



**André Resende Guimarães**

**Estratégia de Contratação das Distribuidoras  
em Leilões de Energia sob Incerteza  
na Demanda**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Professor Orientador:

Reinaldo Castro Souza, D. Sc.

Rio de Janeiro  
Abril de 2006



**André Resende Guimarães**

**Estratégia de Contratação das Distribuidoras  
em Leilões de Energia sob Incerteza  
na Demanda**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre 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. Mônica Barros**

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Dr. Leonardo Lima Gomes**  
FUCAPE

**Dr. Sergio Granville**  
PSR Consultoria Ltda

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 04 de abril de 2006

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

**André Resende Guimarães**

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Apoio à Decisão na PUC-RJ em 2003. Participou de intercâmbio internacional durante um ano no Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, França. Foi monitor no departamento de Matemática e bolsista de iniciação científica na PUC-Rio e estagiário no setor de macroeconomia do Banco BBM. Participou de estudos e projetos na PSR Consultoria, ligados à previsão de demanda, expansão da oferta e regulação.

Ficha Catalográfica

Guimarães, André Resende

Estratégia de contratação das distribuidoras em leilões de energia sob incerteza na demanda / André Resende Guimarães ; orientador: Reinaldo Castro Souza. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

124 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Leilão de energia. 3. Decisão sob incerteza. 4. Otimização estocástica. 5. Árvore de decisão. 6. Previsão de demanda. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha mãe, Wanderlane.  
Ao meu pai, Nelson.  
Ao meu irmão, Fernando.

## **Agradecimentos**

À minha família, pela compreensão e incentivo durante todos os momentos.

À Luciana, por todo apoio, estímulo, carinho e companhia.

Ao amigo Mário Veiga Ferraz Pereira, pela indispensável orientação em todas as etapas do desenvolvimento.

Ao amigo Luiz Augusto Barroso, pela incansável ajuda durante toda a realização deste trabalho.

Ao professor Reinaldo Castro, pelas excelentes aulas e oportunidade de realização deste trabalho.

A todos os meus amigos, pelo incentivo e ajuda, ainda que indireta, para a realização deste trabalho.

A Capes, FAPERJ e PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

## Resumo

Guimarães, André Resende. **Estratégia de contratação das distribuidoras sob incerteza na demanda em leilões de energia**. Rio de Janeiro, 2006, 124 p. Tese de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo desta dissertação de mestrado é analisar o novo marco regulatório do setor elétrico brasileiro e seus impactos para as empresas distribuidoras de energia. Para isto, foi desenvolvida uma ferramenta computacional para elaborar estratégias de atuação das distribuidoras nos leilões de compra de energia instituídos pela nova regulamentação. Desta forma, é possível simular o processo de contratação das distribuidoras no âmbito do ACR e, com os resultados, realizar análises do impacto das novas regras na alocação dos riscos as distribuidoras. O problema consiste, em um ambiente de incerteza da demanda e dado um conjunto de instrumentos de risco, determinar a estratégia de contratação das distribuidoras, fornecendo o montante de energia a ser comprado em cada leilão anteriormente descrito e resultado da melhor compra dados os contratos candidatos. A metodologia de solução é otimização estocástica multi-estágio, levando em consideração, principalmente, os diversos horizontes de contratação e preços da energia, visando minimizar uma ponderação entre tarifa para consumidor e custos para distribuidora.

## Palavras-chave

Leilão de energia, Decisão sob incerteza, Otimização estocástica, Árvore de decisão, Previsão de demanda

## **Abstract**

Guimarães, André Resende. **Contracting strategies in energy auctions for distribution companies under demand uncertainty** Rio de Janeiro, 2006, 124 p. Master Thesis – Electrical Engineering Department, Catholic University of Rio de Janeiro.

The objective of this work is to analyze the new regulatory framework of the Brazilian electric sector. In this sense, it was developed a computational tool in order to elaborate strategies for the distribution companies (DISCOs) in the energy auctions instituted by the new regulation. The computational tool was used to simulate the contracts acquisition process by the DISCOs and the results were analyzed to measure impact of new rules' and risks' allocation for the distribution companies. The problem consists, considering the demand uncertainty and the available risk management instruments, in determining the contracting strategy of the DISCOs, i.e., the amount of energy to be bought in each auction that results from the best purchase given the candidate contracts. The solution methodology is based on a multi-stage stochastic optimization algorithm, minimizing the tariff for consumer and costs for DISCO, taking into account different prices and horizons of the energy contracts.

## **Keywords**

Energy auction, Decision under uncertainty, Stochastic optimization, Decision tree, Demand forecast

# Sumário

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <u>1</u> | <u>INTRODUÇÃO</u>  | <u>15</u> |
| 1.1      | O PROCESSO DE REFORMA NO SETOR ELÉTRICO DURANTE A DÉCADA DE 90 | 15        |
| 1.2      | O QUE DEU ERRADO?  | 16        |
| 1.3      | REFORMA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO                           | 17        |
| 1.4      | SEGURANÇA DE SUPRIMENTO  | 17        |
| 1.5      | MODICIDADE TARIFÁRIA   | 19        |
| 1.6      | RESUMO   | 21        |
| 1.7      | OBJETIVO DA TESE   | 21        |
| 1.8      | ORGANIZAÇÃO DA TESE  | 22        |
| <u>2</u> | <u>DESCRIÇÃO DA REGULAMENTAÇÃO BRASILEIRA</u>                  | <u>24</u> |
| 2.1      | INTRODUÇÃO   | 24        |
| 2.2      | CONTRATAÇÃO DE ENERGIA PELAS DISTRIBUIDORAS                    | 24        |
| 2.3      | LEILÕES DE ENERGIA   | 25        |
| 2.4      | REDUÇÃO DOS CONTRATOS DE ENERGIA EXISTENTE                     | 27        |
| 2.5      | REGRAS PARA CONTRATAÇÃO EFICIENTE                              | 27        |
| <u>3</u> | <u>DECISÃO SOB INCERTEZA</u>                                   | <u>32</u> |
| 3.1      | INTRODUÇÃO   | 32        |
| 3.2      | EXEMPLO  | 33        |
| 3.3      | CONCLUSÃO  | 38        |
| <u>4</u> | <u>MODELAGEM EM ÁRVORE</u>                                     | <u>39</u> |
| 4.1      | INTRODUÇÃO   | 39        |
| 4.2      | ESTRUTURA DA ÁRVORE  | 39        |
| 4.3      | PROBABILIDADE  | 40        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 4.4       | FORMULAÇÃO MATEMÁTICA                                 | 41        |
| <u>5</u>  | <u>MODELO COMPUTACIONAL</u>                           | <u>45</u> |
| 5.1       | INTRODUÇÃO  | 45        |
| 5.2       | ARQUITETURA   | 45        |
| 5.3       | IMPLEMENTAÇÃO DAS REGRAS                              | 46        |
| 5.4       | PENALIDADES   | 48        |
| 5.5       | FUNÇÃO OBJETIVO                                       | 49        |
| 5.6       | DADOS DE ENTRADA                                      | 50        |
| <u>6</u>  | <u>ESTUDO DE CASO: DESCRIÇÃO</u>                      | <u>52</u> |
| 6.1       | INTRODUÇÃO  | 52        |
| 6.2       | PREMISSAS BÁSICAS                                     | 53        |
| 6.3       | CASOS ANALISADOS                                      | 59        |
| <u>7</u>  | <u>ESTUDO DE CASO: RESULTADOS</u>                     | <u>62</u> |
| 7.1       | INTRODUÇÃO  | 62        |
| 7.2       | RESULTADOS PARA LEILÃO EE1                            | 63        |
| 7.3       | RESULTADOS PARA LEILÃO EE2                            | 71        |
| 7.4       | RESULTADOS PARA LEILÃO EN                             | 77        |
| <u>8</u>  | <u>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</u>          | <u>85</u> |
| 8.1       | CONCLUSÕES  | 85        |
| 8.2       | TRABALHOS FUTUROS                                     | 87        |
| <u>9</u>  | <u>REFERÊNCIAS</u>                                    | <u>90</u> |
| <u>10</u> | <u>ANEXO A - DETALHAMENTO DA METODOLOGIA PROPOSTA</u> | <u>93</u> |
| 10.1      | MATRIZES AUXILIARES                                   | 93        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 10.2      | DEFINIÇÃO: CONTRATADO X CONTRATAR                              | 94         |
| 10.3      | RESTRICÇÕES DA DEMANDA   | 95         |
| 10.4      | RESTRICÇÃO DE OFERTA EXISTENTE                                 | 96         |
| 10.5      | RESTRICÇÕES DE REDUÇÃO DE CONTRATO                             | 97         |
| 10.6      | RESTRICÇÃO DE CONTRATAÇÃO MÁXIMA PARA AJUSTE                   | 97         |
| 10.7      | RESTRICÇÃO DE CONTRATAÇÃO MÁXIMA PARA A-3                      | 98         |
| 10.8      | RESTRICÇÃO DE CONTRATAÇÃO MÁXIMA PARA A-1                      | 98         |
| 10.9      | DEFINIÇÃO DE CUSTOS  | 99         |
| 10.10     | MÉDIA PONDERADA DOS CUSTOS                                     | 101        |
| 10.11     | OBJETIVO   | 101        |
| <b>11</b> | <b><u>ANEXO B - CENÁRIO DE MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA</u></b> | <b>102</b> |
| 11.1      | PREMISSAS ECONÔMICAS E POPULACIONAIS                           | 102        |
| 11.2      | MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA – HISTÓRICO 1985/2004              | 104        |
| 11.3      | METODOLOGIA PARA PROJEÇÕES DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA      | 116        |

## Lista de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 3-1 – Previsões de mercado do Brasil com horizonte de cinco anos                         | 33 |
| Figura 3-2 – Custos dos planos fixos para cada cenário e valor esperado (MMR\$)                 | 35 |
| Figura 3-3 – Cenários de demanda  | 36 |
| Figura 3-4 – Árvore de decisão associada  | 37 |
| Figura 3-5 – Custos dos planos fixos e da estratégia para cada cenário e valor esperado (MMR\$) | 38 |
| Figura 4-1 – Taxas de crescimento   | 40 |
| Figura 4-2 – Árvore de expansão da demanda  | 40 |
| Figura 4-3 – Matriz de transição de probabilidade   | 41 |
| Figura 4-4 – Exemplo de compra no leilão de A-1   | 43 |
| Figura 4-5 – Esquema de contratação para determinado ano  | 43 |
| Figura 7-1 – Resumo do estudo realizado   | 63 |
| Figura 7-2 – Resultado das contratações para Leilão EE1   | 64 |
| Figura 7-3 – Resultado Sub-Contratação Média para Leilão EE1                                    | 65 |
| Figura 7-4 – Curva de permanência de Sub-Contratação em 2010 para Leilão EE1                    | 66 |
| Figura 7-5 – Resultado Sobre-Contratação Média para Leilão EE1                                  | 67 |
| Figura 7-6 – Curva de permanência de Sobre-Contratação em 2010 para Leilão EE1                  | 68 |
| Figura 7-7 – Penalidades Sub e Sobre-contratação para Leilão EE1                                | 69 |
| Figura 7-8 – Demanda Realizada e Simulação para Leilão EE1                                      | 70 |
| Figura 7-9 – Resultado das contratações para Leilão EE2   | 71 |
| Figura 7-10 – Resultado Sub-Contratação Média para Leilão EE2                                   | 72 |
| Figura 7-11 – Curva de permanência de Sub-Contratação em 2010 para Leilão EE2                   | 73 |
| Figura 7-12 – Resultado Sobre-Contratação Média para Leilão EE2                                 | 74 |
| Figura 7-13 – Curva de permanência de Sobre-Contratação em 2010 para Leilão EE2                 | 75 |
| Figura 7-14 – Penalidades Sub e Sobre-contratação para Leilão EE2                               | 76 |
| Figura 7-15 – Demanda Realizada e Simulação para Leilão EE2                                     | 77 |
| Figura 7-16 – Resultado das contratações para Leilão EN   | 78 |
| Figura 7-17 – Resultado Sub-Contratação Média para Leilão EN                                    | 79 |
| Figura 7-18 – Curva de permanência de Sub-Contratação em 2011 para Leilão EN                    | 80 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 7-19 – Resultado Sobre-Contratação Média para Leilão EN                  | 81  |
| Figura 7-20 – Curva de permanência de Sobre-Contratação em 2011 para Leilão EN  | 82  |
| Figura 7-21 – Penalidades Sub e Sobre-contratação para Leilão EN                | 83  |
| Figura 7-22 – Demanda Realizada e Simulação para Leilão EN                      | 84  |
| Figura 10-1 – Árvore, nós de decisão e cenários de demanda.                     | 93  |
| Figura 10-2 – Matriz <i>caminhos</i>  | 94  |
| Figura 11-1 – Evolução do Consumo Total por Região                              | 107 |
| Figura 11-2 – Relação Número de Consumidores Residenciais sobre População Total | 117 |
| Figura 11-3 – Relação Consumo Comercial/Consumo Residencial                     | 122 |
| Figura 11-4 – Relação entre o Consumo de Outras Classes e o Consumo Residencial | 123 |
| Figura 11-5 – Metodologia para previsão de demanda                              | 124 |

## Lista de tabelas

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 6-1 - Preços de contrato para os leilões A <sub>5</sub> , A <sub>3</sub> , A <sub>1</sub> , Ajuste e VR (R\$/MWh):  | 53  |
| Tabela 6-2 - Cenários de Preço de Liquidação de Diferenças (PLD) (R\$/MWh):  | 53  |
| Tabela 6-3 – Preço de contratos do primeiro leilão de energia existente (R\$/MWh):   | 54  |
| Tabela 6-4 - Montante de contratos existentes da distribuidora (GWmed):  | 54  |
| Tabela 6-5 – Cenário de referência do crescimento da demanda do Brasil:  | 54  |
| Tabela 6-6 – Participação das distribuidoras no consumo de energia do país:  | 54  |
| Tabela 6-7 – Taxas de crescimento da demanda das distribuidoras:   | 55  |
| Tabela 6-8 - Preços de contrato para os leilões A <sub>5</sub> , A <sub>3</sub> , A <sub>1</sub> , Ajuste e VR (R\$/MWh):  | 55  |
| Tabela 6-9 - Cenários de Preço de Liquidação de Diferenças (PLD) (R\$/MWh):  | 55  |
| Tabela 6-10 - Preço de contratos do segundo leilão energia existente (R\$/MWh):  | 55  |
| Tabela 6-11 - Montante de contratos existentes da distribuidora (GWmed):   | 55  |
| Tabela 6-12 – Cenário de referência do crescimento da demanda do Brasil:   | 56  |
| Tabela 6-13 – Participação das distribuidoras no consumo de energia do país:   | 56  |
| Tabela 6-14 – Taxas de crescimento da demanda das distribuidoras:  | 56  |
| Tabela 6-15 - Preços de contrato para os leilões A <sub>5</sub> , A <sub>3</sub> , A <sub>1</sub> , Ajuste e VR (R\$/MWh): | 57  |
| Tabela 6-16 - Cenários de Preço de Liquidação de Diferenças (PLD) (R\$/MWh):   | 57  |
| Tabela 6-17 - Preço de contratos do leilão de energia nova (R\$/MWh):  | 57  |
| Tabela 6-18 - Montante de contratos existentes da distribuidora (GWmed):   | 57  |
| Tabela 6-19 – Cenário de referência do crescimento da demanda do Brasil:   | 58  |
| Tabela 6-20 – Participação das distribuidoras no consumo de energia do país:   | 58  |
| Tabela 6-21 – Taxas de crescimento da demanda das distribuidoras:  | 58  |
| Tabela 6-22 – Matriz de Transição de Probabilidades (Caso A):  | 59  |
| Tabela 6-23 – Matriz de Transição de Probabilidades (Caso B):  | 60  |
| Tabela 6-24 – Matriz de Transição de Probabilidades (Caso C):  | 60  |
| Tabela 6-25 – Matriz de Transição de Probabilidades:   | 61  |
| Tabela 11-1 – Taxa de Crescimento da População (% ao ano)  | 104 |
| Tabela 11-2 – Consumo Total - Evolução 1985/2004 (GWh)   | 106 |
| Tabela 11-3 – Consumo Residencial - Evolução 1985/2004 (GWh)   | 109 |
| Tabela 11-4 – Consumidores Residenciais - Evolução 1985/2004 (mil)   | 110 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 11-5 – Consumo Médio Residencial - Evolução 1985/2004 (kWh/mês) | 111 |
| Tabela 11-6 – Consumo Industrial - Evolução 1985/2003 (GWh)            | 112 |
| Tabela 11-7 – Consumo Comercial - Evolução 1985/2004 (GWh)             | 114 |
| Tabela 11-8 – Outras Classes - Evolução 1985/2004 (GWh)                | 115 |
| Tabela 11-9 – Grandes Consumidores Industriais                         | 120 |