

5

Modelagem da previsão de atenuação por chuvas em enlaces LEO

Neste capítulo são apresentadas as aplicações das modelagens realizadas nos capítulos anteriores – a previsão da atenuação por chuvas em enlaces GEO e a previsão das *fdps* dos ângulos de elevação – na constituição do modelo de previsão de atenuação por chuvas em sistemas LEO, ou simplesmente Modelo LEO/Cetuc. A idéia do método desenvolvido neste trabalho baseia-se no modelo proposto pela UIT-R para o cálculo da estatística de longo termo em enlaces NGeo, conforme a Recomendação UIT-R P.618-7 [1], que aqui é apresentado e denominado Modelo LEO/ITU-R. Nele é feita a ponderação da percentagem de tempo em um determinado nível de atenuação para um dado ângulo de elevação com a percentagem de tempo que o satélite fica visível neste ângulo de elevação. No Modelo LEO/Cetuc será utilizado o histograma dos ângulos de elevação como ponderação para os níveis de atenuação em um determinado ângulo de elevação, para uma dada percentagem de tempo. Os dois Modelos LEO levam ao mesmo resultado, uma vez que operam sobre a mesma informação de atenuação e percentagem de tempo. Entretanto o Modelo LEO/Cetuc oferece um caminho mais fácil quando permite que sejam utilizados os valores de atenuação obtidos diretamente da aplicação do modelo de previsão em cada ângulo de elevação.

O uso destes Modelos LEO exige o conhecimento da estatística dos ângulos de visibilidade do satélite. No capítulo 4 foi desenvolvida uma solução analítica para obtenção da função densidade de probabilidade dos ângulos de elevação a partir da latitude do local desejado. Esta solução fará parte do Modelo LEO/Cetuc.

Este modelo é calculado de duas maneiras neste capítulo, a saber: através do histograma dos ângulos de elevação e através da previsão da *fdp* destes ângulos.

Estes resultados são confrontados com a simulação das medidas dinâmicas de atenuação, que representam o experimento físico que servirá de base para a validação do Modelo LEO/Cetuc. A simulação é gerada a partir da implementação

da conversão das séries temporais de atenuação medida em enlaces fixos utilizando a variação temporal do ângulo, função $\theta_2(t)$, calculada no Capítulo 4.

Observando os gráficos para uma análise qualitativa verifica-se boa aproximação dos modelos com a simulação. O cálculo do erro médio, desvio padrão e valor RMS com o procedimento da Recomendação UIT-R 311 [20] apresenta a quantificação desta análise. Os resultados obtidos com o modelo desenvolvido podem ser considerados satisfatórios, validando o Modelo LEO/Cetuc como modelo de previsão de atenuação em sistemas de órbita baixa.

5.1.

Modelo de previsão de atenuação em enlaces NGeo proposto pela UIT-R

O modelo para enlaces NGeo da UIT-R é apresentado nesta Seção porque seu procedimento orienta o desenvolvimento do modelo LEO/Cetuc. O modelo propõe que a disponibilidade do enlace para um único satélite seja calculada da seguinte forma:

- a) calcular os ângulos de elevação mínimo e máximo no qual o sistema irá operar;
- b) dividir a faixa de ângulos em incrementos pequenos, por exemplo 5°;
- c) calcular a percentagem do tempo em que o satélite fica visível como função do ângulo de elevação em cada incremento;
- d) para um dado nível de atenuação, calcular a percentagem de tempo em que este nível é excedido para cada incremento de ângulo de elevação;
- e) para cada incremento de ângulo de elevação, multiplicar os resultados de c) e d) e dividir por 100, resultando na percentagem de tempo em que o nível de atenuação é excedido neste ângulo de elevação;
- f) somar os valores das percentagens de tempo obtidas em e) para se obter a percentagem de tempo total do sistema em que o nível de atenuação é excedido.

No caso de constelações com múltipla visibilidade de satélites que empregam diversidade de percurso (isto é, escolhendo o percurso menos atenuado), um cálculo aproximado pode ser feito assumindo que o satélite com o maior ângulo de elevação está sendo utilizado.

5.2.

Simulação das medidas de atenuação dinâmica

O Programa #1 apresentado no capítulo 3 implementa a conversão da série temporal da atenuação utilizando a equação 3.12. Nesta fórmula é aplicada a série temporal diária do ângulo $\theta_2(t)$, obtida na Seção (4.5.2), através da implementação do modelo orbital. Estas séries estão nos arquivos *locenvolt#d.mat*. Para a aplicação em período anual o conjunto de 90 dias é repetido de forma a compor 365 dias ou 366 se o ano for bissexto.

O uso das séries temporais do ângulo de elevação na equação 3.12 caracteriza a simulação das medidas dinâmicas, pois são geradas as séries temporais de atenuação convertidas $A_2(t)$. O resultado é apresentado sob forma da distribuição cumulativa (DC) da atenuação convertida.

A série temporal da chuva deve ser aplicada ao termo L_o na equação (3.12). Sua aplicação não pôde ser feita valor a valor no tempo devido àqueles eventos de chuva que ocorrem ao longo do percurso inclinado. A diferença temporal entre o início do evento da chuva e o início do evento da atenuação está ilustrado na Figura 73, e esta diferença é o tempo que a célula de chuva que se desloca ao longo do enlace leva para atingir o pluviômetro e iniciar o registro de chuva. A solução adotada foi a determinação de um valor médio de chuva (R_{med}) por série temporal diária, do qual é obtido um valor médio de L_o para cada dia, com a expressão do modelo de previsão. O valor R_{med} é calculado para valores acima de 12 mm/h, limite inferior de precisão do pluviômetro. Então a fórmula (3.12) passa a ser escrita como

$$A_2(t) = A_1(t) \frac{L_{omed} \cdot \sin \theta_1 + (h_r - h_s) \cos \theta_1}{L_{omed} \cdot \sin \theta_2 + (h_r - h_s) \cos \theta_2} \quad (5.1)$$

Esta fórmula é então utilizada para a conversão de medidas de atenuação obtidas com nível de sinal recebido do *beacon* do satélite GEO.

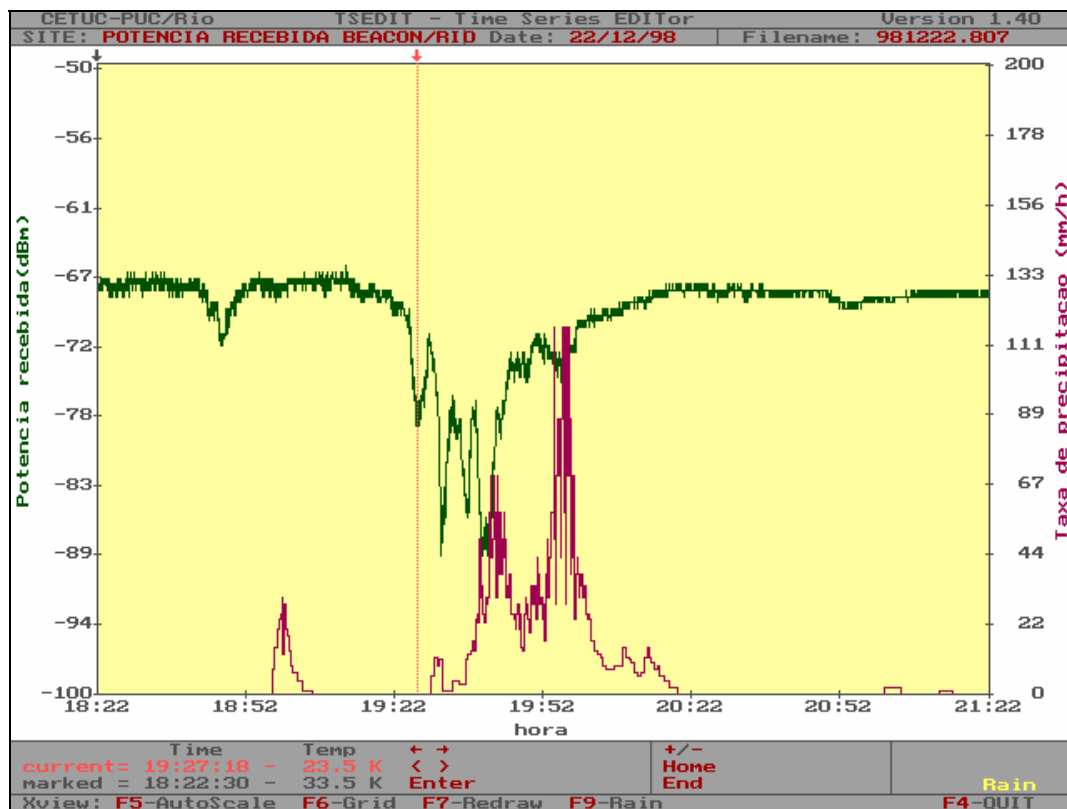


Figura 73 – Eventos de atenuação e chuva

Antes da obtenção do resultado da simulação deve-se observar a faixa de valores possíveis de $A_2(t)$, uma vez que se conhece o fator multiplicativo ou fator de conversão de $A_1(t)$, da equação 5.1. A equação 5.1 é implementada com o modelo de previsão que melhor representa as medidas, que neste caso é o Modelo BR/Cetuc. A faixa de ângulos de elevação possíveis para os satélites LEO está entre 5° e 90° , sendo que em Curitiba e Porto Alegre o ângulo mínimo é 10° . Conjugando-se todos os casos obtém-se a faixa de variação do fator de conversão, chamado FC, para cada local de medida usado na simulação. A Tabela 14 reúne os valores máximos e mínimos obtidos nos períodos de medidas, além das características e os períodos de cada local.

Observa-se um estreitamento da faixa com o aumento da latitude. Os maiores FC em cada um dos casos ocorrem na conjunção de baixos ângulos de elevação do satélite LEO com baixas taxas de precipitação. Considerando que neste cálculo há a influência de θ_1 , o ângulo de elevação da medida fixa, obtém-se em Mosqueiro o menor valor (0.7) de FC devido ao seu alto ângulo de elevação, 89° . As Figuras 74 e 75 ilustram os valores de FC de Mosqueiro e Rio de Janeiro.

Local	Período (mm/yy)	Latitude (°)	Ângulo elevação (°)	Faixa FC
Mosqueiro (PA)	09/96 a 08/97	-1.45	89	4.9 a 0.7
Recife (PE)	12/97 a 11/98 03/98 a 02/99	-8.05	69	5.1 a 0.9
Rio de Janeiro (RJ)	12/97 a 11/98 03/98 a 02/99	-22.92	63	5.0 a 0.9
Curitiba (PR)	03/97 a 02/98 03/98 a 02/99	-25.42	60	3.8 a 0.9
Porto Alegre (RS)	03/98 a 02/99	-30.05	55	3.4 a 0.9

Tabela 14 – Características de cada local de medida e faixa de valores de fator de conversão

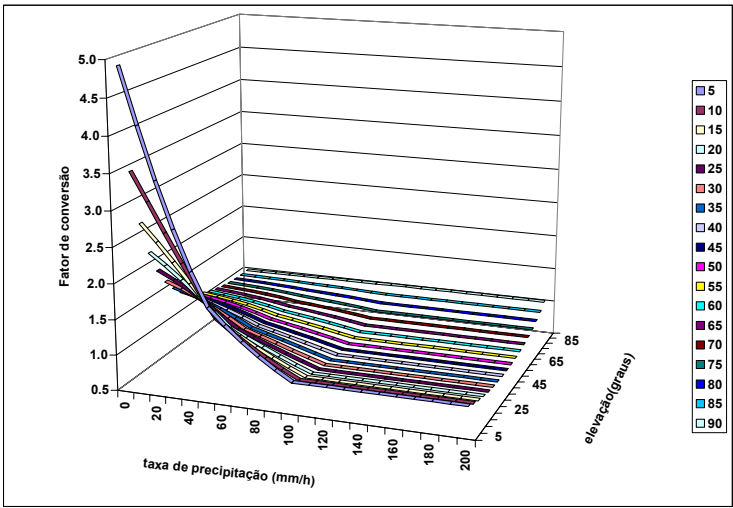


Figura 74 – Fatores de conversão para Mosqueiro (PA)

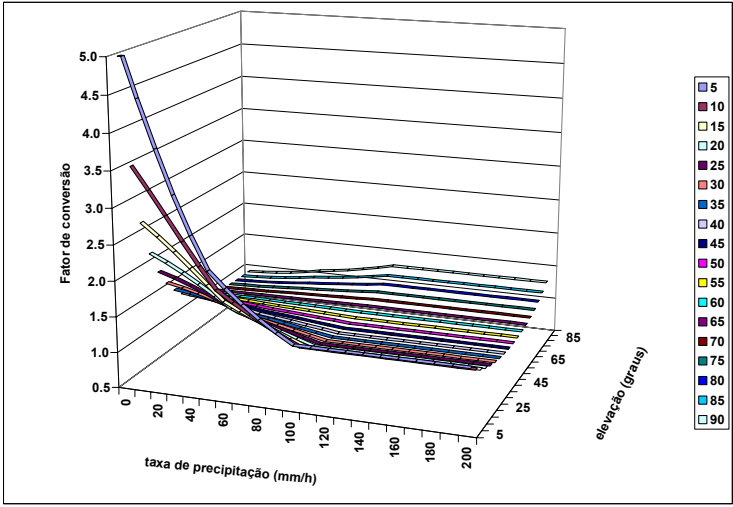


Figura 75 – Fatores de conversão para o Rio de Janeiro (RJ)

Após o estudo dos valores do FC, o próximo passo é obter a simulação das medidas dinâmicas para cada local. A estrutura geral do Programa #1 no caso orbital está esquematizada na Figura 76, onde DC é distribuição cumulativa. Os parâmetros de entrada são o período de tempo do local, suas características de latitude, altitude e ângulo de elevação da medida fixa, os dados do modelo de previsão de atenuação e a série temporal da envoltória do ângulo de elevação, previamente geradas por outro programa para o local desejado, conforme a Seção 4.5.2.

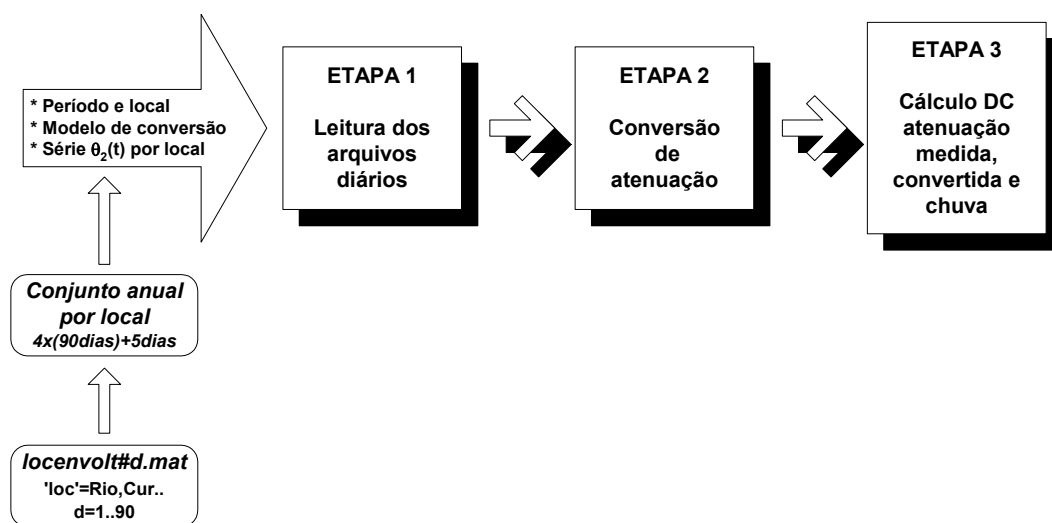


Figura 76 – Estrutura geral do Programa #1 no caso orbital

As Figuras seguintes apresentam o resultado da simulação por local.

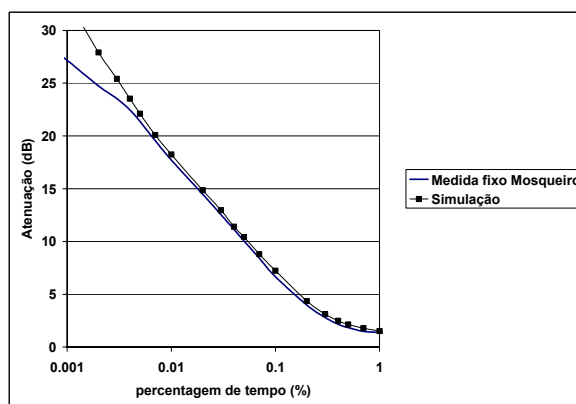


Figura 77 – Simulação de medidas dinâmicas em Mosqueiro

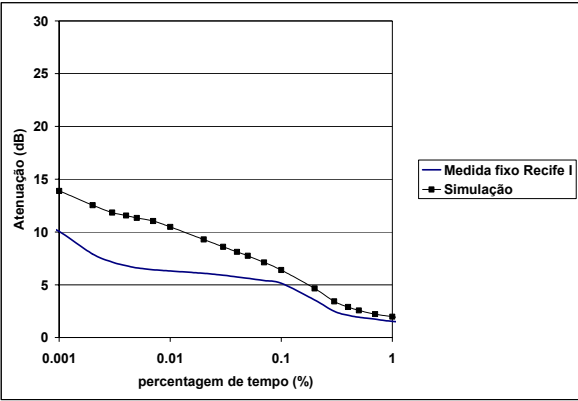


Figura 78 – Simulação de medidas dinâmicas em Recife, período 1

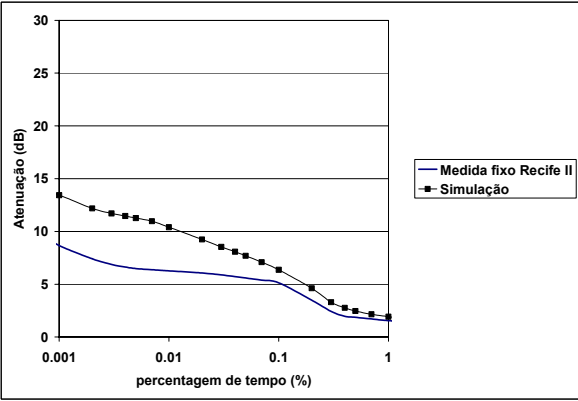


Figura 79 – Simulação de medidas dinâmicas em Recife, período 2

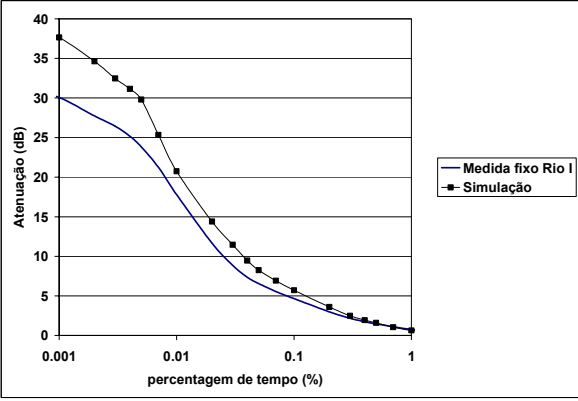


Figura 80 – Simulação de medidas dinâmicas no Rio de Janeiro, período 1

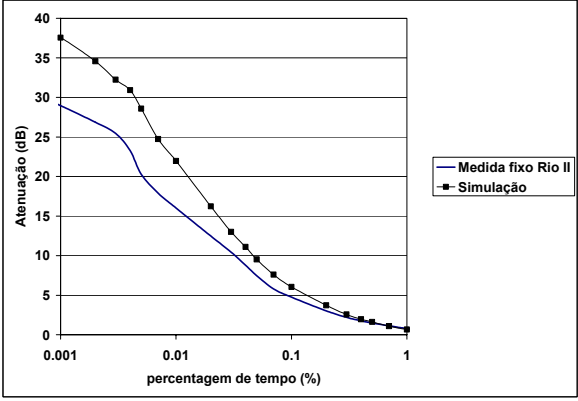


Figura 81 – Simulação de medidas dinâmicas no Rio de Janeiro, período 2

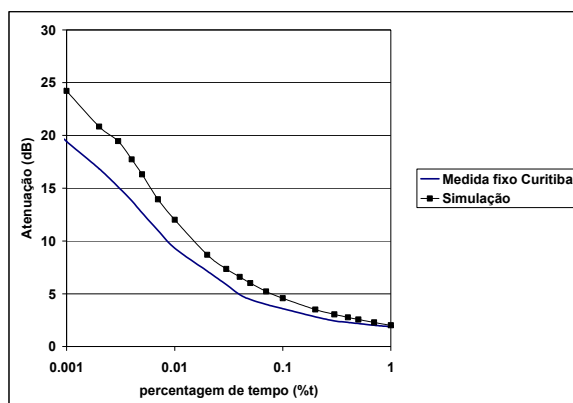


Figura 82 – Simulação de medidas dinâmicas em Curitiba

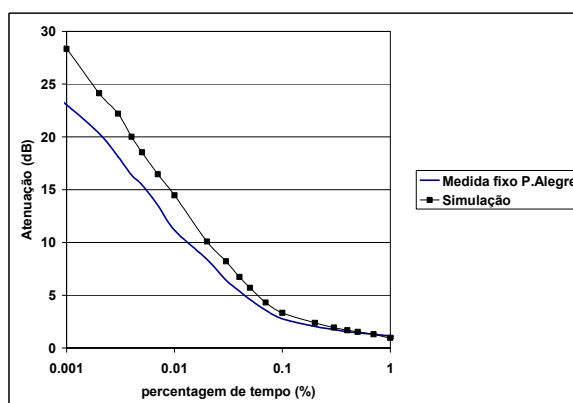


Figura 83 – Simulação de medidas dinâmicas em Porto Alegre.

As distribuições cumulativas obtidas pela simulação estão acima da medida fixa nesta faixa de percentagens de tempo. Observa-se o aumento da atenuação devido à conjunção de eventos de chuva com ângulos de elevação abaixo do ângulo da medida fixa no cálculo da simulação. Nos histogramas dos ângulos de elevação das Figuras 47 a 51 verifica-se que os ângulos na faixa de 20° a 30° são os que apresentam maiores ocorrências diárias, e estão abaixo do menor ângulo de medida fixa, que é 55° em Porto Alegre. Portanto há maior probabilidade de um evento de chuva intensa ocorrer quando o satélite está nesta faixa de ângulos de elevação. As medidas em Recife não apresentaram eventos de atenuação significativos devido ao período de pouca chuva em que foram realizadas.

5.3.

Método de previsão de atenuação baseado no modelo UIT-R

Neste ponto do trabalho será implementada uma abordagem semelhante à metodologia da UIT-R para cálculo da estatística de longo termo de enlaces N GEO, apresentada na Seção 5.1, para a comparação com o resultado da simulação.

A metodologia do modelo LEO/ITU-R utiliza as percentagens de tempo em que o satélite fica visível em cada ângulo de elevação e as percentagens em que determinado nível de atenuação é excedido em cada ângulo de elevação. Este modelo foi implementado e será utilizado como comparação. O método LEO/Cetuc baseia-se nesta idéia pois propõe a ponderação pelo número de vezes que o satélite fica em uma determinada elevação aplicada nos valores de atenuação excedida em cada um destes ângulos. A atenuação é obtida aplicando-se o modelo de previsão em cada ângulo na faixa de 5° a 90°, obtendo-se valores para cada percentagem de tempo. Como a obtenção da atenuação é imediata a partir da formulação do modelo, o modelo LEO/Cetuc oferece um procedimento mais simples do que o modelo LEO/ITU-R, que solicita a interpolação das percentagens de tempo para valores fixados de atenuação.

Então no modelo LEO/Cetuc foram calculadas as distribuições cumulativas de atenuação para ângulos de elevação de 5° em 5° no intervalo de 5° a 90°. Para cada percentagem de tempo foi feita a ponderação com a frequência de ocorrência de cada ângulo. Estes valores são obtidos do histograma para cada local de medida, conforme o item 4.4.3.1. Esses produtos são somados e obtém-se a distribuição cumulativa ponderada, A_{pTOTAL} . A equação (5.1) apresenta a metodologia.

$$A_{p j_{NGEO}} = \frac{\sum_{k=0} A_{p j_{\theta_k}} H_{\theta_k}}{\sum_{k=1} H_{\theta_k}} \quad (5.1)$$

onde:

$A_{p j}$ é a atenuação ponderada por percentagem de tempo, $j = 0.0004\%$ a 50% ;

θ_k são os valores de ângulo de elevação, $k = 5, 10, \dots, 90^\circ$;

H_{θ_k} é a frequência de ocorrência de θ_k no período diário.

Calcula-se ainda a média das atenuações por percentagem de tempo das distribuições convertidas para valores fixos, chamada distribuição média.

5.4.

Aplicação do modelo de distribuição do ângulo de elevação

No item anterior foi utilizado o histograma dos ângulos para ponderar a distribuição cumulativa atenuação em cada ângulo e obter-se a distribuição cumulativa de atenuação total ponderada Ap_j . Foi desenvolvido no Capítulo 4 um modelo para o cálculo da f_{dp} dos ângulos baseado apenas na latitude, oferecendo solução analítica para obtenção do histograma necessário para a distribuição cumulativa da atenuação total ponderada. Estes valores foram aplicados no modelo LEO/Cetuc e os resultados obtidos, que serão chamados Modelo LEO(dens), serão comparados com o procedimento do modelo LEO/Cetuc que utiliza o histograma original, o qual será chamado modelo LEO(hist).

5.5.

Comparação dos resultados

A simulação da atenuação dinâmica, a distribuição de atenuação ponderada pelo histograma (modelo LEO(hist)), a distribuição da atenuação ponderada pelo modelo da f_{dp} do ângulo (modelo LEO(dens)), a distribuição obtida pelo procedimento do modelo LEO/ITU-R e a distribuição média, obtida com a média das distribuições por percentagem de tempo foram calculadas para os locais de medidas da Tabela 14. Os gráficos das Figuras 84 a 90 apresentam os resultados obtidos.

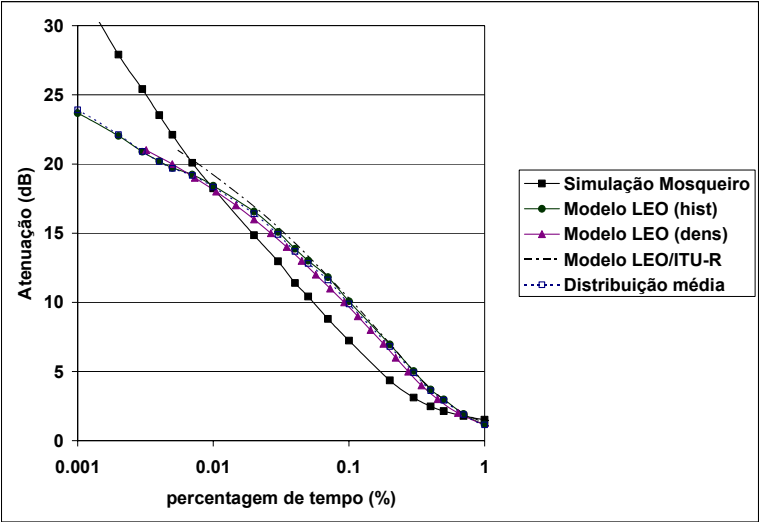


Figura 84 – Resultados para Mosqueiro

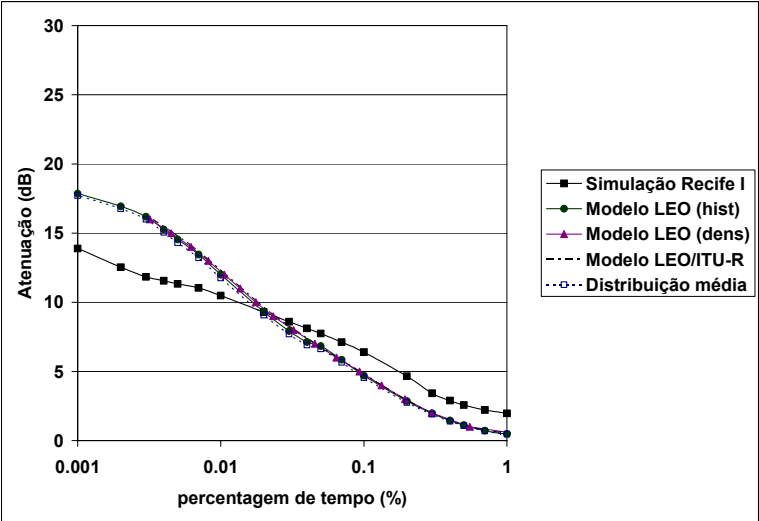


Figura 85 – Resultados para Recife, período 1

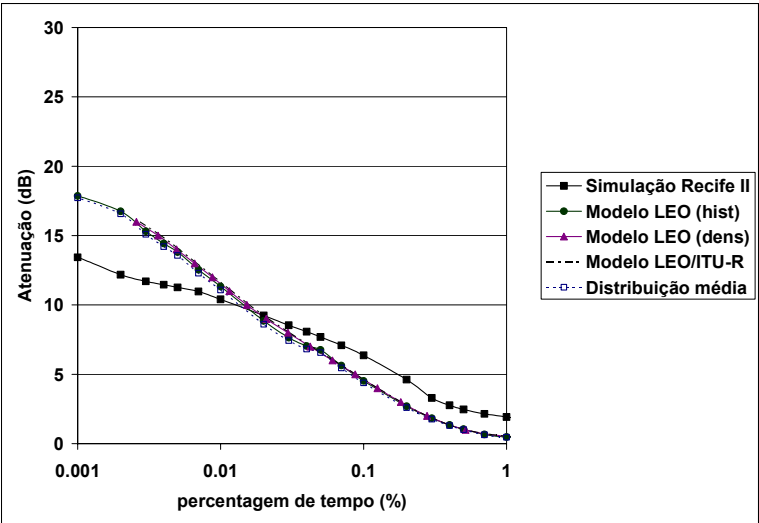


Figura 86 – Resultados para Recife, período 2

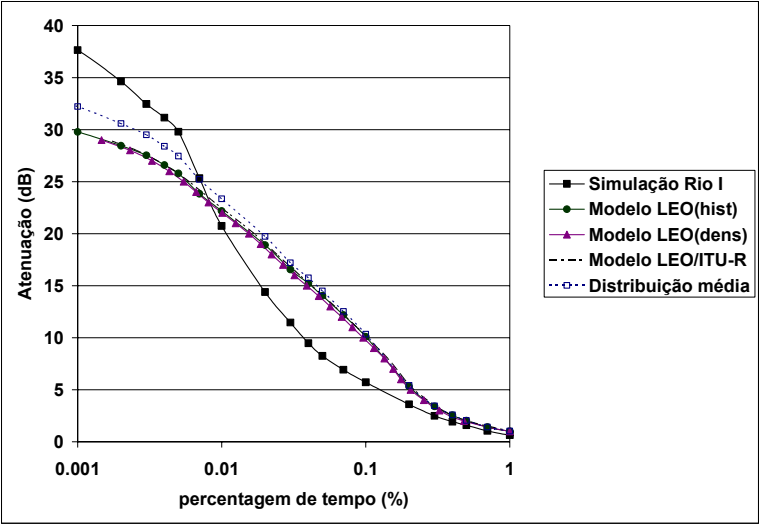


Figura 87 – Resultados para Rio de Janeiro, período 1

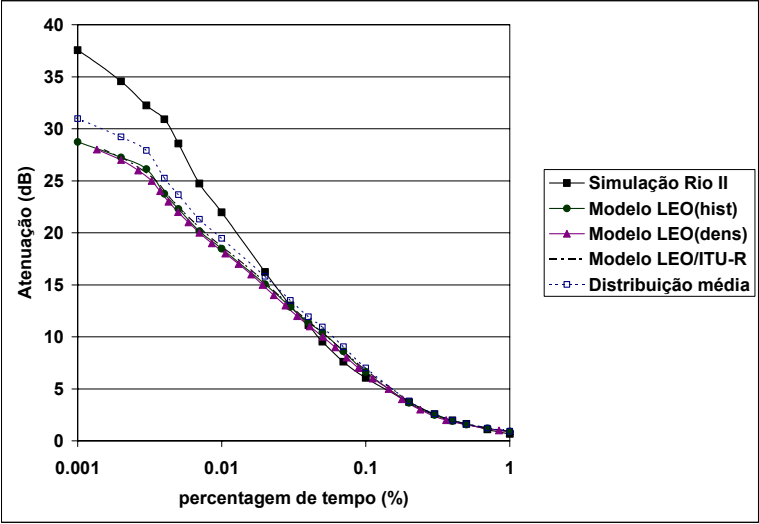


Figura 88 – Resultados para Rio de Janeiro, período 2

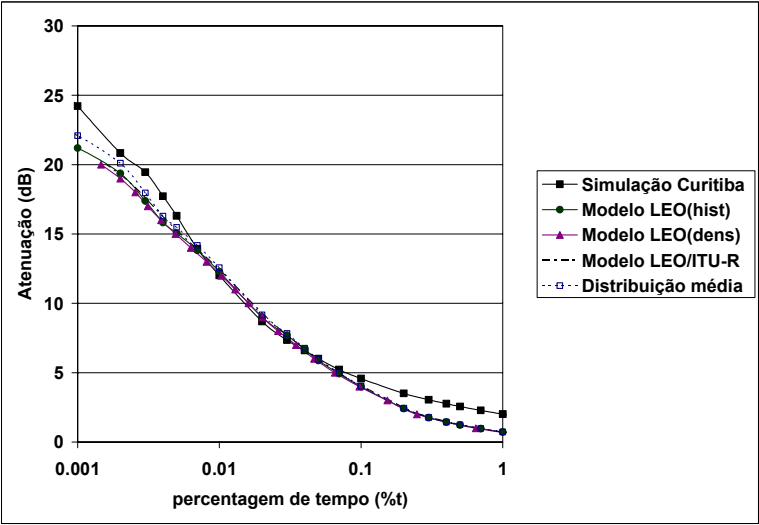


Figura 89 – Resultados para Curitiba

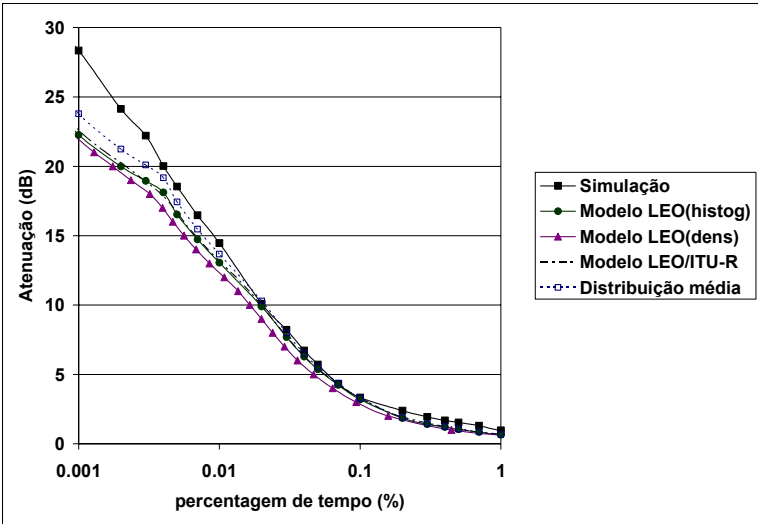


Figura 90 – Resultados para Porto Alegre

Em Recife observam-se baixos valores de atenuação devido à pouca ocorrência de chuva durante os períodos de medida. Os modelos calculados seguem a curva da atenuação prevista para este local. No gráfico para o Rio de Janeiro, período 1, observa-se que a simulação possui uma concavidade originária da medida fixa. Este comportamento já foi observado em outros períodos de medida no Rio de Janeiro [35] e verificou-se ser devido ao fato do local de medida estar circundado por morros que provavelmente dificultam a passagem da célula de chuva pelo enlace, ocasionando poucos eventos de atenuação.

Como os modelos resultaram em valores muito próximos, como pode ser visualizado pela superposição das curvas, para a comparação e cálculo do erro foram escolhidos os Modelos LEO(hist) e a distribuição média. Os valores de erro médio, desvio padrão e valor RMS entre o modelo LEO(hist) e a distribuição média e a medida em enlace dinâmico em cada um dos locais apresentados, obtida pela simulação, foram calculados conforme a Recomendação 311 descrita no Apêndice IV na faixa de 0.001% a 1% para cada caso e são apresentados nas Tabelas 15 a 21.

	Modelo LEO(hist)	Média
Média	0.08	0.06
Desvio Padrão	0.22	0.21
Valor RMS	0.23	0.22

Tabela 15 - Erro, desvio padrão e valor RMS para Mosqueiro

	Modelo LEO(hist)	Média
Média	-0.15	-0.18
Desvio Padrão	0.39	0.40
Valor RMS	0.42	0.44

Tabela 16 - Erro, desvio padrão e valor RMS para Recife período I

	Modelo LEO(hist)	Média
Média	-0.18	-0.20
Desvio Padrão	0.39	0.39
Valor RMS	0.43	0.44

Tabela 17 – Erro, desvio padrão e valor RMS para Recife período II

	Modelo LEO(hist)	Média
Média	0.16	0.20
Desvio Padrão	0.25	0.24
Valor RMS	0.30	0.31

Tabela 18 – Erro, desvio padrão e valor RMS para o Rio de Janeiro período I

	Modelo LEO(hist)	Média
Média	-0.07	-0.02
Desvio Padrão	0.14	0.13
Valor RMS	0.15	0.13

Tabela 19 - Erro, desvio padrão e valor RMS para o Rio de Janeiro período II

	Modelo LEO(hist)	Média
Média	-0.20	-0.18
Desvio Padrão	0.24	0.25
Valor RMS	0.31	0.31

Tabela 20 - Erro, desvio padrão e valor RMS para Curitiba

	Modelo LEO(hist)	Média
Média	-0.14	-0.11
Desvio Padrão	0.09	0.09
Valor RMS	0.17	0.14

Tabela 21 - Erro, desvio padrão e valor RMS para Porto Alegre

Os maiores valores de desvio padrão estão em Recife, pelo motivo da falta de chuva também mencionado antes. O desvio padrão calculado esteve acima de 9% em Porto Alegre, 14% no Rio e acima de 20% nos demais locais, representando a variação dos valores em torno da medida calculada pela simulação.