de novas células de chuva adjacentes a células existentes.

A altura das células de chuva também é um parâmetro importante no cálculo de atenuação em enlaces. Geralmente se considera que este alcance uma altura máxima igual à isoterma de 0°C. Acima desta altura, assume-se que a precipitação se dá na forma de gelo ou neve, embora já tenha sido constatado que em tempestades tropicais, de natureza convectiva, a altura da chuva chega a alturas de 6 à 10 Km, muito acima da isoterma de 0°C.

O conhecimento desta distribuição em um ponto do percurso de propagação ou perto deste é fundamental para a previsão da atenuação por chuva. Sempre que for possível devem ser utilizados os dados de intensidade de precipitação do próprio local onde se deseja determinar a distribuição cumulativa. Se esta informação não estiver disponível, a alternativa é obter um valor que pertença à mesma região climática do local. Para este tipo de procedimento o UIT-R tem fornecido através de Atlas mundial valores de taxa de precipitação excedidas em determinadas percentagens do tempo.

### 4.3. Atenuação Específica da Chuva

A atenuação específica [5] é calculada utilizando-se a integral das contribuições individuais das gotas que compõem um meio com chuva:

$$\gamma = 4,343 \int Q_i(D) \cdot N(D) dD \quad [\text{dB/km}] \quad (4.1)$$

Onde:

$Q_i(D)$  = é a seção reta de espalhamento e absorção da gota de diâmetro  $D$

$N(D)$  = é o número de gotas por unidade de volume com diâmetro entre  $D$  e

$D+dD$

Para aplicações práticas, a relação entre a atenuação específica [dB/km] e a taxa de chuva R [mm/h] adotada é a seguinte, proposta por Olsen et al (1978):

$$\gamma = kR^\alpha \quad (4.2)$$

onde os parâmetros  $k$  e  $\alpha$  dependem da frequência utilizada, bem como do tipo de polarização aplicada. Os valores dos parâmetros mencionados, dependem de outros parâmetros:  $k_H$ ,  $k_V$ ,  $\alpha_H$  e  $\alpha_V$  que foram calculados no intervalo de 1 à 40GHZ (Fedi, 1979; Maggiori, 1981) para gotas de chuva no formato de esferóides oblatos à temperatura de 20°C, utilizando a distribuição proposta por Laws e Parsons (1943), velocidade terminal proposta por Gunn e Kinzer (1949) e índice de refração da gota de acordo com o modelo de Ray (1972).

Para este método, temos a tabela de valores de  $k_H$ ,  $k_V$ ,  $\alpha_H$  e  $\alpha_V$  fornecidos na Tabela 4.1, até a frequência de 40 GHZ. Para valores intermediários de frequência desta tabela é necessário fazer uma interpolação, dada pelas equações a seguir:

$$k(f) = \log^{-1} \left[ \log \frac{k_2}{k_1} \cdot \left( \frac{\log \frac{f_1}{f}}{\log \frac{f_2}{f_1}} \right) + \log k_1 \right] \quad ; \quad \alpha(f) = \left[ (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \left( \frac{\log \frac{f_1}{f}}{\log \frac{f_2}{f_1}} \right) + \alpha_2 \right] \quad (4.3)$$

Onde  $f_2 > f_1$  são valores adjacentes da Tabela 4.1.

Para polarização circular os parâmetros  $k$  e  $\alpha$ , podem ser calculados através de:

$$k = \frac{1}{2} [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau] \quad (4.4)$$

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot k} [k_H \cdot \alpha_H + k_V \cdot \alpha_V + (k_H \cdot \alpha_H - k_V \cdot \alpha_V) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau] \quad (4.5)$$

Onde:

$\theta \rightarrow$  ângulo de elevação do enlace

$\tau \rightarrow$  “tilt angle”- parâmetro que depende da polarização, e:

$\tau = 0^\circ \rightarrow$  polarização horizontal

$\tau = 90^\circ \rightarrow$  polarização vertical

$\tau = 45^\circ \rightarrow$  polarização circular

Após vários estudos envolvendo este tema, notou-se que para frequências mais elevadas as equações de interpolação não forneciam resultados precisos para os valores dos parâmetros de  $k_H$ ,  $k_V$ ,  $\alpha_H$  e  $\alpha_V$  gerando um erro significativo da atenuação específica. Com isso foi desenvolvido na Inglaterra e apresentado no encontro WP3J em Budapest (2001), um novo método para o cálculo de atenuação específica:

$$\log k = \sum_{j=1}^3 \left( a_j \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\log(f) - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_k \cdot \log(f) + c_k \quad (4.6)$$

$$\alpha_{\text{mod}} = \sum_{i=1}^4 \left( a_i \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\log(f) - b_i}{c_i} \right)^2 \right] \right) + m_\alpha \cdot \log(f) + c_\alpha \quad (4.7)$$

Os valores de  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ ,  $c_{ij}$ ,  $m_{k\alpha}$ ,  $c_{k\alpha}$  são dados nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Após calculados os parâmetros desejados, aplicamos às equações descritas a seguir para calcularmos os parâmetros  $k$  e  $\alpha$ , dependendo da inclinação do enlace e da polarização aplicada. A determinação dos parâmetros  $k$  e  $\alpha$  foi feita considerando a forma de esferóides oblatos na temperatura de 20° C:

Frequência (GHZ)	$k_H$	$k_V$	$\alpha_H$	$\alpha_V$
1	0,0000387	0,0000352	0,9122	0,8801
2	0,0001543	0,0001388	0,9629	0,9230
4	0,0006479	0,0005807	1,1212	1,0749
6	0,001813	0,001603	1,3068	1,2662
7	0,002915	0,002560	1,3334	1,3086
8	0,004567	0,003996	1,3275	1,3129
10	0,01006	0,008853	1,2747	1,2636
12	0,01882	0,01680	1,2168	1,1994
15	0,03689	0,03362	1,1549	1,1275
20	0,07504	0,06898	1,0995	1,0663
25	0,1237	0,1125	1,0604	1,0308
30	0,1864	0,1673	1,0202	0,9974
35	0,2632	0,2341	0,9789	0,9630
40	0,3504	0,3104	0,9394	0,9293

Tabela 4.1: Coeficientes para cálculo da atenuação específica

	$a$	$b$	$c$	$m_k$	$c_k$	$m_\alpha$	$c_\alpha$
$j = 1$	0,3364	1,1274	0,2916	1,9925	-4,4123	-	-
<b>2</b>	0,7520	1,6644	0,5175				
<b>3</b>	-0,9466	2,8496	0,4315				
$i = 1$	0,5564	0,7741	0,4011	-	-	-0,08016	0,8993
<b>2</b>	0,2237	1,4023	0,3475				
<b>3</b>	-0,1961	0,5769	0,2372				
<b>4</b>	-0,02219	2,2959	0,2801				

Tabela 4.2: Coeficientes para cálculo da atenuação específica (polarização horizontal)

	$a$	$b$	$c$	$m_k$	$c_k$	$m_\alpha$	$c_\alpha$
$j = 1$	0,3023	1,1402	0,2826	1,9710	-4,4535	-	-
<b>2</b>	0,7790	1,6723	0,5694				
<b>3</b>	-1,0022	2,9400	0,4823				
$i = 1$	0,5463	0,8017	0,3657	-	-	0,07059	0,8756
<b>2</b>	0,2158	1,4080	0,3636				
<b>3</b>	-0,1693	0,6353	0,2155				
<b>4</b>	-0,01895	2,3105	0,2938				

Tabela 4.3: Coeficientes para cálculo da atenuação específica (polarização vertical)

#### 4.4. Atenuação por Chuvas em Enlaces Via-Satélite

A atenuação específica da chuva não é suficiente para a determinação da atenuação num enlace radioelétrico. A razão disso é o seu caráter aleatório tanto temporal e quanto espacial. A chuva pode ser modelada espacialmente como sendo células cilíndricas cujo diâmetro é inversamente proporcional à taxa de precipitação e cuja posição varia aleatoriamente no percurso do enlace [2].

Considerando os aspectos acima com a característica aleatória da taxa de precipitação, pode-se concluir que é bastante complexa a modelagem teórica da atenuação por chuvas no percurso de subida e descida de um enlace via-satélite. Por esta razão, modelos de natureza empírica têm sido desenvolvidos e propostos.

Neste capítulo serão descritos os três modelos considerados neste trabalho que são as duas últimas versões do modelo recomendado pela UIT-R e um modelo desenvolvido pelo CETUC para aplicações no Brasil, principalmente.

#### 4.4.1. Modelo da UIT-R – Versão Rec. P.618-5

O modelo descrito na Recomendação da UIT-R P.618-5 [7] utiliza como parâmetro climático a taxa de precipitação excedida durante 0,01% do ano na região de cada estação terrena. Os outros parâmetros influentes nestes modelos são o ângulo de elevação, a frequência e a polarização de cada enlace, a altitude e latitude das estações terrenas.

Neste modelo a atenuação por chuva excedida numa determinada percentagem do ano nos percursos de subida e descida é estimada através da seguinte fórmula:

$$P(A_{ch} \geq M) = 10^{\left[ -6,35 + \sqrt{18,9 - 23,26 \left( \frac{M}{A_{0,01}} \right)} \right]} \% \quad (4.8)$$

Onde:

$A_{ch}$ : atenuação (dB)

$A_{0,01}$ : atenuação por chuva (dB) excedida em 0,01% do ano na seção, e cujo cálculo estimativo é descrito a seguir.

A atenuação por chuvas excedida durante 0.01% é obtida de:

$$A_{0,01} = \gamma_R r_{0,01} L_S \text{ dB} \quad (4.9)$$

Onde

$\gamma_R$  é atenuação específica excedida em 0,01 % do ano, dada por:

$$\gamma_R = k R_{0,01}^\alpha \text{ dB/Km} \quad (4.10)$$

Sendo  $k$  e  $\alpha$  os coeficientes obtidos de tabela na seção anterior e  $R_{0,01}$  a taxa de precipitação (mm/h) excedida no percurso em 0,01 % do ano

$L_S$ : parâmetro geométrico que representa a distância com chuva no percurso de subida ou descida conforme Figura 4.2 e dado por:

$$L_S = \frac{h_R - h_S}{\text{sen } \theta} \text{ Km}; \quad \theta > 5 \text{ graus} \quad (4.11)$$

$\theta$ : ângulo de elevação (graus);

$h_S$ : altura em relação ao nível do mar da estação terrestre (km);

$h_R$ : altura efetiva de chuva, calculada modelada empiricamente em função da latitude ( $\varphi$ ) de acordo com:

$$h_R = \left\{ \begin{array}{l} 5 - 0,075 (\varphi - 23) ; \varphi > 23 \text{ graus } \text{ Norte} \\ 5 ; 0 \leq \varphi \leq 23 \text{ graus } \text{ Norte} \\ 5 ; 0 \leq \varphi \leq 21 \text{ graus } \text{ Sul} \\ 5 - 0,1(\varphi - 21) ; 21 \leq \varphi \leq 71 \text{ graus Sul} \end{array} \right\} \quad (4.12)$$

$r_{0,01}$ : fator de redução horizontal para 0.01% do tempo, obtido de:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + \frac{L_G}{L_0}} \quad (4.13)$$

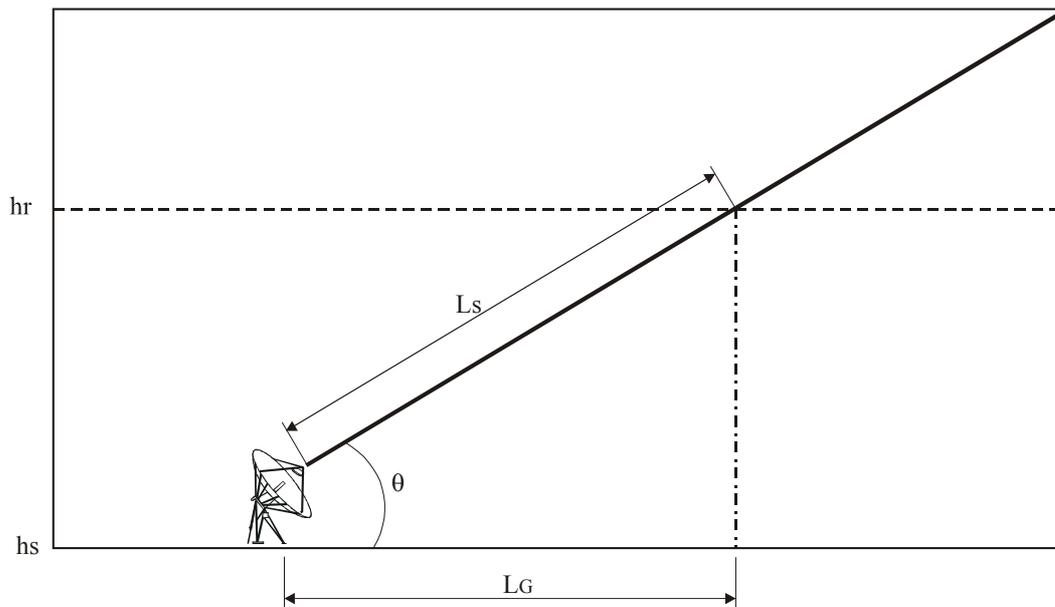
Sendo  $L_G$  a projeção horizontal de  $L_S$ , dada por:

$$L_G = L_S \cos \theta \text{ Km} \quad (4.14)$$

Onde

$$L_0 = 35e^{-0,015R_{0,01}} \quad ; \quad R_{0,01} \leq 100 \text{ mm/h} \quad (4.15)$$

$$L_0 = 7,8 \text{ Km} \quad ; \quad R_{0,01} > 100 \text{ mm/h}$$



hr: altura efetiva de chuva (km)  
 hs: altitude da estação terrena (km)  
 Ls: comprimento do percurso com chuva  
 $\theta$  : ângulo de elevação (graus)  
 Lg: distância projetada (km)

Figura 4.2: Geometria e parâmetros do enlace (subida e descida)

#### 4.4.2. Modelo da UIT-R – Versão Rec. P.618-8

Este modelo de atenuação por chuvas corresponde à versão atualmente recomendada pela UIT-R, e está descrito na Recomendação P 618-8 [8].

Também requer como parâmetro climático a taxa de precipitação excedida  $\epsilon$  em 0,01% do ano na região de cada estação terrena e os outros parâmetros já citados para o modelo do UIT-R da versão anterior.

De acordo com este modelo a atenuação por chuvas excedida durante uma determinada percentagem anual nos percursos de subida e descida é igual a:

$$A_p = A_{0,01} \left( \frac{p}{0,01} \right)^{-(0,655+0,033 \ln(p)-0,045(A_{0,01})-\beta(1-p)\text{sen}\theta)} \% \quad (4.16)$$

Onde:

$A$ : margem para indisponibilidade de cada seção

$p$ : percentagem anual

$A_{0,01}$ : atenuação por chuva excedida em 0,01% do ano em cada seção

$\beta$  : é um parâmetro obtido através de:

$$\begin{aligned}
 \text{se } I \geq 1\% \text{ ou } |\phi| \geq 36^\circ & \quad \beta = 0 \\
 \text{se } I < 1\% \text{ e } |\phi| < 36^\circ \text{ e } \theta \geq 25^\circ & \quad \beta = -0,005(|\phi| - 36) \quad (4.17) \\
 \text{senão} & \quad \beta = -0,005(|\phi| - 36) + 1,8 - 4,25 \text{sen} \theta
 \end{aligned}$$

Neste modelo  $A_{0,01}$  é obtida através das etapas abaixo e Figura 4.2:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_E \text{ (dB)} \quad (4.18)$$

Onde:

$$\gamma_R = kR_{0,01}^\alpha \text{ (dB/km)} \quad (4.19)$$

$$L_E = L_R \nu_{0,01} \quad (4.20)$$

$$\nu_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\text{sen} \theta} \left( 31 \left( 1 - e^{-(\theta/(1+\chi))} \right) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0,45 \right)} \quad (4.21)$$

Onde:

$\theta$ : o ângulo de elevação (graus)

$f$ : frequência (GHZ)

$\chi$ : parâmetro função da latitude ( $\varphi$ ) da ET e dado por:

$$\begin{aligned} \blacksquare \text{ se } |\varphi| < 36^\circ, \quad \chi = 36 - |\varphi| \text{ graus} \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\text{senão} \quad \chi = 0 \text{ graus}$$

$L_R$ : parâmetro função de  $\zeta$  definido por:

$$\zeta = \tan^{-1} \left( \frac{h_R - h_S}{L_G r_{0,01}} \right) \text{ graus} \quad (4.23)$$

$$L_R = \frac{L_G r_{0,01}}{\cos \theta} \text{ Km} ; \quad \zeta > \theta \quad (4.24)$$

$$L_R = \frac{(h_R - h_S)}{\text{sen} \theta} \text{ Km}; \quad \zeta \leq \theta \quad (4.25)$$

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0,38(1 - e^{-2L_G})} \quad (4.26)$$

Sendo  $L_G$  a distância definida na Figura 4.2,  $h_s$  a altitude da ET (Km) e  $h_R$  a altura de chuva de acordo com a recomendação UIT-R P.839.

#### 4.4.3. Modelo CETUC

O modelo desenvolvido pelo CETUC para atenuação por chuvas em enlaces Terra-satélite utiliza a distribuição completa da taxa de precipitação e foi desenvolvido com base em dados experimentais medidos no Brasil.

Como no primeiro modelo descrito a atenuação por chuva também é dada pelo produto da atenuação específica pela distância  $L_S$ , definida na Figura 4.2, com diferença de que neste caso, a altura de chuva e o parâmetro  $L_0$ , definido em (4.15), são determinados para qualquer percentagem de tempo através das seguintes fórmulas empíricas:

$$h_r(R_p) = 2,3 + 0,003lat^2 + 0,01R_p \quad (4.27)$$

$$L_0(R_p) = 135e^{-0,019R_p} \quad (4.28)$$

Onde  $R_p$  é a taxa de precipitação excedida em  $p$  % do ano.

A expressão utilizada para o cálculo da atenuação excedida durante  $p$  % do ano é dada por:

$$A_p = kR_p^\alpha \left( \frac{L_0(h_r - h_s)}{L_0 \text{sen} \theta + (h_r - h_s) \text{cos} \theta} \right) dB \quad (4.29)$$

#### 4.5. Atenuações por Nuvens e Névoa

Para nuvens ou névoa que consistem inteiramente em pequenas gotas d'água, geralmente menores que 0.01 cm, é possível expressar a atenuação nos termos da densidade de água total por o volume de unidade. Assim, a atenuação específica de nuvens e névoas [6] pode ser modelada por:

$$\gamma_c = K_l M \text{ dB/Km} \quad (4.30)$$

Onde:

$K_l$ : coeficiente de atenuação específica ((dB/Km).(g/m<sup>3</sup>))

$M$ : densidade de água líquida na nuvem ou névoa (g/m<sup>3</sup>)

Para o cálculo do coeficiente de atenuação específica  $K_l$  um modelo matemático baseado no espalhamento de Rayleigh, que usa um modelo “double-*ebye*” para o permissividade  $\varepsilon(f)$  tem sido proposto para frequências de até 1000 GHZ.

$$K_l = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1+\eta^2)} \text{ (dB / Km) / (g / m}^3) \quad (4.31)$$

Onde  $f$  é a frequência em GHZ e,

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (4.32)$$

Sendo  $\varepsilon''$  a permissividade dielétrica complexa da água, é dada por:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p \left[ 1 + \left( \frac{f}{f_p} \right)^2 \right]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s \left[ 1 + \left( \frac{f}{f_s} \right)^2 \right]} \quad (4.33)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{\left[ 1 + \left( \frac{f}{f_p} \right)^2 \right]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\left[ 1 + \left( \frac{f}{f_s} \right)^2 \right]} + \varepsilon_2 \quad (4.34)$$

Onde:

$$\varepsilon_0 = 77.6 + 103.3(\mu - 1)$$

$$\varepsilon_1 = 5.48$$

$$\varepsilon_2 = 3.51$$

$$\mu = 300/T$$

$T$ : a temperatura em Kelvin

$f_p$  e  $f_s$ : frequências principais e secundárias de relaxamento dadas por:

$$f_p = 20.09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2 \text{ GHZ} \quad (4.35)$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1) \text{ GHZ} \quad (4.36)$$

A Figura 4.3 mostra os valores de  $K_l$  para frequências de 5 a 200 GHz e temperaturas entre  $-8^\circ\text{C}$  e  $20^\circ\text{C}$ . **Para atenuações da nuvem, a curva que corresponde a  $0^\circ\text{C}$  deve ser usada.**

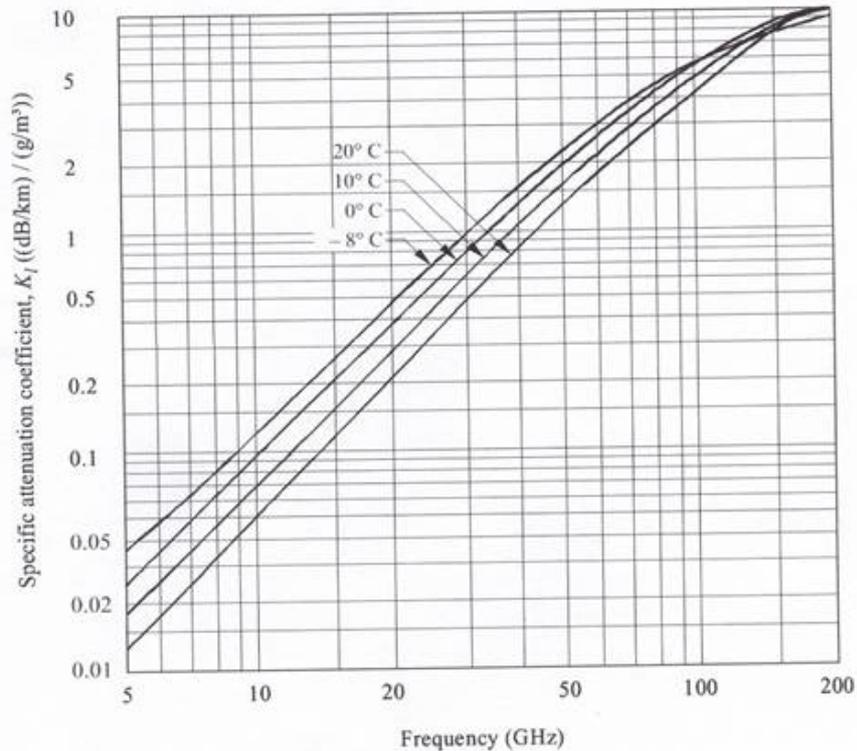


Figura 4.3: Coeficiente de atenuação específica  $K_l$

Para obter a atenuação devido às nuvens, excedida em determinada percentagem de tempo, tem sido proposto o seguinte modelo:

$$A_N = \frac{LK_l}{\sin\theta} \text{ dB} \quad ; \quad 90 \text{ graus} \geq \theta \geq 5 \text{ graus} \quad (4.37)$$

Onde:

$\theta$  : o ângulo de elevação

L: massa d'água da coluna da nuvem ( $\text{kg/m}^2$ )

#### 4.6. Atenuação por Gases

Nas bandas Ku e superiores a absorção por gases da atmosfera em enlaces via-satélite de ser considerada. Esta atenuação deve-se praticamente à absorção de energia eletromagnética pelas moléculas de oxigênio e vapor de água.

A absorção do oxigênio está associada a um fenômeno dipolar magnético de sua molécula enquanto a de vapor de água com fenômeno dipolar elétrico. Devido a estes fenômenos ocorrem picos de absorção em determinadas frequências de ressonância: 22,2 e 183,3 GHz para vapor de água e 57 e 119 GHz para oxigênio.

A atenuação específica é função da frequência, temperatura, pressão atmosférica e concentração. O cálculo rigoroso é bastante complexo sendo, por esta razão, tratado de forma aproximada para a maioria das aplicações práticas. Este é o caso do modelo atualmente proposto pelo UIT-R, descrito na Recomendação P.676 [2]. De acordo com este modelo, a atenuação por gases é dada por:

$$A_g = \frac{\gamma_0 h_0 \exp(-h_s/h_0) + \gamma_w h_w}{\text{sen } \theta}; \theta > 10 \text{ graus} \quad (4.38)$$

$$A_g = \frac{\gamma_0 h_0 \exp(-h_s/h_0)}{g(h_0)} + \frac{\gamma_w h_w}{g(h_w)}; \theta \leq 10 \text{ graus}$$

$$g(h) = 0.661 + 0.339 \sqrt{x^2 + 5.5(h/R_e)} \quad (4.39)$$

$$x = \sqrt{\sin^2 \theta + 2(h_s/R_e)} \quad (4.40)$$

$\gamma_0$  : atenuação específica (dB/Km) do oxigênio

$\gamma_w$  : atenuação específica do vapor de água

$h_s$  : altitude da estação terrena (Km)

$h_{0,w}$  : altura efetiva de ar seco e vapor de água

Para as atenuações específicas e alturas efetivas propõe-se as seguintes aproximações:

$$\gamma_0 \cong \left[ \frac{0,0073}{f^2 + 0,35} + \frac{0,0075}{(f - 57)^2 + 2,4} \right] f^2; f \leq 57 \text{ GHz} \quad (4.41)$$

$$\gamma_w \cong \left[ 0,12 + 57,7 \times 10^{-4} f^{0,5} + \frac{28,5}{(f - 22,2) + 9,8} \right] f^2 \times 10^{-4}; f < 60GHz \quad (4.42)$$

$$h_0 \cong 6Km; f, 60GHz \quad (4.43)$$

$$h_w \cong 1,6 + \frac{4,8}{(f - 22,2)^2 + 9,8}; f < 60GHz \quad (4.44)$$

Embora a atenuação por gases apresente um comportamento aleatório em função da temperatura, pressão atmosférica e concentração de vapor de água, para fins práticos pode ser assumida com uma parcela aditiva constante de perda de propagação nos enlaces de subida e descida.

#### 4.7. Cálculo de Distâncias e Ângulos de Elevação

No caso de satélite GSO o ângulo de elevação ( $\theta$ ), necessários para o cálculo das atenuações por chuvas e gases, pode ser determinado em função da longitude da estação terrena e da longitude do satélite (GSO), utilizando o seguinte algoritmo:

$$\theta = \arccos[y(a + h) / d] \quad (4.45)$$

$$y = \sqrt{1 - \cos^2(lat) \cos^2(z)} \quad (4.46)$$

$$z = (long)_{est.terrena} - (long)_{satélite} \quad (4.47)$$

$$d = \sqrt{h^2 + 2a(a + h)[1 - \cos(z) \cos(lat)]} \quad (4.48)$$

Onde

$h = 36000$  Km e  $a = 6400$  Km