



Lúcio de Medeiros

Previsão do Preço Spot no Mercado de Energia Elétrica

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

Rio de Janeiro, Abril de 2003



Lúcio de Medeiros

Previsão do Preço Spot no Mercado de Energia Elétrica

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

Reinaldo Castro Souza
Orientador
DEE/PUC-Rio

Ricardo Tanscheit
DEE/PUC-Rio

Marcos Azevedo da Silveira
DEE/PUC-Rio

Mônica Barros
DEE/PUC-Rio

Flávio Joaquim de Souza
UERJ

Plutarcho M. Loureço
CEPEL

Paulo Roberto de Holanda Sales
IME-UERJ e Eletrobrás

Marley M. B. R. Vellasco
Coordenadora Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de Abril de 2003

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

Lúcio de Medeiros

Nascido em Três Rios-RJ em 1971. Graduiu-se em Engenharia Elétrica (1995) pela Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF. Especialista em Métodos Estatísticos Computacionais (1996), pela mesma instituição. Mestre em Eng. Elétrica em Teoria de Controle e Estatística (1999) pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio. Suas pesquisas de interesse incluem as áreas de previsão; controle; e sistemas inteligentes aplicados à previsão do preço e da carga elétrica.

Ficha Catalográfica

Medeiros, Lúcio de

Previsão do preço spot no mercado de energia elétrica / Lúcio de Medeiros; orientador: Reinaldo Castro Souza. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

[12], 132 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Mercado de eletricidade. 3. Formação do preço spot. 4. Análise de risco. 5. Modelos de previsão. 6. Sistemas neuro-fuzzy. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Reinaldo Castro Souza, pela indicação do objeto da tese, pelo estímulo e incentivo constantes na realização desta tese.

Ao meu co-orientador Prof. Derek W. Bunn, pelo inestimável apoio, incentivo e contribuição, fundamentais para a conclusão desta tese.

Aos amigos que deixei em Londres e mundo afora. Sou especialmente grato a James W. Taylor, Richard Curry, Fernando Oliveira, Esther Welch, Paul Ellis e Dicon Monfort da London Business School. Também são caros para mim Peter Brown e todos os amigos do Netherhall House.

Ao Prof. Paulo Roberto de Holanda Sales, pela experiente e segura contribuição nas análises do preço spot e ao Prof. Flávio Joaquim de Souza, pelo seu importante apoio e sugestões nos sistemas Neuro-Fuzzy.

Ao CEPEL e a Eletrobrás, pelo apoio a esta tese, em especial de Roberto Caldas, Luiz Guilherme Marzano, Débora Jardim, José Francisco e Plutarcho Lourenço.

A todos os colegas e ex-colegas da PUC-Rio, pela amizade, especialmente a Luiz F. Amaral, Flávia e Márcio Lessa, Ana Paula Sobral, Mayte Fariñas e André Cunha. Também aos meus professores, pela excelente formação e aos funcionários, pela paciência dispensada.

À banca, pela excelente contribuição, com críticas e sugestões ao texto.

Ao CNPq, pelas bolsas do doutorado e doutorado *sandwich*, sem as quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

A toda minha família, pelo suporte e incentivo durante toda a minha formação.

À Flávia, pelo apoio nos momentos mais difíceis dessa longa trajetória.

Resumo

Medeiros, L. **Previsão do preço spot no mercado de energia elétrica.** Rio de Janeiro, 2003. 144p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio.

O objetivo da tese é propor uma metodologia para previsão do preço de curto prazo (spot) da energia elétrica no Brasil baseada em sistemas neuro-fuzzy e nos programas do planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro. Com essa abordagem, obtém-se distribuições estimadas do preço spot para o curto prazo com menor dispersão do que as obtidas somente com os programas do planejamento da operação. Além disso, por ser rápido, o sistema de previsão final possibilita análises de cenários ou simulações Monte Carlo.

As principais variáveis que afetam o preço spot no Brasil são consideradas, tais como a energia natural afluyente e a energia armazenada, entre outras. Ainda, é possível incluir também variáveis que não têm um histórico definido ou dados suficientes para o treinamento, tais como o plano de obras, limites de intercâmbio, demanda etc. Comparações com modelos de redes neurais são feitas.

Apresenta-se, também, o estado da arte em modelagem para a política e o mercado de energia elétrica e os principais conceitos de gerenciamento de risco no mercado de eletricidade.

Palavras-chave

Mercado de Eletricidade; Formação do Preço Spot; Análise de Risco; Modelos de Previsão; Sistemas Neuro-Fuzzy.

Abstract

Medeiros, L. **Spot price forecasting in the electricity market**. Rio de Janeiro, 2003. 144p. DSc. Thesis – Electrical Engineering Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, PUC-Rio.

This thesis focuses on spot price forecasting and risk management in the Brazilian electricity industry. It is proposed a new methodology for the problem based on neuro-fuzzy systems and the dispatching and planning operation programs. The main advantage of the approach is to be able to get more informative spot price distributions than using the operation and planning programs alone. Furthermore, it allows Monte Carlo simulations or scenarios analysis as the forecasting system runs in less than 1 minute.

The main variables which affect the spot price (inflow river, storage capacity of reservoir, among others) are included in the model. Even variables such as the interchange limits, without a well-defined time series and which could be important, could also be included because of the intrinsic characteristics of each fuzzy model. Comparisons with neural networks models are made.

It is also presented the state-of-the-art in the market and politics modelling for the electricity market around the world, as well as some main concepts of the risk management.

Keywords

Electricity Market; Spot Price Formation; Risk Analysis; Forecasting Models; Neuro-Fuzzy Systems.

Sumário

1 Introdução	13
1.1. Motivação	13
1.2. Objetivo	18
1.3. Hipóteses	19
1.4. Validade dos Resultados	20
1.5. Organização da Tese	20
2 Mercados de Eletricidade	22
2.1. Introdução	22
2.2. Novo Paradigma do Setor Elétrico	23
2.3. Processo de Liberalização do Setor Elétrico	24
2.3.1. Breve Histórico	24
2.3.2. A Experiência Brasileira	26
2.4. Tipos de Mercado de Eletricidade	29
2.5. Modelos Teóricos de Mercados	30
2.5.1. Classificações Usuais	30
2.5.2. Correntes Mercadológicas	32
2.6. Modelagem e Simulação da Política e do Mercado	34
3 Formação do Preço da Energia Elétrica	39
3.1. Introdução	39
3.2. Sistema Elétrico Brasileiro	40
3.3. Planejamento da Operação em Sistemas Térmicos	41
3.3.1. Preço Spot em Sistemas Térmicos	43
3.4. Planejamento da Operação em Sistemas Hidrotérmicos	44
3.4.1. As Funções de Custo Futuro e Imediato	45
3.4.2. Planejamento a Médio Prazo	46

3.4.2.1. Programação Dinâmica Estocástica - PDE	49
3.4.2.2. Programação Dinâmica Dual Estocástica - PDDE	51
3.4.3. Planejamento a Curto Prazo	54
3.4.4. Preço Spot em Sistemas Hidrotérmicos	58
3.5. Cadeia de Modelos do Planejamento da Operação	59
4 Análise de Risco no Mercado de Energia Elétrica	64
4.1. Introdução	64
4.2. Volatilidade do Preço Spot no Brasil	65
4.3. Riscos Hidrológicos	68
4.4. Riscos Financeiros	70
4.5. Contratos como Instrumentos de Proteção	72
4.6. Medidas de Risco	74
5 Previsão do Preço Spot de Energia Elétrica	78
5.1. Introdução	78
5.2. Estado da Arte em Previsão do Preço Spot	79
5.3. Metodologia Proposta	85
5.4. Modelo de Previsão do Preço Spot	90
5.5. Inferência Fuzzy para a Previsão do Preço Spot	94
5.6. ANFIS: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System	96
5.6.1. Descrição e Restrições	96
5.6.2. Arquitetura	97
6 Estudo de Casos	101
6.1. Introdução	101
6.2. Análise dos Valores Esperados do CMO Obtidos do Newave	103
6.3. Aplicação da Metodologia Passo-a-Passo	108
6.3.1. Escolha das Variáveis	108
6.3.1.1. Definição das Faixas de Variação	110
6.3.1.2. Estimção dos Parâmetros: Treinamento	111
6.3.1.3. Simulação e Previsão	115
6.4. Estudos Comparativos	117

7 Conclusão	126
7.1.1. Considerações Finais	126
7.1.2. Trabalhos Futuros	129
Bibliografia	130

Lista de figuras

Figura 1. Estratégia de lances via modelos dinâmicos	36
Figura 2. Estratégia de lances (curto e longo prazos)	37
Figura 3. Funções de custo imediato, futuro e total	45
Figura 4. Balanço hídrico	48
Figura 5. Evolução do armazenamento ao longo do período de planejamento	49
Figura 6. Função de custo futuro obtida da PDDE	53
Figura 7. Etapas do planejamento da operação	58
Figura 8. Newave: principais entradas e saídas	60
Figura 9. Relacionamento dos modelos Newave e Decomp	61
Figura 10. Cadeia de modelos para o planejamento da expansão e da operação	63
Figura 11. Custo marginal de operação nos quatro subsistemas	66
Figura 12. Variação percentual do CMO em relação ao mês anterior	67
Figura 13. Histograma da série histórica do CMO do sudeste (R\$/MWh)	68
Figura 14. Energia natural afluyente: série histórica (SE/CO) de jan/96 a ago/01	69
Figura 15. Energia armazenada: série histórica (SE/CO) de jan/96 a ago/01	69
Figura 16. Histogramas das séries históricas de (a) ENA e (b) EARM	70
Figura 17. Conseqüências em uma estratégia de contratação (distribuidora)	71
Figura 18. Curva das carteiras eficientes	76
Figura 19. Esquema geral para a previsão do preço spot	85
Figura 20. CMO médio a partir de simulação histórica (SE-CO, em fev/02)	88
Figura 21. CMO médio a partir de simulação sintética (SE-CO, fev/02)	89
Figura 22. Dados simulados pelo Newave de ENA, EARM e CMO	90
Figura 23. Modelo de previsão do preço spot via SNF	91
Figura 24. Modelo proposto para o treinamento	92
Figura 25. Modelo previsor via SNF de um a seis passos à frente	93
Figura 26. Modelo de redes neurais para a previsão do preço spot	93
Figura 27. Modelo fuzzy Sugeno (a) e Arquitetura ANFIS equivalente (b)	97
Figura 28. Arquitetura ANFIS para (a) modelo Sugeno e (b) espaço de entrada	100
Figura 29. Valores médios de CMO de casos oficiais do Newave em 2001	104

Figura 30. D.P. do CMO de casos oficiais do Newave em 2001	105
Figura 31. Estimativas de preço do Newave com intervalos (perc. 5% e 95%)	108
Figura 32. Histograma da (a) ENA e (b) EARM para T+1=Maio/02 (Newave)	109
Figura 33. Histograma do CMO para T+1=Maio/02 (Newave)	110
Figura 34. Funções de pertinência iniciais das entradas do modelo	112
Figura 35. Resultados do ajuste do modelo (a) estimação e (b) validação	113
Figura 36. CDF do Preço estimado via SNF e Newave	114
Figura 37. Relação entre o preço spot e (a) variáveis (b) ENA (c) EARM	115
Figura 38. Histograma do preço spot estimado para T+1=Mai/02	116
Figura 39. Comparação entre as previsões pontuais e os valores reais	118
Figura 40. Comparações entre os modelos para diversos meses-à-frente	120
Figura 41. Estimativas de preço via SNF com intervalos (perc. 5% e 95%)	122
Figura 42. Estimativas de preço via RNA com intervalos (perc. 5% e 95%)	124

Lista de tabelas

Tabela 1. Modelos estruturais de Hunt & Shuttleworth	31
Tabela 2. Consumo e capacidade instalada dos subsistemas	41
Tabela 3. Estatísticas descritivas do CMO por subsistema (ago/95 a jul/01)	67
Tabela 4. Estatísticas descritivas da ENA e EARM (jan/96 a dez/01)	70
Tabela 5. Estatísticas das estimativas do preço do Newave (2.000 cenários)	107
Tabela 6. Parâmetros do modelo neuro-fuzzy ANFIS	111
Tabela 7. Regras fuzzy e equações finais de saída para maio de 2002	113
Tabela 8. Resultados do ajuste do SNF em T=Abril/2002 para Maio/2002	114
Tabela 9. MAPE das previsões pontuais seis meses-à-frente	118
Tabela 10. Faixas de variação das variáveis CMO, ENA e EARM	119
Tabela 11. Estatísticas das previsões do preço spot com SNF (9.261 cenários)	123
Tabela 12. Estatísticas das previsões do preço spot com RNA (9.261 cenários)	125