

5

CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS

Na literatura técnica tem sido dada pouca atenção ao modelamento das características dinâmicas da atenuação por chuvas em enlaces terrestres. O conhecimento dessas características é de especial interesse, por exemplo, na avaliação da disponibilidade e qualidade de um determinado sistema.

Os principais trabalhos que existem sobre este assunto tratam do problema em enlaces satélite e para regiões na Europa e nos Estados Unidos. Assim, os poucos modelos de previsão existentes podem não são adequados para caracterizar os efeitos da atenuação por chuvas em enlaces terrestres e em climas tropicais e equatoriais.

Entre as principais quantidades que caracterizam o comportamento dinâmico da atenuação por chuvas estão o número de eventos e a duração de eventos de atenuação. O número de eventos para um dado limiar da atenuação é definido como o número de vezes que o sinal cruza este limiar num só sentido, voltando abaixo deste limiar num determinado intervalo de tempo. Por sua vez, a duração de eventos para um determinado limiar de atenuação é definida como o tempo que o sinal permanece acima do limiar, voltando abaixo deste limiar num determinado intervalo de tempo.

5.1.

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTATÍSTICO DA DURAÇÃO E NÚMERO DE EVENTOS DE CHUVA

A maioria dos trabalhos existentes sobre a distribuição cumulativa da duração e número de eventos de chuvas para enlaces satélite, as definem como log-normais ou de Weibull [26-29]. Embora a escolha da distribuição log-normal apresente bons resultados, esta distribuição tem a desvantagem de ter uma *fdc* (função de distribuição cumulativa) de difícil tratamento matemático. A

distribuição de Poisson, assim como a combinação de duas funções exponenciais [29], também têm sido sugeridas para a caracterização das características dinâmicas da atenuação por chuvas. Todavia, conforme foi discutido no Capítulo 2, a distribuição de Weibull se torna bastante apropriada para modelar a duração e o número de eventos de chuva e tem sido utilizada com sucesso para modelar estes efeitos no caso de enlaces satélite [31, 53].

De forma similar à seguida no Capítulo 4 para a desenvolvimento do modelo 2 para a previsão da atenuação diferencial por chuvas, as distribuições cumulativas da duração e o número de eventos serão ajustadas pela distribuição de Weibull diretamente a partir da expressão (2.35):

$$P = e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta} \quad (5.1)$$

onde:

P = probabilidade de que a duração (o número) de eventos exceda um determinado valor.

T = tempo (seg, min, etc.)

A título de exemplo, é escolhido o enlace CENESP15-RIS e o nível de atenuação de 10 dB para exemplificar o ajuste. A Fig. 72, mostra a distribuição cumulativa da duração de eventos de chuva medida e a prevista por uma distribuição de Weibull ajustada aos resultados medidos para este enlace.

Observa-se, na Fig. 72, a elevada correlação (99,43 %) entre as distribuições cumulativas medida e prevista.

A Fig. 73, ilustra as distribuições cumulativas, medida e prevista pela distribuição de Weibull ajustada, do número de eventos de chuva, para o enlace CENESP15-RIS no limiar de 10 dB.

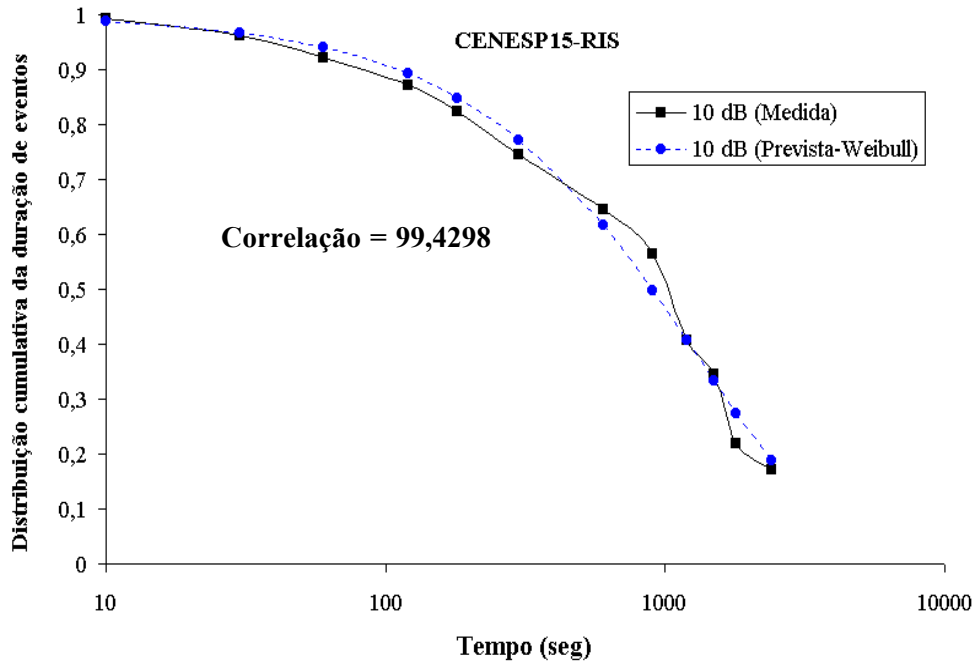


Figura 72 Distribuições cumulativas medida e prevista da duração de eventos de atenuação por chuvas para o enlace CENESP15-RIS (limiar de 10 dB).

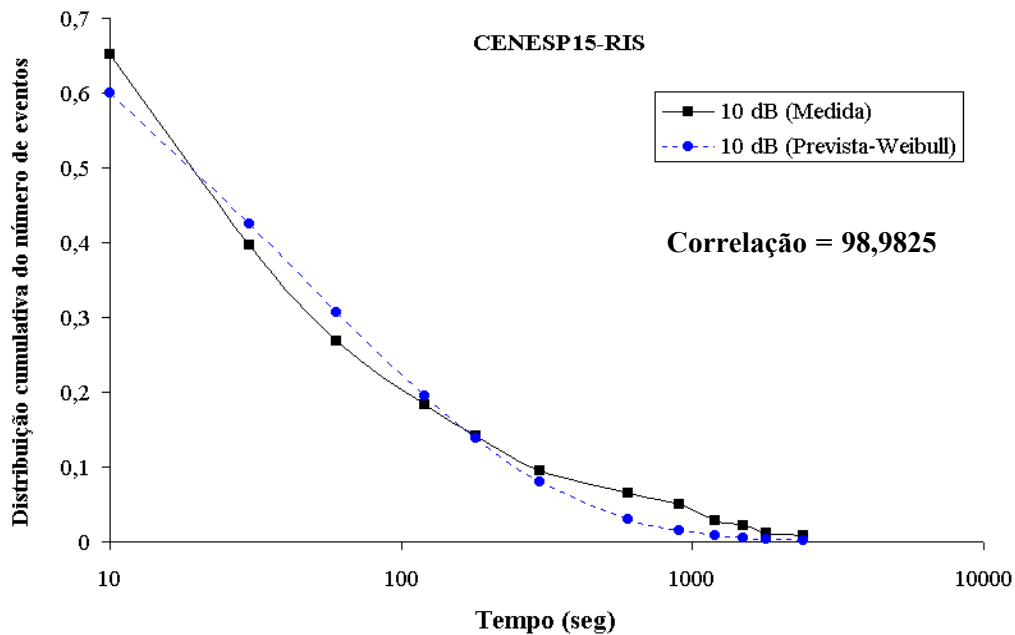


Figura 73 Distribuições cumulativas medida e prevista do número de eventos de atenuação por chuvas para o enlace CENESP15-RIS (limiar de 10 dB).

Novamente pode-se observar uma alta correlação (98,98 %) entre as distribuições cumulativas medida e prevista, neste caso para o número de eventos. Todavia, apesar dessa alta correlação, observa-se uma ligeira deterioração da concordância entre os grupos de valores para grandes durações.

As Figs. 72 e 73 permitem concluir que, efetivamente, as distribuições cumulativas da duração e número de eventos de atenuação por chuvas apresentam comportamento estatístico bem caracterizado pela distribuição de Weibull.

Uma outra análise estatística relevante é a referente à duração média de eventos de atenuação por chuvas. A duração média de eventos, para um determinado nível de atenuação, é definida como a razão entre o tempo total em que o sinal excede este nível e o número total de eventos relativos a este nível.

A Tabela 30 junto à Fig. 74 mostram as durações médias, por nível de atenuação, para o enlace enlaces CENESP15-RIS, a título de exemplo.

Tabela 30 Duração média de eventos de chuva para o enlace CENESP15-RIS.

Nível de atenuação (dB)	Duração total (seg)	Total de eventos	Duração média (seg)
5	311228	3363	92,54
10	80686	589	136,99
15	37112	198	187,43
20	22540	104	216,73
25	12768	81	157,63
30	6090	44	138,41
35	1562	26	60,08
40	182	10	18,20

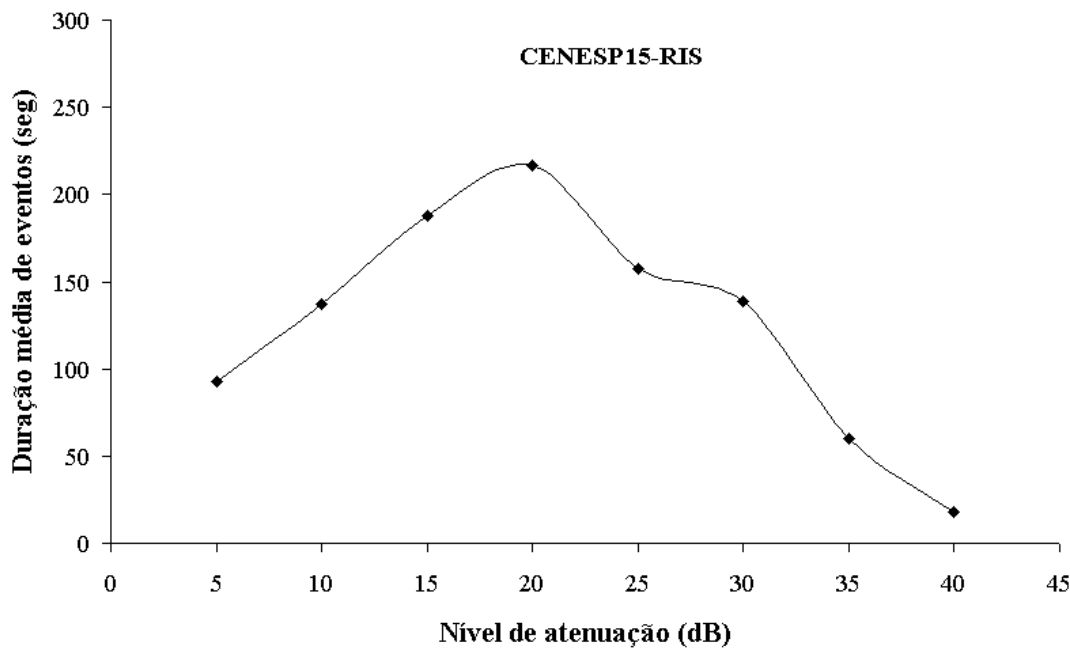


Figura 74 Duração média de eventos de chuva, para o enlace CENESP15-RIS.

5.2.

MODELAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA DA DURAÇÃO DE EVENTOS DE CHUVA PARA CLIMAS TROPICAIS E EQUATORIAIS

5.2.1.

Determinação dos Parâmetros η e β da Distribuição da Duração de Eventos

Conforme observado na seção 5.1, a distribuição cumulativa da duração de eventos de chuva segue um comportamento similar à distribuição de Weibull. Portanto, nesta seção a distribuição cumulativa da duração de eventos de atenuação por chuvas será modelada seguindo um procedimento similar ao utilizado no desenvolvimento do modelo 2 para a previsão da atenuação diferencial por chuvas no capítulo 4. Primeiramente serão ajustas distribuições cumulativas de Weibull às distribuições medidas correspondentes a cada um dos 7 enlaces de São Paulo (operando a 15 GHz e 18 GHz). Uma vez obtidos os pares (η, β) para cada enlace e cada nível de atenuação considerado, se procederá à obtenção de uma expressão matemática empírica para η e β em função de parâmetros dos enlaces. Estes valores são resumidos na Tabela 46 (Apêndice C). As correlações mínima e máxima foram de 96,78 % e 99,89 %, respectivamente.

Pode ser observado na Tabela 46 (Apêndice C) que o nível de 5 dB foi excluído para o modelamento pois pode incluir na atenuação os efeitos de outros fenômenos diferentes aos da chuva. Também foram excluídos os níveis de 30, 35 e 40 dB, por apresentarem muito poucos valores para suas respectivas distribuições cumulativas da duração de eventos e, portanto, baixa confiabilidade estatística.

5.2.2. Determinação da Expressão de η

Para determinar uma expressão matemática que relacione o parâmetro η da distribuição de Weibull e os parâmetros dos enlaces, foram analisados gráficos de espalhamento entre η e alguns destes parâmetros.

A Figs. 75, 76 e 77, mostram as curvas de espalhamento do parâmetro η em função do comprimento do enlace, o nível de atenuação e a duração máxima de eventos por nível, respectivamente. Estes são os parâmetros com os quais η apresentou maior correlação.

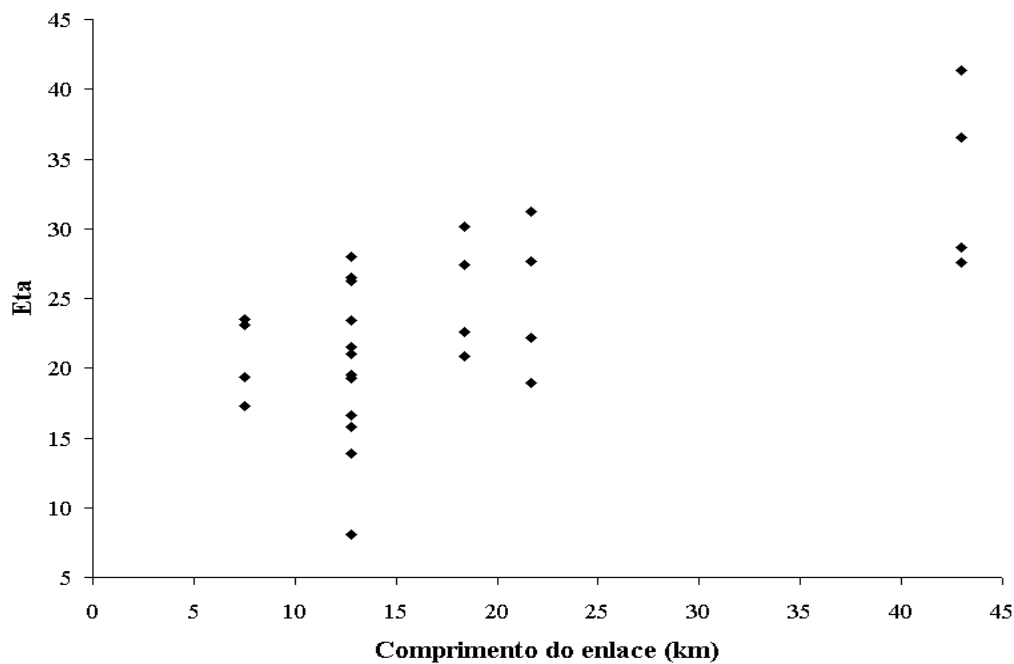


Figura 75 Parâmetro η versus o comprimento do enlace.

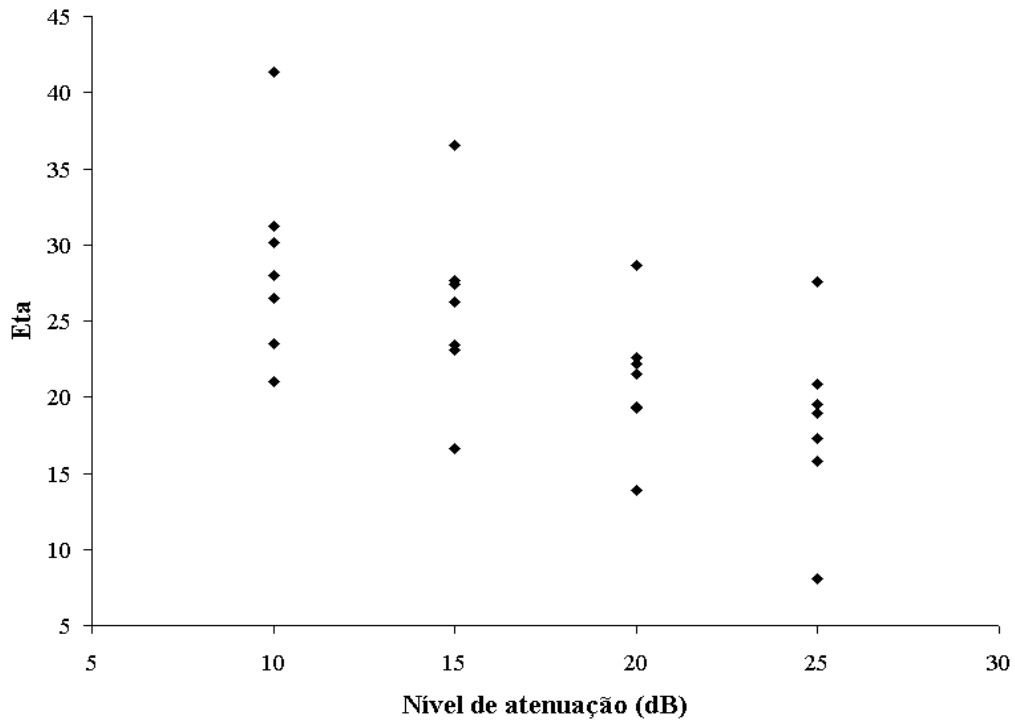


Figura 76 Parâmetro η versus o nível de atenuação.

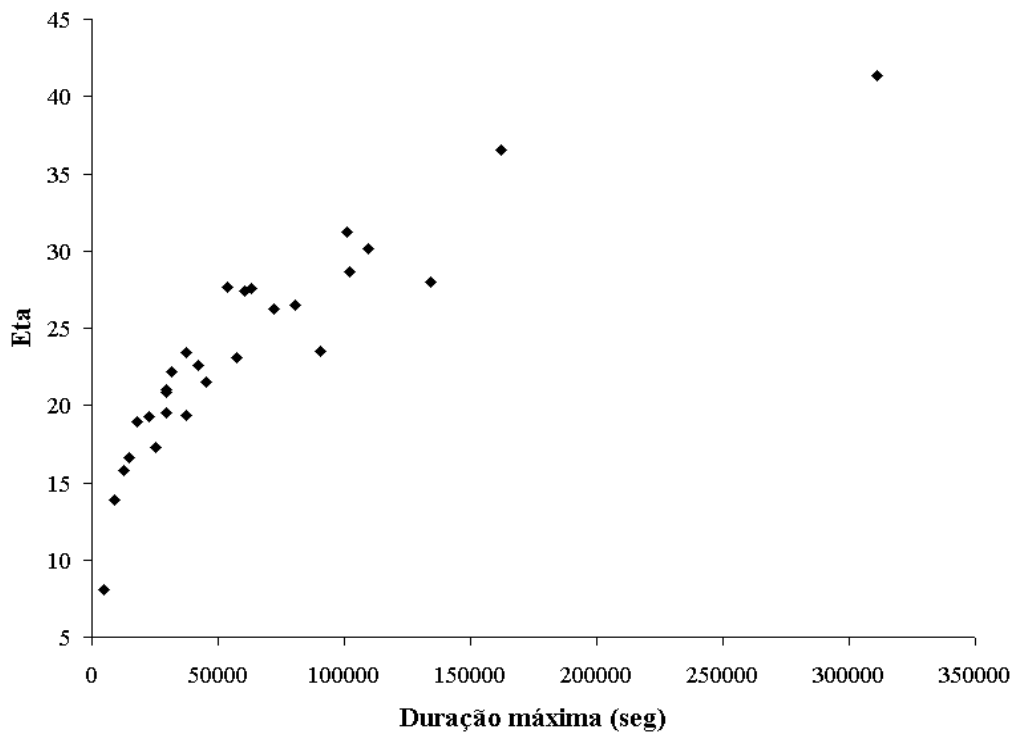


Figura 77 Parâmetro η versus a duração máxima por nível de atenuação.

Das Figs. 75, 76 e 77, pode-se observar que existe uma alta correlação entre os valores do parâmetro η e a duração máxima de eventos por nível de atenuação e que a dependência é do tipo logarítmica. Também observa-se uma boa correlação e uma dependência linear entre o parâmetro η e o comprimento do enlace e o nível de atenuação. Assim, η pode ser representada por uma função do tipo:

$$\eta = g_1 d + g_2 N + g_3 \log(g_4 D_{\max}) \quad (5.2)$$

onde:

d = Comprimento do enlace (km)

N = Nível de atenuação (dB)

D_{\max} = Duração máxima por nível e por enlace (min)

Os valores obtidos para as constantes g_1 , g_2 , g_3 e g_4 , são resumidos na Tabela 31.

Tabela 31 Valores das constantes de ajuste para o parâmetro η .

g_1	g_2	g_3	g_4
0,198	-0,191	11,77	0,129

Portanto, o parâmetro η é dado por:

$$\eta = 0,198 d - 0,191 N + 11,77 \log(0,129 D_{\max}) \quad (5.3)$$

A boa concordância entre os valores observados de η e os previstos pela expressão (5.3), é mostrada nas Figs. 78 e 79, que apresentam o gráfico de espalhamento entre os valores observados e previstos (de η) e a distribuição dos resíduos, respectivamente.

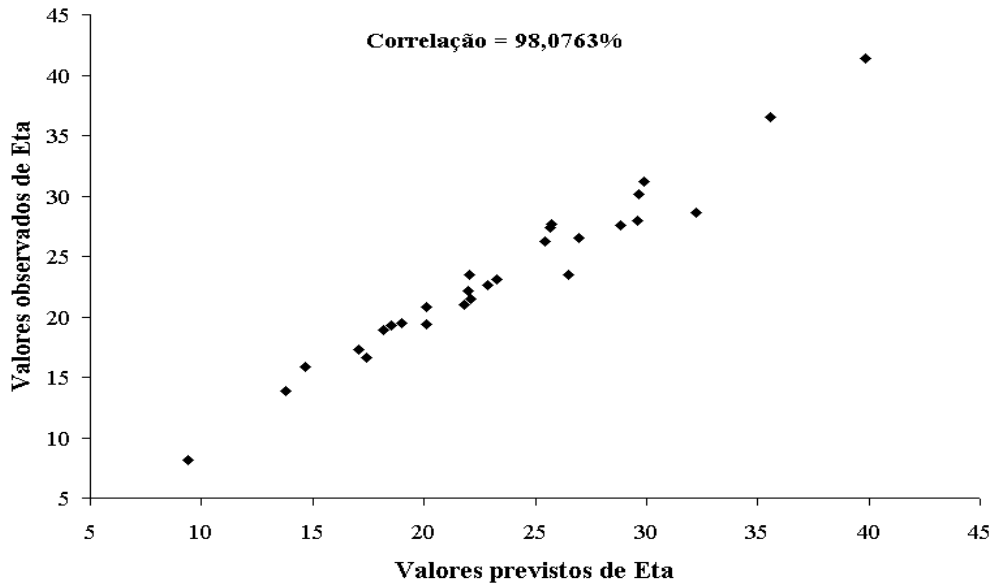


Figura 78 Valores de η previstos *versus* valores de η observados.

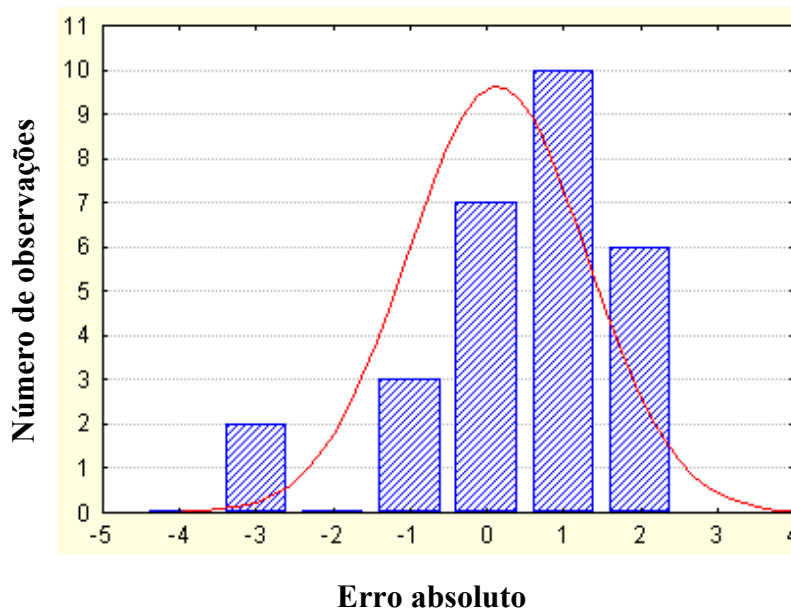


Figura 79 Distribuição dos resíduos para o parâmetro η .

5.2.3.

Determinação da Expressão de β

Os gráficos de espalhamento do parâmetro β em função do comprimento do enlace, o nível de atenuação e a duração máxima de eventos por nível, são mostrados nas Figs. 80, 81 e 82, respectivamente.

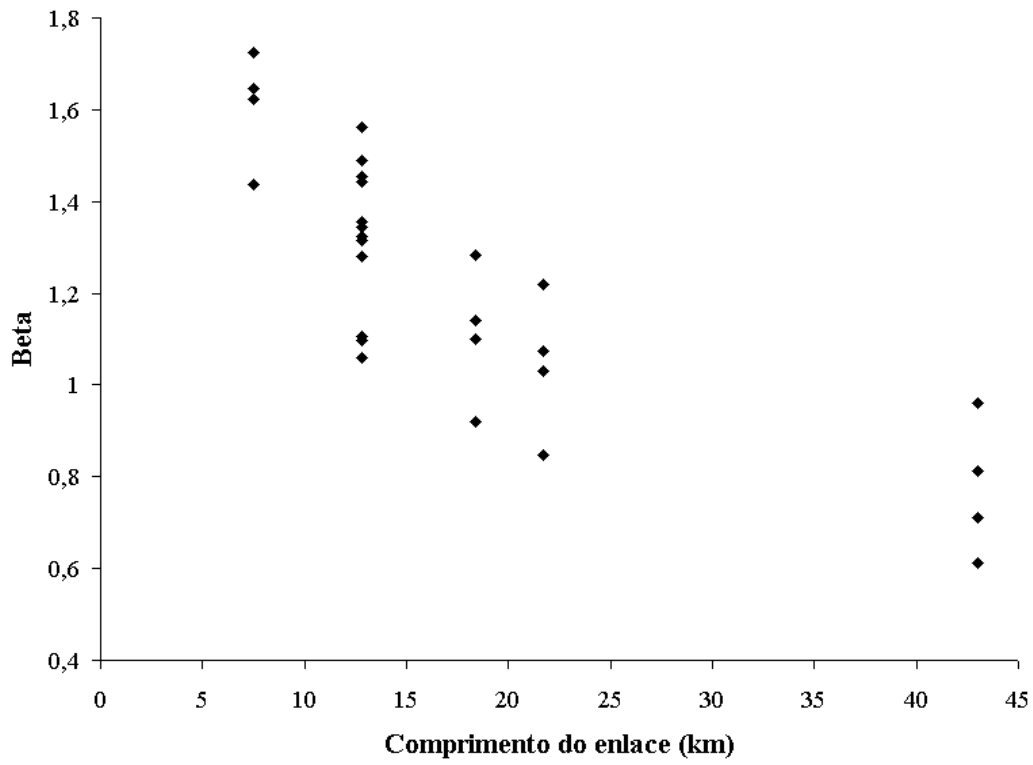


Figura 80 Parâmetro β vs. comprimento do enlace.

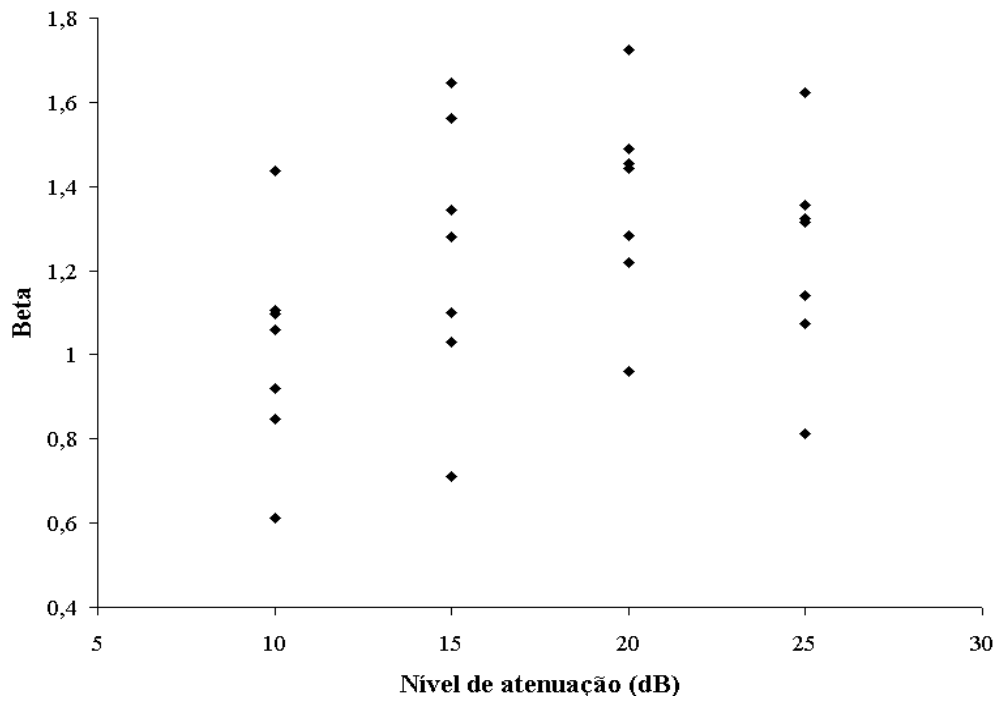


Figura 81 Parâmetro β vs. nível de atenuação.

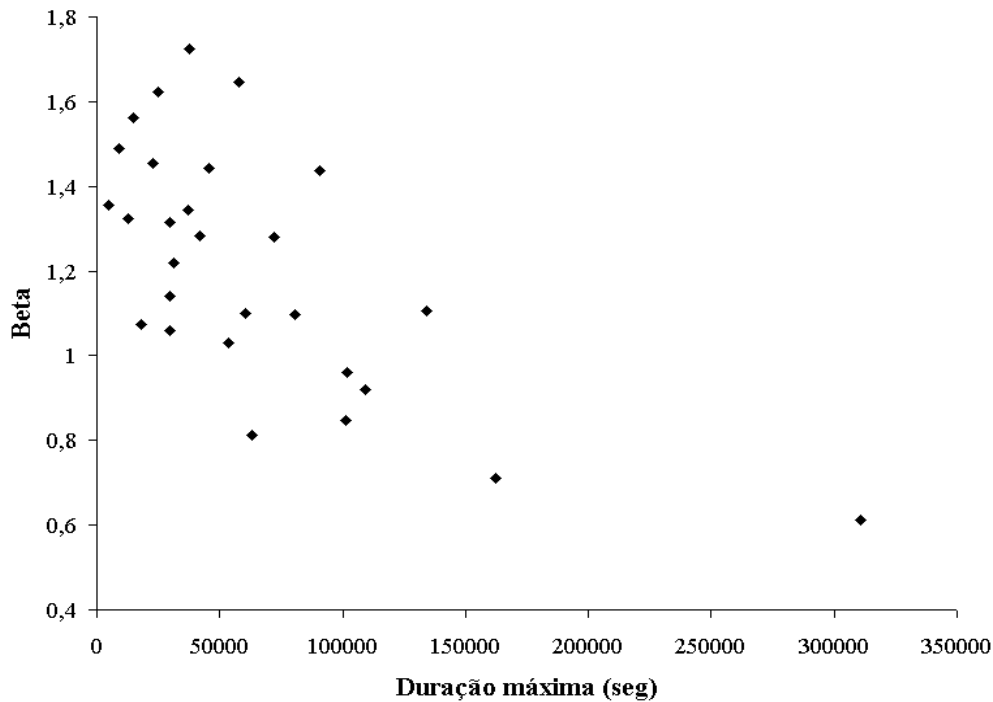


Figura 82 Parâmetro β vs. duração máxima por nível de atenuação.

As Figs. 80, 81 e 82 mostram fortes correlações entre o comprimento do enlace e a duração máxima de eventos por nível com o parâmetro β . A dependência de β com o nível de atenuação é menos pronunciada mas não desprezível. Neste caso, o melhor ajuste foi obtido utilizando uma função com variação linear com o número de eventos e variações exponenciais com o comprimento do enlace e a duração máxima dos eventos.

A expressão ajustada para o parâmetro β , é da forma:

$$\beta = h_1 d^{h_2} + h_3 N + h_4 D_{\max}^{h_5} \quad (5.4)$$

Os valores obtidos para as constantes h_1 , h_2 , h_3 , h_4 e h_5 , aparecem na Tabela 32.

Tabela 32 Valores das constantes de ajuste para o parâmetro β .

h_1	h_2	h_3	h_4	h_5
3,452	-0,411	0,0105	-0,00192	0,576

Portanto, o parâmetro β é dado por:

$$\beta = 3,452 d^{-0,411} + 0,0105 N - 0,00192 D_{\max}^{0,576222} \quad (5.5)$$

A Fig. 83 mostra o gráfico de espalhamento entre os valores observados de β e os previstos usando a expressão (5.5). Observa-se uma boa concordância, com uma correlação de 93,44 %. A Fig. 84 mostra a distribuição dos resíduos.

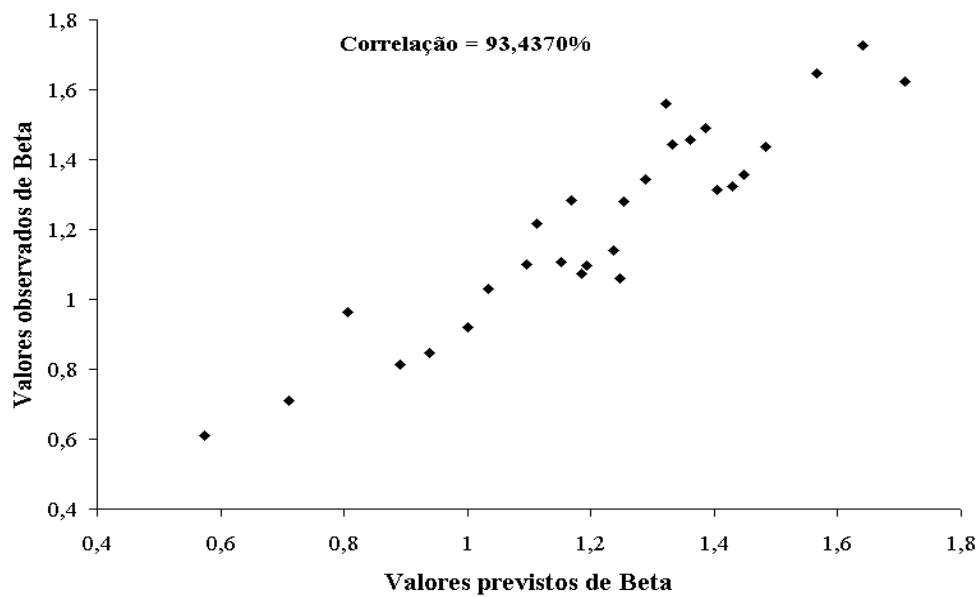


Figura 83 Valores de β previstos *versus* valores de β observados.

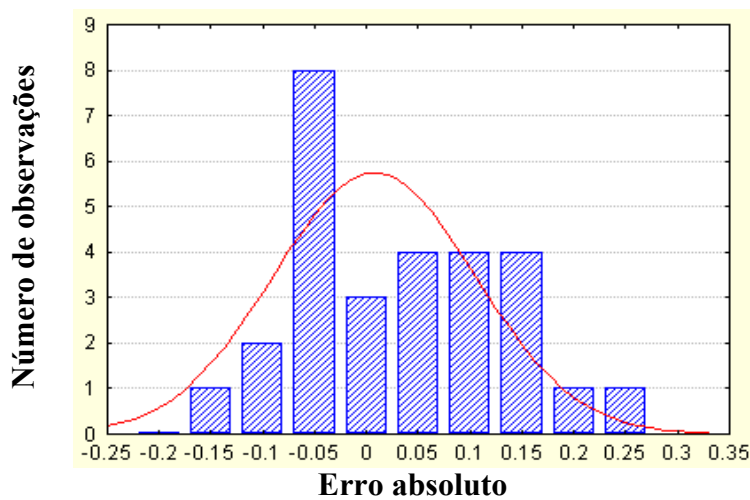


Figura 84 Distribuição dos resíduos para o parâmetro β .

A distribuição cumulativa da duração de eventos de chuva, para climas tropicais e equatoriais, dada pelo modelo aqui desenvolvido (que será chamado Modelo DEC-PM) é dada por:

$$P = e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta} \quad (5.6)$$

onde os parâmetros η e β são dados por pelas expressões (5.3) e (5.5), respectivamente. O tempo T é dado em minutos (o ajuste de η e β foram realizados com o tempo T em minutos).

5.2.4. Testes do Modelo DEC-PM

Nas Tabela 33 são mostrados os resultados dos testes (Recomendação P.311-10 e Erro Relativo) para o Modelo DEC-PM desenvolvido nas seções 5.2.2 e 5.2.3. Esses resultados podem ser visualizados nas Figs. 85 e 86.

Tabela 33 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Recomendação P.311-10 e Erro Relativo), para o modelo DEC-PM.

Tempo (seg)	Média dos erros (%)		Desvio dos erros (%)		Valor RMS dos erros (%)	
	Rec. 311	Erro Relativo	Rec. 311	Erro Relativo	Rec 311	Erro Relativo
10	0,32	0,51	0,61	0,99	0,69	1,12
30	1,26	2,05	0,96	1,61	1,58	2,61
60	1,62	2,66	1,05	1,78	1,93	3,19
120	1,53	2,54	1,49	2,53	2,14	3,58
180	1,26	2,13	1,89	3,24	2,27	3,87
300	1,20	2,23	3,38	6,19	3,59	6,58
600	-0,70	0,01	6,24	11,05	6,28	11,05
900	-3,19	-3,66	9,19	17,34	9,73	17,73
1200	-0,66	-1,83	11,24	19,28	11,25	19,36
1500	-3,41	-7,80	12,14	17,85	12,61	19,48
1800	-3,11	-2,77	12,81	24,01	13,18	24,17
2400	4,29	20,41	14,90	44,62	15,51	49,06
3600	22,73	104,97	13,79	98,68	26,58	144,07

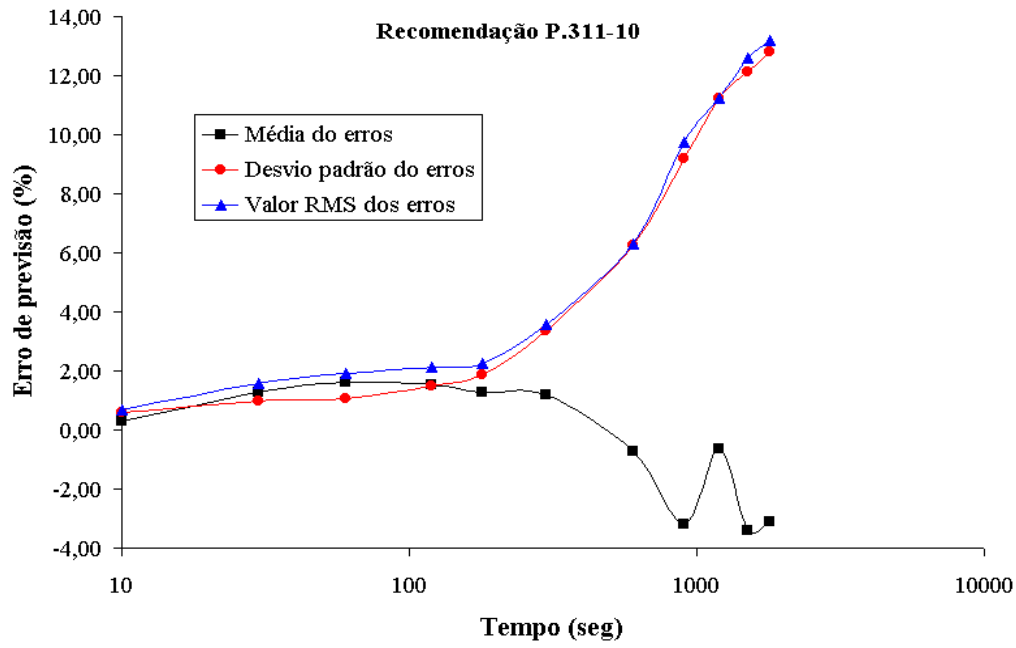


Figura 85 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Recomendação P.311-10), para o modelo DEC-PM.

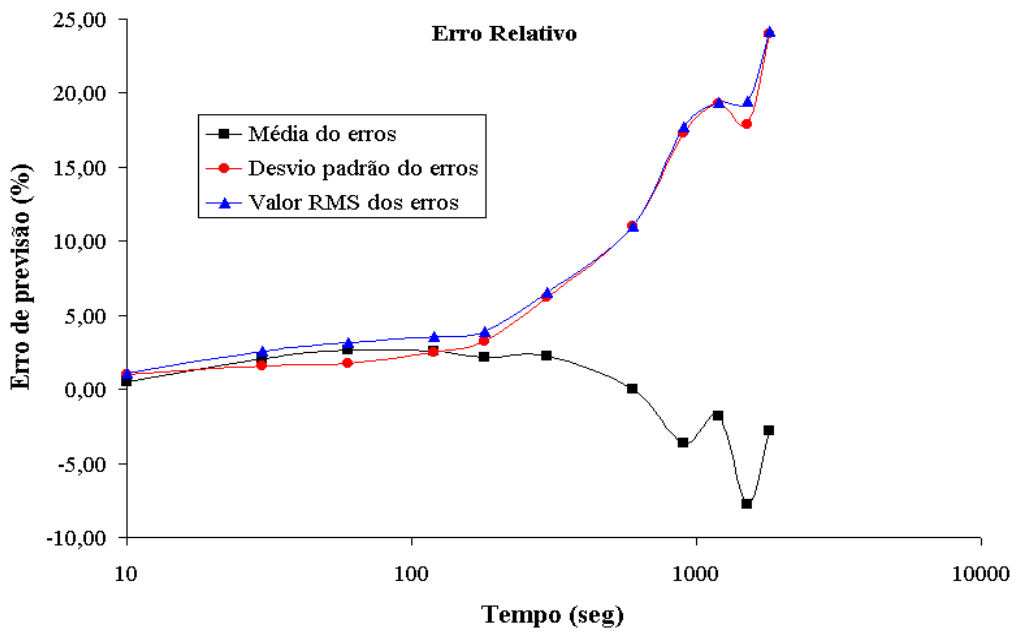


Figura 86 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Erro relativo), para o modelo DEC-PM.

Como pode se observar nas Figs. 85 e 86 os resultados são bons em termos dos erros médios, especialmente para períodos de tempo de até 300 segundos.

O desvio padrão, para ambos os testes, também apresenta bons resultados até 3000 segundos, crescendo nos períodos de tempo maiores. Para esses períodos os valores das probabilidades das distribuições cumulativas são pequenos, fazendo com que uma pequena diferença represente um erro maior.

5.2.5. Modelo DEC-PM modificado

O modelo DEC-PM tem a particularidade de depender de informações obtidas das medidas, pois tanto η quanto β são funções da duração máxima de eventos por nível de atenuação. Isso representa uma restrição importante do modelo. Por este motivo foram desenvolvidos outros ajustes para estes parâmetros que não dependem dos resultados de medidas.

Observando a Fig. 106 (Apêndice C), é possível inferir que existe certa dependência entre a duração máxima de eventos por nível de atenuação e o dito nível. Essa dependência é do tipo exponencial, sugerindo que o parâmetro η pode ser ajustado por uma expressão do tipo:

$$\eta = l_1 d + l_2 N + l_3 \log \left[l_4 + l_5 e^{l_6 N} \right] \quad (5.7)$$

Os valores das constantes l_1 a l_6 obtidos por regressão não linear são mostrados na Tabela 34. O gráfico de espalhamento entre os valores de η observados e os valores previstos pela expressão (5.7), é mostrado na Fig. 87. A distribuição dos resíduos para este caso é ilustrada na Fig. 88, a qual mostra uma degradação em relação ao resultado obtido no ajuste de η no modelo DEC-PM.

Tabela 34 Valores das constantes de ajuste para η (Modelo DEC-PM Modificado).

l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6
0,410	-0,727	-51,87	0,280	32,34	-3,369

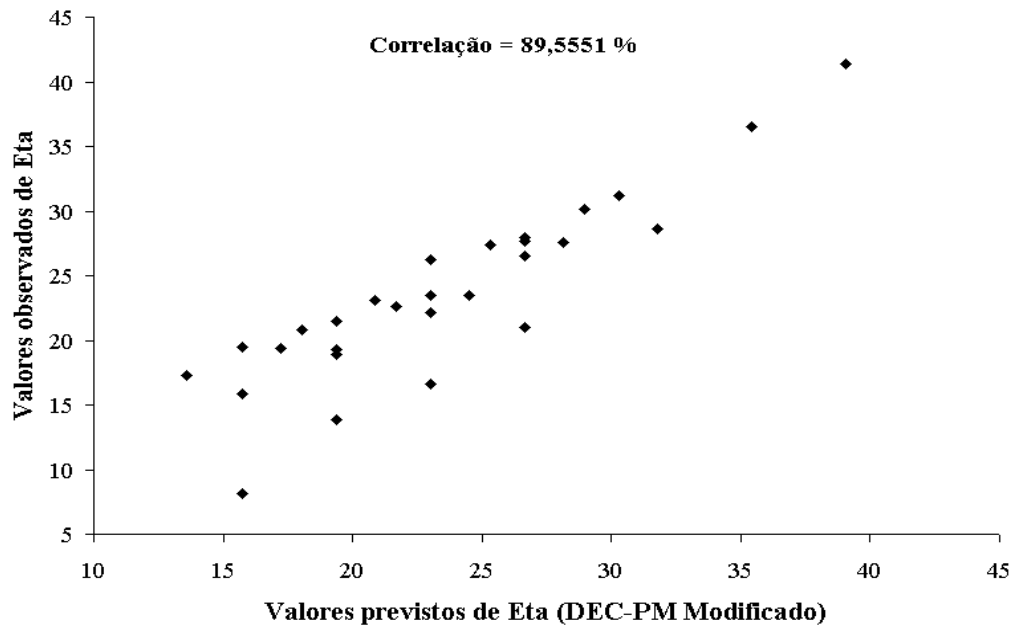


Figura 87 Valores de η previstos versus valores de η observados (Modelo DEC-PM Modificado).

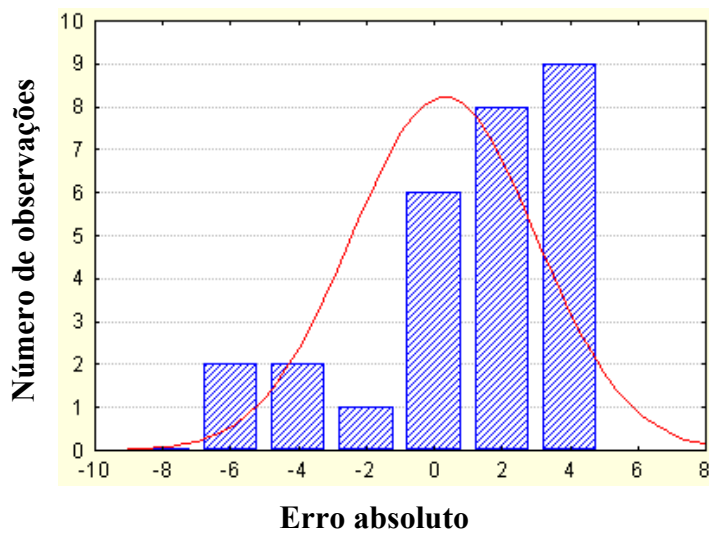


Figura 88 Distribuição dos resíduos para o parâmetro η (Modelo DEC-PM Modificado).

Por outro lado, a expressão a ser ajustada para a determinação do parâmetro β , sem a dependência com a duração máxima de eventos por nível, é dada por:

$$\beta = m_1 d^{m_2} + m_3 N + \left[m_4 + m_5 e^{m_6 N} \right]^{m_7} \quad (5.8)$$

Os valores obtidos para as constantes m_1 a m_7 , são mostrados na Tabela 35.

Tabela 35 Valores das constantes de ajuste para β (Modelo DEC-PM Modificado).

m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7
3,926	-0,257	-0,180	1,688	-1,999	-0,100	3,154

Os valores de β observados em função dos valores previstos pela expressão (5.8) são mostrados na Fig. 89. A Fig. 90 mostra a distribuição dos resíduos.

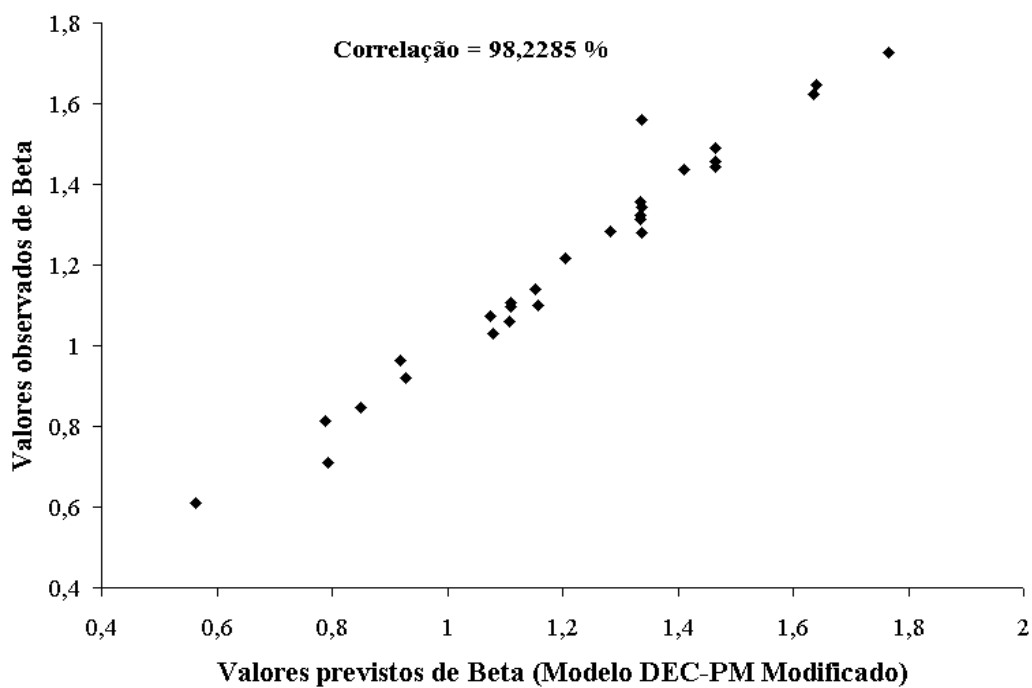


Figura 89 Valores de β previstos versus valores de β observados (Modelo DEC-PM Modificado).

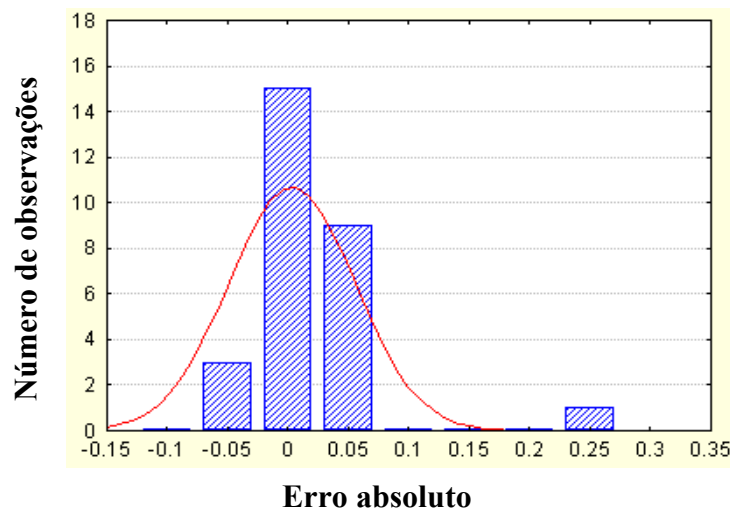


Figura 90 Distribuição dos resíduos para o parâmetro β (Modelo DEC-PM Modificado).

5.2.6.

Comparação entre os Modelos DEC-PM e DEC-PM Modificado

Para comparar os modelos DEC-PM e DEC-PM Modificado se aplicará apenas a Recomendação P.311-10, pois os valores a comparar são pequenos.

A Tabela 36, resume a média, o desvio padrão e valor RMS dos erros. Esses resultados estão plotados nas Figs. 91, 92 e 93.

Tabela 36 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Recomendação P.311-10) para os modelos DEC-PM e DEC-PM Modificado.

Tempo (seg)	Média dos erros (%)		Desvio dos erros (%)		Valor RMS dos erros (%)	
	Modelo DEC-PM	Modelo DEC-PM Modificado	Modelo DEC-PM	Modelo DEC-PM Modificado	Modelo DEC-PM	Modelo DEC-PM Modificado
10	0,32	0,31	0,61	0,64	0,69	0,71
30	1,26	1,25	0,96	0,99	1,58	1,59
60	1,62	1,63	1,05	1,09	1,93	1,96
120	1,53	1,59	1,49	1,63	2,14	2,28
180	1,26	1,40	1,89	1,93	2,27	2,38
300	1,20	1,52	3,38	4,54	3,59	4,78
600	-0,70	-0,89	6,24	6,51	6,28	6,57
900	-3,19	-3,67	9,19	10,94	9,73	11,54
1200	-0,66	-1,99	11,24	15,69	11,25	15,81
1500	-3,41	-7,30	12,14	20,30	12,61	21,58
1800	-3,11	-8,46	12,81	22,07	13,18	23,63
2400	4,29	0,20	14,90	17,83	15,51	17,83
3600	22,73	21,22	13,79	12,52	26,58	24,64

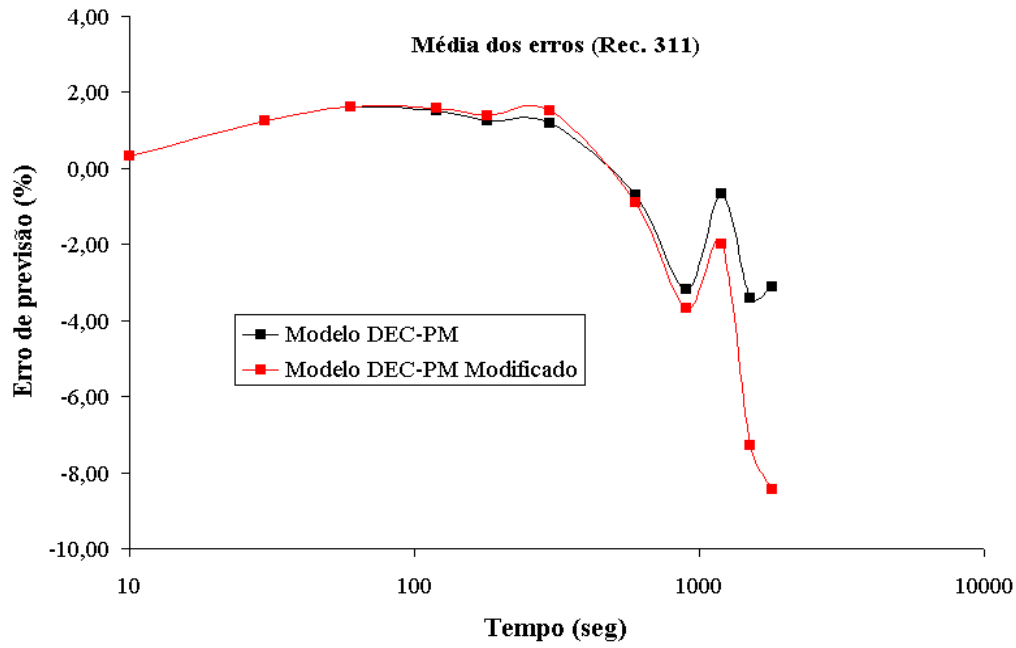


Figura 91 Média dos erros para os modelos DEC-PM e DEC-PM modificado.

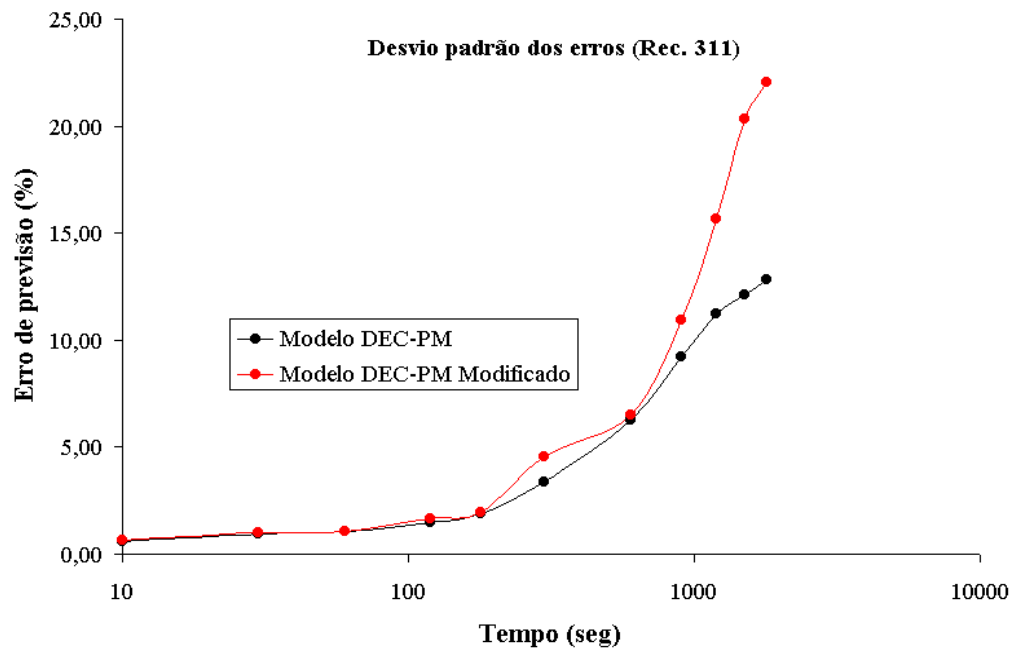


Figura 92 Desvio padrão dos erros para os modelos DEC-PM e DEC-PM modificado.

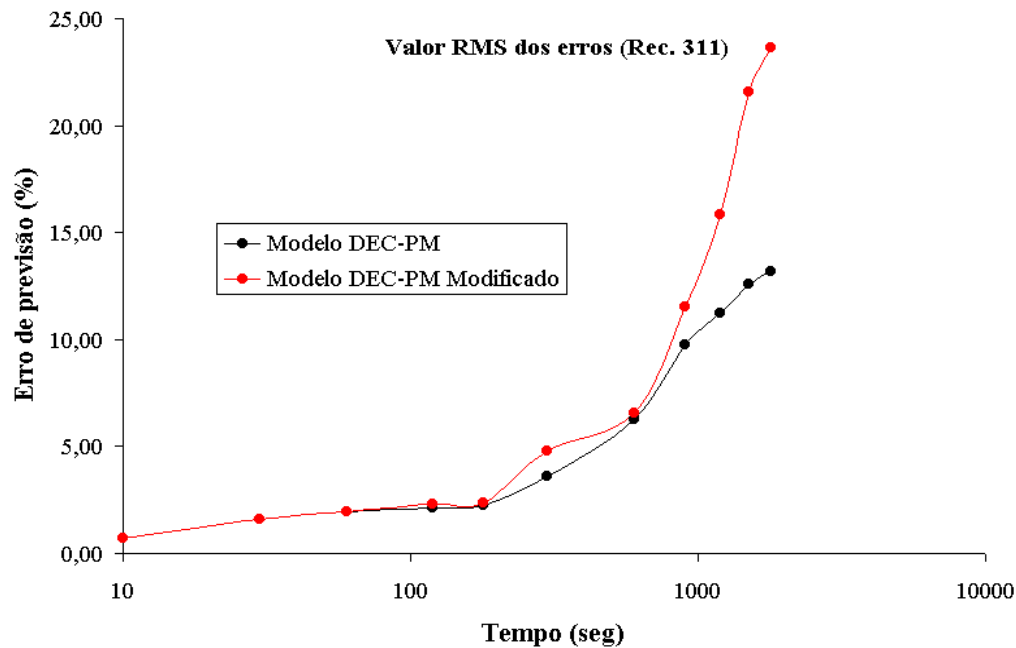


Figura 93 Valor RMS dos erros - modelos DEC-PM e DEC-PM modificado.

Das Figs. 91, 92 e 93, pode-se observar que o comportamento de ambos os modelos é similar. Não obstante, o modelo DEC-PM apresenta um desempenho ligeiramente melhor do que o modelo DEC-PM modificado que, em compensação apresenta a vantagem de não depender da duração máxima da atenuação.

É importante destacar que ambos os modelos foram desenvolvidos para níveis de atenuação entre 10 e 25 dB e com dados de um clima tropical.

Finalmente, na Fig. 94, se observa a comparação entre a distribuição cumulativa medida da duração de eventos de chuva e as previstas pelos modelos DEC-PM y DEC-PM modificado, para o enlace Scania e um nível de atenuação de 15 dB. A Fig. 94 mostra um bom ajuste de ambos os modelos à medida.

5.3. MODELAMENTO DA DURAÇÃO MÉDIA DE EVENTOS DE CHUVA

O comportamento da duração média de eventos segundo o nível de atenuação mostrado nas Figs. 107 a 113 (Apêndice D) sugere que, até o nível de 25 dB, a duração média de eventos de atenuação por chuvas pode ser modelada por um polinômio do segundo grau. O processo de modelamento consistirá em obter, para cada um dos 7 enlaces de São Paulo, os valores dos coeficientes do

polinômio e, a seguir, obter uma expressão para estes coeficientes em função dos parâmetros dos enlaces.

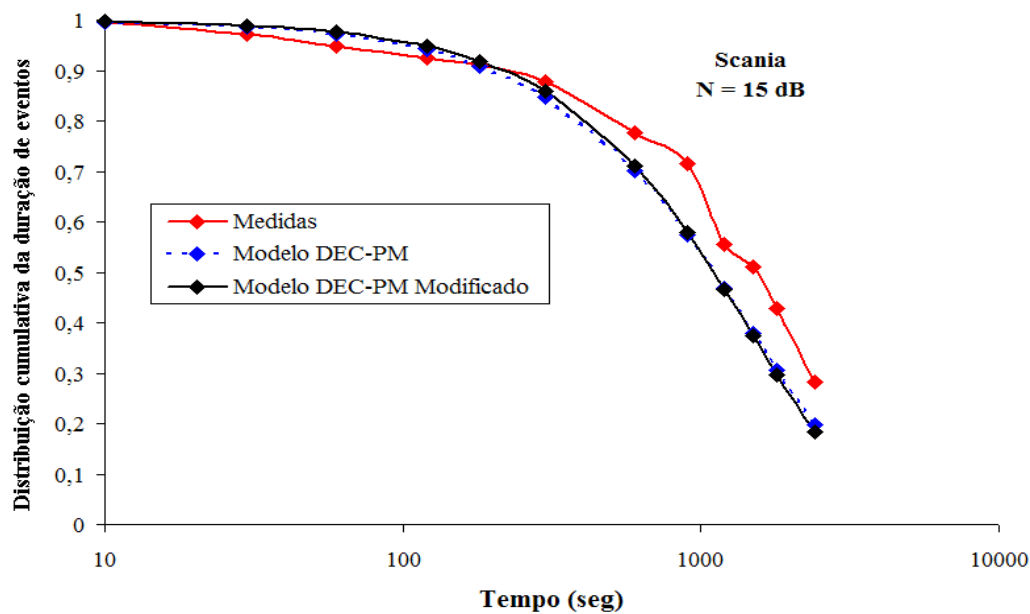


Figura 94 Distribuições cumulativas, medida e previstas, para o enlace Scania e um nível de atenuação de 15 dB.

5.3.1. Coeficientes do Polinômio de Ajuste

O polinômio escolhido é da forma:

$$D_m = b_1 + b_2 N + b_3 N^2 \quad (5.9)$$

onde:

D_m = Duração média dos eventos, em segundos.

N = Nível de atenuação, em dB

Os valores obtidos para as constantes b_1 , b_2 , e b_3 , são resumidas na Tabela

37.

Tabela 37 Valores dos coeficientes do polinômio de ajuste.

Enlace	b_1	b_2	b_3
Barueri-RIS	-9,87	23,21	-0,63
Bradesco2-RIS	-71,53	39,09	-1,22
CENESP15-RIS	-18,83	23,76	-0,65
CENESP18-RIS	-172,77	50,02	-1,25
Scania-RIS	-67,09	33,35	-0,91
Paranapiacaba-RIS	-2,43	6,00	-0,14
Shell-RIS	-221,47	71,04	-1,79

A maior correlação obtida foi de 98,4 % (para o enlace Barueri-RIS) e a menor foi de 91,3 % (para o enlace CENESP18-RIS).

5.3.2.

Determinação das Funções para os Coeficientes do Polinômio de Ajuste

Uma vez obtidos os trios de coeficientes (b_1 , b_2 , b_3), procede-se ao ajustar de expressões para estes coeficientes em função dos parâmetros dos enlaces envolvidos. O processo é semelhante ao descrito em seções anteriores e não será detalhado aqui, indicando-se diretamente os resultados obtidos.

A expressão geral escolhida para cada um dos coeficientes, a partir de um exame de gráficos de espalhamento destes coeficientes em relação a parâmetros dos enlaces é da forma:

$$b_i = c_i d^{g_i} \left[1 + \frac{h_i}{D_{\max e}} \right] \left[1 + \frac{m_i}{f} \right] \quad (5.10)$$

onde:

c_i , g_i , h_i e m_i = Constantes de ajuste para cada b_i ($i = 1,2,3$).

d = Comprimento do enlace (km).

$D_{\max e}$ = Duração máxima de eventos de chuva por enlace (min).

f = Frequência de operação (GHz)

Os valores obtidos para as constantes c_i , g_i , h_i e m_i são resumidas na Tabela 38.

Tabela 38 Valores das constantes dos coeficientes b_i .

b_i	c_i	g_i	h_i	m_i	Correlação (%)
b_1	-3291	-0,565	0	-14,15	96,1
b_2	451	-0,497	1037	-12,23	96,6
b_3	-7,89	-0,442	1829	-11,72	96,0

Portanto, a duração média de eventos de chuva, segundo o modelo desenvolvido, que será chamado de modelo DMEC-PM, é determinada pela expressão (5.9), com coeficientes b_1 , b_2 e b_3 dados pela expressão (5.10) e a Tabela 38.

A Fig. 95 mostra o gráfico de espalhamento entre as durações médias de eventos de chuva medida e prevista pelo modelo DMEC-PM.

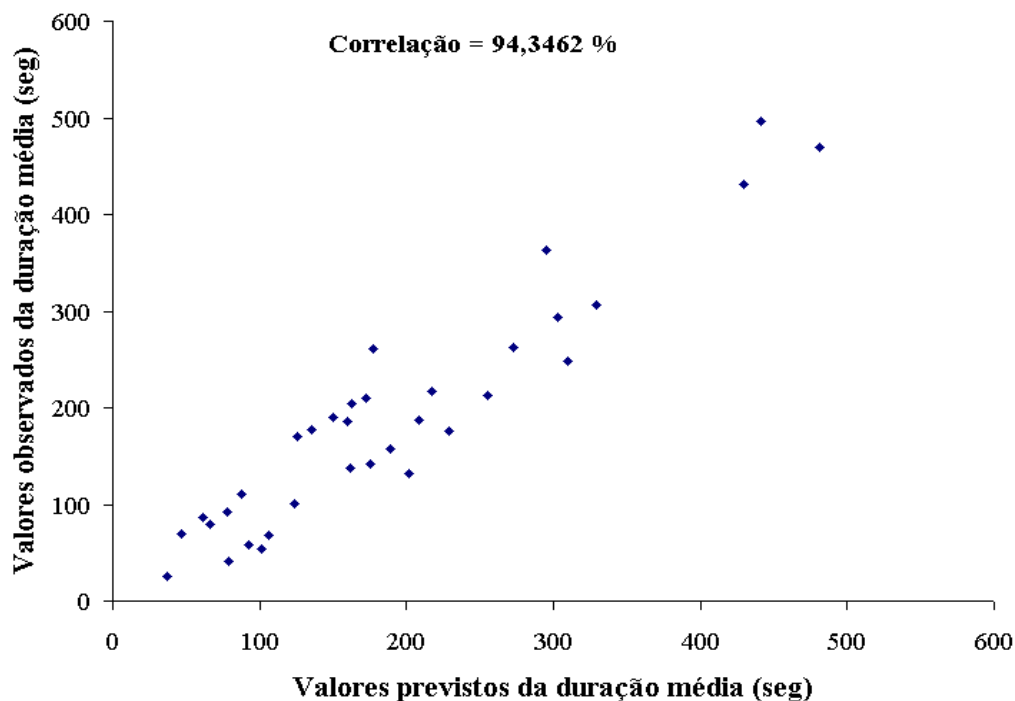


Figura 95 Valores observados da duração média de eventos de chuva versus valores previstos da duração média de eventos de chuva.

5.3.3. Teste do Modelo DMEC-PM

O modelo DMEC-PM foi testado utilizando tanto a Recomendação P.311-10, quanto ao erro relativo. A Tabela 39 resume a média, o desvio padrão e erro relativo dos erros, para ambos os testes. Estes resultados são mostrados nas Figs. 96 e 97.

Tabela 39 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Recomendação P.311-10 e Erro Relativo), para o modelo DMEC-PM.

Nível de atenuação (dB)	Média dos erros (%)		Desvio dos erros (%)		Valor RMS dos erros (%)	
	Rec. 311	Erro Relativo	Rec. 311	Erro Relativo	Rec 311	Erro Relativo
5	-10,51	-6,61	28,41	28,99	30,29	29,73
10	16,53	24,07	34,84	41,52	38,56	47,99
15	1,55	6,07	29,88	38,31	29,92	38,78
20	1,77	5,05	27,14	28,87	27,20	29,31
25	5,37	8,67	26,09	28,95	26,63	30,22

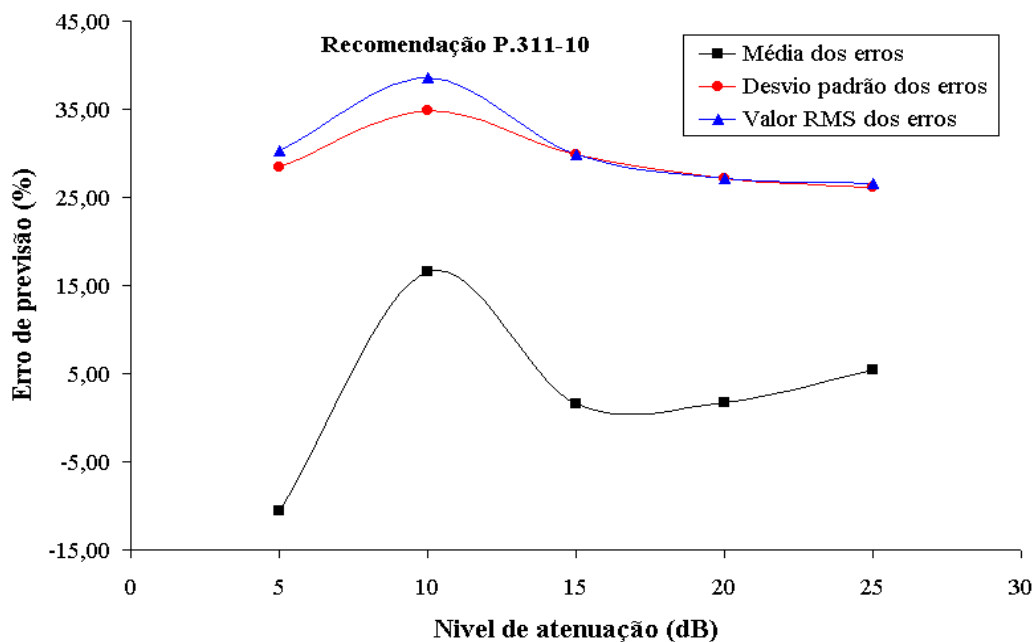


Figura 96 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Recomendação P.311-10), para o modelo DMEC-PM.

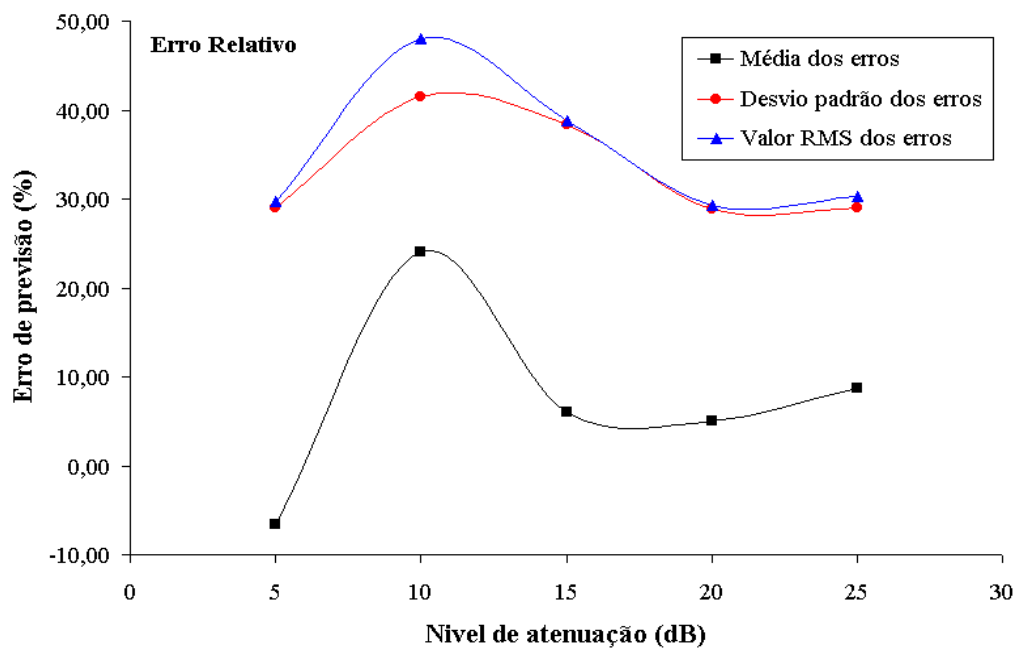


Figura 97 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Erro Relativo), para o modelo DMEC-PM

De ambos os testes, pode-se observar que, exceto para o nível de 10 dB, os resultados são razoáveis.

Finalmente, é necessário ressaltar que o modelo foi desenvolvido para níveis de atenuação entre 5 e 25 dB com dados de um clima tropical.

5.3.4. Modelo DMEC-PM Modificado

O modelo DMEC-PM tem, outra vez, a desvantagem de depender diretamente de medidas, pois os coeficientes b_2 e b_3 são função da duração máxima de eventos de chuva por enlace, D_{\max} .

Esta dependência pode ser eliminada observando a variação da duração máxima de eventos de chuva por enlace com o comprimento do enlace (Figura 114, do Apêndice E). Esta variação é do tipo linear. Assim, a duração média de eventos de atenuação por chuvas pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$b_i = c_i d^{g_i} \left[1 + \frac{h_i}{n_i + r_i d} \right] \left[1 + \frac{m_i}{f} \right]; \quad i = 2,3 \quad (5.11)$$

Os valores obtidos para c_i , g_i , h_i , n_i , r_i e m_i são mostrados na Tabela 40.

Tabela 40 Valores dos coeficientes b_i (Modelo DMEC-PM modificado).

b_i	c_i	g_i	h_i	n_i	r_i	m_i	Correlação (%)
b_2	1,0226	0,0371	0,8813	-0,0023	0,0013	-7,7324	92,4492
b_3	-0,1012	-0,4501	5,4185	0,0472	0,0019	-9,0521	93,0031

Pode se observar que as correlações para o ajuste dos coeficientes b_2 e b_3 são menores que as obtidas no caso do modelo DMEC-PM.

Portanto, o modelo DMEC-PM modificado permite determinar a duração média de eventos de chuva a partir da expressão (5.9), mas com o coeficiente b_1 dado pela expressão (5.10) e a Tabela 38, e os coeficientes b_2 e b_3 dados pela expressão (5.11) e a Tabela 40.

A Fig. 98 mostra os valores da duração média de eventos de chuva observados e os valores previstos pelo modelo. A correlação é de 81,2 %, que é bem menor que a obtida quando utilizado o modelo DMEC-PM.

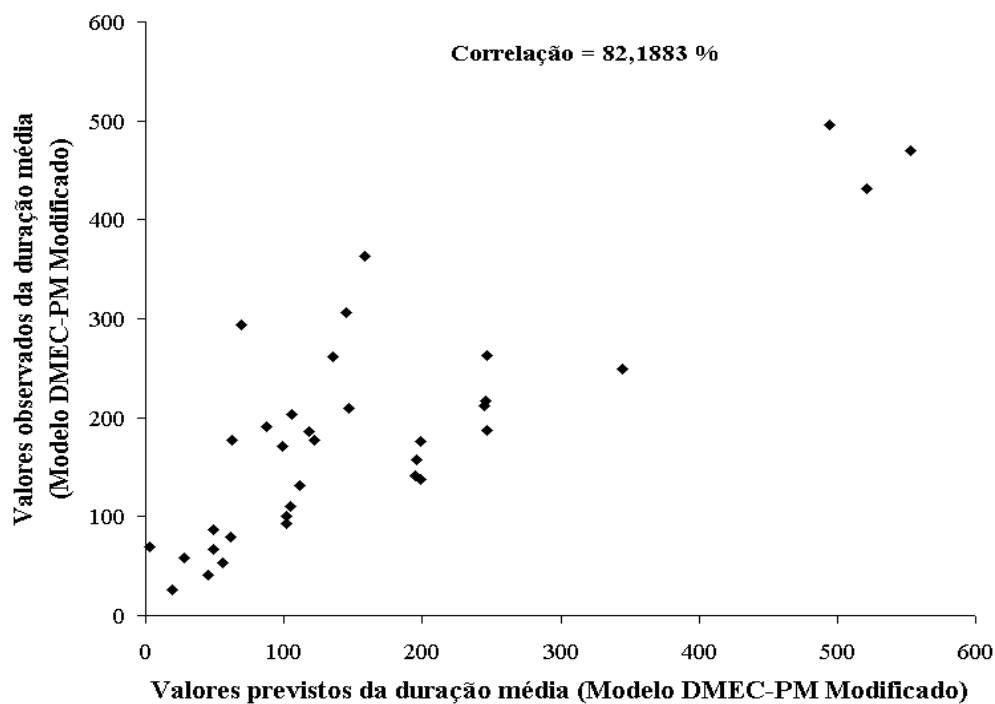


Figura 98 Valores observados e previstos da duração média de eventos de atenuação por chuvas - modelo DMEC-PM Modificado.

5.3.5.

Comparação dos Modelos DMEC-PM e DMEC-PM Modificado

Para comparar os modelos para a previsão da duração média de eventos de chuva desenvolvidos neste trabalho, foi utilizado o erro relativo. A Tabela 41 resume a média, o desvio padrão e o valor RMS dos erros, para o modelo DMEC-PM e DMEC-PM Modificado, utilizando o Erro Relativo. As Figs. 99, 100 e 101, mostram esses resultados.

Tabela 41 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Erro Relativo) para os modelos DMEC-PM e DMEC-PM Modificado.

Nível de atenuação (dB)	Média dos erros (%)		Desvio dos erros (%)		Valor RMS dos erros (%)	
	Modelo DECM-PM	Modelo DECM-PM Modificado	Modelo DECM-PM	Modelo DECM-PM Modificado	Modelo DECM-PM	Modelo DECM-PM Modificado
5	-10,51	-6,61	28,41	28,99	30,29	29,73
10	16,53	24,07	34,84	41,52	38,56	47,99
15	1,55	6,07	29,88	38,31	29,92	38,78
20	1,77	5,05	27,14	28,87	27,20	29,31
25	5,37	8,67	26,09	28,95	26,63	30,22

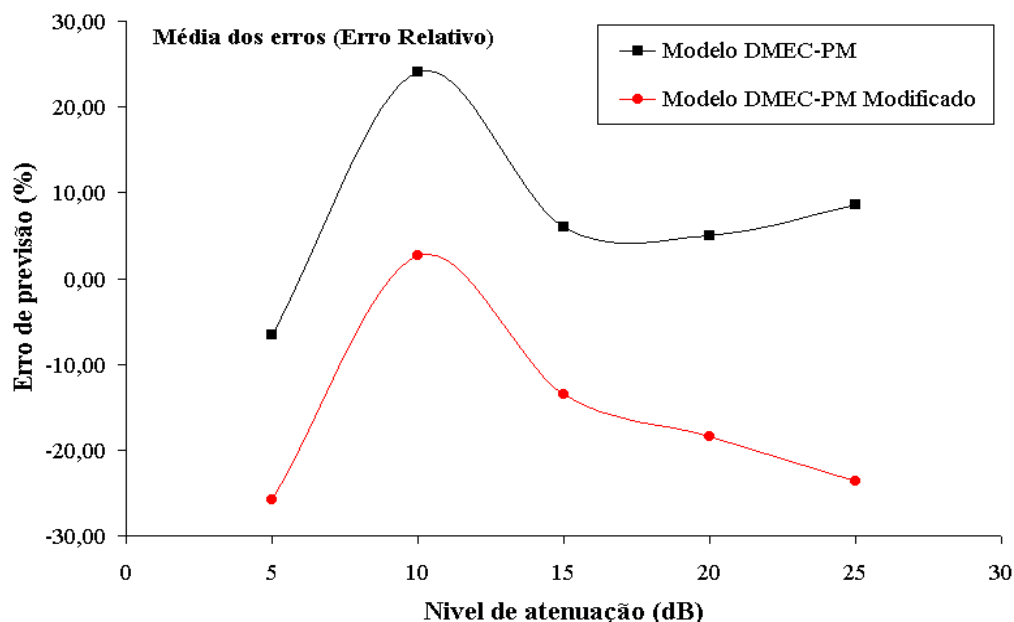


Figura 99 Média dos erros (erro relativo), para os modelos DMEC-PM e DMEC-PM modificado.

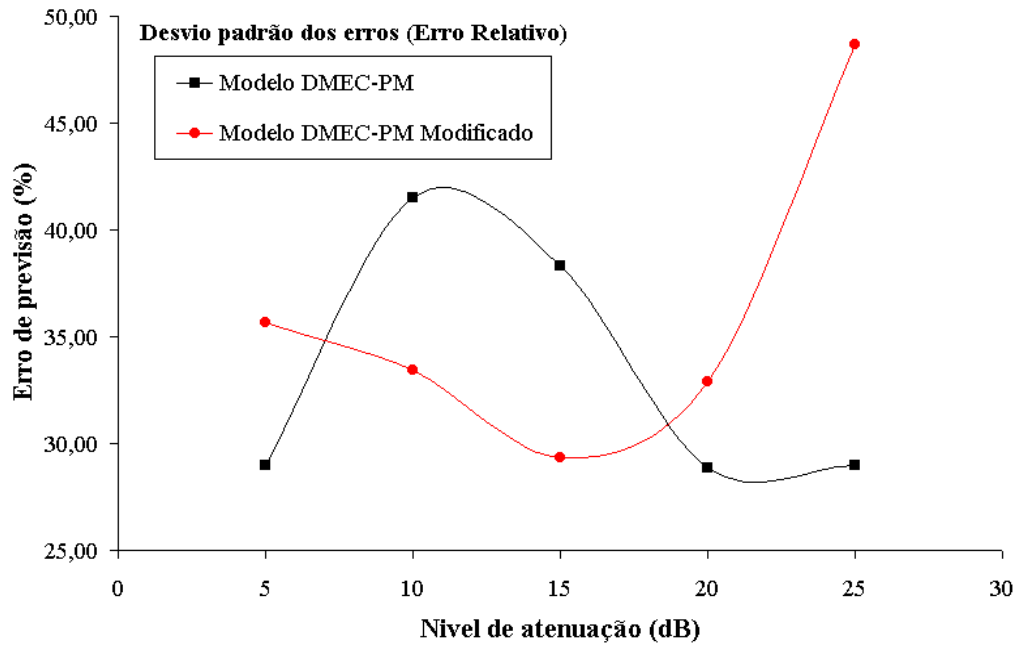


Figura 100 Desvio padrão dos erros (erro relativo), para os Modelos DMEC-PM e DMEC-PM Modificado.

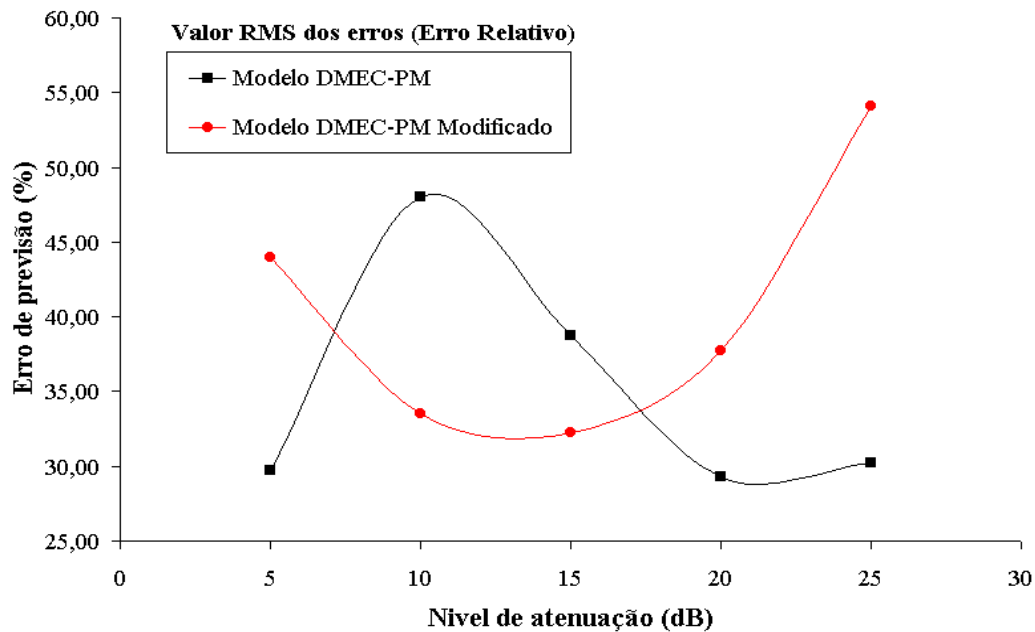


Figura 101 Valor RMS dos erros (erro relativo), para os Modelos DMEC-PM e DMEC-PM Modificado.

Das Figs. 99, 100 e 101, pode-se observar que o modelo DMEC-PM apresenta um melhor desempenho para os níveis de desvanecimento mais profundos. Todavia, o modelo DMEC-PM Modificado, que subestima os valores da duração média de eventos de chuva para quase todos os níveis de atenuação, exceto para 10 dB, apresenta um melhor desempenho precisamente para o nível de 10 dB. O desvio padrão e o valor RMS dos erros, tanto para 10 dB quanto para 15 dB, melhoram quando se aplica este modelo.