



**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