

## 5

### Comparações entre resultados teóricos e experimentais e previsões do modelo

Neste capítulo, são comparados, numa mesma figura, resultados obtidos por intermédio do modelo e resultados experimentais. Cada par de enlaces, representados na Figura 5.1, gera duas distribuições cumulativas de cada tipo, correspondentes às diferenças entre as atenuações nos enlaces AB (desejado) e AC (interferente) e entre as atenuações nos enlaces AC (desejado) e AB (interferente). Assim, uma figura apresenta quatro gráficos.

Lembramos que a atenuação diferencial é definida como a diferença (quando positiva) entre a atenuação do enlace desejado e a atenuação do enlace interferente. Quando esta diferença for negativa, o simétrico (positivo) deste valor será contabilizado na distribuição do par de enlaces apresentados na ordem inversa da anterior.

#### 5.1.

#### Comparação com medidas efetuadas em São Paulo na faixa de 15 GHz

Fizemos a comparação dos resultados do modelo com os resultados provenientes de medidas feitas pelo CETUC/PUC-Rio em São Paulo, em pares de enlaces convergentes da Embratel. Foram utilizados seis pares de enlaces formados a partir da combinação dos quatro enlaces de comprimentos iguais a 12,8 km, 12,8 km, 21,7 km e 41,3 km observados na Figura 3.2. Nos cálculos, utilizamos os valores  $d_0 = 7$  km e  $\beta = 0,4$  para os parâmetros relativos ao diâmetro da célula de chuva, conforme calculado e apresentado no item 3.2. As Figuras 5.1 a 5.6 apresentam os resultados relativos aos seis pares de enlaces.

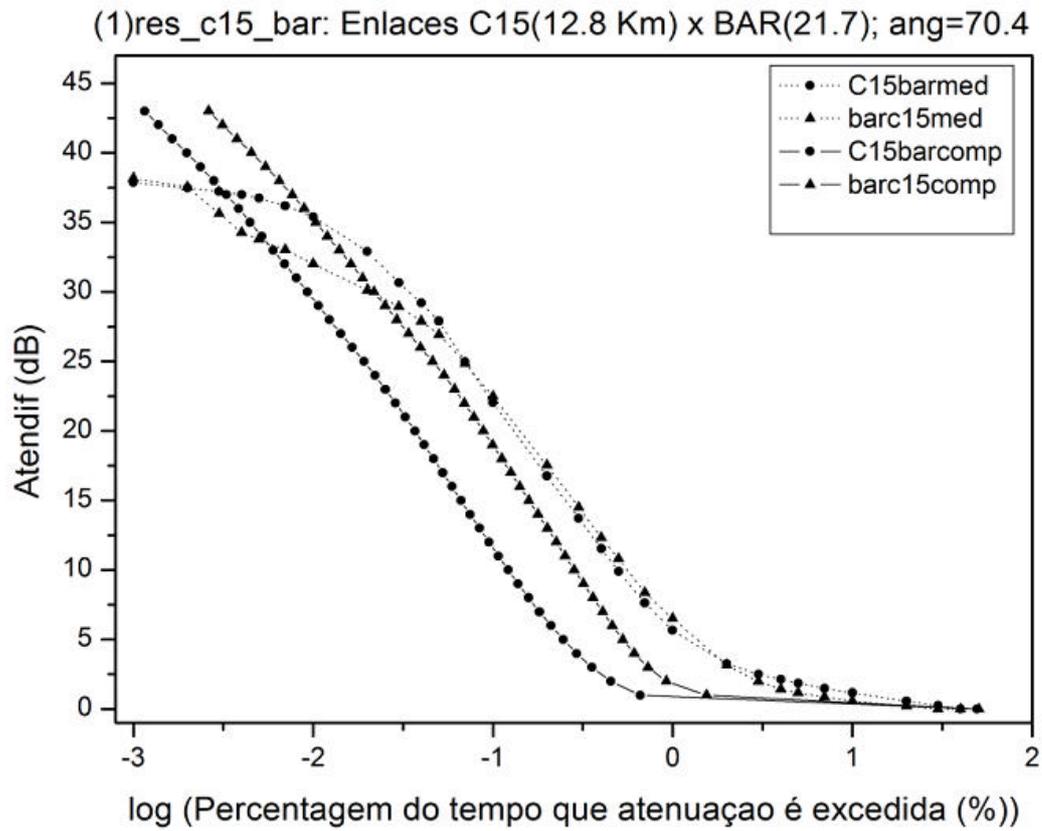


Figura 5.1 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces C15 (12,8 km) e BAR (21,7 km), que formam o ângulo de 70,4°

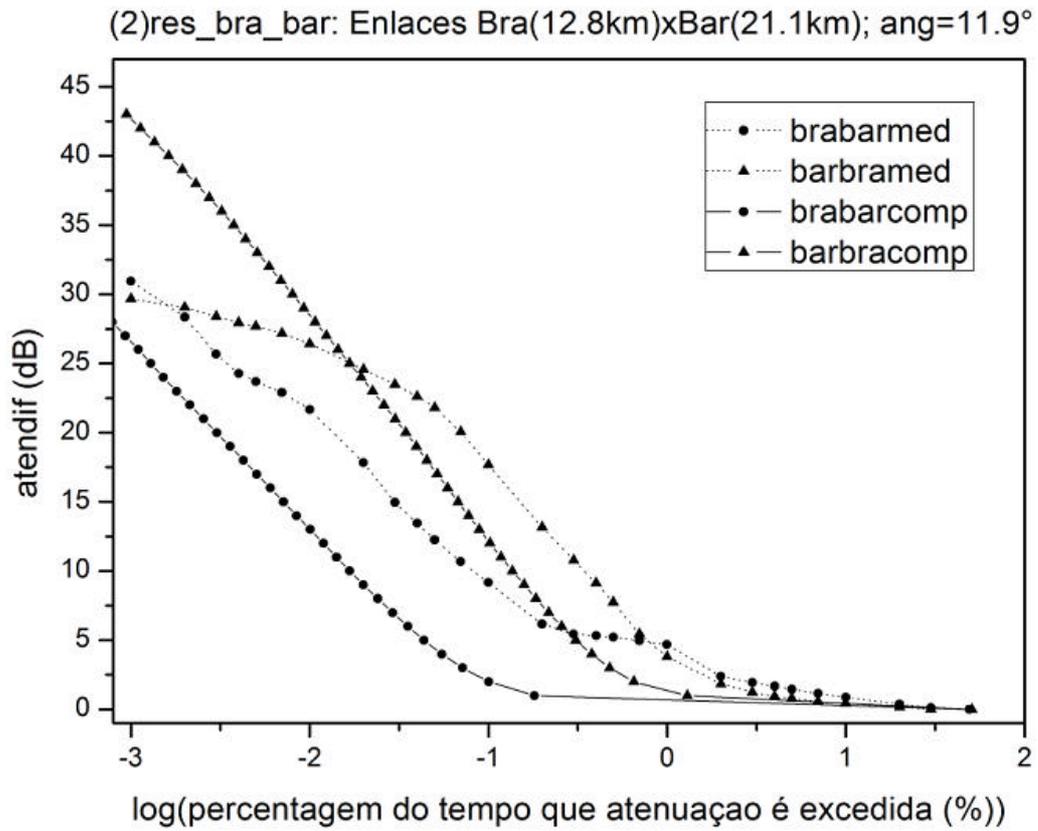


Figura 5.2 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces BRA (12,8 km) e BAR (21,7 km), que formam o ângulo de 11,9°

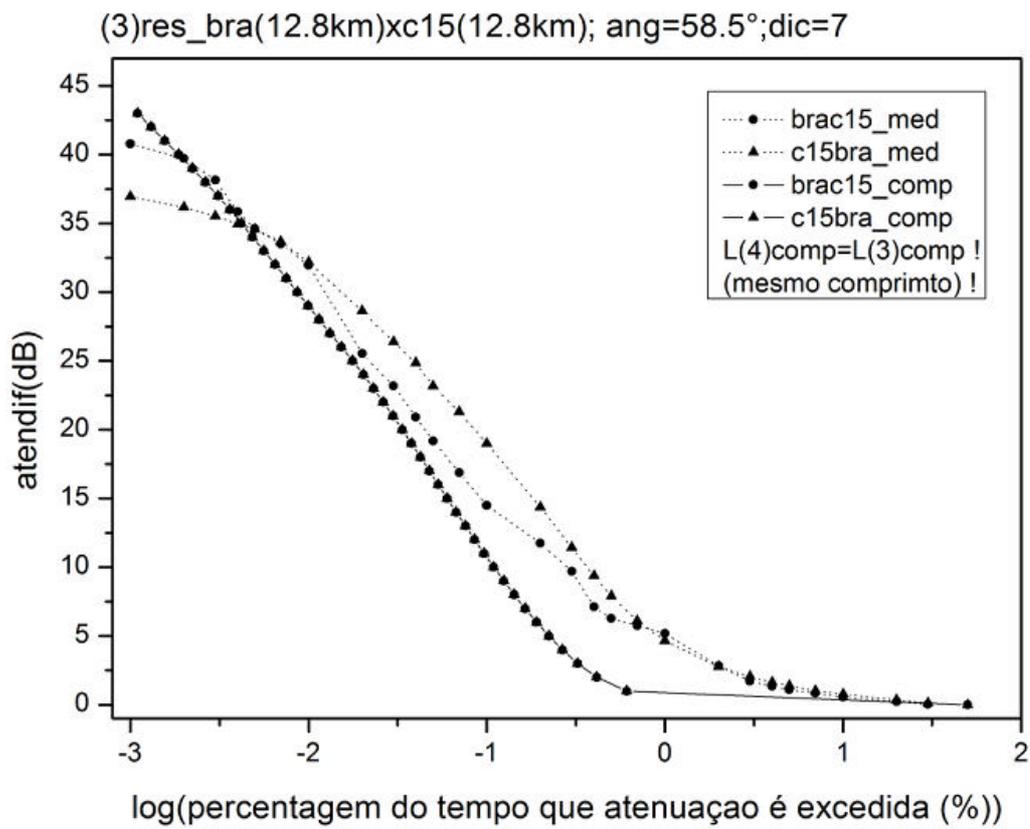


Figura 5.3 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces BRA (12,8 km) e C15 (12,8 km), que formam o ângulo de 58,5°

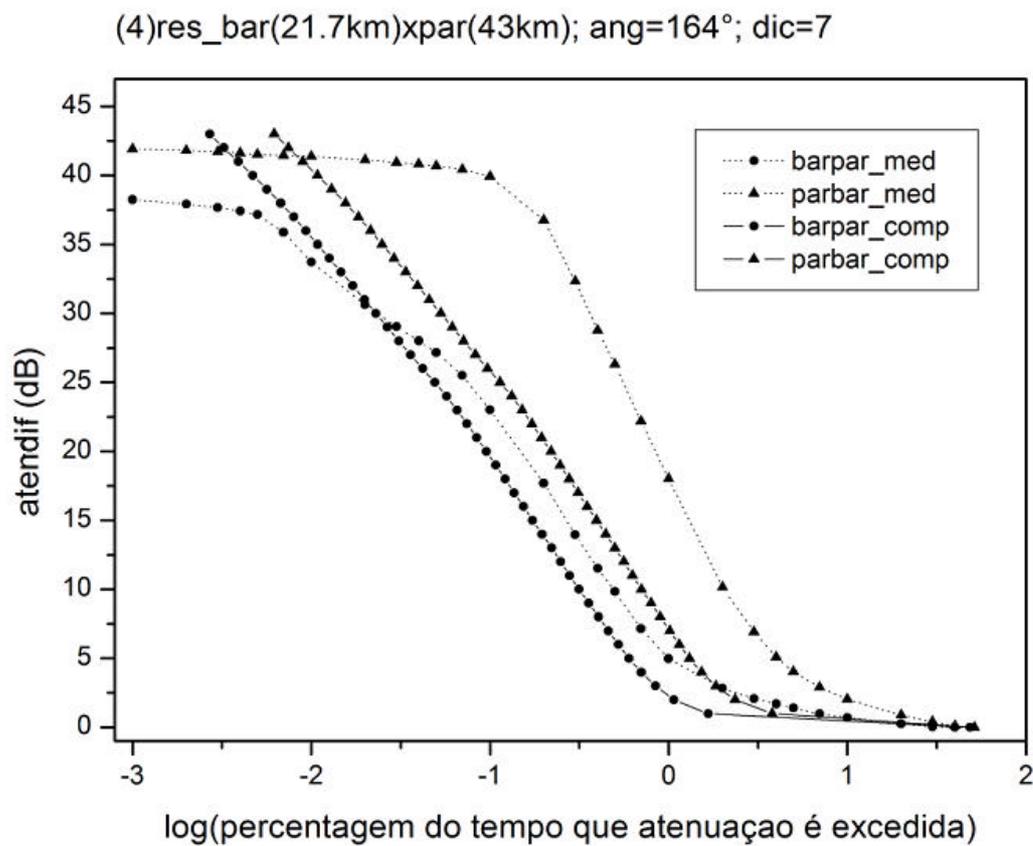


Figura 5.4 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces BAR (21,7 km) e PAR (41,3 km), que formam o ângulo de 164°

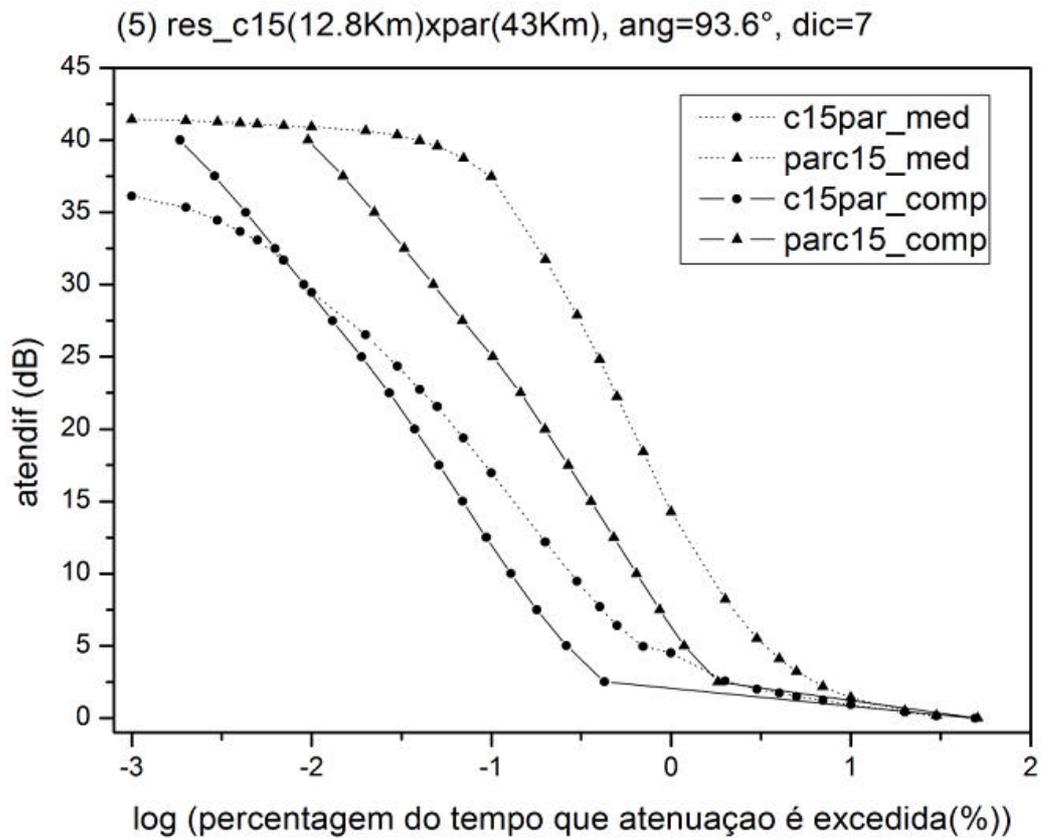


Figura 5.5 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces C15 (12,8 km) e PAR (43 km), que formam o ângulo de 93,6°

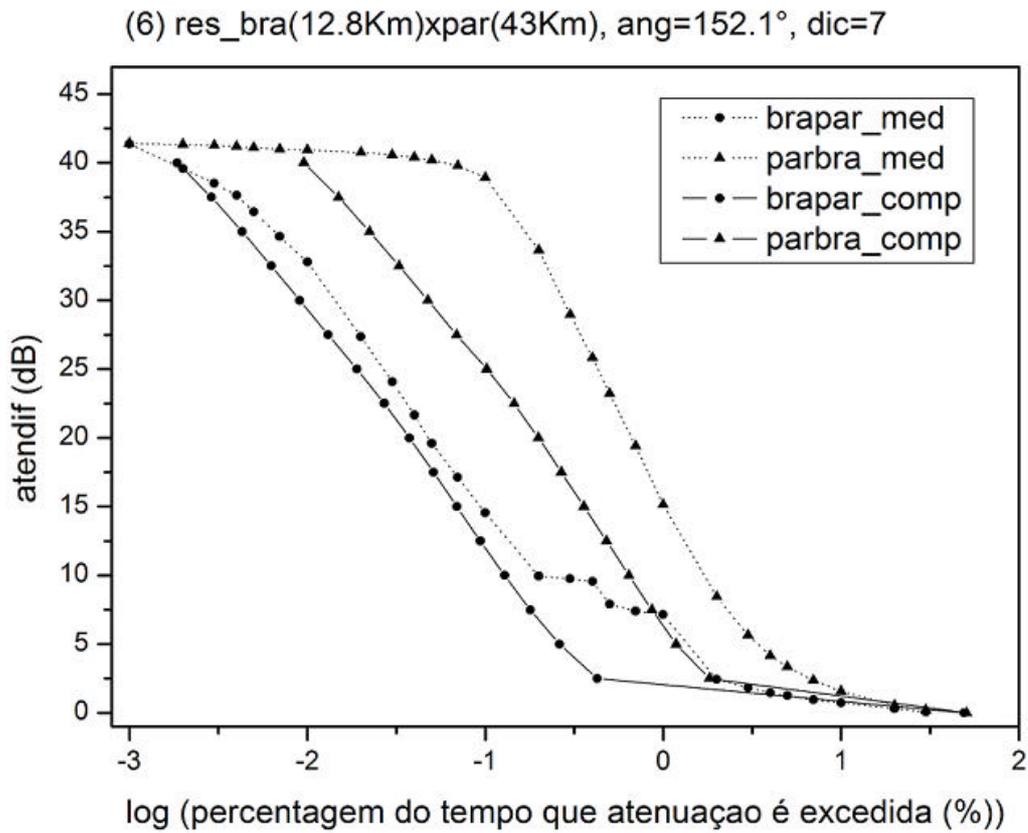


Figura 5.6 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces BRA (12,8 km) e PAR (43 km), que formam o ângulo de 152°

Notamos, para um valor fixo de probabilidade, que os valores medidos possuem atenuação diferencial maior que os resultados calculados, sendo a diferença inferior a cerca de 5 a 10 dB (e inferiores a 15 dB, quando é envolvido o enlace de 41,3 km). Isto ocorre para probabilidades situadas no intervalo compreendido entre 0,01 % e 3%, sendo quase paralelas as curvas referentes aos valores calculados e medidos. Acima da probabilidade de 10%, as curvas medidas e calculadas tendem a se igualar. Em torno da probabilidade de 0.01%, as duas curvas se cruzam. Isto é explicado pela ocorrência de uma saturação da atenuação diferencial medida em torno de 30 a 40 dB, decorrente da limitação física do receptor, que atinge o seu limiar de recepção para atenuações desta ordem de grandeza.

Conforme detalhado na seção 3.2, o valor  $d_0 = 7$  km para o parâmetro que relaciona o diâmetro da célula de chuva à taxa de precipitação é um valor efetivo, não representado uma realidade física. Este parâmetro foi obtido pelo ajuste, descrito na mesma seção, realizado para reproduzir os valores elevados de atenuação, de até 35 dB, encontrados nos enlaces utilizados na região de São Paulo (comprimentos de 12 km a 43 km). Os valores medidos com o auxílio de radares para os diâmetros de células de chuva em regiões de clima temperado se situam na faixa de 2 km a 4 km. Esta diferença indica que os valores elevados de atenuação observados nos referidos enlaces podem ter sido provocados pela ocorrência simultânea de duas células de chuva no enlace ou por valores diferentes para os parâmetros da expressão (3.1).

Observamos que variações nos valores da atenuação diferencial poderiam ser explicadas a partir dos argumentos apresentados a seguir. Em alguns eventos, a ocorrência simultânea de duas células de chuva provocaria maior atenuação no enlace desejado e, conseqüentemente, um aumento na atenuação diferencial. Em outros eventos, a ocorrência simultânea de duas células de chuva provocaria maior atenuação no enlace interferente e, conseqüentemente uma diminuição na atenuação diferencial. Em parte destas ocorrências, o aumento de atenuação poderia ser de tal magnitude que tornaria negativa a atenuação diferencial. Os efeitos destes eventos seriam contabilizados na distribuição do par de enlaces apresentados na ordem inversa. Os efeitos globais da combinação destes eventos sobre a distribuição cumulativa da atenuação diferencial devem ser avaliados por

intermédio da generalização do modelo descrito no capítulo anterior, para considerar a ocorrência de múltiplas células.

Observamos que as discrepâncias observadas ocorrem para probabilidades menores, quando a intensidade de chuva é maior e o diâmetro da célula de chuva é menor. A ocorrência de um diâmetro de chuva menor é fisicamente favorável ao aumento da probabilidade de ocorrência simultânea de duas células de chuva no enlace. A maior discrepância (de até 15 dB) nos pares de enlaces que envolvem o lance mais longo (com comprimento de 43 km) poderia ter sido causada pela maior probabilidade de ocorrência de duas células de chuva simultâneas no enlace.

Outros fenômenos poderiam, também, contribuir para as discrepâncias observadas entre valores medidos e calculados. Deve-se lembrar que a distribuição da intensidade de chuva não é uniforme no interior da célula, ao contrário do modelo adotado. A taxa de precipitação é máxima no centro e decresce em direção às bordas da célula. Por outro lado, a duração de um evento de atenuação por chuva de um enlace pode variar com o seu azimute, devido à ocorrência de direção predominante dos ventos na região. Este efeito altera as distribuições cumulativas da atenuação do enlace e da atenuação diferencial do par de enlaces considerado. A influência da direção predominante dos ventos foi evidenciada pelas medidas feitas pelo CETUC/PUC-Rio em São Paulo, que indicaram que o enlace Cenesp 15 - RIS de 12,8 km possuía uma distribuição de atenuação por chuva com valores até 5 dB maiores que a do outro enlace de mesmo comprimento (Bradesco II - RIS). Isto também pode explicar os resultados apresentados na Figura 5.1 para o par de enlaces Cenesp 15 - RIS (12,8 km) e Barueri - RIS (21,7 km): as distribuições cumulativas medidas para atenuação diferencial são praticamente idênticas, particularmente para percentagens de tempo superiores a 0,1 %, na região não afetada pelas saturações dos receptores. Teoricamente, esta superposição só ocorre quando os dois enlaces possuem o mesmo comprimento.

## 5.2. Comparação com medidas feitas no Japão na faixa de 19 GHz

Foram realizadas medidas de atenuação em enlaces convergentes e também medidas de atenuação diferencial em dois pares de enlaces, numa região de chuva moderada no Japão. O primeiro par é constituído pelos enlaces Shakujii – ECL (4,3 km) e Sakai – ECL (2,9 km), formando um ângulo de 163°. O segundo par é constituído pelos enlaces Shakujii – ECL (4,3 km) e Shinkawa – ECL (4,7 km), formando ângulo de 115°. Deve-se observar que os enlaces medidos no Japão são muito mais curtos que os medidos na região de São Paulo (comprimentos de 12 km a 43 km).

No modelo de previsão, utilizamos os seguintes valores para os parâmetros relativos ao diâmetro de célula de chuva:  $d_0 = 2,9$  km e  $\beta = 0,17$ . Estes parâmetros foram calculados conforme ajuste descrito na seção 3.2, sendo os dados obtidos a partir da curva de variação da atenuação do enlace em função da taxa de precipitação [1]-[3].

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam os resultados relativos aos dois pares de enlaces. No primeiro par de enlaces (com comprimentos distintos) encontramos diferenças inferiores a 6 dB entre valores medidos e calculados para percentagens de tempo superiores a 0,001%. No segundo par de enlaces (com comprimentos semelhantes) encontramos diferenças inferiores a 5 dB entre valores medidos e calculados para percentagens de tempo superiores a 0,001%. As diferenças encontradas no Japão (cujos enlaces são mais curtos) são menores que aquelas encontradas em São Paulo. É menor a probabilidade de ocorrência simultânea de duas células de chuva nos enlaces do Japão.

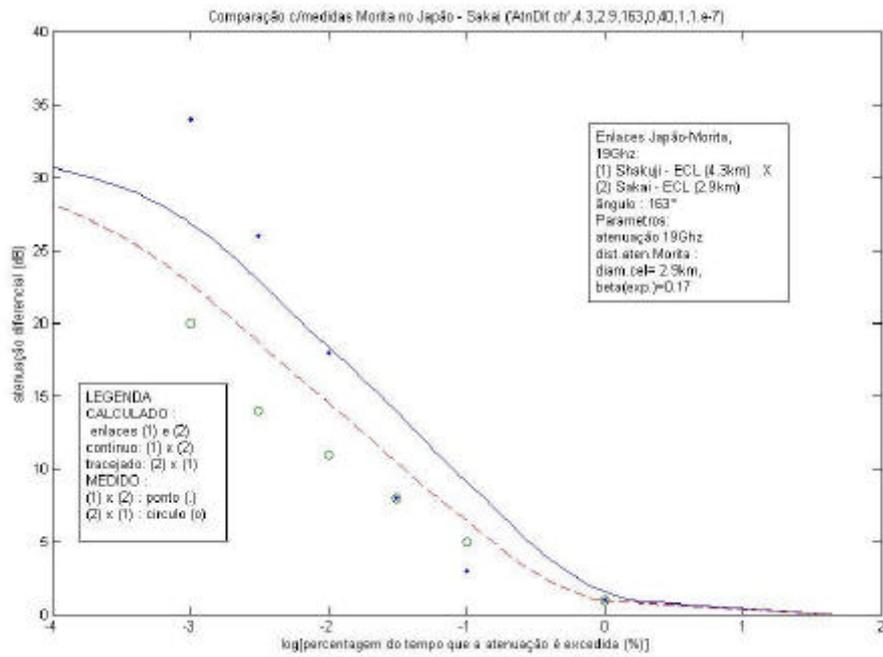


Figura 5.7 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces Shakuji – ECL (4,3 km) e Sakai – ECL (2,9 km), que formam o ângulo de 163°. Dados reproduzidos das referências [1]-[3].

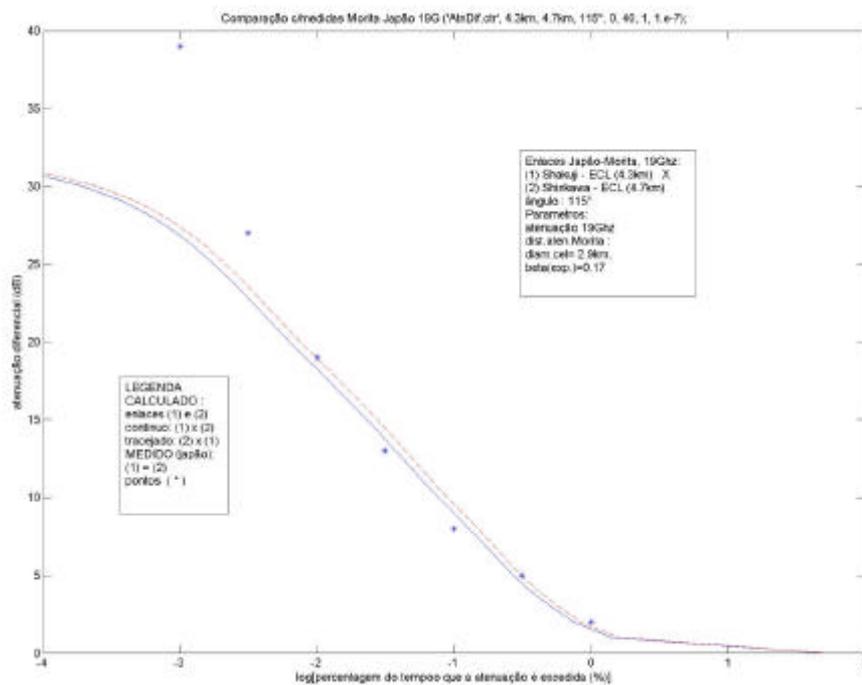


Figura 5.8 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces Shakuji – ECL (4,3 km) e Shinkawa – ECL (4,7 km), que formam o ângulo de  $115^\circ$ . Dados reproduzidos das referências [1]-[3].

### 5.3. Previsões do modelo

Nesta seção, serão apresentadas previsões para os efeitos das variações do ângulo entre os enlaces e do comprimento do enlace interferente sobre a distribuição cumulativa da atenuação diferencial.

#### 5.3.1. Previsão do modelo para o efeito da variação do ângulo entre os enlaces sobre a distribuição cumulativa da atenuação diferencial

A atenuação diferencial ótima é aquela próxima do zero. Assim, para dois enlaces convergentes, a relação entre as potências dos sinais desejado e interferente se mantém e, teoricamente, a atenuação diferencial não afeta a indisponibilidade dos enlaces. Para ângulo próximo de zero grau entre os dois enlaces convergentes, haverá uma grande correlação de ocorrência de chuva nos dois enlaces (e no valor de suas atenuações), o que implica uma atenuação diferencial próxima de zero. Conforme aumenta o ângulo entre os enlaces, aumenta a grandeza atenuação diferencial (uma vez que diminui a correlação de ocorrência simultânea de chuva nos dois enlaces).

Determinamos a distribuição cumulativa da atenuação diferencial para um par de enlaces de comprimentos fixos, formado pelo enlace desejado de comprimento igual a 10 km e pelo enlace interferente de comprimento igual a 20 km, situados na região de São Paulo ( $d_0 = 7$  km e  $\beta = 0,4$ ). Variamos o ângulo entre os enlaces entre  $5^\circ$  e  $45^\circ$  com intervalos de  $5^\circ$  e entre  $45^\circ$  e  $90^\circ$  com intervalos de  $15^\circ$ . As distribuições cumulativas da atenuação diferencial resultantes estão apresentadas na Figura 5.9 da esquerda para a direita, na ordem crescente dos ângulos. Observa-se que, para ângulos inferiores a aproximadamente  $30^\circ$ , as curvas variam rapidamente em função do incremento no ângulo entre os enlaces. Entretanto, a partir deste limiar, a mesma variação torna-se extremamente lenta. Para evidenciar tal fato, a Figura 5.10 apresenta a relação entre o ângulo formado pelos enlaces e os valores da atenuação diferencial correspondentes às percentagens de tempo de iguais a 0,1% (curva tracejada) e 0,01% (curva contínua).

Uma explicação para o comportamento acima é resultante da observação da variação da área da interseção entre os dois lugares geométricos apresentada na Figura 4.1. Partindo de um ângulo de zero grau entre os enlaces, uma pequena variação angular provoca rápida diminuição desta área. A partir de um determinado ângulo, tal variação é lenta.

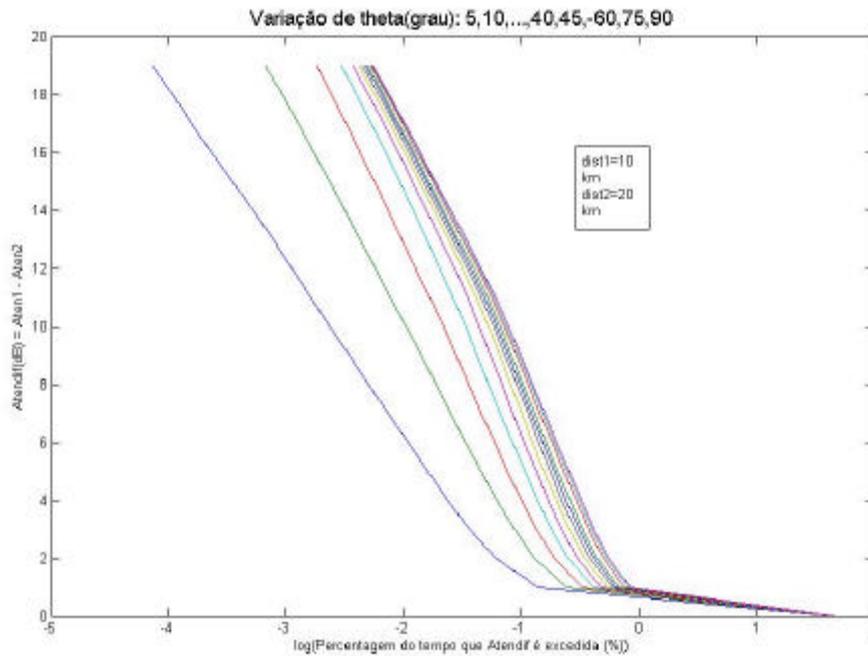


Figura 5.9 - Distribuições cumulativas da atenuação diferencial apresentadas da esquerda para a direita, na ordem crescente dos ângulos entre enlaces que variaram entre  $5^\circ$  e  $45^\circ$  com intervalos de  $5^\circ$  e entre  $45^\circ$  e  $90^\circ$  com intervalos de  $15^\circ$ , supondo enlaces situados na região de São Paulo ( $d_0 = 7$  km e  $\beta = 0,4$ ) de comprimentos iguais a 10 km e 20 km

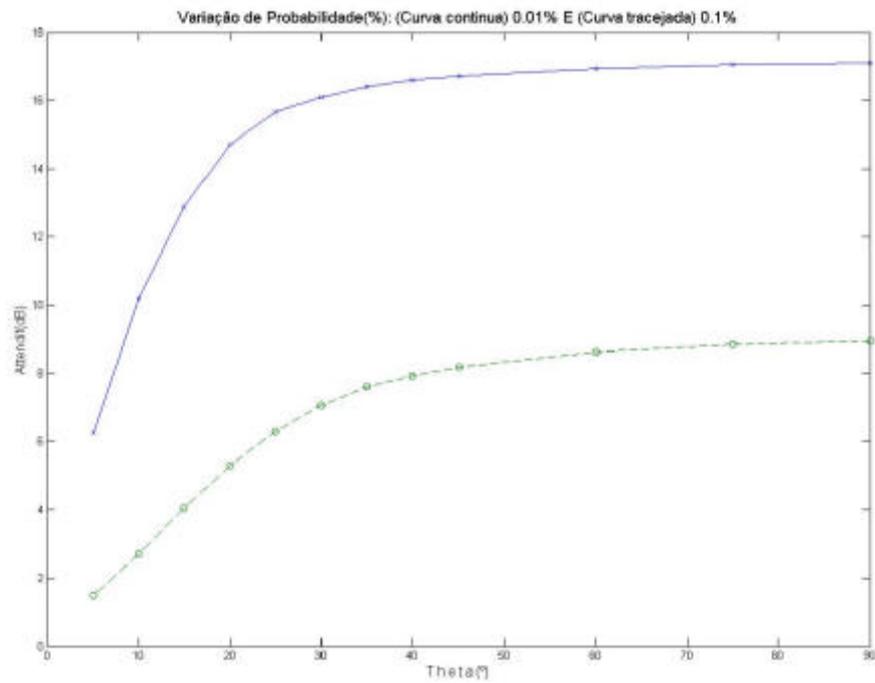


Figura 5.10 - Relação entre o ângulo formado pelos enlaces e os valores da atenuação diferencial correspondentes às percentagens de tempo iguais a 0,1% (curva tracejada) e 0,01% (curva contínua)

### 5.3.2.

#### **Previsão do modelo para o efeito da variação no comprimento do enlace interferente sobre a distribuição cumulativa da atenuação diferencial**

Adicionalmente, o comprimento do enlace interferente foi variado (2 km, 3 km, 4 km, 5 km, 7 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km, 30 km, 60 km), sendo fixado o comprimento do enlace desejado em 10 km e o ângulo entre eles em  $15^\circ$ . As distribuições cumulativas da atenuação diferencial resultantes estão apresentadas na Figura 5.11 da direita para a esquerda, na ordem crescente dos comprimentos do enlace interferente. Observa-se que, para comprimentos inferiores a 10 km, as curvas variam em função do incremento no comprimento do enlace. Entretanto, a partir deste limiar, esta variação não mais ocorre. Para evidenciar tal fato, a Figura 5.12 apresenta a relação entre o comprimento do enlace e os valores da atenuação diferencial correspondentes às percentagens de tempo de iguais a 0,1% (curva tracejada) e 0,01% (curva contínua). Assim, ao variarmos o comprimento do enlace interferente de 2 km para 10 km, observamos uma variação na atenuação diferencial de 16 dB para 12,5 dB na curva contínua e uma variação de 8 dB para 4 dB, na curva tracejada.

Ao diminuirmos o comprimento do enlace interferente, diminuimos sua atenuação por chuva. Isto provoca um aumento na atenuação diferencial (definida como diferença entre atenuação no enlace desejado e atenuação no enlace interferente). Analisemos a interseção entre os dois lugares geométricos, apresentada na Figura 4.1. Verificamos que, ao aumentarmos o comprimento do enlace interferente, seu respectivo lugar geométrico também aumenta de comprimento. Entretanto, sua altura, que independe daquele, de acordo com a fórmula (3.17), se mantém constante. Portanto, o aumento do comprimento do lugar geométrico correspondente ao enlace interferente ocorre fora da interseção, que não se altera. Isto é, a atenuação diferencial torna-se independente do comprimento do enlace interferente a partir de um determinado limiar.

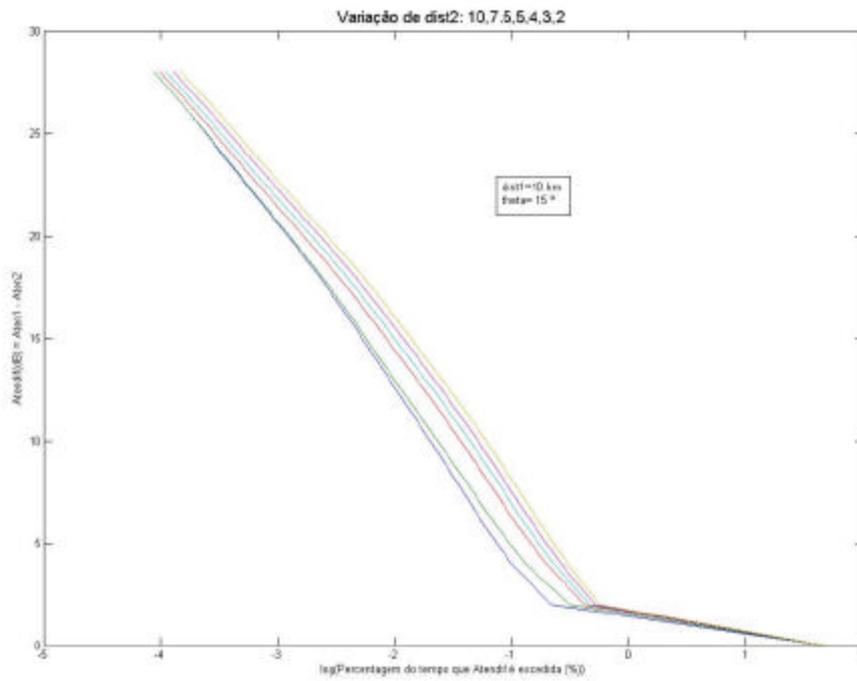


Figura 5.11 - Distribuições cumulativas da atenuação diferencial apresentadas da direita para a esquerda, na ordem crescente dos comprimentos do enlace interferente (2 km, 3 km, 4 km, 5 km, 7 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km, 30 km, 60 km), fixados o comprimento do enlace desejado em 10 km e o ângulo entre eles em 15°.

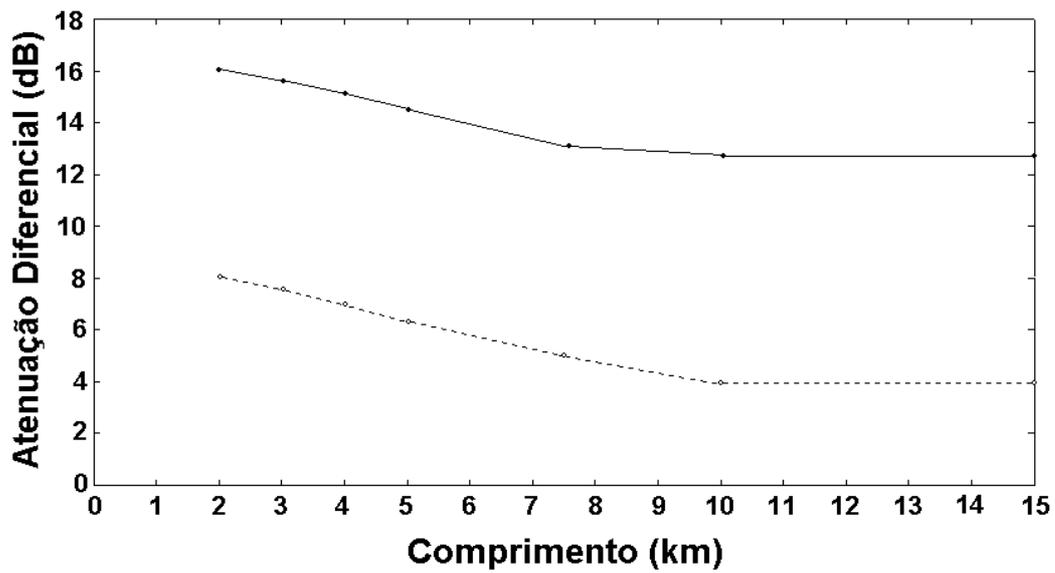


Figura 5.12 - Relação entre o comprimento variável do enlace interferente e os valores da atenuação diferencial correspondentes às percentagens de tempo de iguais a 0,1% (curva tracejada) e 0,01% (curva contínua), fixados o comprimento do enlace desejado em 10 km e o ângulo entre eles em  $15^\circ$