

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Pedro A. M-S. David**

**Formação do Preço, Atração de Investimentos e  
Gerenciamento de Risco no Mercado  
Brasileiro de Energia Elétrica**

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

Professores Orientadores:

Alvaro Veiga Filho, Docteur  
Mario Veiga Ferraz Pereira, D.Sc.  
Sergio Granville, Ph.D.

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2004



**Pedro Américo Moretz-Sohn David**

**Formação do Preço, Atração de Investimentos e  
Gerenciamento de Risco no Mercado  
Brasileiro de Energia Elétrica**

Tese de Doutorado 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.

**Dr. Álvaro de Lima Veiga Filho**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Dr. Mário Veiga Ferraz Pereira**

Co-Orientador

PSR Consultoria Ltda

**Dr. Sérgio Granville**

Co-Orientador

PSR Consultoria Ltda

**Dr. Afonso Henriques M. Santos**

UNIFEI

**Dr. Edson Luiz da Silva**

UFSC

**Dra. Mônica Barros**

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Dr. Boris Garbati Gorenstin**

FURNAS

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 06 de fevereiro de 2004

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

**Pedro A. M-S. David**

Graduou-se em Engenharia Elétrica na EE-UFRJ em 1974 e pós graduou em Engenharia Elétrica na PUC-Rio, em 1995, na área de Controle Digital e Processamento de Sinais. Possui diversos cursos de especialização em Engenharia Elétrica e Informática e participou de diversos projetos e estudos, entre os quais destacam-se o projeto do Sistema de Transmissão em Corrente Contínua de Alta Tensão (CCAT) de Itaipu; estudos pré-operativos de sistemas de alta e extra-alta tensão; estudos de viabilidade de expansão de geração e análises de risco-retorno no mercado brasileiro de energia elétrica.

Ficha Catalográfica

David, Pedro A. M-S.

Formação do preço, atração de investimentos e gerenciamento de risco no mercado brasileiro de energia elétrica / Pedro A. M-S. David; orientadores: Alvaro Veiga Filho, Mario Veiga Ferraz Pereira e Sergio Granville. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

134 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 energia elétrica. 3. Modelos de mercado e formação do preço. 4. Viabilidade de investimentos em geração. 5. Derivativos no mercado de energia elétrica. 6. Aversão ao risco. I. Veiga Filho, Alvaro. II. Pereira, Mario Veiga Ferraz. III. Granville, Sergio. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. V. Título.

CDD:621.3

Para meus pais, Décio e Arlete  
com afeto, gratidão e saudade.

Para você, Nena  
com todo amor.

## Agradecimentos

Ao meu orientador Alvaro Veiga F<sup>o</sup> pelo estímulo e apoio.

A FURNAS, ao CNPq e à PUC-Rio pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos professores que participaram da comissão julgadora.

Aos amigos Ajax R. B. Moreira e Katia Rocha do IPEA, pelo desenvolvimento das idéias, pela iluminação das dúvidas, pela motivação e pelo apoio absolutamente fundamentais.

Aos amigos e orientadores Mario Veiga Ferraz Pereira e Sergio Granville, fundamentais e cuja generosidade só rivaliza com a inteligência e conhecimento.

Aos diretores, superintendentes e gerentes de FURNAS, Celso Ferreira e Fabio Resende, Adelino Ferreira, Edmundo Pochmann e Luiz Roberto Alves Correa, Carlos Eduardo de Almeida Silva, Silvia Maria de Carvalho Celestino e Claudia de Barros Cotia, pelo apoio e incentivo; e aos meus colegas de FURNAS, em especial a Luiz Laércio S. Machado Jr., pelas discussões incentivadoras.

Aos professores da PUC-Rio, em especial aos Prof<sup>es</sup>. Reinaldo Castro, Mônica Barros, Tara Baidya, Carlos P. Samanez e Love Ekenberg (Stockholm University) e aos funcionários do DEE, em especial à Alcina; à *University of British Columbia - Faculty of Commerce*, em especial aos Prof<sup>es</sup>. William T. Ziemba e Alan D. Kraus, à secretaria da *Operations Division*, Betty Gelean e aos colegas, em especial, a Issouf Soumaré.

Aos meus amigos da PSR Consultoria, em especial à Luiz Augusto N. Barroso e Rafael Kelman; aos amigos da PUC-Rio, em especial, à Alessandro Castro e Leonardo L. Gomes; e do ONS, em especial à Alberto Kligerman e Mirtis Couto.

Às minhas irmãs, Analucia e Claudia e aos amigos Carlos Alberto da Silva Neto, Jorge Jardim, Mauro Muniz, Rita Rodrigues, Rogério Rocha e Salvatore Mantuano, pelo afeto, apoio e incentivo.

À minha esposa e companheira, Nena, pelo amor e apoio incondicionais ao longo dessa caminhada.

## Resumo

David, Pedro A. M-S.; Veiga F<sup>o</sup>, Alvaro. **Formação do Preço, Atração de Investimentos e Gerenciamento de Risco no Mercado Brasileiro de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, 2003, 134 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O mercado brasileiro de energia elétrica ainda não encontrou um modelo de mercado e de formação de preço que garanta a expansão auto-sustentada da oferta. Investigando em detalhe o modelo atual de despacho da geração e formação do preço, demonstramos a sua pouca eficácia na atração de investimentos, e identificamos a causa dessa falha como sendo a miopia do modelo de despacho, uma vez os estados críticos do sistema só aparecem de forma significativa quando o sistema já estiver degradado. São estudados três modelos alternativos que modificam a função-objetivo ou a regra de formação do preço, ajustados de modo a viabilizar e tornar suficientemente atrativos os investimentos na expansão da oferta. Finalmente, estes modelos são então comparados entre si e com o modelo atual, quanto ao valor para o investidor e quanto ao custo para o sistema e para o consumidor.

Um mercado é dito “completo” se permite aos agentes alocar livremente seus recursos e demandas quando estiverem disponíveis e/ou forem necessários e permite que os agentes condicionem estes recursos / demandas ao estado (preço) do mercado. Estas funcionalidades são implementadas através dos derivativos financeiros, negociados no “mercado futuro”. Neste trabalho fazemos uma análise conceitual do mercado futuro de energia elétrica, indicando a diferença em relação ao de outras *commodities* e apresentando um modelo da oferta e demanda por contratos futuros de energia elétrica.

## Palavras-chave

Engenharia Elétrica; Mercado de Energia Elétrica; Modelos de Mercado e Formação do Preço; Viabilidade de Investimentos em Geração; Contratos Futuros de Energia Elétrica.

## **Abstract**

David, Pedro A. M-S; Veiga F<sup>o</sup>, Alvaro (Advisor). **Spot Price Formation, Investment Attraction and Risk Management in the Brazilian Electrical Energy Market**. Rio de Janeiro, 2003, 134 p. Doctorate Thesis – Electrical Engineering Dept., Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Brazilian Market of Electrical Energy has not yet found a stable market and price model that ensues the feasibility and makes attractive a self-sustained investment for the expansion of electrical energy generation.

Researching the current generation dispatch and spot price model, we show that it is ineffective to attract investments because the model is myopic, since the range of critical system states that is foreseen at the current state is not significant until the system is already too degraded. Stemming from this conclusion, we develop three alternative models, modifying the dispatch model objective and the price formation rule. These alternative models are tuned to make the investments in generation expansion feasible and attractive. The models are compared regarding their value to the investor and the cost to the system and to the consumer.

A complete market allows the economic agents to freely allocate their resources and requirements whenever they are available and/or required. A complete market also allows conditional settlement, i.e., to condition the resource availability and/or requirement to a particular market state (price). These features are realized by financial derivatives, in the, so called, “futures market”. We present a conceptual analysis of the electrical energy’s future market, pointing the differences to other commodities’ future markets that are due to economical unfeasibility of storing electricity. We also present an “equilibrium model” for the forward electrical energy contracts.

## **Keywords**

Electrical Engineering; Electrical Energy Market; Market and Spot Price Models; Feasibility of Investments in Power Generation; Electrical Energy Forward Contracts.

## Sumário

1	Introdução	14
1.1	Resumo da História Econômica do Sistema Elétrico Brasileiro	15
1.2	Formação do Preço e Expansão da Oferta	18
1.3	Mercado Futuro de Energia Elétrica	20
1.4	Revisão Bibliográfica	21
1.5	Estrutura da Monografia	24
2	Mercado de Energia Elétrica	25
2.1	Características Econômicas da Energia Elétrica	26
2.2	Mercado Brasileiro de Energia Elétrica	34
3	Decisão sob Incerteza	41
3.1	Introdução	42
3.2	Utilidade Esperada	43
3.3	Dominância Estocástica	54
3.4	Heurísticas de Decisão sob Incerteza Absoluta	61
4	Formação do Preço e Expansão da Oferta	63
4.1	Introdução	64
4.2	Modelo de Despacho da Geração Hidrotérmica	65
4.3	Modelos Alternativos de Despacho da Geração e Formação do Preço Spot <sup>74</sup>	
4.4	Viabilidade Econômica da Expansão da Oferta	82
4.5	Estudo de Caso	86
5	Mercado Futuro de Energia Elétrica	103
5.1	Introdução	104
5.2	Mercado Futuro de <i>Commodities</i>	106
5.3	Oferta e Procura por Contratos de Energia	109
6	Conclusão	125
6.1	Principais Resultados	126



6.2	Sugestões de Pesquisa Futura	129
7	Bibliografia	130

## Lista de figuras

Figura 1 – Sistema Brasileiro de Geração Hidrelétrica	34
Figura 2 – Distribuição Marginal da Potência Instalada das Usinas Hidrelétricas	35
Figura 3 – Sistema Elétrico Brasileiro	35
Figura 4 – Incerteza do Preço Spot no Longo Prazo	37
Figura 5 – Energia Natural Afluente (Séries Históricas – Sudeste – 2004)	37
Figura 6 – Rateio da Produção Hidrelétrica (MRE)	39
Figura 7 – Função Utilidade – Neutralidade ao Risco	47
Figura 8 – Função Utilidade – Aversão ao Risco	48
Figura 9 - Função Utilidade – Atração pelo Risco	48
Figura 10 – Curvatura da Função Utilidade x Aversão ao Risco	49
Figura 11 – Dominância Estocástica de 1ª. Ordem	56
Figura 12 – Dominância Estocástica de 2ª. Ordem	57
Figura 13 – Fronteira Eficiente e Dominância Estocástica	59
Figura 14 – Dominância Estocástica de 3ª. Ordem	59
Figura 15 – Cálculo Recursivo do Custo Operativo	66
Figura 16– Custo Marginal da Geração Térmica e do Déficit	67
Figura 17 – Aproximação Linear por Partes de uma Função Convexa	69
Figura 18 – Equilíbrio de Mercado a Longo Prazo	70
Figura 19 – Déficit de Energia x Custo de Déficit	71
Figura 20 – CMO x Custo de Déficit	72
Figura 21 – Custo Operativo em função do Estoque e da Afluência	72
Figura 22 – Distribuição Produção Hidrelétrica Modelos Original e Averso a Risco	76
Figura 23 – Estoque de Água nos Reservatórios Modelos Original e Averso a Risco	77
Figura 24 – Distribuição P. Spot Modelos Original e com Aversão a Risco	77
Figura 25 – Distribuição P. Spot - Modelos Original e com Preço Mínimo	79
Figura 26 – Distribuição P. Spot - Modelos Original e com Margem Mínima	80

Figura 27 – Despacho da Geração Hidrelétrica - Modelos Original e com Margem Mínima	81
Figura 28 – Estoque de Energia - Modelos Original e com Margem Mínima	81
Figura 29 – Processo de Decisão de Investimento com Opção de Espera	82
Figura 30 – Valor da Opção de Compra x Incerteza dos Resultados	83
Figura 31 – Evolução da Capacidade de Geração	87
Figura 32 - Rentabilidade do Investimento em Geração Hidrelétrica Modelo com Aversão ao Risco	91
Figura 33 - Rentabilidade do Investimento em Geração Hidrelétrica Modelo com Margem de Investimento	91
Figura 34 - Rentabilidade do Investimento em Geração Hidrelétrica Modelo com Preço Mínimo	92
Figura 35 - Rentabilidade do Investimento em Geração Hidrelétrica Todos os Modelos	92
Figura 36 - Rentabilidade do Investimento em Geração Termelétrica Modelo com Aversão ao Risco	94
Figura 37 - Rentabilidade do Investimento em Geração Termelétrica Modelo com Margem de Investimento	94
Figura 38 - Rentabilidade do Investimento em Geração Termelétrica Modelo com Preço Mínimo	95
Figura 39 - Rentabilidade do Investimento em Geração Termelétrica Todos os Modelos	95
Figura 40 - Rentabilidade do Investimento no Portfolio de Geração Hidrotérmica Modelo com Aversão ao Risco	97
Figura 41 - Rentabilidade do Investimento no Portfolio de Geração Hidrotérmica Modelo com Margem de Investimento	97
Figura 42 - Rentabilidade do Investimento no Portfolio de Geração Hidrotérmica Modelo com Preço Mínimo	98
Figura 43 - Rentabilidade do Investimento no Portfolio de Geração Hidrotérmica Todos os Modelos	98
Figura 44– Reprodução de um Contrato Futuro através de Contratos de Opção	105
Figura 45 – Grau de Aversão Risco e Portfolio de Geração	112

Figura 46 – Curva de Oferta e Demanda por Contratos pelo Produtor – ( $\lambda = 6.791$ )	115
Figura 47 – Curva de Oferta e Demanda por Contratos pelo Produtor – ( $\lambda = 24.160$ )	116
Figura 48 – Curva de Oferta e Demanda por Contratos pelo Produtor – ( $\lambda=49.642$ )	116
Figura 49 – Curva de Oferta e Demanda por Contratos pelo Consumidor - $\lambda = 6.791$	119
Figura 50 – Curva de Oferta e Demanda por Contratos pelo Consumidor - $\lambda = 24.160$	120
Figura 51 – Curva de Oferta e Demanda por Contratos pelo Consumidor - $\lambda = 49.642$	120
Figura 52 – Oferta e Procura por Contratos	121
Figura 53 – Preço de Equilíbrio x Aversão ao Risco	122
Figura 54 – Nível de Contratação x Aversão ao Risco	123
Figura 55 – Elasticidade Preço do Produtor	124
Figura 56 – Elasticidade Preço do Consumidor	124

*Where there is a wish, there is a way*  
*William Shakespeare*