

### 3 Propagação em ambientes abertos na faixa 10-66 GHz

Na faixa de frequências de operação entre 10 e 66 GHz, a existência de visada direta é muito importante para viabilizar a comunicação de sistemas sem fio em ambientes abertos uma vez que quaisquer tipos de obstruções, até mesmo as causadas por vegetação [15, 16] causam degradação no sinal. A desobstrução de pelo menos 58% da 1ª zona de Fresnel, conforme ilustrado pela Figura 3.1, evita a ocorrência de perdas adicionais por difração. Na prática, deve-se buscar fazer com que a maior parte da 1ª zona de Fresnel esteja desobstruída o que pode ser alcançado através da elevação das antenas. [17].

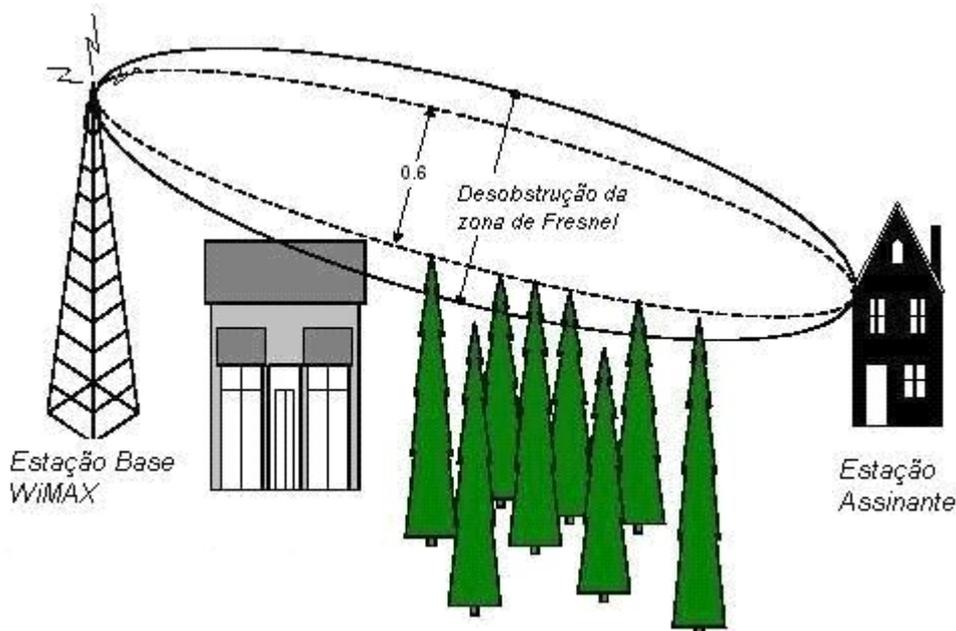


Figura 3.1 – Propagação em visada direta [18].

Mesmo com a existência de visibilidade entre transmissor e receptor, podem existir ondas refletidas (denominadas multipercursos) chegando à antena do receptor. Multipercursos podem causar distorção de fase nos sinais e os multipercursos oriundos de percursos mais longos podem causar distorções na forma dos pulsos devido aos efeitos de dispersão dos componentes de frequência [19].

Os multipercursos devem ter seus efeitos considerados principalmente em situações onde existem superfícies muito lisas presentes no ambiente de propagação como, por exemplo, superfícies de água pois a intensidade das ondas refletidas que chegam ao receptor pode se tornar relevante.

Alguns testes experimentais realizados no estado da Virgínia (EUA) com três enlaces operando na frequência de 38 GHz [20] mostraram a existência de multipercursos durante a ocorrência de chuvas em um dos enlaces em que não havia sinal proveniente de multipercursos chegando ao receptor em condições de céu claro. Foi observado também que a potência dos multipercursos era ainda maior durante chuvas fortes que ocorriam exatamente antes e exatamente depois de ocorrer precipitação de granizo. Este efeito pode ser considerado como tendo sido causado pelas extremidades da célula de chuva de granizo como mostrou outra pesquisa apresentada em [19].

O padrão IEEE 802.16 [12] especifica a necessidade de existência de visada direta entre estações assinantes e estação base de uso de antenas altamente diretivas nas estações assinantes para minimizar o número de multipercursos e de interferências de outras fontes que chegam ao receptor. Sendo assim, neste estudo serão considerados somente os aspectos de propagação envolvidos nos casos em que a 1ª zona de Fresnel está totalmente desobstruída. Não serão consideradas as perdas causadas por vegetação e não serão abordados os efeitos de multipercursos e as perdas por difração.

Uma vez definidas estas premissas, os principais tipos de perdas na propagação durante a operação de sistemas sem fio operando na faixa entre 10 e 66 GHz estão apresentadas a seguir.

Na análise da propagação de ondas eletromagnéticas pelo ar, a primeira perda a ser considerada é a perda de propagação em espaço livre. Neste caso a frequência de operação e a distância entre antena do transmissor e antena do receptor são os fatores diretamente relacionados com tais perdas.

A propagação na atmosfera acima de 10 GHz, entretanto, não envolve somente perdas no espaço livre mas também outros fatores que contribuem para a degradação do sinal: a existência de não-homogeneidades na atmosfera, a presença de gases em atmosfera homogênea, a precipitação de chuvas, a existência de nevoeiro e partículas em suspensão na atmosfera [21]. Estes fatores causam atenuação por absorção e espalhamento.

No caso das chuvas, a absorção acontece pela dissipação da energia da onda incidente na gota. O espalhamento é provocado pelas modificações da onda para satisfazer às condições de contorno em cada gota, não havendo perda de energia [22].

As chuvas também podem causar uma redução na discriminação de polarização cruzada segundo indica a recomendação ITU-R P.530-10 [23]. Este assunto será analisado na seção 3.3.

Variações do índice de refração da atmosfera ao longo do enlace também contribuem para a degradação do sinal podendo causar atenuação por variação no ângulo de chegada e partida das ondas eletromagnéticas. Variações abruptas do índice de refração causam desvanecimento devido a espalhamento do feixe das ondas transmitidas (efeito que também é conhecido como desfocalização) [23].

### **3.1. Perdas na propagação**

Dentre todos os fatores mencionados como causadores de perdas na propagação das ondas eletromagnéticas em ambientes abertos, este estudo irá se concentrar nos fatores mais comuns e mais importantes: chuvas, gases atmosféricos e vapor de água e variação do ângulo de partida/chegada. O estudo destes fatores é baseado na recomendação ITU-R P.530 [23]. Não serão abordados neste estudo os efeitos de precipitação de neve e granizo cuja influência é estudada na recomendação ITU-R P.840 [24].

#### **3.1.1. Atenuação por gases atmosféricos e vapor de água**

Em frequências superiores a 10 GHz ocorre atenuação do sinal devido à absorção por oxigênio e vapor de água. A atenuação é diretamente proporcional à distância do enlace e pode ser calculada através da Equação 3.1.

$$A_{gv} (dB) = \gamma_{gv} \cdot d \quad (3.1)$$

Onde  $d$  é a distância do enlace em quilômetros

$\gamma_{gv}$  é a atenuação específica por quilômetro (dB/km) obtida a partir da recomendação ITU-R P.676 [25]

A Figura 3.2 apresenta um gráfico do valor da atenuação específica em função da frequência de operação. Neste gráfico podemos observar que a atenuação específica total é a soma da atenuação específica causada por vapor de água com a atenuação específica por gases atmosféricos em situação de céu claro.

Na faixa de frequências sob análise o vapor de água tem a maior influência em frequências próximas a 22 GHz enquanto moléculas de oxigênio causam grande atenuação em frequências entre 58 e 62 GHz.

Os efeitos de atenuação por gases atmosféricos e vapor de água, entretanto, são consideravelmente inferiores aos efeitos de atenuação por chuvas que serão analisados na próxima sub-seção deste estudo.

### **3.1.2. Atenuação por chuva**

Na faixa entre 10 e 66 GHz o mecanismo predominante de desvanecimento é proveniente da atenuação por chuvas.

A intensidade do desvanecimento depende de diferentes fatores. Um deles é a intensidade da chuva que varia conforme o clima da região geográfica onde o enlace está localizado.

As estatísticas de incidência de chuvas na região geográfica do enlace possibilitam estimar a probabilidade de que uma determinada taxa de precipitação seja excedida na região e, conseqüentemente, a distribuição de probabilidades de atenuação por chuvas. A partir destas estatísticas é possível estabelecer para um sistema ponto-multiponto o máximo raio de célula que viabiliza a operação apropriada do sistema dado um requisito de disponibilidade do enlace e um conjunto de características dos equipamentos de transmissão. Um exemplo apresentado em [12] mostra que parâmetros típicos de equipamentos operando em 28 GHz resultam num raio máximo de célula de aproximadamente 3,5 km para uma região com taxa de chuvas de 42 mm/h que pode ser excedida em 0,01% do tempo.

Outros fatores que influem na intensidade do desvanecimento são: frequência de operação, distância do enlace e tipo de polarização utilizada.

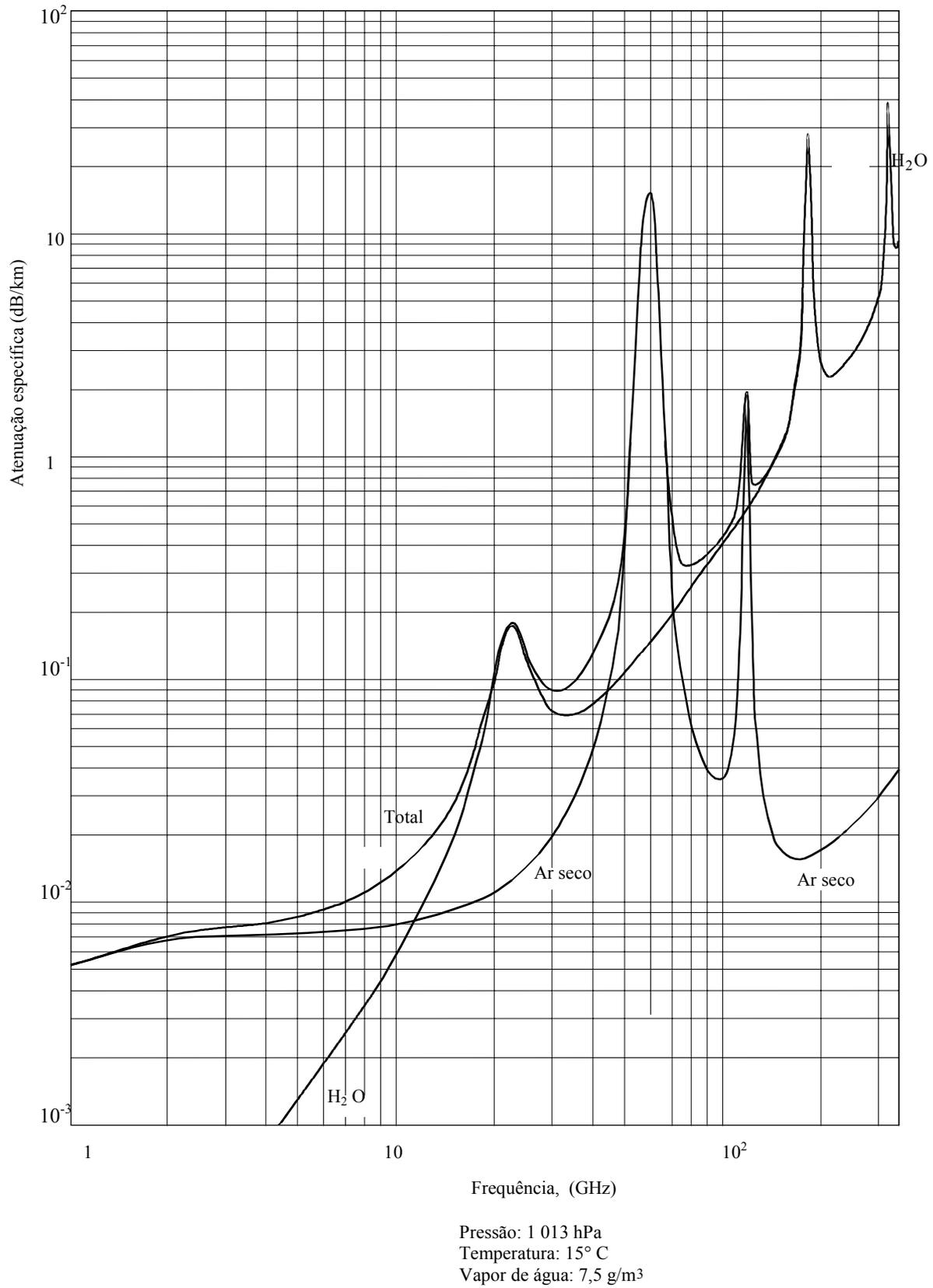


Figura 3.2 - Atenuação específica por gases atmosféricos e vapor de água [25].

A influência do tipo de polarização se deve ao fato de que as gotas de chuvas apresentam durante a queda o formato de um esferóide oblato devido à resistência do ar, podendo sofrer também uma rotação devido à ação dos ventos. A orientação do eixo maior na seção reta da gota é mais próxima da horizontal e, por isto, uma onda eletromagnética com polarização linear horizontal sofre uma atenuação maior que uma onda com polarização linear vertical [22].

Testes realizados em Cingapura em um enlace ponto-a-ponto operando na frequência de 26 GHz com distância de 3,8 km [26] mostraram que a diferença entre a atenuação de uma onda com polarização horizontal e a atenuação de outra com polarização vertical na mesma frequência é diretamente proporcional à taxa de precipitação conforme mostra o gráfico da Figura 3.3.

É possível observar também na Figura 3.3 que existe uma diferença de 3 dB de atenuação entre os 2 tipos de polarização em situações de chuvas cujas taxas sejam de 90 mm/h e quase 6 dB para taxas de 150 mm/h.

Na faixa de frequência de 10 a 40 GHz também foi mostrado em [27] através de testes experimentais realizados para uma das regiões mapeadas pelo ITU em [28] que a diferença de atenuação entre polarização horizontal e vertical é diretamente proporcional à frequência de operação.

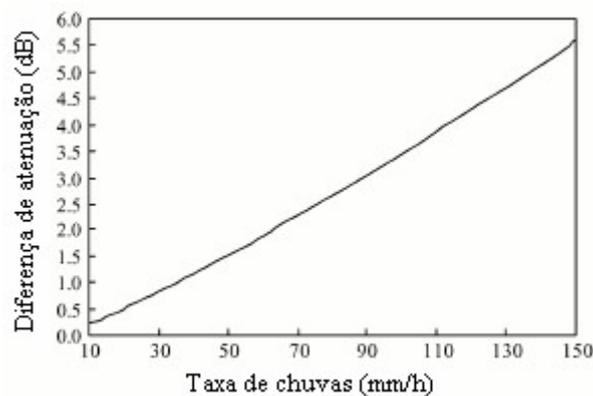


Figura 3.3 - Diferença de atenuação entre polarização horizontal e vertical [26]

Para estimar as estatísticas de atenuação em larga escala causada por chuvas em enlaces ponto-a-ponto existem diversos métodos empíricos e semi-empíricos entre os quais podemos citar os métodos ITU [23], CETUC-98 [29], Pérez-Mello [30], Crane [31] e Fedi [32].

Para regiões tropicais e equatoriais, entretanto, é necessário algum cuidado na aplicação dos métodos ITU [23], Crane [31] e Fedi [32] pois eles foram elaborados com base em resultados obtidos em testes experimentais realizados no hemisfério norte onde prevalece o clima temperado. A aplicação de tais métodos em regiões tropicais e equatoriais pode levar a valores subestimados de atenuação por chuva conforme mostram testes experimentais realizados com enlaces de 15 e 18 GHz na cidade de São Paulo [33]. Testes experimentais realizados no estado da Virgínia (EUA) com enlaces de 38 GHz também apresentaram resultados de atenuação superiores aos valores estimados pelo método Crane [20].

A seguir estão apresentados o método do ITU que é internacionalmente aceito e o método Pérez-Mello que foi desenvolvido a partir de medidas realizadas no Brasil.

#### Método ITU [23]

As estatísticas de atenuação em larga escala causada por chuvas podem ser estimadas a partir dos seguintes passos :

1 - obter o valor da taxa de chuvas ( $R_{0,01}$ ) excedida em 0,01 % do tempo na região de interesse.

O valor de  $R_{0,01}$  é medido em mm/h e deve ser obtido a partir de dados de incidência de chuva na região do enlace considerando tempo de integração igual a 1 minuto. Caso tais dados não sejam disponíveis, é possível obter os valores em mapas de unidades climáticas apresentados na recomendação ITU-R P.837 [28].

2 - calcular a atenuação específica  $\gamma_R$  (dB/km) para a taxa de chuvas obtida e para a frequência e o tipo de polarização através da Equação 3.2 [34].

$$\gamma_R = k \cdot R^\alpha \quad (3.2)$$

Onde  $k$  e  $\alpha$  são coeficientes que dependem da frequência e da polarização utilizada e podem ser obtidos através das Equações 3.3 e 3.4.

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2 \quad (3.3)$$

$$a = [k_H a_H + k_V a_V + (k_H a_H - k_V a_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2k \quad (3.4)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo de elevação do enlace

$\tau$  é o ângulo *tilt* de polarização em relação à horizontal

$k_H$ ,  $k_V$ ,  $\alpha_H$  e  $\alpha_V$  são obtidos através de equações apresentadas em [34] a partir das quais são obtidos os dados da Tabela 3.1 conforme o tipo de polarização linear utilizada (horizontal ou vertical)

As Equações 3.3 e 3.4 também podem ser utilizadas para polarização circular. Neste caso o valor do ângulo  $\tau$  utilizado é 45°.

Para frequências com valores intermediários aos valores apresentados na Tabela 3.1 é possível fazer um processo de interpolação para obter os valores dos coeficientes.

3 - calcular o comprimento efetivo do percurso do enlace  $d_{eff}$ .

A distância efetiva do enlace é um parâmetro utilizado nos cálculos para considerar o fato de que as chuvas ocorrem em regiões delimitadas (denominadas células de chuva) e não estão presentes em todo o percurso do enlace. O cálculo é feito através da Equação 3.5.

$$d_{eff} = d \cdot r \quad (3.5)$$

Onde  $d$  é a distância do enlace

$r$  é um fator de encurtamento da distância e pode ser calculado através da Equação 3.6.

$$r = \frac{1}{1 + d/d_0} \quad (3.6)$$

Onde  $d$  é a distância do enlace em quilômetros

$d_0$  é calculado através da Equação 3.7 se a taxa de chuvas  $R_{0.01}$  for menor ou igual a 100 mm/h.

$$d_0 = 35 \cdot e^{-0,015 R_{0,01}} \tag{3.7}$$

Se  $R_{0,01} > 100$  mm/h, o valor 100 mm/h deve ser usado para a taxa de chuvas  $R_{0,01}$ . Neste caso,  $d_0 = 7,8$  km.

Tabela 3.1 – Coeficientes para cálculo da atenuação específica na faixa de frequências em estudo [34]

Frequência (GHz)	$k_H$	$k_V$	$\alpha_H$	$\alpha_V$
10	0,01217	0,01129	1,2571	1,2156
12	0,02386	0,02455	1,1825	1,1216
15	0,04481	0,05008	1,1233	1,0440
20	0,09164	0,09611	1,0568	0,9847
25	0,1571	0,1533	0,9991	0,9491
30	0,2403	0,2291	0,9485	0,9129
35	0,3374	0,3224	0,9047	0,8761
40	0,4431	0,4274	0,8673	0,8421
45	0,5521	0,5375	0,8355	0,8123
50	0,6600	0,6472	0,8084	0,7871
60	0,8606	0,8515	0,7656	0,7486
66	0,9670	0,9598	0,7458	0,7313

4 – calcular através da Equação 3.8 a atenuação em dB no enlace  $A_{0,01}$  que é excedida em 0,01% do tempo.

$$A_{0,01}(db) = \gamma_R \cdot d_{eff} \tag{3.8}$$

5 – para enlaces localizados em latitudes iguais ou superiores a 30° (norte ou sul), a atenuação excedida para outros percentuais de tempo  $p$  entre 0,001% e 1% pode ser estimada através da Equação 3.9.

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0.12 p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \tag{3.9}$$

Para enlaces localizados em latitudes inferiores a 30° (norte ou sul), a Equação 3.10 é usada na estimativa da atenuação [23].

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = 0.07 p^{-(0.855 + 0.139 \log p)} \quad (3.10)$$

Este procedimento de estimativa da atenuação por chuvas que é recomendado pelo ITU é válido em todas as partes do mundo, pelo menos para frequências até 40 GHz e distâncias até 60 km [23].

Método Pérez-Mello [30]

Analogamente ao método ITU, a atenuação por chuvas é diretamente proporcional à atenuação específica por quilômetro e à distância efetiva do enlace mas no método Pérez-Mello estes parâmetros são determinados para qualquer percentual de tempo  $p$  enquanto o método ITU faz a estimativa para um percentual de tempo de 0,01% e utiliza um fator para extrapolar o valor da atenuação para outros percentuais de tempo.

As etapas do cálculo são apresentadas a seguir.

A atenuação total excedida durante um determinado percentual de tempo  $p$  é dada pela expressão apresentada na Equação 3.11.

$$A_p (db) = \gamma_{R_p} \cdot d_{eff} \quad (3.11)$$

Onde  $\gamma_{R_p}$  é a atenuação específica (dB/km) e é obtida pela expressão da Equação 3.12

$d_{eff}$  é a distância efetiva (km) e é obtida pela expressão da Equação 3.13.

$$\gamma_{R_p} = k \cdot R_p^\alpha \quad (3.12)$$

Onde  $k$  e  $\alpha$  são parâmetros relacionados com a frequência de operação e com o tipo de polarização utilizado. Estes parâmetros são obtidos através da recomendação ITU-R 838 [34].

$$d_{eff} = d \cdot r_p \quad (3.13)$$

Onde  $d$  é a distância em km do enlace

$r_p$  é calculado pela expressão da Equação 3.14.

$$r_p = 3,445 \cdot d^{-0,164} \cdot R_p^b \quad (3.14)$$

Onde  $R_p$  é a taxa de chuvas na região do enlace para um determinado percentual de tempo  $p$

$b$  é calculado pela expressão apresentada na Equação 3.15.

$$b = -0,369 + \frac{0,115}{d} \quad (3.15)$$

Portanto, reescrevendo a Equação 3.11, temos o valor da atenuação total excedida durante um determinado percentual de tempo  $p$  :

$$A_p = 3,445 \cdot k \cdot R_p^{(\alpha - 0,369 + \frac{0,115}{d})} \cdot d^{0,836} \quad (3.16)$$

### 3.1.3. Atenuação diferencial

Conforme apresentado na sub-seção 3.1.2, existem diversos métodos para previsão de atenuação por chuvas em enlaces terrestres. Estes métodos, entretanto, são aplicados a enlaces ponto-a-ponto. Nos casos de enlaces ponto-multiponto, considerações adicionais são necessárias. A distribuição espacial da chuva não é uniforme e, portanto, os sinais dos enlaces convergentes que formam um sistema ponto-multiponto podem ser submetidos a atenuações de diferentes intensidades mesmo que tais enlaces tenham a mesma distância. Isto ocorre em situações em que a precipitação da chuva está localizada no percurso de apenas um dos enlaces.

A diferença entre os valores de atenuação a que são submetidos dois enlaces convergentes é definida como atenuação diferencial.

O fato das chuvas serem distribuídas espacialmente de maneira não uniforme tem grande importância no planejamento de sistemas fixos de acesso sem fio que utilizam topologia ponto-multiponto. Nestes sistemas a área de abrangência do sistema é dividida em áreas menores denominadas células e em cada célula a cobertura é provida por uma estação rádio-base. Conforme será estudado no Capítulo 4, para possibilitar um aumento da capacidade dos sistemas, as mesmas frequências são utilizadas em diferentes células. Devido a este fato, o enlace entre a estação base de uma determinada célula e uma estação assinante localizada dentro da mesma célula forma um enlace convergente com um sinal interferente recebido pela mesma estação base e que foi transmitido por uma estação assinante de outra célula que utiliza a mesma frequência.

Na maioria dos eventos de chuva ocorrerá uma melhora na relação sinal-interferência (S/I) do enlace desejado na estação base uma vez que o percurso do sinal desejado é normalmente menor que o percurso dos sinais interferentes sendo, portanto, sujeito a menos atenuação. Durante pequenos percentuais de tempo, entretanto, poderá ocorrer a degradação da relação sinal-interferência devido a eventos de chuvas localizados apenas no percurso do sinal desejado, conforme ilustrado na Figura 3.4. Neste caso, dependendo da intensidade da chuva, o sinal desejado pode ser submetido a atenuações maiores que os sinais interferentes podendo levar à indisponibilidade do enlace desejado.

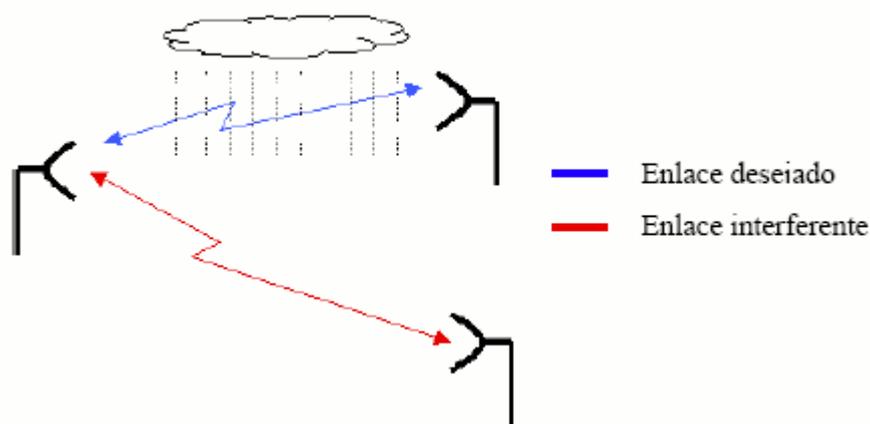


Figura 3.4 – Situação de atenuação diferencial por chuvas [22].

Se a atenuação diferencial for alta, a discriminação das antenas pode também ser insuficiente para recepção apropriada quando diferentes polarizações

são utilizadas em setores vizinhos [35] pois o sinal desejado pode sofrer uma atenuação tão significativa que um sinal interferente, mesmo usando outra polarização, acaba sendo recebido pela antena.

Uma previsão precisa da atenuação diferencial, portanto, é fundamental para prevenir ou minimizar os efeitos das interferências durante a ocorrência de chuvas em regiões cobertas por sistemas rádio ponto-multiponto.

Um modelo empírico de previsão de atenuação diferencial foi proposto a partir de testes experimentais em enlaces localizados em duas cidades no Brasil em frequências de 15, 18, 23 e 38 GHz [23, 35].

A expressão obtida para a previsão da distribuição de probabilidade cumulativa de atenuação diferencial para dois enlaces A e B está apresentada na Equação 3.17.

$$A_{AB}(p) = [A_A(p) - 0,34 A_B(p)] \cdot (2,65 \cdot |\theta|^{0,23} + 0,004 \cdot |\Delta d|^{2,25}) \cdot f^{-0,4} \quad (3.17)$$

Onde  $\theta$  (rad) é o ângulo entre os enlaces

$\Delta d$  (km) é a diferença entre as distâncias dos enlaces

$f$  (GHz) é a frequência

$A_A$  e  $A_B$  são, respectivamente, as atenuações dos enlaces A e B excedidas durante o percentual de tempo  $p$ .

Outros modelos de previsão de atenuação diferencial foram propostos em [36] e [37].

### 3.1.4.

#### **Varição nos ângulos de partida e chegada das ondas**

Variações anormais no índice de refração da atmosfera ao longo do enlace podem causar variação nos ângulos de partida e chegada das ondas transmitidas e recebidas. Esta variação é independente da frequência e ocorre no plano vertical das antenas. A faixa de variação dos ângulos é maior em regiões costeiras úmidas do que em regiões mais interiores e secas mas nenhuma variação significativa é observada durante condições de ocorrência de chuvas [23].

Este efeito é particularmente importante em enlaces com antenas de alto ganho e feixe estreito (que são as antenas especificadas pelo padrão IEEE 802.16

para uso nas estações assinantes) pois podem ocorrer desvanecimentos quando ocorrerem variações nos ângulos.

Sendo assim, nos enlaces em que as estações assinantes estiverem localizadas nas regiões onde a variação do índice de refração da atmosfera é mais acentuada é importante verificar o alinhamento das antenas frequentemente.

### 3.1.5. Desvanecimentos por outros mecanismos

Alguns mecanismos de desvanecimento causados por camadas muito refrativas da atmosfera podem ser considerados no planejamento dos enlaces em condições de céu claro: espalhamento de feixe (desfocalização), multipercurso de superfície e multipercurso atmosférico. Estes mecanismos podem ocorrer isoladamente ou combinados entre si.

Desvanecimento por cintilação devido a irregularidades em menor escala na atmosfera está sempre presente em conjunto com estes mecanismos e deve ser considerado nos casos de frequências superiores a 40 GHz [23].

Os efeitos destes desvanecimentos são analisados na recomendação ITU-R P.530 [23] e podem ser incluídos no planejamento dos enlaces. Conforme esta recomendação do ITU é possível calcular o percentual de tempo em que um desvanecimento excederá um valor pré-determinado no mês de pior média.

### 3.2. Cálculo da atenuação total na propagação

Considerando os principais fatores causadores de perdas considerados neste estudo, a atenuação total em um enlace na faixa de frequências entre 10 e 66 GHz é a soma da atenuação em espaço livre com as atenuações por chuvas e por gases atmosféricos e vapor de água podendo ser estimada através da expressão da Equação 3.18.

$$A_{total}(dB) = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d + A_{gv} + A_{ch} \quad (3.18)$$

Onde  $d$  (km) é a distância do enlace

$f$  (GHz) é frequência de operação

$A_{gv}$  (dB) é a atenuação causada por gases atmosféricos e vapor de água

$A_{ch}$  (dB) é a atenuação causada por chuvas

### 3.3.

#### **Redução na discriminação da polarização cruzada (XPD)**

Conforme foi apresentado na sub-seção 3.1.2, as gotas de chuvas apresentam o formato de um esferóide oblato durante a queda devido à resistência do ar e podem sofrer uma rotação devido à ação dos ventos. Por causa desta assimetria, os componentes horizontais e verticais das ondas eletromagnéticas propagadas podem sofrer diferentes atenuações resultando em rotação da polarização ou despolarização.

A redução da discriminação da polarização cruzada (*Cross-Polarization Discrimination* – XPD) pode levar à ocorrência de interferências co-canal ou, menos frequentemente, interferência de canal adjacente e pode ocorrer em situações de céu claro ou de chuva [23].

Nas situações de céu claro a redução da discriminação está relacionada com os multipercursos que não estão considerados neste estudo.

As estatísticas de despolarização das ondas eletromagnéticas durante a ocorrência de chuvas podem ser estimadas através de método proposto em [38].

Testes realizados no Rio de Janeiro com um enlace ponto-a-ponto na frequência de 28 GHz e distância de 2,98 km mostraram, entretanto, que os valores de discriminação de polarização cruzada (XPD) apresentaram poucas variações durante todo o período de medidas, mesmo durante a ocorrência de chuva no percurso de propagação. Ainda que não tenham ocorrido condições extremas de chuvas, os resultados indicam que para enlaces curtos a despolarização não deve afetar significativamente o desempenho do sistema [39].