

## 6

### A indisponibilidade do enlace desejado

O cálculo de indisponibilidade devida à chuva foi a motivação da presente dissertação, cujo objetivo principal é o desenvolvimento de modelo teórico para a determinação da distribuição cumulativa da atenuação diferencial entre dois enlaces convergentes. Desenvolvemos neste capítulo um cálculo teoricamente exato para a estimativa do efeito da atenuação diferencial devida à chuva na indisponibilidade de um enlace, supondo a existência de apenas dois enlaces convergentes. No caso de três ou mais enlaces convergentes, desenvolvemos um cálculo teórico conservador (resultado maior que o real) e indicaremos um método exato (a extensão do modelo de Misme e Fimbel para múltiplos enlaces).

Neste capítulo, mostraremos como obter a distribuição da relação C/I entre as potências do sinal desejado e interferente e o valor da indisponibilidade do enlace desejado a partir da distribuição cumulativa da atenuação diferencial.

Apresentamos algumas definições:

- **Indisponibilidade:** para as necessidades da presente dissertação, um enlace será considerado indisponível se um requisito pré-determinado não for atingido.
- **Limiar de recepção de um receptor:** valor da potência recebida ao atingir este requisito. Em geral, este limiar corresponde à soma da potência de ruído térmico (presente no receptor), da potência do sinal interferente e de uma parcela característica da modulação. Casos particulares podem ser definidos na ausência de interferência ou quando a potência do ruído térmico for desprezível em comparação à potência do sinal interferente.
- **Margem de desvanecimento (ou margem de fading):** diferença entre o nível nominal recebido e o limiar de recepção.

Na determinação da indisponibilidade, estudaremos quatro casos:

1. Um caso meramente teórico, em que não há interferências, sendo então considerado o apenas o ruído térmico. Este caso é útil no entendimento do conceito de indisponibilidade.
2. O atual modelo de dois enlaces convergentes (desejado e interferente). Não é considerado o ruído térmico, cuja potência será suposta inferior à potência do sinal interferente em, pelo menos, 10 decibéis.
3. Além dos dois enlaces convergentes, será considerada a existência de outras contribuições significativas como o ruído térmico e a interferência fixa de outros enlaces (não sujeitos, teoricamente, à atenuação por chuva que afeta o enlace desejado).

Além dos dois enlaces convergentes, será considerada a existência de interferência de outros enlaces convergentes, sujeitos à atenuação por chuva (que afeta o enlace desejado). Não é considerado o ruído térmico.

### 6.1. Ruído térmico

Na ausência de interferência, a indisponibilidade ocorre quando a atenuação no enlace supera a margem de desvanecimento, de modo que em relação ao ruído térmico

$$\Pr\{\text{Indisponibilidade}\} = \Pr\{a > M\} \quad (6.1)$$

Nesta equação,  $a$  é a atenuação devida à chuva no enlace e  $M$  (dB) é a margem de desvanecimento em relação ao ruído térmico. Observamos que este caso pode incluir, também, aquele em que a interferência é fixa (não é afetada pela chuva, em um modelo teórico simplista). Haverá uma conjugação entre o ruído e a interferência fixa (soma em potência) e, conseqüentemente, haverá uma elevação do limiar de recepção e uma diminuição (degradação) da margem de desvanecimento. Este modelo teórico simplista é aquele geralmente utilizado no cálculo de indisponibilidade.

## 6.2. Efeito da atenuação diferencial devida à chuva sobre a indisponibilidade de um enlace

Para o segundo caso, consideramos somente o efeito da atenuação diferencial devida à chuva por intermédio do atual modelo de dois enlaces convergentes (desejado e interferente). Não é considerado o ruído térmico, cuja potência será suposta inferior à potência do sinal interferente em, pelo menos, 10 decibéis. Não será considerado, também, o efeito direto da atenuação devida à chuva sobre o enlace desejado. Este efeito, intensamente estudado, causa indisponibilidade quando a potência do sinal do enlace desejado tornar-se inferior ao correspondente limiar de recepção. Esta seção apresenta as características da relação  $C/I$  (dB) entre as potências dos sinais desejado e interferente, supondo a existência de apenas dois enlaces convergentes de 8 km de comprimento operando na frequência de 15 GHz sob as condições climáticas da região de São Paulo. O primeiro procedimento de cálculo analisado é conservador e considera a atenuação  $A_d$  (dB) devida à chuva no enlace desejado e despreza a atenuação  $A_i$  (dB) no enlace interferente, de modo que a relação  $C/I$  pode ser apresentada na forma  $C/I = (C/I)_o - A_d$ . O segundo procedimento é realista e considera ambas as atenuações, de modo que a relação  $C/I$  pode ser apresentada na forma  $C/I = (C/I)_o - (A_d - A_i) = (C/I)_o - A_{dif}$ . Em ambas as expressões,  $(C/I)_o$  representa o valor nominal da relação  $C/I$ , existente em condições de céu claro e supondo a utilização de equipamentos iguais nos lances desejado e interferente. Foram considerados os valores de 50 dB, 45 dB e 40 dB para a relação  $(C/I)_o$ , correspondentes à discriminação co-polar da antena Andrew VHLP4-142 (de alta qualidade) para os ângulos de discriminação de 50°, 20°, 12°, respectivamente. Tanto  $A_d$  quanto a atenuação diferencial  $A_{dif} = A_d - A_i$  são consideradas variáveis aleatórias, cujas distribuições cumulativas foram determinadas pelos modelos descritos nos capítulos 3 e 4, considerando os ângulos de discriminação, quando aplicável. A partir dos resultados obtidos e das expressões apresentadas acima, a distribuição cumulativa da relação  $C/I$  foi obtida para cada procedimento e valor de  $(C/I)_o$ . A Figura 6.1 apresenta um conjunto de três distribuições cumulativas da relação  $C/I$  para cada procedimento. O primeiro conjunto (à direita, usando linhas tracejadas), corresponde ao procedimento conservador, que supõe que o enlace

interferente não sofre atenuação devida à chuva. O segundo conjunto (à esquerda, usando linhas contínuas) corresponde ao procedimento realista, que considera a atenuação devida à chuva em ambos os enlaces. Os resultados indicam que, para o mesmo valor da relação  $(C/I)_0$  (ou, equivalentemente, da separação angular entre os enlaces), a percentagem de tempo em que um determinado nível da relação  $C/I$  não é excedido é sempre maior quando calculada pelo procedimento conservador.

Para avaliar o impacto dos procedimentos descritos acima na determinação do efeito da chuva sobre a indisponibilidade de um enlace e sobre a eficiência na utilização do espectro eletromagnético, será suposto que, desprezando-se os efeitos do ruído térmico, um enlace está indisponível quando  $C/I = 20$  dB. Como critério de qualidade para o dimensionamento do enlace, exige-se que, devido à chuva, a indisponibilidade ocorra, no máximo, durante 0,01 % do tempo (isto é, durante 53 minutos do ano médio). Com base no procedimento conservador e considerando a possibilidade de outras interferências, seria necessário dimensionar o enlace com a margem de 50 dB e evitar a reutilização da mesma frequência em enlaces com separações angulares inferiores a  $50^\circ$ . Portanto, apenas seis enlaces convergentes na estação central poderiam compartilhar a mesma frequência na mesma polarização. Por outro lado, com base no procedimento realista e mesmo considerando a possibilidade de outras interferências, seria possível dimensionar o enlace com a margem de 40 dB e reutilizar a mesma frequência em enlaces com separações angulares iguais a  $12^\circ$ . Portanto, cerca de trinta enlaces convergentes na estação central poderiam compartilhar a mesma frequência na mesma polarização.

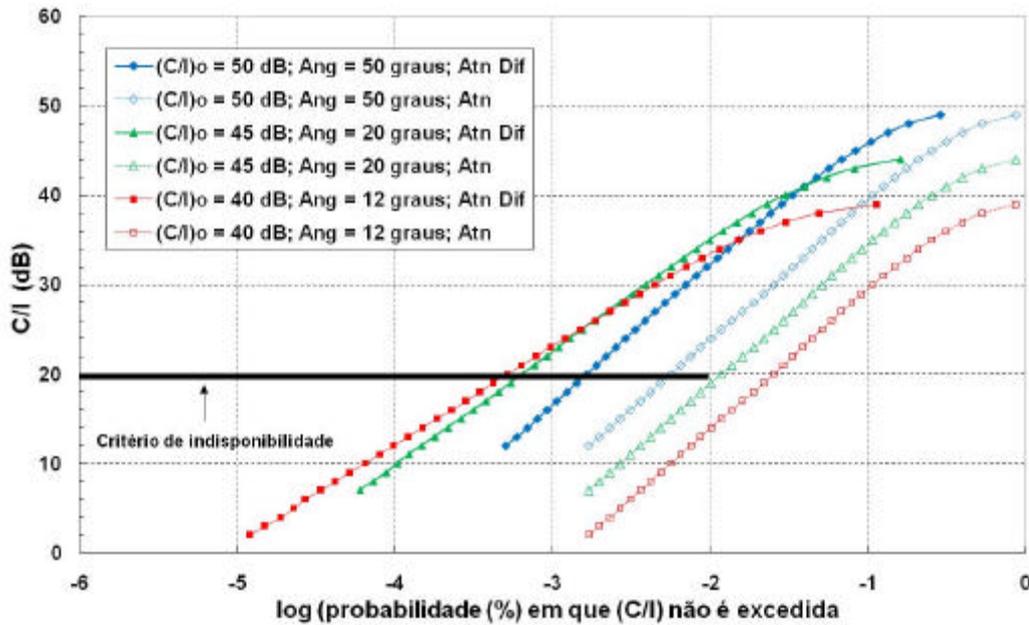


Figura 6.1 - Distribuições cumulativas da relação C/I de acordo com os procedimentos conservador (curvas tracejadas com símbolos ocios, obtidas considerando apenas a atenuação no enlace desejado) e realista (curvas contínuas com símbolos cheios, obtidas considerando a atenuação diferencial entre os dois enlaces), para três valores da relação  $(C/I)_0$  ou, equivalentemente, da separação angular entre os enlaces

A indisponibilidade ocorre quando a Atenuação diferencial entre os enlaces supera a margem de desvanecimento (em relação à interferência).

Probabilidade (ocorrência de indisponibilidade) = Probabilidade (atenuação diferencial  $> A_0$ ) = Probabilidade ( $a_1 - a_2 > A_0$ );  $A_0$  = margem de desvanecimento em relação à interferência, Atenuação diferencial =  $(a_1 - a_2)$ .

Observamos que neste caso (em relação ao caso sem interferência), simplesmente substituímos o ruído térmico pela interferência, e a atenuação no enlace desejado pela atenuação diferencial (positiva). A margem de desvanecimento “ $A_0$ ” se refere a um limiar de recepção provocado pela interferência (e não pelo ruído térmico).

Exemplificando, para Atenuação diferencial = 30 dB, haverá inúmeros pares de atenuações  $\{A(1)/A(2)\}$  que satisfarão este valor, provocando indisponibilidade :

{30dB/0dB}, {40dB/10dB}, {50dB/20dB}....

Na figura 6.2 (conforme estudado no capítulo 4), a indisponibilidade corresponde à integração da função densidade de probabilidade  $f(a_1, a_2)$  na região acima da reta  $a_1 - a_2 = A_0$ , onde “ $A_0$ ” é a margem de desvanecimento do enlace desejado, relativamente à interferência (provocada pelo enlace interferente).

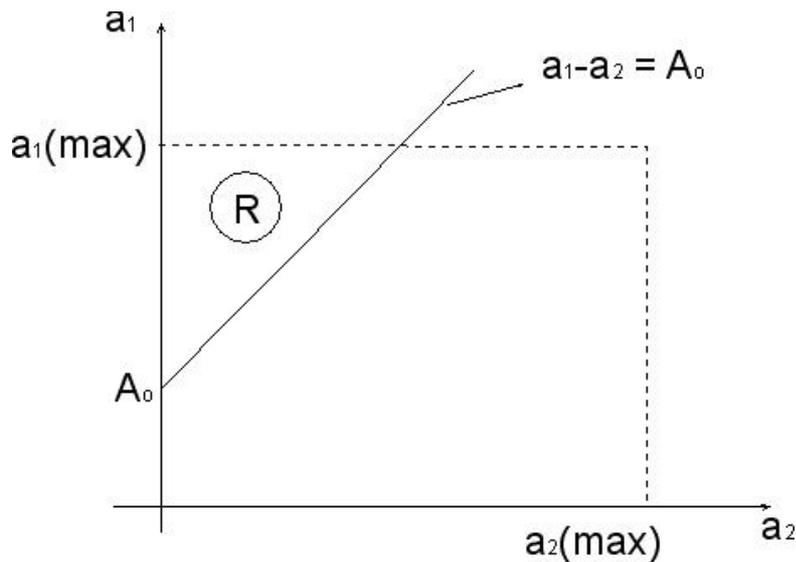


Figura 6.2 - O cálculo de indisponibilidade corresponde à integração da função densidade de probabilidade, na região de interesse (R).

### 6.3. Dois enlaces convergentes juntamente com ruído térmico e interferência fixa de outros enlaces

Para o terceiro caso, consideramos, além dos dois enlaces convergentes, a existência de outras contribuições significativas como o ruído térmico e a interferência fixa de outros enlaces.

Como vimos no primeiro caso (não há interferências), haverá indisponibilidade quando a atenuação no enlace desejado superar a margem de fading (agora denominada  $A_{th}$ : atenuação necessária para provocar indisponibilidade, por ruído térmico).

No presente caso, haverá uma indisponibilidade adicional (em relação ao segundo caso), correspondente à região  $R_2$  (veja figura 6.3), que é situada abaixo da reta ( $a_1 - a_2 = A_0$ ) e acima da reta horizontal  $a_1 = A_{th}$ .

A figura 6.3 ilustra o caso. Observamos que a indisponibilidade desejada corresponde à integração na região R (calculado pela distribuição de atenuação diferencial) mais a integração na região  $R_2$ .

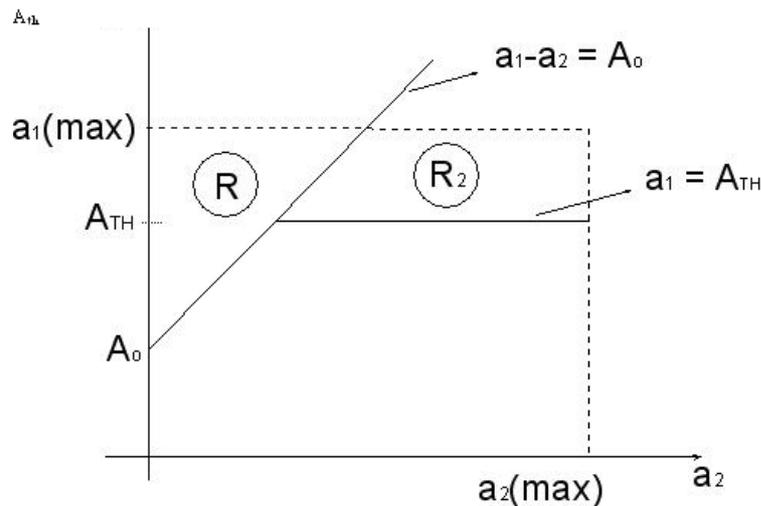


Figura 6.3 - Indisponibilidade no caso do ruído térmico ser significativo face à interferência. Além da região (R), integramos a f.d.p na região ( $R_2$ ), situada acima da reta  $a_1 = A_{th}$ , e simultaneamente abaixo da reta  $a_1 - a_2 = A_0$ .

Observamos que a indisponibilidade por ruído térmico corresponde à integração em toda a região acima da reta horizontal  $a_1 = A_{th}$ , portanto é maior que a indisponibilidade correspondente à região  $R_2$ . Uma maneira de calcular a indisponibilidade devida à soma das regiões R e  $R_2$  é considerar duas parcelas: a primeira parcela considera toda a região acima da reta horizontal  $a_1 = A_{th}$  (corresponde à indisponibilidade por ruído térmico), a segunda parcela correspondente à região acima da reta ( $a_1 - a_2 = A_0$ ), porém abaixo do valor  $a_1 = A_{th}$ . Esta última parcela é facilmente obtida calculando-se a atenuação diferencial, agora com o valor de atenuação máxima de ( $a_1$ ) alterado para  $(a_1)_{Max} = A_{th}$ .

Observamos que no caso de  $A_{th}$  ser muito maior que  $A_o$  ( pelo menos 10 dB), é desprezível a contribuição da região ( $R_2$ ). Isto é motivado pelo formato da função  $F(a_1, a_2)$  distribuição cumulativa das atenuações ( $a_1, a_2$ ) ser decrescente conforme nos afastamos da origem (e geralmente fortemente decrescente).

#### 6.4. Múltiplos enlaces convergentes sujeitos a atenuação devida à chuva

Para o quarto caso consideramos, além dos dois enlaces convergentes, a existência de outros enlaces convergentes, também sujeitos à atenuação por chuva. Mostramos um cálculo de indisponibilidade pessimista (resultado maior que o real). O cálculo exato é indicado e sugerido para ser desenvolvido em próximos trabalhos.

Trataremos do caso particular de três enlaces convergentes, a generalização é óbvia. Consideremos o enlace desejado  $L_1$ , interferido pelos enlaces convergentes interferentes  $L_2$  e  $L_3$ .

Um cálculo de indisponibilidade pessimista (valor maior que a real), é simplesmente somar as indisponibilidades geradas por cada par de enlaces (notaremos indisponibilidade como “indisp”):

$$\text{Indisp total (1-2,3)} = \text{indisp (1-2)} + \text{indisp (1-3)};$$

$$\text{Onde indisp (1-2)} = \text{atenuação diferencial (a1-a2 > A}_{o2}\text{)}$$

$$\text{indisp (1-3)} = \text{atenuação diferencial (a1-a2 > A}_{o3}\text{)}$$

Ocorre que ao somarmos as duas indisponibilidades, estamos contabilizando duplamente um tipo de evento que afeta ambos pares de enlaces. Para um cálculo exato de indisponibilidade, é necessário subtrair esta probabilidade de ocorrência comum. Ao considerarmos o lugar geométrico de Misme e Fimbel de cada enlace, esta parcela subtrativa corresponde à área comum aos três enlaces (e de modo geral, a “n” enlaces). Fica como sugestão para próximos desenvolvimentos, para o cálculo da indisponibilidade exata.

Observamos que o método de simplesmente somar as indisponibilidades dos vários pares de enlaces, embora aproximado e pessimista (o que é bom para o projetista), é mais exato que o cálculo geralmente utilizado atualmente (super

pessimista), que simplesmente despreza a atenuação de chuva dos enlaces interferentes.

A indisponibilidade total do enlace desejado (valor pessimista, superdimensionado), considerando as três interferências nos ângulos acima, pode ser simplesmente obtida, somando-se as três indisponibilidades, correspondentes ao cruzamento a reta horizontal  $(C/I)=20$  dB. Veja exemplo em 6.2.1.

#### 6.4.1.

#### **Um exemplo de cálculo de indisponibilidade para três enlaces interferentes, convergentes com o enlace desejado, formando ângulos de 12°, 20° e 50° (considera os dados do item 6.2)**

No primeiro caso consideramos o conjunto de curvas à direita (somente o enlace desejado é atenuado pela chuva). As interferências são consideradas constantes.

Fixada a maior interferência como referência ( $C/I=40$  dB, ângulo de 12°), as outras interferências ( $C/I=45$  dB e  $C/I=50$  dB) estarão 5 dB e 10 dB abaixo da referência. Elas se somarão à interferência de referência, provocando uma degradação na margem de desvanecimento, que é calculado pela fórmula abaixo (para interferências situadas (A, B, C...) dB, abaixo da referência): Degradação (dB) =  $10\log(1 + 10^{-A/10} + 10^{-B/10} + 10^{-C/10} + \dots)$ .

No caso temos Degradação (dB) =  $10\log(1 + 10^{-5/10} + 10^{-10/10}) = 10\log(1.60) = 2.04$  dB. Considerando uma degradação de margem de desvanecimento de 2dB, temos uma nova curva  $(C/I)_{total} = (C/I)_{38}$  dB correspondente à curva  $(C/I)_{40}$  dB, deslocada 2 dB para baixo. Ora isto equivale em elevar o limiar em 2 dB, ou seja elevar o critério de indisponibilidade de 20 dB para 22 dB. Este novo critério de indisponibilidade (22dB) aplicado à curva de referência (( $C/I$ ) 40 dB, ângulo de 12°), finalmente, leva à indisponibilidade total = 0,0335%.

No segundo caso consideramos o conjunto de curvas à esquerda (todos os enlaces são atenuados pela chuva, considerando a atenuação diferencial). Utilizaremos um cálculo de indisponibilidade total pessimista (superdimensionado), que soma as indisponibilidades referentes aos três pares de enlaces (a rigor seria necessário diminuir a ocorrência de eventos comuns). A

partir do gráfico obtemos os seguintes valores de indisponibilidade (%), para os ângulos acima:  $10^{-3.284}$ ,  $10^{-3.187}$ ,  $10^{-2.781}$ .

Ocorre que, como veremos no capítulo 6, os valores medidos são maiores que os valores calculados. As curvas referentes aos valores medidos estão no máximo 10 dB acima (não incluindo o enlace de 43 km), quanto à atenuação diferencial. As curvas referentes aos valores medidos estão no máximo meia década à direita, quanto à probabilidade (ou seja, meia década maior), considerando a região com probabilidade menor que  $10^{-2}$  %.

Então considerando um cálculo de indisponibilidade super-dimensionado (o que é bom para o projetista), aumentaremos em meia década cada um dos três valores acima.

Os valores (em %)  $10^{-3.284}$ ,  $10^{-3.187}$ ,  $10^{-2.781}$ , majorados de meia década (somar 0.5 a expoente) passam a ser  $10^{-2.784}$ ,  $10^{-2.687}$ ,  $10^{-2.281}$ , que somados fornecem o valor da indisponibilidade total = 0.0122% (valor bem menor que o valor encontrado no primeiro caso 0.0335%). Verificamos então, neste exemplo, que o método de somar as indisponibilidades, calculadas considerando-se a distribuição de atenuação diferencial entre os enlaces, mesmo majorada de meia década de probabilidade, leva a um valor de indisponibilidade total menor (melhor) que o calculado pelo método que só considera atenuação de chuva no enlace desejado (geralmente utilizado atualmente).

Observamos que no caso de majorarmos uma determinada parcela de indisponibilidade, esta superar a indisponibilidade do caso anterior (a chuva só ocorre no enlace desejado), esta última é que deve ser considerada. Refizemos os cálculos considerando um caso mais pessimista, a majoração de uma década, e chegamos a um valor de indisponibilidade total (%) =  $10^{-2.284} + 10^{-2.187} + 10^{-2.251} = 0,0173$  (na terceira parcela utilizamos o critério apontado na frase anterior, correspondente á indisponibilidade da curva referente ao ângulo de 50°).