

5

Modelagem estatística da atenuação por chuva

As estatísticas estacionárias de atenuação por chuva são apresentadas através da CCDF de atenuação que traz informações sobre o nível de atenuação que pode ser excedido para cada percentual de tempo. Sendo assim, a distribuição de atenuação é influenciada pelo o clima da região onde o enlace está operando. Portanto, para a sintetização de séries temporais de atenuação por chuva em regiões tropicais é necessário que a distribuição de atenuação seja estatisticamente modelada nestas regiões.

5.1. Faixas de percentuais de tempo para análise estatística

A primeira etapa para a modelagem da distribuição de atenuação por chuva é a especificação da faixa de percentuais de tempo que será considerada. Ainda que a proposta do modelo EMB tenha a recomendação de identificar a faixa de percentuais em que o ajuste possa ser considerado lognormal antes de aplicar o modelo [07], este trabalho buscou realizar o ajuste para a máxima faixa de percentuais que os dados experimentais permitem.

No caso do percentual máximo da faixa, a análise do gráfico da CCDF de atenuação de cada enlace e a realização de algumas simulações de ajuste permitiram escolher o valor de 10% como o percentual máximo padrão para o conjunto de enlaces. Este valor de percentual é maior que os valores da probabilidade de ocorrência de chuva no percurso do enlace (p_0) obtidos por diferentes métodos, assunto que será abordado no item 5.3 deste capítulo, mas é mais próximo do percentual cuja atenuação excede zero nos enlaces analisados e permite uma otimização dos ajustes lognormais.

O percentual mínimo escolhido varia conforme os dados dos enlaces e foi determinado de forma que não estivesse numa região do gráfico da CCDF em que a quantidade de dados fosse escassa ou que o enlace pudesse estar operando no limite de sua margem. Silva Mello et al. [17] mostrou que os valores de margem dos enlaces analisados variam de 37 a 42 dB.

A Figura 5.1 rerepresenta o gráfico que já foi mostrado na Figura 4.1 com as distribuições de atenuação dos cinco enlaces terrestres analisados.

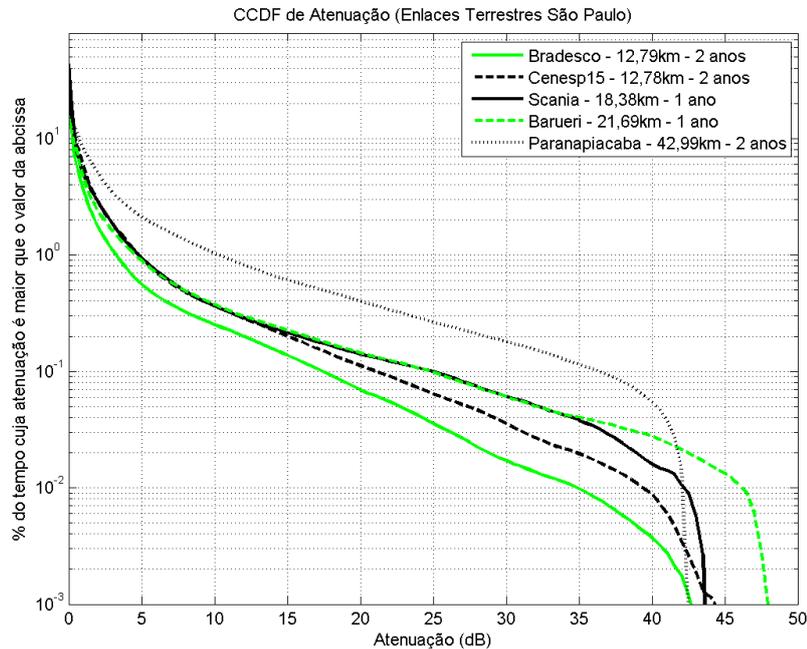


Figura 5.1 – CCDF de atenuação por chuva dos enlaces terrestres

É possível observar que nas regiões próximas dos valores da margem dos enlaces os gráficos apresentam inflexões que indicam que o ajuste não deve ser feito para percentuais nesta região.

Levando em consideração a quantidade de dados, o valor de percentual mínimo usado nos ajustes foi de 0,01% quando a margem do enlace permitiu. Nos casos em que a margem do enlace corresponde a um percentual superior a este, percentuais maiores foram considerados.

A Tabela 5.1 apresenta os valores das faixas de percentuais utilizadas para os ajustes nos cinco enlaces.

Tabela 5.1 – Faixas de percentuais de tempo usadas nos ajustes dos enlaces terrestres

Enlace	Faixa (%)
Bradesco	0,01 a 10
Censp15	0,01 a 10
Scania	0,03 a 10
Barueri	0,02 a 10
Paranapiacaba	0,10 a 10

5.2. Extração dos parâmetros lognormais no modelo EMB

A Figura 5.2 apresenta um gráfico que ilustra um ajuste de curva a partir do qual são extraídos os parâmetros lognormais do modelo EMB cujo procedimento foi descrito no item 2.2. O gráfico é referente ao enlace Bradesco. A reta ajustada (linha tracejada do gráfico) é referente à Equação 2.4.

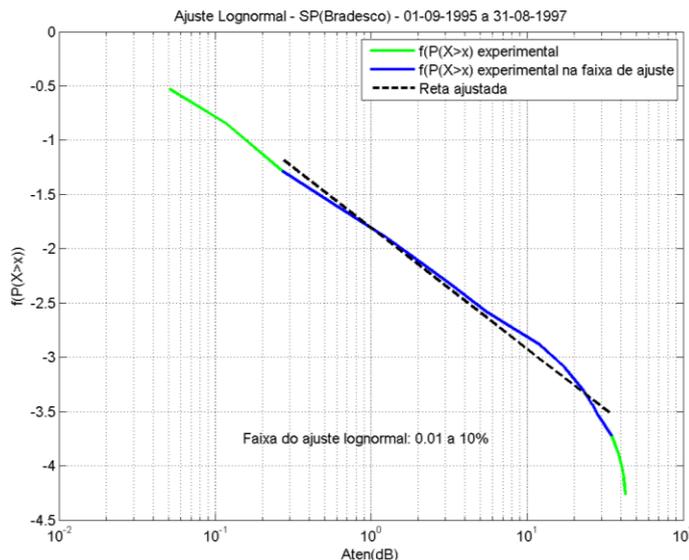


Figura 5.2 – Ajuste lognormal do modelo EMB – Bradesco (0,01 a 10%)

É possível observar que para valores de atenuações inferiores a cerca de 6 dB a curva referente aos dados experimentais é muito próxima de uma reta, mas acima deste valor de atenuação o gráfico começa a apresentar uma curvatura indicando que o ajuste lognormal começa a perder a precisão, ou seja, o ajuste lognormal é mais adequado apenas na faixa de percentuais em que o gráfico se aproxima de uma reta.

A Figura 5.3 apresenta um gráfico comparativo entre a CCDF de atenuação experimental e a CCDF de atenuação referente ao ajuste lognormal obtido na faixa de 0,01 a 10%. É possível verificar que as distribuições são próximas apenas nas atenuações muito baixas.

Caso o percentual mínimo de tempo utilizado no ajuste seja aumentado, o que reduz a faixa de ajuste, o gráfico da Figura 5.4 mostra que o ajuste lognormal melhora para valores de até aproximadamente 17 dB de atenuação, mas a discrepância nas atenuações mais altas acaba acentuando ainda mais.

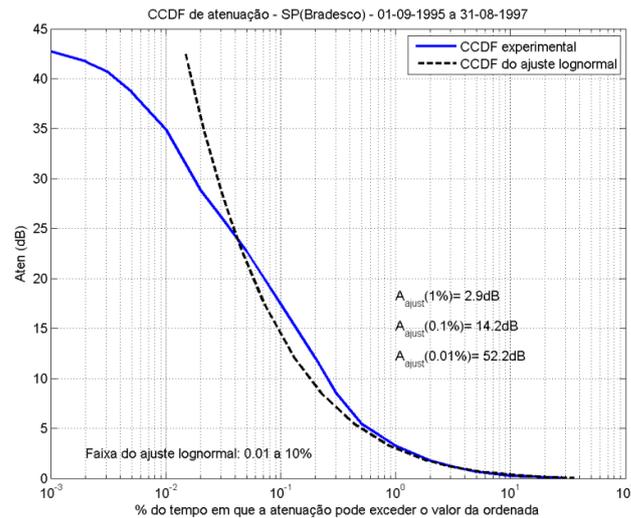


Figura 5.3 – Resultado do ajuste lognormal do modelo EMB – Bradesco (0,01 a 10%)

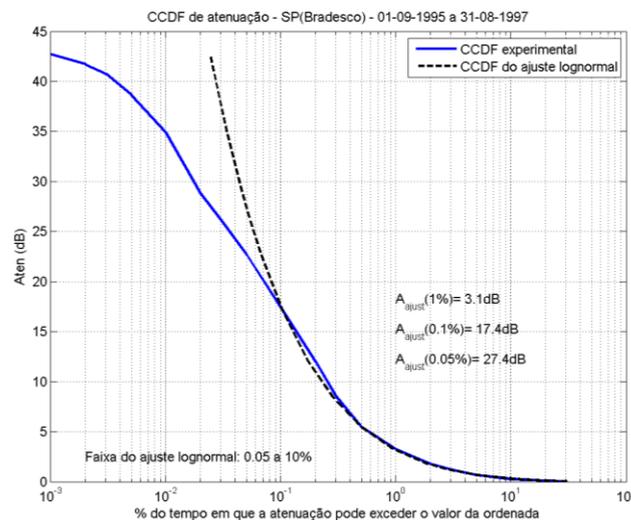


Figura 5.4 – Resultado do ajuste lognormal do modelo EMB – Bradesco (0,05 a 10%)

O Apêndice B apresenta os gráficos dos ajustes realizados pelo modelo EMB para os demais enlaces e os gráficos comparativos entre CCDF experimental e CCDF lognormal EMB.

Considerando o conjunto de enlaces é possível observar que o ajuste lognormal realizado pelo modelo EMB proporciona bons resultados para as atenuações mais baixas, mas não é muito preciso no caso das atenuações mais altas o que pode ser uma limitação para regiões de clima tropical que são sujeitas a níveis de atenuação mais severos.

A análise do método de ajuste de curva do modelo EMB mostra que ele é feito numa escala logarítmica da atenuação. Isto é coerente com o fato de que o

modelo utiliza o logaritmo da atenuação para a extração dos parâmetros lognormais. Por outro lado, ao fazer o ajuste de curva diretamente na escala logarítmica, os valores mais baixos de atenuação acabam sendo priorizados em detrimento dos valores mais altos.

5.3. Modelo *Terrestrial Maseng-Bakken* (TMB)

O modelo TMB proposto em [11] foi desenvolvido nesta pesquisa com o objetivo de aperfeiçoar o modelo EMB para aplicação a enlaces terrestres localizados em regiões sujeitas a atenuações mais severas, como as regiões tropicais. Ele foi implementado com uma estrutura análoga à do modelo EMB e com os mesmos tipos de parâmetros, mas existe uma diferença relevante no procedimento de extração dos parâmetros lognormais e do parâmetro A_{offset} .

Os parâmetros lognormais m e σ são extraídos da CCDF experimental de atenuação por chuva através de uma simulação em que números aleatórios com distribuição Lognormal são gerados para uma grande faixa de valores de m e σ . Para cada conjunto de números aleatórios gerados é calculado o erro RMS, em dB, entre os valores de atenuação da curva da CCDF de atenuação gerada e os valores de atenuação da curva da CCDF de atenuação experimental. Os parâmetros lognormais escolhidos são os que minimizam o erro RMS. Posteriormente foi incluído nesta simulação o parâmetro A_{offset} .

O parâmetro A_{offset} é utilizado para aprimorar as estatísticas estacionárias de atenuação no modelo TMB uma vez que sua utilização para melhorar a dinâmica das séries temporais sintetizadas, como é feito no modelo EMB [14], não trouxe melhora perceptível na aplicação aos enlaces terrestres.

Inicialmente foi feita uma tentativa de associar o parâmetro A_{offset} ao valor de atenuação da CCDF lognormal que corresponde ao percentual de tempo em que há ocorrência de chuva no percurso do enlace (p_0), método que era utilizado na versão anterior do modelo EMB [12]. A dificuldade neste caso é a determinação do percentual de tempo p_0 . O pluviômetro utilizado no sistema de medidas é preciso para registro de valores médios e altos de intensidade de chuva, mas não tem precisão para medição de chuvas de intensidade muito baixa, como 0,25 mm/h que é a intensidade necessária para definir o valor de p_0 .

A utilização de um procedimento de extrapolação na curva de distribuição de chuvas mostrou-se igualmente imprecisa. Tentativas de realizar esta extrapolação resultaram em valores de percentuais entre 2,9 e 4,5%, mas uma observação dos gráficos da CCDF de atenuação experimental dos cinco enlaces terrestres mostra que os valores de atenuação excedida nestes percentuais de tempo são sempre superiores a 1 dB, podendo atingir 3 dB em um dos enlaces.

Uma alternativa considerada foi o uso de procedimento descrito na recomendação ITU-R P-837 [25] conforme foi sugerido em [12]. Neste caso o valor do percentual obtido é 6,9% e os valores de atenuação excedida para este percentual de tempo são sempre iguais ou superiores a 0,5 dB nos enlaces considerados. O resultado é um pouco melhor que o resultado obtido através da extrapolação das curvas, mas é necessário considerar que valores experimentais de atenuação muito próximos a zero são igualmente imprecisos ainda que a calibração dos dados brutos busque eliminar as variações do nível de sinal que não estão associadas à ocorrência de chuva.

A metodologia da recomendação ITU-R P-837 [25] e outras metodologias para determinação do valor de p_0 foram comparadas por Rodrigues & Silva Mello [26] que mostraram que há divergência nos resultados.

Sendo assim, dada a dificuldade em determinar de forma precisa o valor do percentual, foi adotado um procedimento diferente para a extração do parâmetro A_{offset} no modelo TMB. Ele passou a ser extraído durante a simulação para extração dos parâmetros lognormais m e σ de modo a contribuir para a minimização do erro RMS entre a distribuição de atenuação gerada e a distribuição de atenuação experimental. Para cada par de valores de parâmetros lognormais m e σ , é gerado um conjunto de números aleatórios e a CCDF de atenuação é gerada. O valor do A_{offset} é extraído da CCDF gerada como sendo o valor de atenuação que pode ser excedido durante 10% do tempo, percentual máximo da faixa de ajuste lognormal que foi especificada. A CCDF de atenuação gerada é deslocada no eixo de atenuação em um valor referente à subtração do parâmetro A_{offset} . Após o deslocamento é calculado o erro RMS, em dB, entre valores de atenuação da curva da CCDF de atenuação gerada e deslocada e os valores de atenuação da curva da CCDF de atenuação experimental. A simulação é realizada até que toda a faixa escolhida de parâmetros lognormais seja utilizada.

Os parâmetros escolhidos são os que possibilitaram o menor valor de erro RMS, em dB.

O único parâmetro do modelo TMB que é extraído com o mesmo procedimento utilizado no modelo EMB é o parâmetro dinâmico β . A diferença é que um conjunto mais limitado de intervalos de tempo em segundos foi usado: [1; 10; 20; 30] ou [10; 20; 30], conforme a taxa de amostragem dos dados experimentais. Esta alteração em relação ao modelo EMB foi definida através de análise de resultados obtidos para diferentes conjuntos. As classes de atenuação utilizadas são as mesmas que foram sugeridas em [07] e que foram consideradas na aplicação do modelo EMB aos dados dos enlaces terrestres neste trabalho. Outros valores de classes de atenuação também foram experimentados, mas o conjunto citado acabou sendo o que proporcionou o melhor resultado.

5.4. Comparação entre a extração dos parâmetros lognormais pelos modelos EMB e TMB

O modelo TMB realiza o ajuste lognormal buscando a minimização do erro RMS da atenuação diretamente no gráfico da CCDF de atenuação. Para o cálculo do erro RMS, portanto, é necessário especificar os percentuais cujos valores de atenuação serão considerados. Os percentuais padrões especificados são: 0,001, 0,002, 0,003, 0,005, 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30 e 50. Os valores dos erros RMS são calculados nos percentuais padrões que estejam dentro da faixa de ajuste considerada.

O gráfico da Figura 5.5 é referente ao enlace Bradesco e apresenta o gráfico da CCDF obtida através do ajuste do modelo TMB comparado com o gráfico obtido através do ajuste do modelo EMB. Ainda que nas atenuações mais baixas o ajuste do modelo EMB esteja mais próximo da estatística experimental, para valores de atenuação entre cerca de 7 e 15 dB e acima de 25 dB o ajuste do modelo TMB está mais próximo da curva experimental. O valor do erro RMS de atenuação na CCDF do modelo EMB para a faixa de ajuste entre 0,01 e 10%, é igual a 5,43 dB enquanto no caso do modelo TMB o erro RMS é igual a 1,29 dB.

Os gráficos para os demais enlaces estão apresentados no Apêndice A.

A Tabela 5.2 apresenta os valores de erro RMS para os ajustes lognormais de todos os enlaces através dos modelos EMB e TMB.

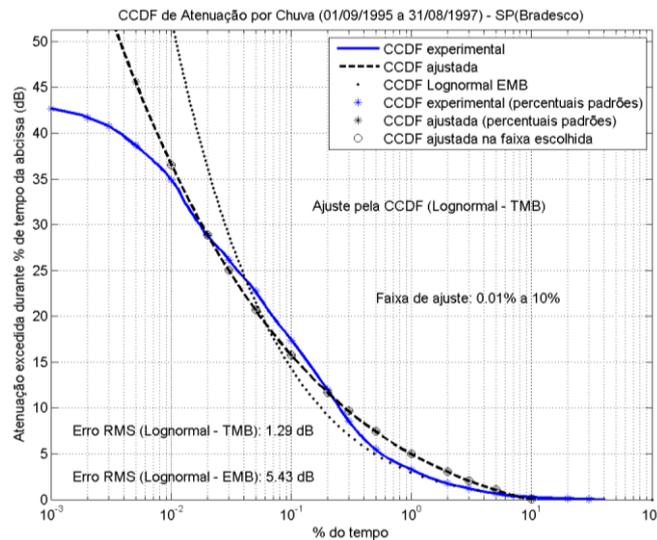


Figura 5.5 – Resultado do ajuste lognormal dos modelos EMB e TMB – Bradesco (0,01 a 10%)

Tabela 5.2 – Erros RMS no ajuste lognormal através dos modelos EMB e TMB

Enlace	Faixa (%)	Erro RMS EMB (dB)	Erro RMS TMB (dB)
Bradesco	0,01 a 10	5,43	1,29
Cenesp15	0,01 a 10	5,87	1,48
Scania	0,03 a 10	3,33	1,25
Barueri	0,02 a 10	5,40	1,38
Paranapiacaba	0,10 a 10	4,13	0,94

Os resultados indicam que o ajuste do modelo TMB é mais indicado para as regiões sujeitas a atenuações intensas.

Os parâmetros lognormais m e σ extraídos através do modelo TMB foram utilizados para gerar o mesmo tipo de gráfico onde é feita a extração dos parâmetros do modelo EMB. Desta forma foi possível ilustrar graficamente a diferença entre os ajustes realizados pelos dois modelos.

A comparação está apresentada na Figura 5.6 onde o gráfico referente ao modelo TMB mostra que a forma de extrair os parâmetros lognormais através de ajuste de curva diretamente na CCDF de atenuação prioriza as atenuações mais altas enquanto o ajuste realizado pelo modelo EMB prioriza as atenuações mais baixas.

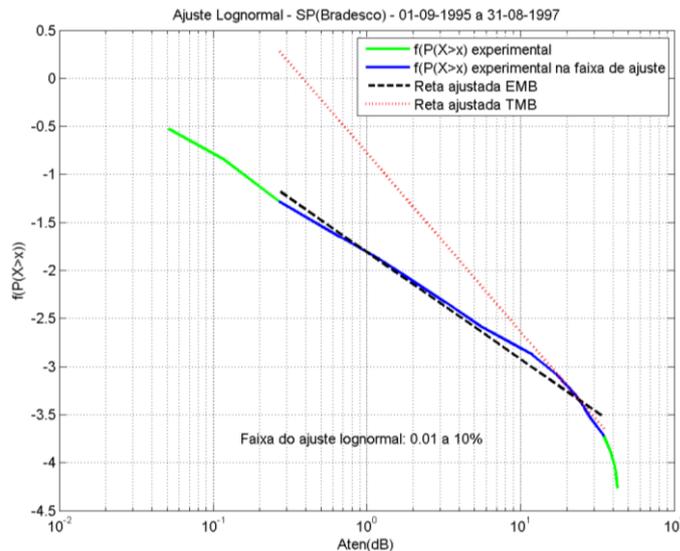


Figura 5.6 – Comparação entre ajustes dos modelos EMB e TMB – Bradesco

5.5. Avaliação das estatísticas de atenuação para períodos diários de 8 horas

Os modelos MB e EMB foram concebidos com base em dados de atenuação por chuva de regiões de clima temperado onde a incidência de chuvas é menor que em regiões de clima tropical.

No caso das regiões de clima tropical, existe a percepção de que as chuvas ocorrem com maior intensidade em determinados horários do dia especialmente durante o verão. Neste trabalho foi realizado um estudo com os dados dos enlaces terrestres para avaliar se as séries temporais refletem esta percepção e se as distribuições de atenuação por chuva de diferentes períodos do dia apresentam variação significativa. Para isto, as séries temporais de atenuação por chuva dos enlaces terrestres pesquisados foram segmentadas em séries temporais parciais, cada uma relativa a um mesmo período de 8 horas contínuas diárias.

O gráfico da Figura 5.7 mostra que as distribuições de atenuação de períodos contínuos de 8 horas diárias apresentam grande variação entre si e em relação à distribuição de atenuação do dia completo. As curvas referentes aos períodos que incluem os horários da tarde estão acima da distribuição do dia completo indicando que estes períodos são mais sujeitos a atenuação por chuva.

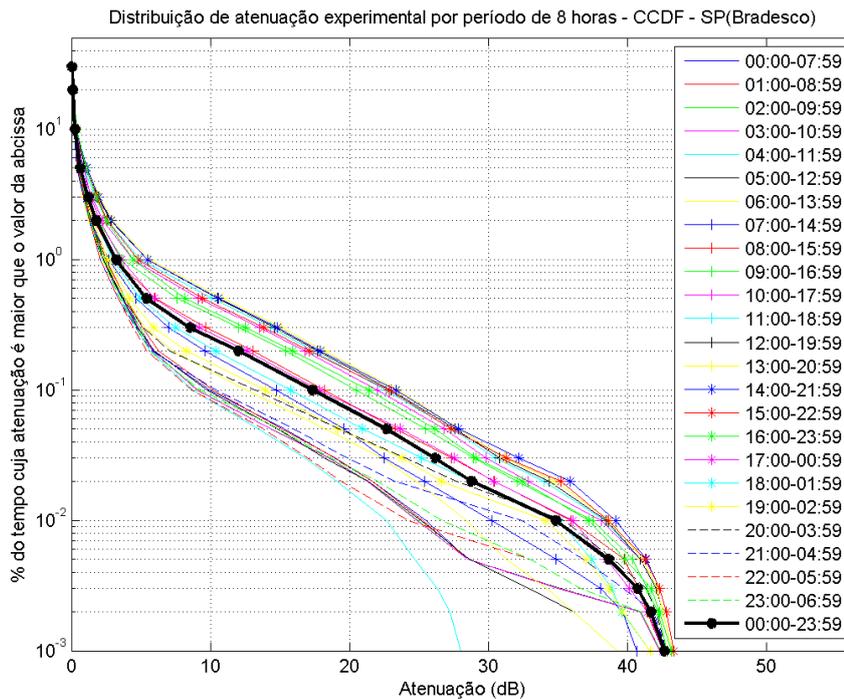


Figura 5.7 – CCDF de atenuação para períodos de 8 horas – Bradesco

A Figura 5.8 apresenta gráficos para os dois períodos de 8 horas que apresentam as distribuições extremas de atenuação. A mesma figura apresenta as distribuições relativas ao período com as 8 horas restantes do dia e ao dia todo. A mesma análise foi realizada para o enlace Cenesp15, cujas características e quantidade de dados experimentais disponíveis são muito próximas do caso do enlace Bradesco, e mostra a mesma variação acentuada na distribuição de atenuação durante o dia conforme está ilustrado no gráfico da Figura 5.9.

A diferença principal nas distribuições do enlace Cenesp15 em relação às do enlace Bradesco está relacionada com os horários referentes aos períodos de 8 horas de valores extremos. Enquanto no enlace Bradesco o período do dia mais sujeito a atenuação é entre 14:00 Hs e 21:59 Hs, no caso do enlace Cenesp15 o período é de 12:00 Hs até 19:59 Hs.

Apesar da diferença entre os horários de início e fim dos períodos extremos, ambos gráficos mostram a predominância da atenuação por chuva no período da tarde e início da noite. A diferença poderia ser explicada pelo fato de que uma parte dos dados dos dois enlaces foi coletada em épocas diferentes, como foi mostrado na Figura 2.3 e na Tabela 2.2, mas também é possível que a direção do vento, e conseqüentemente da direção de deslocamento da célula de chuva, em relação aos percursos dos enlaces tenha alguma influência. Esta influência,

entretanto, não foi investigada nesta pesquisa. O objetivo foi apenas identificar a existência de variação entre as distribuições conforme o período diário de 8 horas contínuas que é considerado.

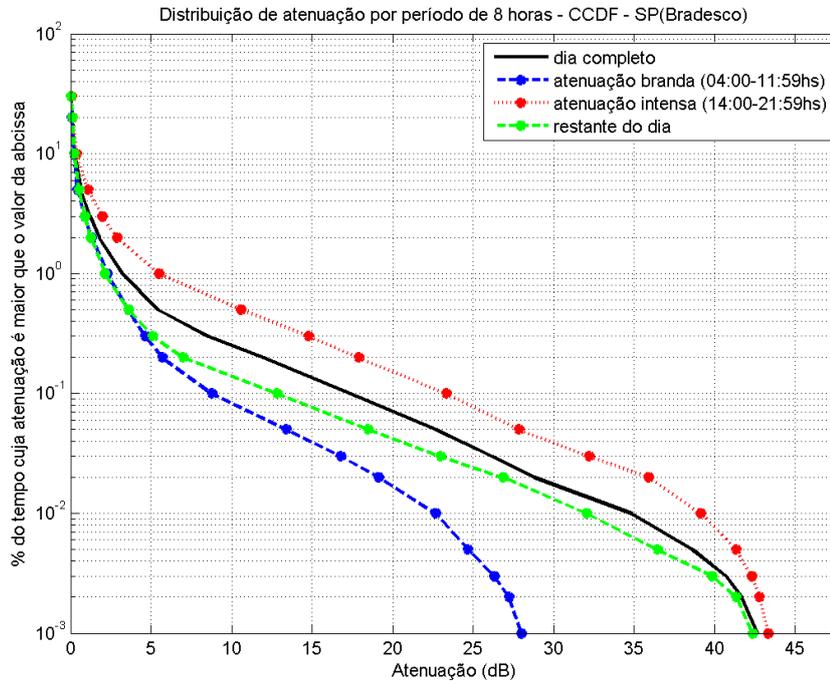


Figura 5.8 – CCDF de atenuação para períodos extremos de intensidade de atenuação – Bradesco

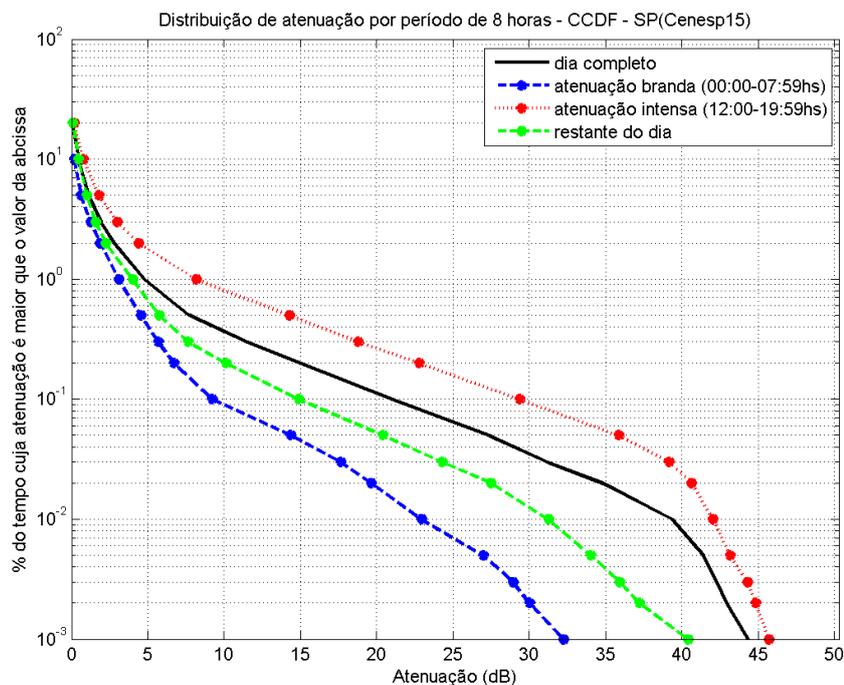


Figura 5.9 – CCDF de atenuação para períodos extremos de intensidade de atenuação – Cenesp15

O ajuste lognormal do modelo EMB foi aplicado às séries temporais parciais do enlace Bradesco e os gráficos estão apresentados nas Figuras 5.10 a 5.12.

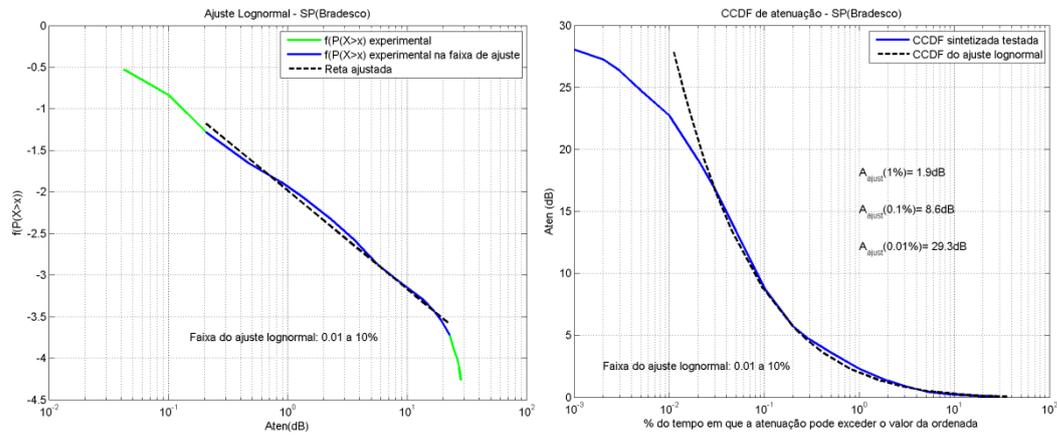


Figura 5.10 – Ajuste lognormal EMB da distribuição de atenuação branda – Bradesco

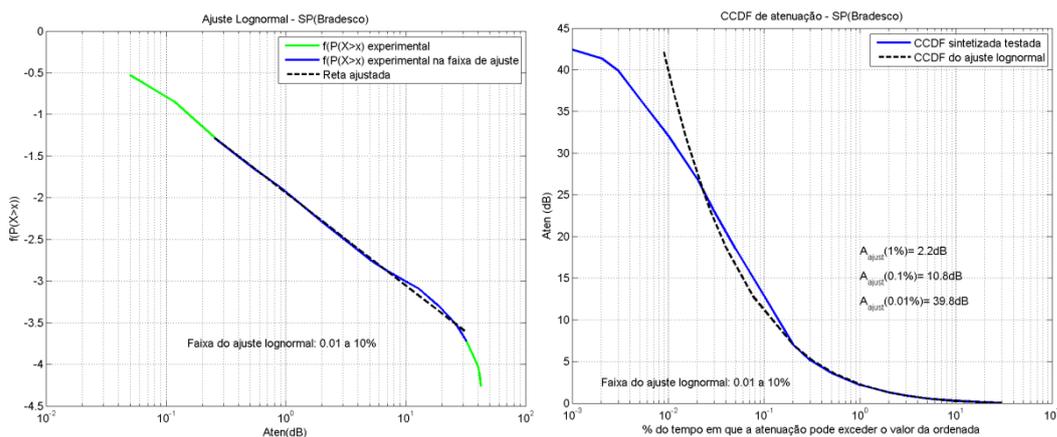


Figura 5.11 – Ajuste lognormal EMB da distribuição de atenuação média – Bradesco

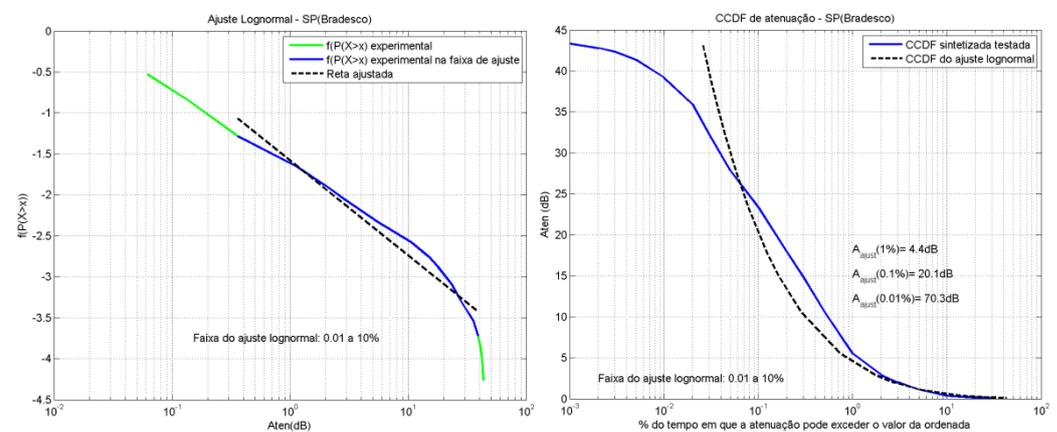


Figura 5.12 – Ajuste lognormal EMB da distribuição de atenuação intensa – Bradesco

Os gráficos mostram que quanto mais severas são as intensidades de atenuação por chuva, mais longe estão as distribuições de atenuação por chuva da modelagem lognormal.

Os gráficos relativos ao enlace Cenesp15 estão apresentados no Apêndice B e mostram que distribuição de atenuação mais intensa é também a que mais longe está da modelagem lognormal.

Estes resultados indicam que a modelagem lognormal pode não ser a mais apropriada para enlaces terrestres localizados numa região tropical e que outros tipos de distribuição devem ser considerados.

5.6. Ajuste através de outros tipos de distribuição

Parte da literatura sobre modelagem estatística de taxas de chuvas e de atenuação por chuva indica a distribuição Lognormal como a mais adequada [27-31]. É importante observar, entretanto, que as pesquisas que indicam este tipo de ajuste foram sempre realizadas com dados obtidos em regiões de clima temperado.

S. H. Lin é um dos pesquisadores cujas publicações recebem mais referências quando o ajuste Lognormal é citado para as estatísticas de taxas de chuvas e de atenuação por chuva. Ele apresentou um estudo [32] baseado em 31 conjuntos de dados experimentais de atenuação por chuva em enlaces operando acima de 10 GHz nos Estados Unidos, Inglaterra, Japão, Itália e Canadá. Este estudo concluiu que a distribuição de atenuação por chuva α , em dB, é aproximadamente Lognormal com um desvio padrão σ_a de $\log_{10}\alpha$ variando entre 0,44 e 0,71 para enlaces de comunicação por satélite e entre 0,33 e 0,86 para enlaces terrestres. Neste estudo ele apresenta ainda uma base teórica para justificar os resultados que apontam a distribuição Lognormal como a mais adequada. Segundo ele, a atenuação por chuva é função de muitos parâmetros do meio de propagação como, por exemplo, o número total de gotas de chuva no percurso do enlace, a distribuição do tamanho das gotas, as características espaciais da densidade da chuva ao longo do enlace, a velocidade do vento, as formas e tamanho das células de chuva, a temperatura das gotas, etc. Portanto, a atenuação por chuva é uma função de muitos parâmetros do meio de propagação

que são aleatórios e variantes no tempo, além de dependerem das condições climáticas, localização e altitude.

Assumindo que a atenuação por chuva $\alpha(t)$ pode ser afetada por um grande número de componentes aleatórios que variam com o tempo, temos [32]:

$$\alpha(t) = S_1(t) \cdot S_2(t) \cdot S_3(t) \dots S_n(t) \quad (5.1)$$

onde cada $\{S_i(t)\}_{i=1}^n$ representa um dos fatores aleatórios de influência do meio.

Aplicando o logaritmo a ambos os lados da Equação 5.1, temos:

$$\log \alpha = \log S_1 + \log S_2 + \log S_3 + \dots + \log S_n \quad (5.2)$$

A Equação 5.2 mostra que o logaritmo da atenuação é a soma de grande número de variáveis aleatórias. Pelo Teorema do Limite Central [33], a distribuição de $\log \alpha$ se aproxima de uma distribuição Normal para um número grande de fatores se não houver um fator dominante. Portanto, a distribuição de α é aproximadamente Lognormal.

O estudo enfatiza, entretanto, que alguns dos fatores variam muito lentamente e suas variações podem levar meses ou anos para terem sua influência observada. Um exemplo é apresentado em que uma chuva cuja intensidade excedeu o valor de 150 mm/h por um período de 5 minutos na região de New Jersey demora 5 anos para ocorrer novamente. Sendo assim, se a base de dados utilizada no estudo fosse inferior a 5 anos, a chance de não considerar este caso extremo seria grande. Portanto, estatísticas de longo prazo são imprescindíveis para um estudo deste tipo [32].

A distribuição Gamma foi considerada uma alternativa para chuvas de alta intensidade, cujos valores fossem superiores a 50 mm/h [27, 34, 35], e foi considerada adequada para todas as faixas de taxas de chuvas no Japão [36].

A distribuição Pareto Generalizada foi considerada a mais apropriada para todas as faixas de taxas de chuvas por Reffye [35] porque se aproxima de uma distribuição Lognormal nas taxas mais baixas e de uma distribuição Gamma nas taxas mais altas. Este resultado é confirmado por Burgueño et. al [37] em uma pesquisa realizada com dados de taxas de chuvas que foram coletados ininterruptamente a cada 10 segundos durante 49 anos na região de Barcelona. Os resultados mostram que as estatísticas de taxas de chuvas seguem uma distribuição Gamma no caso de taxas de chuva superiores a 25 mm/h, mas são mais bem ajustadas ainda através da distribuição Pareto Generalizada quando são

consideradas todas as faixas de taxas de chuvas, incluindo valores de até 250 mm/h. Nesta pesquisa o ajuste através de distribuição Lognormal mostrou-se insatisfatório para taxas de chuvas superiores a 60 mm/h. Apesar de não ser comum na Europa, a região onde foram coletados os dados é sujeita a chuvas cujas intensidades podem superar 150 mm/h. Com base em resultados da pesquisa, os autores afirmam ainda que o período mínimo de tempo para obter estatísticas confiáveis é de 7 anos, mas é desejável que sejam considerados 10 anos, o que confirma resultados obtidos por Fedi [29].

Mais recentemente, estudos mostraram que as estatísticas de taxas de chuva em regiões tropicais e subtropicais seguem distribuição Gamma [38, 39].

Um estudo anterior realizado com os enlaces terrestres Bradesco, Cenesp15 e Barueri mostra que as estatísticas da atenuação diferencial por chuva para Bradesco-Barueri e Cenesp15-Barueri seguem a distribuição Gamma [40], mas a distribuição de atenuação de cada enlace não foi apresentada no referido estudo.

Outro estudo mostra que no caso da cidade de Belém, localizada em uma região de clima equatorial, a distribuição Gamma também é a mais adequada para as taxas de chuvas e as estatísticas de atenuação por chuva seguem o mesmo tipo de distribuição [41].

Uma proposta de modelo de predição de atenuação por chuva em enlaces de comunicação via satélite com base em dados de diferentes regiões, entre as quais Canadá, Estados Unidos, Grã-Bretanha e Japão, conclui que a distribuição Weibull é a que melhor descreve as estatísticas de taxa de chuvas e atenuação por chuva para todas as faixas de percentuais [42].

Durante este trabalho outros tipos de distribuição foram avaliados em [43], mas os tipos de distribuição cujas curvas apresentam as formas próximas das curvas da distribuição dos dados experimentais são as mesmas que foram mencionadas: Pareto Generalizada, Weibull e Gamma.

As equações das funções densidade de probabilidade (*probability density function* – PDF) de cada um dos tipos de distribuição citados estão apresentadas nas Equações 5.3 a 5.5 [43].

$$p_{Pareto}(x) = \frac{c \cdot a^c}{x^{c+1}}, x \geq a, a > 0, c > 0 \quad (5.3)$$

$$p_{Gamma}(x) = \frac{1}{b^c \Gamma(c)} x^{c-1} e^{-\frac{x}{b}}, \quad x \geq 0, b > 0, c > 0 \quad (5.4)$$

$$p_{Weibull}(x) = \frac{\beta}{\eta^\beta} x^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta}, \quad x \geq 0, \eta > 0, \beta > 0 \quad (5.5)$$

As distribuições foram testadas através de ajuste de curva no gráfico da CCDF de atenuação experimental da mesma forma como foi feito no modelo TMB, buscando minimizar o erro RMS da atenuação dentro da faixa de percentuais de tempo considerada para cada enlace.

Os gráficos com os ajustes realizados para o enlace Cenesp15 estão apresentados nas Figuras 5.13 a 5.15. Os gráficos com os ajustes realizados para os demais enlaces estão apresentados no Apêndice C.

A Tabela 5.3 apresenta os valores do erro RMS para as cinco distribuições testadas nos cinco enlaces analisados.

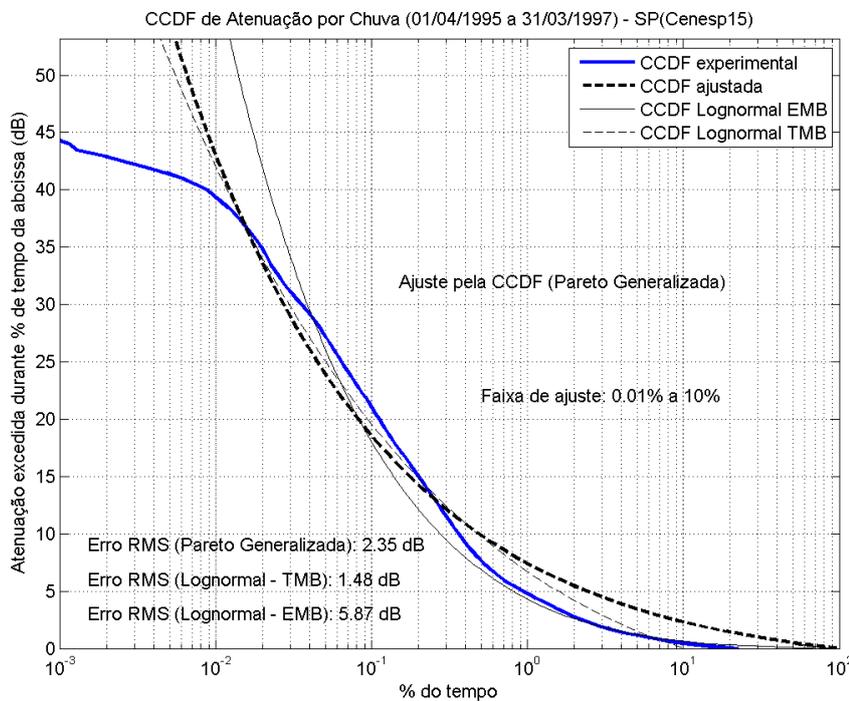


Figura 5.13 – Ajuste da CCDF de atenuação através da distribuição Pareto – Cenesp15

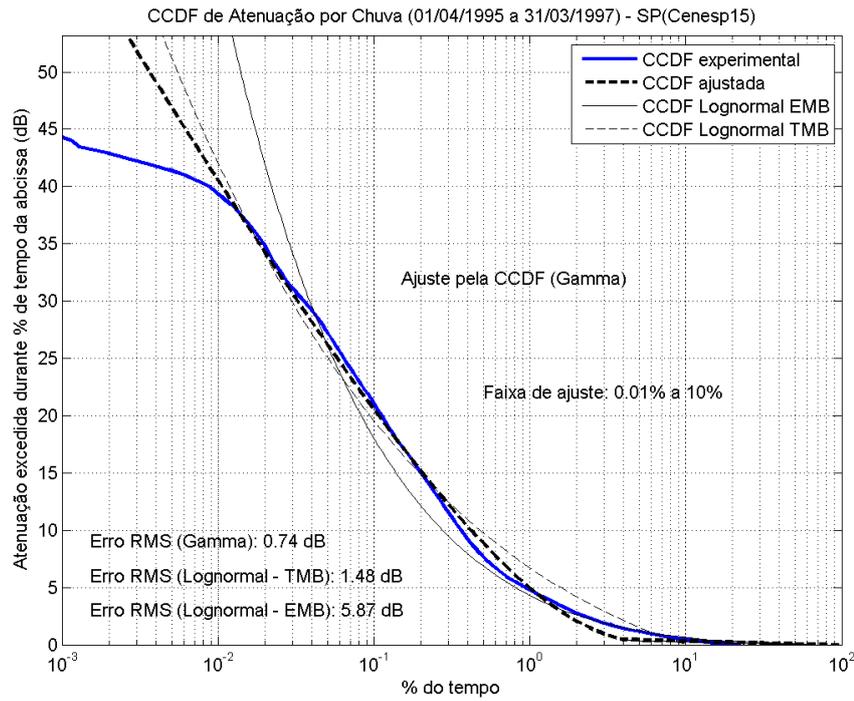


Figura 5.14 – Ajuste da CCDF de atenuação através da distribuição Gamma – Cenesp15

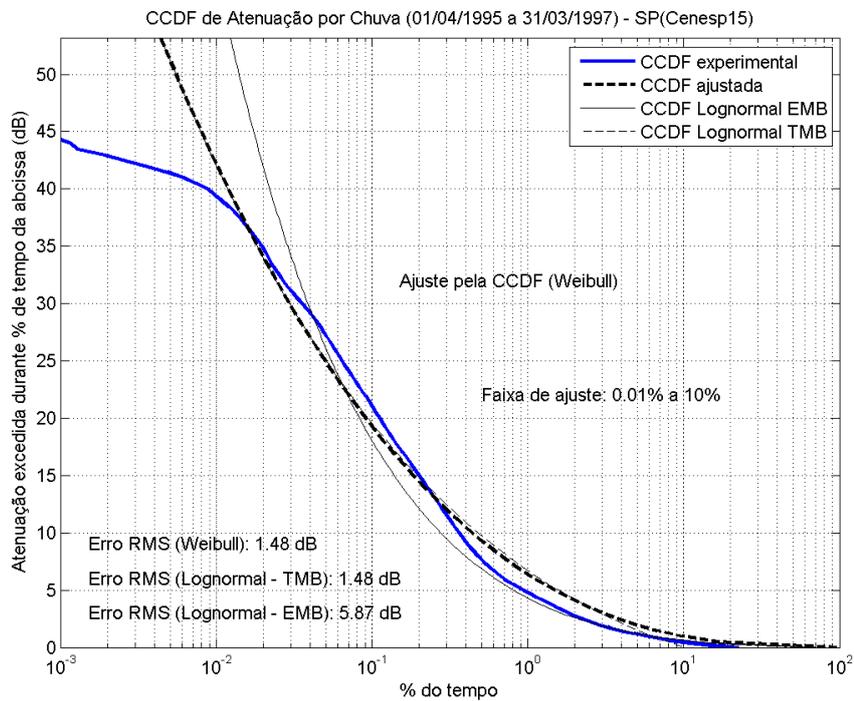


Figura 5.15 – Ajuste da CCDF de atenuação através da distribuição Weibull – Cenesp15

Tabela 5.3 – Erros RMS da CCDF de atenuação (em dB) para ajustes através de cinco tipos diferentes de distribuições

Enlace	Faixa de ajuste (%)	Lognormal EMB	Lognormal TMB	Pareto Generalizada	Gamma	Weibull
Bradesco	0,01 a 10	5,43	1,29	1,97	0,55	1,23
Cenesp15	0,01 a 10	5,87	1,48	2,35	0,74	1,48
Scania	0,03 a 10	3,33	1,25	1,80	0,98	1,17
Barueri	0,02 a 10	5,40	1,38	2,11	0,75	1,27
Paranapiacaba	0,10 a 10	4,13	0,94	1,86	0,46	1,05

Estes resultados indicam que na faixa de ajuste utilizada para cada enlace, o ajuste através da distribuição Gamma é o mais preciso para a modelagem estatística da atenuação por chuva nos enlaces terrestres localizados na região de São Paulo. Como São Paulo é uma região de clima tropical, os resultados estão de acordo com alguns dos estudos mencionados anteriormente.

Sendo assim, um modelo de sintetização de séries temporais de atenuação por chuva baseado na distribuição Gamma foi desenvolvido e é apresentado no próximo capítulo.