

Fernando Jose de Almeida Andrade

**Sintetização de Séries Temporais
de Atenuação por Chuvas em
Enlaces Terrestres**

TESE DE DOUTORADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica

Rio de Janeiro
Novembro de 2010



Fernando Jose de Almeida Andrade

**Sintetização de Séries Temporais de Atenuação
por Chuvas em Enlaces Terrestres**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Rio de Janeiro
Novembro de 2010



Fernando José de Almeida Andrade

**Sintetização de Séries Temporais de Atenuação por Chuvas
em Enlaces Terrestres**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Marco Antônio Grivet Mattoso Maia

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Gláucio Lima Siqueira

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Erasmus Couto Brazil de Miranda

INPI/UCP

Prof. Rodolfo Saboia Lima de Souza

Inmetro

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de novembro de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Fernando Jose de Almeida Andrade

Graduou-se em Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1989. Possui Especialização em Engenharia de Redes e Sistemas de Telecomunicações pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (2003) e Mestrado em Engenharia Elétrica na área de concentração de Eletromagnetismo Aplicado pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2006). Trabalhou durante 13 anos com automação comercial e sistemas de telecomunicações.

Ficha Catalográfica

Andrade, Fernando Jose de Almeida

Sintetização de séries temporais de atenuação por chuvas em enlaces terrestres / Fernando Jose de Almeida Andrade ; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello. – 2010.

176 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Atenuação por chuvas. 3. Enlaces terrestres. 4. Sintetização de séries temporais. 5. Modelos estocásticos. 6. Rádio propagação. 7. Rádio meteorologia I. Luiz Alencar Reis da Silva Mello. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

Para minhas filhas Fernanda e Mariana,
eterna fonte de alegria e motivação.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Dr. Luiz Alencar Reis da Silva Mello, pela orientação e apoio;

Ao colega, e agora Doutor, Márcio Eduardo C. Rodrigues pela permanente colaboração;

Ao Dr. Rodolfo Saboia Lima de Souza pela ajuda relacionada aos dados experimentais utilizados neste trabalho;

Ao Dr. Sing H. Lin pela gentileza em enviar documentação técnica relacionada ao tema pesquisado;

A todos os meus familiares que souberam compreender as minhas ausências por causa da dedicação necessária à realização deste trabalho;

Aos colegas, professores e funcionários do CETUC e da PUC-Rio durante os anos 2006 a 2010;

À PUC-Rio pelo auxílio financeiro concedido através de bolsa de isenção de pagamentos durante o período de conclusão deste trabalho;

Ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido para a realização de grande parte deste trabalho.

Resumo

Andrade, Fernando Jose de Almeida; Silva Mello, Luiz Alencar Reis da. **Sintetização de Séries Temporais de Atenuação por Chuvas em Enlaces Terrestres**. Rio de Janeiro, 2010. 176p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A atenuação por chuva é a causa principal de indisponibilidade em enlaces terrestres de rádio operando em frequências acima de 10 GHz. Devido às condições adversas de propagação, técnicas de mitigação de desvanecimentos são necessárias. Para desenvolver e otimizar estas técnicas, é preciso conhecer a distribuição cumulativa de atenuação por chuva e o comportamento dinâmico do canal de propagação, em termos das estatísticas de duração de desvanecimentos e de *fade-slope*. Esta necessidade é preenchida pelo uso de séries temporais que introduzem a deterioração da propagação nos sistemas de simulação. Estas séries podem ser de dados experimentais ou dados sintetizados que considerem as características climatológicas da região do enlace e os parâmetros geométricos e de propagação do mesmo. Três modelos para sintetização de séries temporais de longo prazo de atenuação por chuva são apresentados e testados neste trabalho utilizando dados medidos em cinco enlaces terrestres operando na faixa de frequência de 15 GHz. O primeiro modelo foi originalmente desenvolvido para enlaces satélite em climas temperados enquanto o segundo é uma versão modificada, proposta neste trabalho para enlaces terrestres em áreas tropicais. O terceiro modelo é proposto neste trabalho com base numa modelagem estatística da atenuação por chuva através da distribuição Gamma. Séries temporais foram sintetizadas pelos três modelos e suas estatísticas foram comparadas com as estatísticas dos dados experimentais. Os três modelos apresentam bons resultados em diversas situações analisadas, mas o terceiro modelo proporciona resultados significativamente melhores para distribuições de atenuação e *fade-slope*.

Palavras-chave

Atenuação por chuvas; enlaces terrestres; sintetização de séries temporais; modelos estocásticos; rádio propagação; radio meteorologia.

Abstract

Andrade, Fernando Jose de Almeida; Silva Mello, Luiz Alencar Reis da (Advisor). **Rain Attenuation Time Series Synthesizers for Terrestrial Links**. Rio de Janeiro, 2010. 176p. Doctoral Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Rain attenuation is the main cause of unavailability in fixed terrestrial radio systems operating at frequency of above 10 GHz in tropical areas. Propagation impairments are expected to be quite severe in these regions. Due to these adverse propagation conditions, Fade Mitigating Techniques (FMT) are often needed. To design and optimize FMT, the knowledge of the cumulative distribution of rain attenuation and of the dynamic behavior of the propagation channel, as provided by fade durations and fade slope statistics, is required. This need can be fulfilled by the introduction of time series of propagation impairments in system simulation. If real data collected from propagation experiments are not available, typical fading time-series may be generated making use of climatologic characteristics as well as geometrical and radiowave parameters of the link. Three models for long-term rain attenuation time series synthesizers are presented and tested in this work using data measured in five terrestrial radio links operating at 15 GHz. The first one was originally developed for satellite systems in temperate climates whereas the second one is a modified version proposed in this work for terrestrial links in tropical areas. A third model is proposed in this work and is based on a different approach using the Gamma distribution. Time series were synthesized by the three models and stationary and dynamic statistics between synthesized and experimental data were compared. The first two models provide good results in some cases but the third model provides significantly better results for cumulative distributions of attenuation and fade-slope.

Keywords

Rain attenuation; terrestrial links; time series synthesizers; stochastic models; radio propagation; radio meteorology.

Sumário

| | | |
|--------|---|----|
| 1 | Introdução | 24 |
| 1.1. | Caracterização do problema | 24 |
| 1.2. | Objetivo | 25 |
| 1.3. | Estado da arte na sintetização de séries temporais de atenuação por chuva | 26 |
| 1.4 | Contribuições | 27 |
| 1.3. | Estrutura deste trabalho | 28 |
| 2 | Modelos de sinterização de séries temporais de atenuação por chuva | 30 |
| 2.1. | Modelo Maseng-Bakken (MB) | 30 |
| 2.2. | Modelo <i>Enhanced</i> Maseng-Bakken (EMB) | 31 |
| 2.3. | Modelo Lacoste-Carrie ' <i>event-on-demand</i> ' | 35 |
| 2.4. | Modelo Cadeia de Markov de N estados | 35 |
| 2.5. | Modelo Cadeia de Markov de 2 estados com eventos sob demanda (MKod) | 36 |
| 3 | Dados experimentais | 37 |
| 3.1. | Sistema de medidas | 37 |
| 3.2. | Distribuição geográfica dos enlaces | 38 |
| 3.3. | Seleção e pré-processamento dos dados | 39 |
| 4 | Análise dos dados de atenuação por chuvas | 45 |
| 4.1. | Estatísticas estacionárias da atenuação por chuvas | 45 |
| 4.2. | Estatísticas dinâmicas da atenuação por chuva | 46 |
| 4.2.1. | Taxa de variação da atenuação (<i>fade-slope</i>) | 46 |
| 4.2.2. | Duração dos desvanecimentos | 54 |
| 5 | Modelagem estatística da atenuação por chuva | 59 |
| 5.1. | Faixas de percentuais de tempo para análise estatística | 59 |

| | |
|--|-----|
| 5.2. Extração dos parâmetros lognormais no modelo EMB | 61 |
| 5.3. Modelo <i>Terrestrial</i> Maseng-Bakken (TMB) | 63 |
| 5.4. Comparação entre a extração dos parâmetros lognormais pelos modelos EMB e TMB | 65 |
| 5.5. Avaliação das estatísticas de atenuação para períodos diários de 8 horas | 67 |
| 5.6. Ajuste através de outros tipos de distribuição | 71 |
| 6 Modelo Gamma-Cetuc (GC) | 77 |
| 6.1. Geração de ruído branco gaussiano | 78 |
| 6.2. Geração da sequência gamma correlatada | 79 |
| 6.3. Relação entre as autocovariâncias das sequências gaussianas e gamma | 81 |
| 6.4. Geração da sequência gaussiana correlatada | 85 |
| 7 Comparação de resultados e validação dos modelos | 88 |
| 7.1. Parâmetros dos modelos | 90 |
| 7.2. Resultados da CCDF de atenuação | 91 |
| 7.3. Resultados das estatísticas de <i>fade-slope</i> | 96 |
| 7.4. Resultados das estatísticas de duração de desvanecimentos | 101 |
| 7.4.1. Número de desvanecimentos | 101 |
| 7.4.2. Tempo relativo de desvanecimento | 106 |
| 7.5. Resumo dos resultados | 111 |
| 7.6. Sensibilidade dos modelos à variação do parâmetro dinâmico β | 112 |
| 7.7. Relação entre a distância do enlace e o valor do parâmetro dinâmico β | 116 |
| 7.8. O uso do modelo EMB em outros trabalhos | 124 |
| 8 Conclusões e sugestões de trabalhos futuros | 126 |
| 9 Referências bibliográficas | 130 |
| APÊNDICE A Estatísticas dinâmicas da atenuação por chuva nos enlaces terrestres | 135 |

| | |
|---|-----|
| APÊNDICE B Gráficos do ajuste lognormal pelos modelos EMB e TMB | 141 |
| APÊNDICE C Gráficos dos ajustes por outras distribuições | 145 |
| APÊNDICE D Gráficos das estatísticas das séries temporais sintetizadas | 151 |
| APÊNDICE E Tabelas e gráficos referentes às variáveis de teste das séries temporais sintetizadas | 161 |
| APÊNDICE F Gráficos da sensibilidade dos modelos às variações do parâmetro dinâmico | 173 |

Lista de tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 3.1 – Características dos enlaces terrestres | 39 |
| Tabela 3.2 – Períodos dos dados analisados e percentual relativo de dados válidos | 44 |
| Tabela 5.1 – Faixas de percentuais de tempo usadas nos ajustes dos enlaces terrestres | 60 |
| Tabela 5.2 – Erros RMS no ajuste lognormal através dos modelos EMB e TMB | 66 |
| Tabela 5.3 – Erros RMS da CCDF de atenuação (em dB) para ajustes através de cinco tipos diferentes de distribuições | 76 |
| Tabela 7.1 – Tempo de processamento da sintetização das séries temporais | 89 |
| Tabela 7.2 – Valores dos parâmetros dos modelos EMB e TMB | 90 |
| Tabela 7.3 – Valores dos parâmetros do modelo GC | 90 |
| Tabela 7.4 – Valores RMS da variável de teste da CCDF de atenuação de séries temporais sintetizadas | 94 |
| Tabela 7.5 – Percentuais de tempo máximos e valores de atenuação em que o modelo GC proporciona melhor desempenho na CCDF de atenuação | 95 |
| Tabela 7.6 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de <i>fade-slope</i> para cada nível de atenuação – Censp15 | 98 |
| Tabela 7.7 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de <i>fade-slope</i> – resultados gerais por enlace | 99 |
| Tabela 7.8 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de <i>fade-slope</i> – resultados gerais por enlace para $A \geq 10$ dB | 99 |
| Tabela 7.9 – Variação percentual dos valores RMS da variável de teste das estatísticas de <i>fade-slope</i> – resultados gerais por enlace | 100 |
| Tabela 7.10 – Variação percentual dos valores RMS da variável de teste das estatísticas de <i>fade-slope</i> – resultados gerais por enlace para $A \geq 10$ dB | 100 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 7.11 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos para cada nível de atenuação – Censp15 | 103 |
| Tabela 7.12 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos – resultados gerais por enlace | 104 |
| Tabela 7.13 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos – resultados gerais por enlace para $A \geq 10$ dB | 104 |
| Tabela 7.14 – Variação percentual dos valores RMS da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos – resultados gerais por enlace | 105 |
| Tabela 7.15 – Variação percentual dos valores RMS da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos – resultados gerais por enlace para $A \geq 10$ dB | 105 |
| Tabela 7.16 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento para cada nível de atenuação – Censp15 | 108 |
| Tabela 7.17 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento – resultados gerais por enlace | 109 |
| Tabela 7.18 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento – resultados gerais por enlace para $A \geq 10$ dB | 109 |
| Tabela 7.19 – Variação percentual dos valores RMS da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento – resultados gerais por enlace | 110 |
| Tabela 7.20 – Variação percentual dos valores RMS da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento – resultados gerais por enlace para $A \geq 10$ dB | 110 |
| Tabela 7.21 – Parâmetro β : valores extraídos x melhores valores para cada estatística | 113 |
| Tabela 7.22 – Comparação entre valores RMS obtidos nas estatísticas dinâmicas – resultados gerais | 114 |
| Tabela 7.23 – Comparação entre valores RMS obtidos nas | |

| | |
|---|-----|
| estatísticas dinâmicas – resultados gerais para $A \geq 10$ dB | 115 |
| Tabela 7.24 – Valores do parâmetro dinâmico extraídos pelos modelos | 117 |
| Tabela 7.25 – Relação $\beta \times d$ – parâmetros do ajuste através de lei de potência | 118 |
| Tabela 7.26 – Relação $\beta \times d$ – parâmetros do ajuste exponencial | 118 |
| Tabela 7.27 – Relação $\beta_{OT} \times d$ – parâmetros do ajuste através de lei de potência | 119 |
| Tabela 7.28 – Relação $\beta_{OT} \times d$ – parâmetros do ajuste exponencial | 119 |
| Tabela 7.29 – Parâmetro β : valores extraídos x valores por ajuste exponencial | 122 |
| Tabela 7.30 – Comparação entre valores RMS das estatísticas dinâmicas – parâmetros extraídos x parâmetros ajustados | 122 |
| Tabela 7.31 – Valores RMS das variáveis de teste das estatísticas de enlaces satélite no Brasil – modelo EMB [09] | 125 |
| Tabela E.1 – Valores RMS da variável de teste – <i>fade-slope</i> – Bradesco (Δt entre 20 e 60 s) | 161 |
| Tabela E.2 – Valores RMS da variável de teste – <i>fade-slope</i> – Cenesp15 (Δt entre 20 e 60 s) | 162 |
| Tabela E.3 – Valores RMS da variável de teste – <i>fade-slope</i> – Scania (Δt entre 20 e 60 s) | 163 |
| Tabela E.4 – Valores RMS da variável de teste – <i>fade-slope</i> – Barueri (Δt entre 20 e 60 s) | 164 |
| Tabela E.5 – Valores RMS da variável de teste – <i>fade-slope</i> – Paranapiacaba (Δt entre 20 e 60 s) | 165 |
| Tabela E.6 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos para cada nível de atenuação – Bradesco | 167 |
| Tabela E.7 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos para cada nível de atenuação – Scania | 167 |
| Tabela E.8 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos para cada nível de atenuação – | |

| | |
|--|-----|
| Barueri | 168 |
| Tabela E.9 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos para cada nível de atenuação – Paranapiacaba | 168 |
| Tabela E.10 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento para cada nível de atenuação – Bradesco | 170 |
| Tabela E.11 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento para cada nível de atenuação – Scania | 170 |
| Tabela E.12 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento para cada nível de atenuação – Barueri | 171 |
| Tabela E.13 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento para cada nível de atenuação – Paranapiacaba | 171 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Atenuação específica por chuvas, gases atmosféricos e vapor de água | 24 |
| Figura 2.1 – Modelo <i>Enhanced</i> Maseng-Bakken (EMB) | 31 |
| Figura 2.2 – Primeira etapa para estimação do parâmetro β | 34 |
| Figura 2.3 – Representação do modelo Cadeia de Markov de N estados [10] | 36 |
| Figura 3.1 – Sistema de aquisição de dados do Cetuc [15] | 37 |
| Figura 3.2 – Distribuição geográfica dos enlaces terrestres | 39 |
| Figura 3.3 – Períodos dos dados analisados | 40 |
| Figura 3.4 – Edição de série temporal de potência (exemplo 1) | 41 |
| Figura 3.5 – Edição de série temporal de potência (exemplo 2) | 41 |
| Figura 3.6 – Edição de série temporal de potência (exemplo 3) | 42 |
| Figura 3.7 – Calibração de série temporal de potência (exemplo 1) | 43 |
| Figura 3.8 – Calibração de série temporal de potência (exemplo 2) | 43 |
| Figura 3.9 – Exemplo de série temporal de atenuação de um dia | 44 |
| Figura 4.1 – CCDF de atenuação por chuva dos enlaces terrestres | 45 |
| Figura 4.2 – Ilustração do <i>fade-slope</i> | 47 |
| Figura 4.3 – Distribuição de <i>fade-slope</i> – Cenesp15 ($\Delta t = 30$ s) | 49 |
| Figura 4.4 – Distribuições de <i>fade-slope</i> para diferentes níveis de atenuação e tempos de amostragem – Paranapiacaba ($\Delta t = 30$ s) | 50 |
| Figura 4.5 – Distribuições de <i>fade-slope</i> para diferentes níveis de atenuação e tempos de amostragem – Paranapiacaba ($\Delta t = 20$ s) | 51 |
| Figura 4.6 – Distribuições de <i>fade-slope</i> para diferentes níveis de atenuação e tempos de amostragem – Paranapiacaba ($\Delta t = 40$ s) | 51 |
| Figura 4.7 – Distribuições de <i>fade-slope</i> para diferentes níveis de atenuação e tempos de amostragem – Paranapiacaba ($\Delta t = 50$ s) | 52 |
| Figura 4.8 – Distribuições de <i>fade-slope</i> para diferentes níveis de atenuação e tempos de amostragem – Paranapiacaba ($\Delta t = 60$ s) | 52 |
| Figura 4.9 – Distribuições de <i>fade-slope</i> dos enlaces terrestres de SP (níveis de atenuação iguais a 10 e 20 dB, $\Delta t = 30$ s) | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.10 – Ilustração da duração de desvanecimento | 54 |
| Figura 4.11 – Distribuições de número de desvanecimentos – Cenesp15 | 55 |
| Figura 4.12 – Distribuições de tempo relativo de desvanecimento – Cenesp15 | 55 |
| Figura 4.13 – Distribuições de número de desvanecimentos para diferentes níveis de atenuação e tempos de amostragem – Paranapiacaba | 56 |
| Figura 4.14 – Distribuições de tempo relativo de desvanecimentos para diferentes níveis de atenuação e tempos de amostragem – Paranapiacaba | 56 |
| Figura 4.15 – Distribuição de número de desvanecimentos dos enlaces terrestres de SP | 57 |
| Figura 4.16 – Distribuição de tempo relativo de desvanecimento dos enlaces terrestres de SP | 58 |
| Figura 5.1 – CCDF de atenuação por chuva dos enlaces terrestres | 60 |
| Figura 5.2 – Ajuste lognormal do modelo EMB – Bradesco (0,01 a 10%) | 61 |
| Figura 5.3 – Resultado do ajuste lognormal do modelo EMB – Bradesco (0,01 a 10%) | 62 |
| Figura 5.4 – Resultado do ajuste lognormal do modelo EMB – Bradesco (0,05 a 10%) | 62 |
| Figura 5.5 – Resultado do ajuste lognormal dos modelos EMB e TMB – Bradesco (0,01 a 10%) | 66 |
| Figura 5.6 – Comparação entre ajustes dos modelos EMB e TMB – Bradesco | 67 |
| Figura 5.7 – CCDF de atenuação para períodos de 8 horas – Bradesco | 68 |
| Figura 5.8 – CCDF de atenuação para períodos extremos de intensidade de atenuação – Bradesco | 69 |
| Figura 5.9 – CCDF de atenuação para períodos extremos de intensidade de atenuação – Cenesp15 | 69 |
| Figura 5.10 – Ajuste lognormal EMB da distribuição de atenuação | |

| | |
|--|----|
| branda – Bradesco | 70 |
| Figura 5.11 – Ajuste lognormal EMB da distribuição de atenuação média – Bradesco | 70 |
| Figura 5.12 – Ajuste lognormal EMB da distribuição de atenuação intensa – Bradesco | 70 |
| Figura 5.13 – Ajuste da CCDF de atenuação através da distribuição Pareto – Cenesp15 | 74 |
| Figura 5.14 – Ajuste da CCDF de atenuação através da distribuição Gamma – Cenesp15 | 75 |
| Figura 5.15 – Ajuste da CCDF de atenuação através da distribuição Weibull – Cenesp15 | 75 |
| Figura 6.1 – Diagrama de blocos do modelo Gamma-Cetuc (GC) | 77 |
| Figura 6.2 – Modelo GC (1ª etapa): geração de ruído branco gaussiano | 78 |
| Figura 6.3 – Modelo GC (3ª etapa): geração da sequência com distribuição Gamma e correlação especificada | 80 |
| Figura 6.4 – Detalhes da etapa de geração da sequência com distribuição Gamma e correlação especificada | 80 |
| Figura 6.5 – Gráfico da ACF gamma como função da ACF gaussiana | 83 |
| Figura 6.6 – Gráfico da ACF gaussiana como função da ACF gamma Cenesp15 | 84 |
| Figura 6.7 – ACF Gamma experimental e ACF Gaussiana desejada – Cenesp15 | 84 |
| Figura 6.8 – Modelo GC (2ª etapa): geração da sequência gaussiana colorida | 85 |
| Figura 6.9 – Ajuste de curva para extração do parâmetro β – Cenesp15 | 86 |
| Figura 7.1 – CCDF de atenuação das séries temporais sintetizadas – Cenesp15 | 91 |
| Figura 7.2 – Erro absoluto da CCDF de atenuação das séries temporais sintetizadas – Cenesp15 | 92 |
| Figura 7.3 – CCDF de atenuação de múltiplas séries temporais sintetizadas – Cenesp15 | 92 |

| | |
|--|-----|
| Figura 7.4 – Distribuições de <i>fade-slope</i> experimental e sintetizadas Cenesp15 | 96 |
| Figura 7.5 – Valores da variável de teste das estatísticas de <i>fade-slope</i> Cenesp15 | 98 |
| Figura 7.6 – Distribuições de número de desvanecimentos experimental e sintetizadas – Cenesp15 | 102 |
| Figura 7.7 – Valores da variável de teste – número de desvanecimentos – Cenesp15 | 103 |
| Figura 7.8 – Distribuições de tempo relativo de desvanecimento experimental e sintetizadas – Cenesp15 | 106 |
| Figura 7.9 – Valores da variável de teste – tempo rel. de desvanecimento – Cenesp15 | 108 |
| Figura 7.10 – Sensibilidade das estatísticas de <i>fade-slope</i> à variação do parâmetro dinâmico – Cenesp15 | 116 |
| Figura 7.11 – Sensibilidade das estatísticas de duração de desvanecimentos à variação do parâmetro dinâmico – Cenesp15 | 116 |
| Figura 7.12 – Relação entre distância do enlace e valores dos parâmetros dinâmicos | 118 |
| Figura 7.13 – Relação distância dos enlaces x valores dos parâmetros dinâmicos – EMB | 120 |
| Figura 7.14 – Relação distância dos enlaces x valores dos parâmetros dinâmicos – TMB | 120 |
| Figura 7.15 – Relação distância dos enlaces x valores dos parâmetros dinâmicos – GC | 121 |
| Figura A.1 – Distribuições de <i>fade-slope</i> – Bradesco ($\Delta t = 30$ s) | 135 |
| Figura A.2 – Distribuições de <i>fade-slope</i> – Scania ($\Delta t = 30$ s) | 135 |
| Figura A.3 – Distribuições de <i>fade-slope</i> – Barueri ($\Delta t = 30$ s) | 136 |
| Figura A.4 – Distribuições de <i>fade-slope</i> – Paranapiacaba ($\Delta t = 30$ s) | 136 |
| Figura A.5 – Distribuições de número de desvanecimentos – Bradesco | 137 |
| Figura A.6 – Distribuições de tempo relativo de desvanecimento – | |

| | |
|---|-----|
| Bradesco | 137 |
| Figura A.7 – Distribuições de número de desvanecimentos – Scania | 138 |
| Figura A.8 – Distribuições de tempo relativo de desvanecimento – Scania | 138 |
| Figura A.9 – Distribuições de número de desvanecimentos – Barueri | 139 |
| Figura A.10 – Distribuições de tempo relativo de desvanecimento – Barueri | 139 |
| Figura A.11 – Distribuições de número de desvanecimentos – Paranapiacaba | 140 |
| Figura A.12 – Distribuições de tempo relativo de desvanecimento – Paranapiacaba | 140 |
| Figura B.1 – Ajuste lognormal EMB – Cenesp15 | 141 |
| Figura B.2 – Ajuste lognormal EMB – Scania | 141 |
| Figura B.3 – Ajuste lognormal EMB – Barueri | 142 |
| Figura B.4 – Ajuste lognormal EMB – Paranapiacaba | 142 |
| Figura B.5 – Ajustes lognormais EMB e TMB – Cenesp15 | 142 |
| Figura B.6 – Ajustes lognormais EMB e TMB – Scania | 143 |
| Figura B.7 – Ajustes lognormais EMB e TMB – Barueri | 143 |
| Figura B.8 – Ajustes lognormais EMB e TMB – Paranapiacaba | 143 |
| Figura B.9 – Ajuste lognormal EMB da distribuição de atenuação branda – Cenesp15 | 144 |
| Figura B.10 – Ajuste lognormal EMB da distribuição de atenuação média – Cenesp15 | 144 |
| Figura B.11 – Ajuste lognormal EMB da distribuição de atenuação intensa – Cenesp15 | 144 |
| Figura C.1 – Ajuste da CCDF de atenuação – distribuição Pareto – Bradesco | 145 |
| Figura C.2 – Ajuste da CCDF de atenuação – distribuição Pareto – Scania | 145 |
| Figura C.3 – Ajuste da CCDF de atenuação – distribuição Pareto – Barueri | 146 |
| Figura C.4 – Ajuste da CCDF de atenuação – distribuição Pareto – Paranapiacaba | 146 |

| | |
|---|-----|
| Figura C.5 – Ajuste da CCDF de atenuação – distribuição Gamma – Bradesco | 147 |
| Figura C.6 – Ajuste da CCDF de atenuação – distribuição Gamma – Scania | 147 |
| Figura C.7 – Ajuste da CCDF de atenuação – distribuição Gamma – Barueri | 148 |
| Figura C.8 – Ajuste da CCDF de atenuação – distribuição Gamma – Paranapiacaba | 148 |
| Figura C.9 – Ajuste da CCDF de atenuação – distribuição Weibull – Bradesco | 149 |
| Figura C.10 – Ajuste da CCDF de atenuação – distribuição Weibull – Scania | 149 |
| Figura C.11 – Ajuste da CCDF de atenuação – distribuição Weibull – Barueri | 150 |
| Figura C.12 – Ajuste da CCDF de atenuação – distribuição Weibull – Paranapiacaba | 150 |
| Figura D.1 – CCDF de atenuação das séries temporais sintetizadas – Bradesco | 151 |
| Figura D.2 – Erro absoluto médio da CCDF de atenuação das séries temporais sintetizadas – Bradesco | 151 |
| Figura D.3 – CCDF de atenuação das séries temporais sintetizadas – Scania | 152 |
| Figura D.4 – Erro absoluto médio da CCDF de atenuação das séries temporais sintetizadas – Scania | 152 |
| Figura D.5 – CCDF de atenuação das séries temporais sintetizadas – Barueri | 153 |
| Figura D.6 – Erro absoluto médio da CCDF de atenuação das séries temporais sintetizadas – Barueri | 153 |
| Figura D.7 – CCDF de atenuação das séries temporais sintetizadas – Paranapiacaba | 154 |
| Figura D.8 – Erro absoluto médio da CCDF de atenuação das séries temporais sintetizadas – Paranapiacaba | 154 |
| Figura D.9 – Distribuições de <i>fade-slope</i> experimental e | |

| | |
|---|-----|
| sintetizadas – Bradesco | 155 |
| Figura D.10 – Distribuições de <i>fade-slope</i> experimental e sintetizadas – Scania | 155 |
| Figura D.11 – Distribuições de <i>fade-slope</i> experimental e sintetizadas – Barueri | 156 |
| Figura D.12 – Distribuições de <i>fade-slope</i> experimental e sintetizadas – Paranapiacaba | 156 |
| Figura D.13 – Distribuições de número de desvanecimentos experimental e sintetizadas – Bradesco | 157 |
| Figura D.14 – Distribuições de número de desvanecimentos experimental e sintetizadas – Scania | 157 |
| Figura D.15 – Distribuições de número de desvanecimentos experimental e sintetizadas – Barueri | 158 |
| Figura D.16 – Distribuições de número de desvanecimentos experimental e sintetizadas – Paranapiacaba | 158 |
| Figura D.17 – Distribuições de tempo relativo de desvanecimento experimental e sintetizadas – Bradesco | 159 |
| Figura D.18 – Distribuições de tempo relativo de desvanecimento experimental e sintetizadas – Scania | 159 |
| Figura D.19 – Distribuições de tempo relativo de desvanecimento experimental e sintetizadas – Barueri | 160 |
| Figura D.20 – Distribuições de tempo relativo de desvanecimento experimental e sintetizadas – Paranapiacaba | 160 |
| Figura E.1 – Valores da variável de teste das estatísticas de <i>fade-slope</i> – Bradesco | 166 |
| Figura E.2 – Valores da variável de teste das estatísticas de <i>fade-slope</i> – Scania | 166 |
| Figura E.3 – Valores da variável de teste das estatísticas de <i>fade-slope</i> – Barueri | 166 |
| Figura E.4 – Valores da variável de teste das estatísticas de <i>fade-slope</i> – Paranapiacaba | 166 |
| Figura E.5 – Valores da variável de teste – número de desvanecimentos – Bradesco | 169 |

| | |
|--|-----|
| Figura E.6 – Valores da variável de teste – número de desvanecimentos – Scania | 169 |
| Figura E.7 – Valores da variável de teste – número de desvanecimentos – Barueri | 169 |
| Figura E.8 – Valores da variável de teste – número de desvanecimentos – Paranapiacaba | 169 |
| Figura E.9 – Valores da variável de teste – tempo rel. de desvanecimento – Bradesco | 172 |
| Figura E.10 – Valores da variável de teste – tempo rel. de desvanecimento – Scania | 172 |
| Figura E.11 – Valores da variável de teste – tempo rel. de desvanecimento – Barueri | 172 |
| Figura E.12 – Valores da variável de teste – tempo rel. de desvanecimento – Paranapiacaba | 172 |
| Figura F.1 – Sensibilidade das estatísticas de <i>fade-slope</i> à variação do parâmetro dinâmico – Bradesco | 173 |
| Figura F.2 – Sensibilidade das estatísticas de duração de desvanecimentos à variação do parâmetro dinâmico – Bradesco | 173 |
| Figura F.3 – Sensibilidade das estatísticas de <i>fade-slope</i> à variação do parâmetro dinâmico – Scania | 174 |
| Figura F.4 – Sensibilidade das estatísticas de duração de desvanecimentos à variação do parâmetro dinâmico – Scania | 174 |
| Figura F.5 – Sensibilidade das estatísticas de <i>fade-slope</i> à variação do parâmetro dinâmico – Barueri | 175 |
| Figura F.6 – Sensibilidade das estatísticas de duração de desvanecimentos à variação do parâmetro dinâmico – Barueri | 175 |
| Figura F.7 – Sensibilidade das estatísticas de <i>fade-slope</i> à variação do parâmetro dinâmico – Paranapiacaba | 176 |
| Figura F.8 – Sensibilidade das estatísticas de duração de desvanecimentos à variação do parâmetro dinâmico – Paranapiacaba | 176 |

O caos é uma ordem por decifrar.

José Saramago, *O Homem Duplicado*