

Débora Dias Jardim Penna

**Definição da Árvore de Cenários de Afluências
para o Planejamento da Operação Energética
de Médio Prazo**

Tese de Doutorado

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

Orientador: Reinaldo Castro Souza
Co-Orientadora: Maria Elvira Piñeiro Maceira

Rio de Janeiro
Julho de 2009



Débora Dias Jardim Penna

**Definição da Árvore de Cenários de Afluências
para o Planejamento da Operação Energética
de Médio Prazo**

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para obtenção do título 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.

Dr. Reinaldo Castro Souza
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica/PUC-Rio

Dra. Maria Elvira Piñeiro Maceira
Co-Orientadora
UERJ/CEPEL

Dra. Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco
Departamento de Engenharia Elétrica /PUC-Rio

Dr. Ricardo Tanscheit
Departamento de Engenharia Elétrica /PUC-Rio

Dr. Jorge Machado Damázio
UERJ/CEPEL

Dr. Paulo Roberto de Holanda Sales
UERJ/ELETRONBRAS

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 09 de julho de 2009

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

Débora Dias Jardim Penna

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF (1997). Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ (2002). Desde 1998 é pesquisadora do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, CEPEL, onde tem participado do desenvolvimento de modelos e sistemas computacionais para planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos interligados e geração de cenários sintéticos multivariados de vazões e energias.

Ficha Catalográfica

Penna, Débora Dias Jardim

Definição da árvore de cenários de afluências para o planejamento da operação energética de médio prazo / Débora Dias Jardim Penna ; orientador: Reinaldo Castro Souza ; co-orientadora: Maria Elvira Piñeiro Maceira. – 2009.

293 f. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Planejamento da operação energética. 3. Geração de séries sintéticas multivariadas. 4. Geração de árvore de cenários. 5. Técnicas de agregação. 6. Técnicas de amostragem. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Piñeiro Maceira, Maria Elvira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Para meu querido vô Moacir
(in memorian)

Agradecimentos

À orientadora Maria Elvira Maceira pela excelente orientação ao longo deste trabalho. Agradeço o voto de confiança e a oportunidade de trabalharmos no mesmo grupo de pesquisa.

Ao professor Reinaldo Souza, por ter proporcionado o intercâmbio PUC/CEPEL, sem o qual este trabalho não teria sido realizado.

Ao pesquisador Jorge Damázio pelas discussões e observações fundamentadas na sua sólida experiência.

Aos demais membros da banca, Marley Vellasco, Ricardo Tanscheit e Paulo Holanda pelas valiosas contribuições ao texto final da tese.

Ao Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL), na figura de seu diretor Albert Melo, pelo grande apoio e pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Vitor Duarte, Welington Oliveira e André Diniz pelas enriquecedoras discussões que muito me auxiliaram neste trabalho.

Ao pesquisador Roberto Pinto, pela grande ajuda com o universo Linux.

Aos amigos Luiz Guilherme e Fábio Batista pelo incentivo constante e pelos boletins diários da tese. Aos demais amigos do CEPEL pelo apoio e pela amizade incondicional oferecida.

Aos engenheiros do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) Alberto Kligerman, Cecília Mércio, Maria Cândida Lima, Maria Helena de Azevedo, Joari Costa e Murilo Soares pelas importantes discussões travadas.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio, pelo excelente trabalho que realizam.

À PUC-Rio, pelo suporte financeiro.

Ao meu marido Leandro e meu filho Pedro por serem minha fonte de força e energia, e pelo apoio nos momentos mais difíceis dessa longa trajetória.

À minha família que sempre esteve ao meu lado, acreditando e torcendo por mim. Em especial, à vó Cida pelo exemplo de vida.

Finalmente, a Deus, por ter me dado a benção da vida, assim como os melhores presentes: a minha família e os meus amigos.

Resumo

Penna, Débora Dias Jardim; Castro, Reinaldo Souza. **Definição da Árvore de Cenários de Afluências para o Planejamento da Operação Energética de Médio Prazo.** Rio de Janeiro, 2009. 293p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No modelo atualmente utilizado para o planejamento da operação de médio prazo do Sistema Interligado Nacional, a incerteza referente às afluências é considerada explicitamente no cálculo de valores da função de custo futuro bem como ao se percorrer o espaço de estados através da utilização de cenários hidrológicos multivariados. O conjunto de todas as possíveis realizações do processo estocástico de afluências, ao longo de todo horizonte de planejamento, forma uma árvore de cenários. Esta árvore representa todo o universo probabilístico sobre o qual é efetuado o processo de otimização da operação energética. Como a árvore possui uma cardinalidade bastante elevada, torna-se impossível do ponto de vista computacional percorrer completamente a árvore. Portanto, apenas uma porção da árvore (sub-árvore) é percorrida. Atualmente a sub-árvore é definida utilizando amostragem aleatória simples. Este trabalho tem o objetivo de propor um método para a definição da sub-árvore a ser visitada durante o processo do cálculo da política ótima de operação por programação estocástica dual com o intuito de tornar mais robusto os resultados obtidos por esta política de operação em relação a variações no número de cenários das simulações *forward* e *backward* e em relação a variações da amostra de cenários hidrológicos utilizada. Duas propostas são aplicadas na definição da sub-árvore: (i) utilizar a amostragem por hipercubo latino ou amostragem descritiva no modelo de geração de cenários hidrológicos multivariados, e (ii) aplicar técnicas estatísticas multivariadas capazes de agrupar objetos similares em determinados grupos (técnicas de agregação). Estas propostas podem ser aplicadas separadamente ou em conjunto.

Palavras-chave

Planejamento da operação energética; geração de séries sintéticas multivariadas; geração de árvore de cenários; técnicas de agregação; técnicas de amostragem

Abstract

Penna, Débora Dias Jardim; Castro, Reinaldo Souza (Advisor). **Definition of the Streamflow Scenario Tree to Long-Term Operation Planning.** Rio de Janeiro, 2009. 293p. D.Sc. Thesis - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the planning operation the currently used model in the long-term operation planning of the Brazilian Interconnected System, the uncertainty concerning streamflow is considered explicitly in the estimation of the expected cost-to-go function, as well as in the covering of the state space, by the use of multivariate hydrological scenarios. The set of all possible realizations of the streamflow stochastic process throughout the planning horizon forms a scenario tree. This tree represents the entire probabilistic universe on which are calculated the optimal operation strategies. As the scenario tree of the long-term operation planning problem has a high cardinality, makes it impossible to visit the complete tree due to computational effort. Therefore, only a portion of the tree (sub-tree) is covered. Currently the sub-tree is selected using the Monte-Carlo method with classical simple random sampling. The objective of this work is to propose a method for defining the sub-tree to be visited during the calculation of the optimal operating strategy for the Brazilian hydro-thermal power system by stochastic dual dynamic programming in order to obtain more robust results from this operation policy with regard to variations in the number of scenarios of forward and backward simulations, and variations in the sample hydrological scenario. There are two proposals for definition of the sub-tree: (i) change the simple random sampling to latin hypercube sampling or descriptive sampling in the multivariate streamflow scenario generation model, and (ii) apply multivariate statistical techniques to develop criteria that allow grouping similar objects in certain groups (clustering techniques). The proposals can be applied together or separately.

Keywords

long-term operation planning; multivariate synthetic scenarios generation; scenarios tree generation; clustering techniques; sampling techniques

Sumário

1	Introdução	23
1.1.	Considerações Iniciais	23
1.2.	Contexto do Trabalho	25
1.3.	Objetivos do Trabalho	26
1.4.	Metodologia Proposta	27
1.5.	Relevância do Trabalho	27
1.6.	Organização do Trabalho	28
2	Planejamento da Operação Energética	30
2.1.	Considerações Iniciais	30
2.2.	Formulação do Problema	31
2.2.1.	Sistemas Térmicos	31
2.2.2.	Sistemas Hidrotérmicos	32
2.3.	Planejamento da Operação Energética no Sistema Brasileiro	35
2.3.1.	Cadeia de Modelos	37
2.3.2.	Planejamento de Médio Prazo	38
2.3.3.	Planejamento de Curto Prazo	40
2.3.4.	Programação da Operação	40
2.4.	Resumo	41
3	Planejamento da Operação de Médio Prazo	42
3.1.	Considerações Iniciais	42
3.2.	Representação da Incerteza Hidrológica na PDDE	43
3.3.	Construção da Árvore de Cenários	47
3.4.	Resumo	51
4	Modelo de Geração de Séries Sintéticas de Energia	52
4.1.	Considerações Iniciais	52
4.2.	Processos Estocásticos e Séries Temporais	53
4.3.	O Modelo Autorregressivo Periódico	56
4.3.1.	Descrição do Modelo	56
4.3.2.	Ajuste do Modelo	59

4.3.3. Geração de Séries Sintéticas com o Modelo PAR(p)	61
4.3.4. Vazões Incrementais Negativas	65
4.3.5. Correlação Espacial	66
4.4. Avaliação do Desempenho do Modelo	66
4.4.1. Geração em Paralelo	66
4.4.2. Geração em Árvore	71
4.5. Resumo	74
5 Definição da Árvore de Cenários	75
5.1. Considerações Iniciais	75
5.2. Técnicas de Seleção de Cenários	75
5.2.1. Métodos de Agrupamento	77
5.2.2. Método K-MEANS	80
5.3. Técnicas de Amostragem	81
5.3.1. Amostragem por Hipercubo Latino	81
5.3.2. Amostragem Descritiva	84
5.3.3. Quase-Monte Carlo	85
5.4. Resumo	87
6 Aplicação do Modelo de Geração de Cenários	88
6.1. Considerações Iniciais	88
6.2. Alternativas para Construção da Árvore de Afluências	88
6.3. Construção dos Cortes de Benders	94
6.4. Reamostragem de Cenários (recombinação de ruídos)	96
6.5. Considerações Finais	99
6.6. Resumo	100
7 Avaliação dos Cenários Hidrológicos Gerados	101
7.1. Considerações Iniciais	101
7.2. Análise da amostra de ruídos	102
7.2.1. Amostra de ruídos utilizada no processo de agregação	102
7.2.2. Amostra de ruídos utilizada na geração dos cenários do passo forward	107
7.2.3. Amostra de ruídos utilizada na geração dos cenários do passo backward	111
7.2.4. Variando o tamanho da amostra de ruídos forward e backward	114
7.2.5. Amostra de ruídos utilizando LHC e AD	122
7.3. Análise dos Cenários Gerados para Passo Forward	125

7.3.1. Envoltória dos Cenários	126
7.3.2. Média dos Cenários	130
7.3.3. Desvio-padrão dos Cenários	132
7.3.4. Distribuição Univariada dos Cenários	134
7.3.5. Correlação Cruzada dos Cenários	138
7.3.6. Análise de Seqüências Negativas	143
7.4. Análise dos Cenários Gerados para Passo Backward	149
7.4.1. Envoltória dos Cenários	150
7.4.2. Testes não condicionados para média e desvio	155
7.4.3. Distribuição Univariada dos Cenários	157
7.4.4. Testes condicionados para média e desvio	162
7.4.5. Correlação Cruzada dos Cenários	164
7.5. Resumo	172
8 Avaliação dos Resultados do Problema de Planejamento da Operação	174
8.1. Considerações Iniciais	174
8.2. Avaliação da convergência	176
8.3. Alteração da amostra de cenários	179
8.4. Alteração do número de cenários backward	183
8.5. Alteração do número de cenários forward	186
8.6. Alteração do tamanho da amostra para o processo de agregação	191
8.7. Alteração do método de amostragem	193
8.8. Combinação de método de amostragem e agregação	197
8.9. Verificação da estabilidade dos resultados	203
8.10. Resumo	213
9 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	214
9.1. Sugestões para trabalhos futuros	217
10 Referências Bibliográficas	219
Apêndice A Modelo Newave	225
A.1. Introdução	225
A.2. Modelo Newave	226
A.2.1. Módulo de Cálculo do Sistema Equivalente	228
A.2.2. Módulo de Cálculo da Política de Operação	231
A.2.2.1. Programação Dinâmica Dual Estocástica Aplicada ao	

Planejamento da Operação Hidrotérmica	231
A.2.2.2 Despacho de Operação Hidrotérmica em Sistemas Equivalentes de Energia	236
A.2.3. Módulo de Simulação da Operação	240
Apêndice B Análise dos Cenários Gerados de Energia Natural Afluyente (Complementação)	241
B.1 Análise dos Cenários Gerados para Passo Forward	241
B.1.1 Média dos Cenários	241
B.1.2 Desvio-padrão dos Cenários	245
B.2. Análise dos Cenários Gerados para Passo Backward	250
B.2.2 Testes não Condicionados para Média e Desvio-padrão	250
B.2.2 Testes Condicionados para Média e Desvio-padrão	255
B.2.3 Testes Condicionados para Correlação Cruzada	259
Apêndice C Avaliação dos Resultados do Problema de Planejamento da Operação (Complementação)	269

Lista de figuras

Figura 1: Processo de decisão para um sistema hidrotérmico	24
Figura 2: Custos Imediato e Futuro X Armazenamento	33
Figura 3: Uso ótimo da água	34
Figura 4: Horizontes do Planejamento da Operação e Principais Decisões em cada Estágio	36
Figura 5: Representação de Incertezas e do Detalhamento do Sistema com o Horizonte de Estudo	37
Figura 6: Cadeia de Modelos Computacionais para o Planejamento da Expansão e Operação Energética	39
Figura 7: Exemplo de árvore de cenários (Árvore Completa)	44
Figura 8: Exemplo de sub-árvore de cenários do NEWAVE	45
Figura 9: Exemplo CEPEL - árvore completa	46
Figura 10: Exemplo CEPEL – sub-árvores	47
Figura 11: Opção Atual	49
Figura 12: Sorteio Condicionado	49
Figura 13: Opção 1AAS	50
Figura 14: Relação Demanda x Risco em um Ano Qualquer	52
Figura 15: Vazão Afluente Anual x Anos	53
Figura 16: Tendência Hidrológica	62
Figura 17: Geração não condicionada – Primeira Etapa	62
Figura 18: Geração não condicionada – Segunda Etapa	63
Figura 19: Geração em Paralelo (Pente) para a simulação Forward	63
Figura 20: Seqüência de geração para a simulação Backward	64
Figura 21: Geração em Paralelo (Pente) para a simulação Backward	64
Figura 22: Seqüência Negativa	67
Figura 23: Volume de regularização (Déficit)	69
Figura 24: Aplicação técnicas de agregação	77
Figura 25: Exemplo ilustrativo do processo aglomerativo	78
Figura 26: Dendograma	79
Figura 27: Divisão em 5 intervalos do domínio de duas VA (a) distribuição normal (b) distribuição uniforme	81
Figura 28: Valores sorteados para cada variável	82
Figura 29: Representação bi-dimensional de uma possível	

amostragem por hipercubo latino	83
Figura 30: Representação da amostragem utilizando método Quase-Monte Carlo (Sobol) (a) 100 pontos (b) 1000 pontos	86
Figura 31: Amostra (a) Seqüência de Sobol (b) Amostragem Aleatória Simples	86
Figura 32: Amostra (a) Seqüência de Sobol [50] (b) Seqüência de Halton [20]	87
Figura 33: Aplicação do Procedimento de Agregação	89
Figura 34: Escolha do Objeto Representativo	89
Figura 35: Probabilidade dos Cenários Forward	91
Figura 36: Opção 0	91
Figura 37: Opção 1	92
Figura 38: Opção 2	92
Figura 39: Opção 3	93
Figura 40: Opção 4	94
Figura 41: Construção da FCF – modelo NEWAVE	95
Figura 42: Árvore Completa – Exemplo	97
Figura 43: Sub-árvore (1º. amostra) – Exemplo	97
Figura 44: – Sub-árvore – Exemplo (a) 2º. amostra e (b) 3º. Amostra	98
Figura 45: Sub-árvore após diversas reamostragens – Exemplo	98
Figura 46: Tendência Hidrológica Recente (%MLT)	102
Figura 47: Estimativa Média (amostra de ruídos)	103
Figura 48: Estimativa Desvio-Padrão (amostra de ruídos)	104
Figura 49: Número de Rejeições (amostra de ruídos)	104
Figura 50: Intervalos da Distribuição Univariada	105
Figura 51: Exemplificação Classe 34	105
Figura 52: Distribuição Multivariada – Amostra com Tamanho 2 mil a 100 mil	107
Figura 53: Estatística t – Média – Amostra Forward (ruído)	108
Figura 54: Estatística t – Desvio-padrão – Amostra Forward (ruído)	109
Figura 55: Teste de Aderência – Amostra Forward (ruído)	110
Figura 56: Distribuição Multivariada – Amostra Forward (ruído)	111
Figura 57: Estatística t – Desvio-padrão Média – Amostra Backward (ruído)	112
Figura 58: Estatística t – Desvio-padrão – Amostra Backward (ruído)	112
Figura 59: Teste de Aderência – Amostra Backward (ruído)	113
Figura 60: Distribuição Multivariada – Amostra Backward (ruído)	114
Figura 61: Estatística t – Média – Amostra Forward (ruído) – Variando Tamanho Amostra Forward	115

Figura 62: – Estatística t – Desvio-Padrão – Amostra Forward (ruído) – Variando Tamanho Amostra Forward	115
Figura 63: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – 250x20 – Opção Atual	116
Figura 64: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – 300x20 – Opção Atual	116
Figura 65: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – 250x20 – Opção 0	116
Figura 66: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – 300x20 – Opção 0	117
Figura 67: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – 250x20 – Opção 4	117
Figura 68: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – 300x20 – Opção 4	117
Figura 69: Estatística t – Média – Amostra Backward (ruído) – Variando Tamanho Amostra Backward	118
Figura 70: Estatística t – Desvio-Padrão – Amostra Backward (ruído) – Variando Tamanho Amostra Backward	119
Figura 71: Estatística t – Média – Amostra Forward (ruído) – Variando Tamanho Amostra Backward	120
Figura 72: Estatística t – Desvio-Padrão – Amostra Forward (ruído) – Variando Tamanho Amostra Backward	120
Figura 73: Distribuição – Amostra Backward (ruído) – 200x50 – Opção Atual	121
Figura 74: Distribuição – Amostra Backward (ruído) – 200x100 – Opção Atual	121
Figura 75: Distribuição – Amostra Backward (ruído) – 200x50 – Opção 0 e 4	121
Figura 76: Distribuição – Amostra Backward (ruído) – 200x100 – Opção 0 e 4	122
Figura 77: Estatística t – Média – Amostra Forward (ruído) – Variando Método Amostragem	122
Figura 78: Estatística t – DP – Amostra Forward (ruído) – Variando Método Amostragem	123
Figura 79: Estatística t – Média – Amostra Backward (ruído) – Variando Método Amostragem	123
Figura 80: Estatística t – DP – Amostra Backward (ruído) – Variando Método Amostragem	124
Figura 81: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – LHC	124
Figura 82: Distribuição – Amostra Backward (ruído) – LHC	125
Figura 83: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – AD	125
Figura 84: Distribuição – Amostra Backward (ruído) – AD	125
Figura 85: Envoltória Cenários Forward – Sudeste	127
Figura 86: Envoltória Cenários Forward – Sul	128
Figura 87: Envoltória Cenários Forward – Nordeste	129
Figura 88: Envoltória Cenários Forward – Norte	130

Figura 89: Média Cenários Forward – Sudeste	132
Figura 90: Desvio-Padrão Cenários Forward – Sudeste	134
Figura 91: Teste de Aderência Cenários Forward – Sudeste	135
Figura 92: Teste de Aderência Cenários Forward – Sul	136
Figura 93: Teste de Aderência Cenários Forward – Nordeste	137
Figura 94: Teste de Aderência Cenários Forward – Norte	137
Figura 95: Correlação Cruzada Cenários Forward – Sudeste x Sul	138
Figura 96: Correlação Cruzada Cenários Forward – Sudeste x Nordeste	139
Figura 97: Correlação Cruzada Cenários Forward – Sudeste x Norte	140
Figura 98: Correlação Cruzada Cenários Forward – Sul x Nordeste	141
Figura 99: Correlação Cruzada Cenários Forward – Sul x Norte	142
Figura 100: Correlação Cruzada Cenários Forward – Nordeste x Norte	143
Figura 101: Teste com Diferentes Níveis de Regularização – Opção Atual	145
Figura 102: Teste com Diferentes Níveis de Regularização – Opção 0	148
Figura 103: Teste com Diferentes Níveis de Regularização – Opções 1 e 1AAS	148
Figura 104: Teste com Diferentes Níveis de Regularização – Opções 2, 3 e 4	149
Figura 105: Amostra utilizada no teste não condicionado	150
Figura 106: Amostras utilizadas no teste condicionado	150
Figura 107: Envoltória Cenários Forward – Sudeste	151
Figura 108: Envoltória Cenários Backward – Sul	153
Figura 109: – Envoltória Cenários Backward – Nordeste	154
Figura 110: Envoltória Cenários Backward – Norte	155
Figura 111: Média Cenários Backward – Sudeste	157
Figura 112: Teste de Aderência Cenários Backward – Sudeste	158
Figura 113: Teste de Aderência Cenários Backward – Sul	160
Figura 114: Teste de Aderência Cenários Backward – Nordeste	161
Figura 115: Teste de Aderência Cenários Backward – Norte	162
Figura 116: Estatística t Média e Desvio-Padrão – Cenários Backward - Sudeste	164
Figura 117: Correlação Cruzada Cenários Backward – Sudeste x Sul	166
Figura 118: CC Backward x Forward – Sudeste x Sul – Opção Atual	167
Figura 119: CC Backward x Forward – Sudeste x Sul – Opção 0	167
Figura 120: CC Backward x Forward – Sudeste x Sul – Opção 1	168
Figura 121: CC Backward x Forward – Sudeste x Sul – Opção 4	168

Figura 122: CC Backward x Forward – Sudeste x Sul – Opção 1AAS	169
Figura 123: CC Backward x Forward – Sudeste x Sul – Opção LHC	169
Figura 124: CC Backward x Forward – Sudeste x Sul – Opção AD	170
Figura 125: Comparação entre CC Forward e Backward	172
Figura 126: Diagrama esquemático das usinas hidroelétricas do SIN 2008-2012	174
Figura 127: Representação dos subsistemas equivalentes	175
Figura 128: Convergência – Última Iteração	178
Figura 129: Convergência – Última Iteração – Variação Amostra – FEV/07	179
Figura 130: Trajetória Convergência – Variação Amostra – Opção Atual – FEV/07	180
Figura 131: Trajetória Convergência – Variação Amostra – Opção 4 – FEV/07	181
Figura 132: Convergência – Última Iteração – Variação Amostra – Com Reamostragem - FEV/07	182
Figura 133: CMO – Variação Amostra – Com Reamostragem - FEV/07	182
Figura 134: COPER – Variação Amostra – Com Reamostragem - FEV/07	183
Figura 135: Risco – Variação Amostra – Com Reamostragem - FEV/07	183
Figura 136: EENS – Variação Amostra – Com Reamostragem - FEV/07	183
Figura 137: Convergência – Última Iteração – Variação Backward – Com Reamostragem - FEV/07	184
Figura 138: COPER – Variação Backward – Com Reamostragem - FEV/07	185
Figura 139: CMO – Variação Backward – Com Reamostragem - FEV/07	185
Figura 140: Risco – Variação Backward – Com Reamostragem - FEV/07	185
Figura 141: EENS – Variação Backward – Com Reamostragem - FEV/07	186
Figura 142: Convergência – Última Iteração – Variação Forward – Com Reamostragem - FEV/07	187
Figura 143: Resultados – Variação Forward – Com Reamostragem - FEV/07	187
Figura 144: Convergência – Última Iteração – Variação Forward & Amostra – Opção Atual - FEV/07	188
Figura 145: Resultados – Variação Forward & Amostra – Opção Atual - FEV/07	188
Figura 146: Convergência – Última Iteração – Variação Forward & Amostra – Opção 0 - FEV/07	189
Figura 147: Resultados – Variação Forward & Amostra – Opção 0 - FEV/07	189
Figura 148: Convergência – Última Iteração –	

Variação Forward & Amostra – Opção 4 - FEV/07	190
Figura 149: Resultados – Variação Forward & Amostra – Opção 4 - FEV/07	190
Figura 150: Convergência – Última Iteração – Variação Forward & Amostra – Opção 4 - FEV/07	191
Figura 151: COPER – Variação Tamanho da Amostra - FEV/07	192
Figura 152: CMO – Variação Tamanho da Amostra - FEV/07	192
Figura 153: Risco – Variação Tamanho da Amostra - FEV/07	193
Figura 154: EENS – Variação Tamanho da Amostra - FEV/07	193
Figura 155: Convergência – Última Iteração – Variação Método de Amostragem - FEV/07	194
Figura 156: Resultados- Variação Método de Amostragem - FEV/07	195
Figura 157: Convergência – Última Iteração – Variação Método de Amostragem e Backward - FEV/07	196
Figura 158: Resultados- Variação Método de Amostragem e Backward - FEV/07	196
Figura 159: Convergência – Última Iteração – Variação Método de Amostragem e Forward - FEV/07	197
Figura 160: Resultados- Variação Método de Amostragem e Forward - FEV/07	197
Figura 161: Opções com combinação de LHC com agregação	198
Figura 162: Convergência – Última Iteração – Variação Amostra – Combinação LHC e Agregação - FEV/07	199
Figura 163: CMO - Variação Amostra – Combinação LHC e Agregação - FEV/07	199
Figura 164: COPER - Variação Amostra – Combinação LHC e Agregação - FEV/07	200
Figura 165: Risco - Variação Amostra – Combinação LHC e Agregação - FEV/07	200
Figura 166: EENS - Variação Amostra – Combinação LHC e Agregação - FEV/07	200
Figura 167: Convergência – Última Iteração – Variação Forward – Combinação LHC e Agregação - FEV/07	201
Figura 168: Resultados - Variação Forward – Combinação LHC e Agregação - FEV/07	202
Figura 169: Convergência – Última Iteração – Variação Backward – Combinação LHC e Agregação - FEV/07	202

Figura 170: Resultados - Variação Backward – Combinação LHC e Agregação - FEV/07	203
Figura 171: Resultados 45ª iteração – Opção Atual	206
Figura 172: Resultados 45ª iteração – Opção 0	207
Figura 173: Resultados 45ª iteração – Opção 4	209
Figura 174: Resultados 45ª iteração – Opção 0 com reamostragem	210
Figura 175: Resultados 45ª iteração – Opção 4 com reamostragem	212
Figura 176: Esquema de relacionamento entre os módulos do programa NEWAVE	228
Figura 177: Cálculo da Função de Custo Futuro através da Programação Dinâmica	234
Figura 178: Média Cenários Forward – Sul	242
Figura 179: Média Cenários Forward – Nordeste	244
Figura 180: Média Cenários Forward – Norte	245
Figura 181: Desvio-Padrão Cenários Forward – Sul	247
Figura 182: Desvio-Padrão Cenários Forward – Nordeste	248
Figura 183: Desvio-Padrão Cenários Forward – Norte	249
Figura 184: Média Cenários Backward – Sul	251
Figura 185: Média Cenários Backward – Nordeste	253
Figura 186: Média Cenários Backward – Norte	254
Figura 187: Estatística t Média e Desvio-Padrão – Cenários Backward – Sul	256
Figura 188: Estatística t Média e Desvio-Padrão – Cenários Backward - Nordeste	258
Figura 189: Estatística t Média e Desvio-Padrão – Cenários Backward - Norte	259
Figura 190: Correlação Cruzada Cenários Backward – Sudeste x Nordeste	261
Figura 191: Correlação Cruzada Cenários Backward – Sudeste x Norte	263
Figura 192: Correlação Cruzada Cenários Backward – Sul x Nordeste	264
Figura 193: Correlação Cruzada Cenários Backward –Sul x Norte	266
Figura 194: Correlação Cruzada Cenários Backward – Nordeste x Norte	268
Figura 195: Resultados– Variação Backward - PMO Mai/04	269
Figura 196: Resultados– Variação Backward - PMO Set/04	270
Figura 197: Resultados– Variação Backward - PMO Set/09	270
Figura 198: Resultados– Variação Backward - PMO Jun/06	271
Figura 199: Resultados– Variação Backward - PMO Jul/06	272

Figura 200:Resultados– Variação :Backward - PMO Jan/07	272
Figura 201:Resultados– Variação Backward - PMO Fev/07	273
Figura 202:Resultados– Variação Backward - PMO Mai/07	273
Figura 203:Resultados– Variação Backward - PMO Jul/07	274
Figura 204:Resultados– Variação Backward - PMO Ago/07	275
Figura 205:Resultados– Variação Backward - PMO Jan/08	275
Figura 206:Resultados– Variação Forward - PMO Mai/04	276
Figura 207:Resultados– Variação Forward - PMO Set/04	276
Figura 208:Resultados– Variação Forward - PMO Set/09	277
Figura 209:Resultados– Variação Forward - PMO Jun/06	278
Figura 210:Resultados– Variação Forward - PMO Jul/06	278
Figura 211:Resultados– Variação Forward - PMO Jan/07	279
Figura 212:Resultados– Variação Forward - PMO Fev/07	279
Figura 213:Resultados– Variação Forward - PMO Mai/07	280
Figura 214:Resultados– Variação Forward - PMO Jul/07	281
Figura 215:Resultados– Variação Forward - PMO Ago/07	281
Figura 216:Resultados– Variação Forward - PMO Jan/08	282
Figura 217:Resultados– Variação Semente – Opção 4 - PMO Set/05	282
Figura 218:Resultados– Variação Semente – PMO Set/04	283
Figura 219:Resultados– Variação Semente – PMO Jul/07	284
Figura 220:Resultados– Variação Semente – PMO Jan/08	284
Figura 221:Resultados– Variação Amostra & Semente – Opção 4 - PMO Jan/08	285
Figura 222:Resultados– Variação Forward & Semente – Opção 4 - PMO Set/04	285
Figura 223:Resultados– Variação Forward & Semente – Opção 4 - PMO Jul/07	286
Figura 224:Resultados– Variação Forward & Semente – Opção 4 - PMO Jan/08	287
Figura 225:Resultados– Variação Forward & Amostra – Opção 4 - PMO Jul/07	287
Figura 226:Resultados– Variação Forward & Amostra – Opção 4 - PMO Jan/08	288
Figura 227:Resultados– Variação Semente – Opção 4 & Variantes - PMO Set/04	288
Figura 228:Resultados– Variação Amostra –	

Opção 4 & Variantes - PMO Jan/08	289
Figura 229:Resultados– Variação Backward – Opção 4 & Variantes - PMO Set/04	290
Figura 230:Resultados– Variação Backward – Opção 4 & Variantes - PMO Jul/06	290
Figura 231:Resultados– Variação Backward – Opção 4 & Variantes - PMO Jan/08	291
Figura 232:Resultados– Variação Forward – Opção 4 & Variantes - PMO Set/04	291
Figura 233:Resultados– Variação Forward – Opção 4 & Variantes - PMO Jul/06	292
Figura 234:Resultados– Variação Forward – Opção 4 & Variantes - PMO Jan/08	293

Lista de tabelas

Tabela 1: Valores Padrão para IC 95%	73
Tabela 2: Correlação Cruzada Média Cenários Forward	143
Tabela 3: Análise das Seqüências Negativas – Opção Atual	144
Tabela 4: Teste de Máximos – Opção Atual	145
Tabela 5: Análise das Seqüências Negativas – Opção 0	146
Tabela 6: Análise das Seqüências Negativas – Opções 1 e 1AAS	146
Tabela 7: Análise das Seqüências Negativas – Opções 2, 3 e 4	146
Tabela 8: Teste de Máximos – Opção 0	146
Tabela 9: Teste de Máximos – Opções 1 e 1AAS	147
Tabela 10: Teste de Máximos – Opções 2, 3 e 4	147
Tabela 11: Correlação Cruzada Média Cenários Backward - Não Condicionado	170
Tabela 12: Número de iterações para convergência	177
Tabela 13: Número de iterações para convergência (cont.)	177

Lista de siglas e abreviaturas

AD – amostragem descritiva
AAS – amostragem aleatória simples
CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
Cepel – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CMO – custo marginal de operação
COPER – valor esperado do custo total de operação para a simulação final
EENS - valor esperado da energia não suprida
ENA – energia natural afluyente
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
FCF – função de custo futuro
FCI – função de custo imediato
LHC – hipercubo latino (sigla em inglês)
MME – Ministério de Minas e Energia
NLEQ – número de cenários backward (aberturas)
NSIM – número de cenários forward
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAR(p) – modelo autorregressivo periódico de ordem p (sigla em inglês)
PDD – programação dinâmica determinística
PDDE – programação dinâmica dual estocástica (em inglês SDDP)
PDE – programação dinâmica estocástica
PMO – programa mensal de operação
SIN – sistema interligado nacional
ZINF - limite inferior do valor esperado do custo total de operação
ZSUP – limite superior do valor esperado do custo total de operação