



Wagner Saboia de Abreu

**Modelagem e Previsão de Preços à Vista de
Energia Elétrica e Aplicações no Contexto de
Investimentos sob Incerteza**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Carlos Patricio Samanez
Co-orientador: Prof. Tara Keshar Nanda Baidya

Rio de Janeiro
Abril de 2012



Wagner Saboia de Abreu

**Modelagem e Previsão de Preços à Vista de
Energia Elétrica e Aplicações no Contexto de
Investimentos sob Incerteza.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Carlos Patricio Samanez

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Tara Keshar Nanda Baidya

Co-orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Marco Antonio Guimarães Dias

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Juan Guillermo Lazo Lazo

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Fernando Antonio Lucena Aiube

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Jose Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 9 de Abril de 2012

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

Wagner Saboia de Abreu

Graduou-se em Engenharia de Produção (2009) pela Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e em Engenharia Generalista (2008) pela École Centrale Marseille. Atuando principalmente nos seguintes temas: eficiência energética, opções reais, sustentabilidade.

Ficha Catalográfica

Abreu, Wagner Saboia de

Modelagem e previsão de preços à vista de energia elétrica e aplicações no contexto de investimentos sob incerteza / Wagner Saboia de Abreu ; orientador: Carlos Patricio Samanez ; co-orientador: Tara Keshar Nanda Baidya. – 2012.

111 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Setor elétrico brasileiro. 3. Comercialização de energia elétrica. 4. Apreçamento de contratos de energia. 5. Método de Monte Carlo. I. Samanez, Carlos Patricio II. Baidya, Tara Keshar Nanda. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

A Deus, sem o qual nada seria possível.

Agradecimentos

Aos meus pais, Verônica e Valcinei, pela vida e pela educação;

À Renata, pelo amor, carinho e compreensão, além da revisão do trabalho;

À Camila, minha irmã, e a Diego, seu marido, por todas as conversas de apoio.

Ao Professor Tara Keshar Nanda Baidya, pela orientação, compreensão, paciência e amizade.

Ao Professor Leonardo Lima Gomes, pela ideia que levou a esta dissertação.

Aos Professores Juan Lazo e Fábio Batista, pela revisão e concelhos;

Aos Professores Carlos Patricio Samanez, José Paulo Teixeira, Marco Antonio Guimarães Dias, Fernando Aiube e Kátia Rocha, pelos ensinamentos sem os quais este trabalho não seria possível;

Aos funcionários do DEI, Ana Carolina, Ana Zélia, Celi, Cláudia, Dilza, Eduardo, Fernanda, Gilvan e Isabel, por todo apoio, paciência e ajuda;

Aos colegas, Eduardo, Frances, Priscila, Rafael, Thaís, entre outros, pelo companheirismo e apoio;

À PUC-Rio, por todo apoio durante a graduação e durante mestrado; e

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Resumo

Abreu, Wagner Saboia de; Samanez, Carlos Patricio (Orientador); Baidya, Tara Keshar Nanda (Coorientador). **Modelagem e Previsão de Preços à Vista de Energia Elétrica e Aplicações no Contexto de Investimentos sob Incerteza**. Rio de Janeiro, 2012. 111p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O Setor Elétrico Brasileiro (SEB) passou por uma grande reestruturação, saindo de uma situação de monopólio estatal para uma de desestatização regulamentada. Neste processo, a interação entre os agentes, causada pelas privatizações ocorridas no setor, passou a condicionar a formação dos preços do mercado de energia elétrica e, consequentemente, dos contratos dela derivados. O presente trabalho coloca a eletricidade no contexto das outras commodities e debate suas características específicas; apresenta o Setor Elétrico Brasileiro (SEB) e o Mercado Brasileiro de Energia Elétrica e discute a Formação dos Preços no Mercado de Curto Prazo Brasileiro. Foram usados dados históricos para a estimação dos parâmetros de um modelo que capta as principais características dos preços spot de energia elétrica e, lançando mão do Método de Monte Carlo (MMC) para a simulação desses preços, foi analisada a flexibilidade de compra e venda parcial de um contrato de energia elétrica, usando a Teoria de Opções Reais (TOR). Concluiu-se que essa flexibilidade agrega valor aos contratos de energia.

Palavras-chave

Setor Elétrico Brasileiro; Comercialização de Energia Elétrica; Apreçamento de Contratos de Energia; Opções Reais; Método de Monte Carlo; Economia da Energia.

Abstract

Abreu, Wagner Saboia de; Samanez, Carlos Patricio (Advisor); Baidya, Tara Keshar Nanda (Co-advisor). **Modelling and Forecasting of Electricity Spot Prices and Applications within the Context of Investment under Uncertainty**. Rio de Janeiro, 2012. 111p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Brazilian Electric Power Industry (SEB) has undergone a major restructuring moving from a situation of state monopoly to a regulated privatization. In this process, interaction among agents took place in the industry, influencing electricity spot prices and consequently power derivative contracts. This work: places electric power in the context of other commodities and discusses its specific characteristics; presents the Brazilian Power Companies and the Brazilian Electricity Market and discusses the formation of short-term prices in Brazil. We used historical data to carry out the parameters' estimation of a model that captures the main characteristics of electricity spot prices and we analyzed a flexibility of partial buying or selling of one energy contract using the Real Options Approach (ROA), employing Monte Carlo Method (MCM) to simulate these prices. We concluded that this flexibility adds value to power contracts.

Keywords

Brazilian Electric Power Industry; Energy Marketing; Electricity Contracts Pricing; Real Options; Monte Carlo Method; Energy Economics.

Sumário

1. Introdução	15
1.1. Considerações Gerais	15
1.2. Motivação	18
1.3. Objetivos	19
1.4. Metodologia	19
1.5. Revisão Bibliográfica	24
1.6. Organização do Trabalho	27
2. O Mercado de Energia Elétrica no Brasil	28
2.1. Considerações Iniciais	28
2.2. Alterações no Setor Elétrico Brasileiro	29
2.3. Instituições do Setor Elétrico Brasileiro	34
2.4. Comercialização de Energia no SEB	38
2.5. Formação dos Preços no Mercado de Curto Prazo Brasileiro	42
3. Modelagem	53
3.1. Considerações Iniciais	53
3.2. Processos Estocásticos	55
3.3. Modelagem dos Preços da Eletricidade	68
3.4. Avaliação do Modelo	85
4. Opções Reais em Energia Elétrica	91
4.1. Considerações Iniciais	91

4.2. Volatilidade dos preços spot da CCEE	93
4.3. Transação no Mercado Atacadista Brasileiro de Energia Elétrica	94
4.4. Opção de Escolha da Quantidade	95
4.4.1. Modelagem das Flexibilidades	95
4.4.2. Penalidades	96
4.4.3. Opção de Escolha Parcial da Quantidade	97
4.4.4. Cálculo do Valor da Opção de Escolha Parcial da Quantidade	98
5. Conclusões e Oportunidades para Trabalhos Futuros	102
5.1. Conclusões	102
5.2. Oportunidades para Trabalhos Futuros	103
6. Referências Bibliográficas e Bibliografia	104
6.1. Referências	104
6.2. Bibliografia	109

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Preços de Curto Prazo de Algumas Commodities	16
Figura 1.2 – Quando as Opções Reais são Valiosas – Incerteza x Flexibilidade	18
Figura 2.1 – Contabilização da Energia Disponível no Sistema	36
Figura 2.2 – Diagrama das Instituições do Sistema Elétrico Brasileiro	37
Figura 2.3 – Processo de Decisão para Sistemas Hidrotérmicos	42
Figura 2.4 – Minimização do Custo de Operação de um Sistema Hidrotérmico	43
Figura 2.5 – Custo Marginal de Operação x Volume Total de Produção	44
Figura 2.6 – Os Quatro Submercados do Sistema Elétrico Brasileiro	46
Figura 2.7 – Armazenamento e Curva de Aversão ao Risco	51
Figura 3.1 – Preços Horários no Mercado de Curto Prazo (Nord Pool)	70
Figura 3.2 – Preço Mensal do Barril de Petróleo 1970-2000	71
Figura 3.3 – Comportamento Sazonal do Preço de Curto Prazo (Nord Pool)	72
Figura 3.4 – PLDs Semanais, Submercado: SE, Patamar de Carga Médio	76
Figura 3.5 – Ln PLDs Semanais, Submercado: SE, Patamar de Carga Médio	78
Figura 3.6 – Coeficientes Dummy Mensais para Dessazonalização	82
Figura 3.7 – PLDs Semanais Dessazonalizados por Variáveis Dummy	83
Figura 3.8 – Regressão da eq. (45)	84
Figura 3.9 – Ajuste de Distribuição Exponencial de Dados	85
Figura 3.10 – Distribuições de Probabilidade Semanais do PLD	87
Figura 3.11 – PLD Semanal Realizado, Previsão e Erro de Previsão	88
Figura 4.1 – Ilustração da Modelagem da Opção de Escolha da Quantidade	95
Figura 4.2 – Valor da Opção de Escolha da Quantidade x Flexibilidade(%)	100

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Mudanças do Setor Elétrico Brasileiro	32
Tabela 2.2 – Patamares de Carga	45
Tabela 3.1 – Resumo das estatísticas descritivas do PLD e do $\ln(\text{PLD})$	77
Tabela 3.2 – Resultados da Regressão da eq. (47)	82
Tabela 3.3 – Resultados da Regressão da eq. (51)	84
Tabela 3.4 – Resultados da aplicação das Eqs. (53 e 54)	84
Tabela 3.5 – Medidas Agregadas de Erros	90
Tabela 4.1 – Características de um Contrato Hipotético de Venda de Energia Elétrica	97

Símbolos, Acrônimos e Abreviaturas

ACL – Ambiente de Contratação Livre

ACR – Ambiente de Contratação Regulada

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN – Balanço Energético Nacional

CAR – Curvas Bianaais de Aversão ao Risco

CCVE – Contratos de Compra e Venda de Energia

CEF – Certificado de Energia Firme

CFaR – Cash Flow at Risk

CMO – Custo Marginal de Operação

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

EaR – Earning at Risk

Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas

GW – Giga Watt

GWh – Giga Watt-hora

IEA – International Energy Agency

kW – Kilo Watt

kWh – Kilo Watt-hora

MAE – Mercado Atacadista de Energia Elétrica

MMC – Método (ou Simulação) de Monte Carlo

MME – Ministério de Minas e Energia

Mtep – Milhões de Toneladas Equivalentes de Petróleo

MW – Mega Watt

MWh – Mega Watt-hora

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development

OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas

PLD – Preço de Liquidação das Diferenças

PPA – Power Purchase Agreement

Proinfa – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

SEB – Sistema Elétrico Brasileiro

SIN – Sistema Interligado Nacional

TIR – Taxa Interna de Retorno

TOR – Teoria de Opções Reais

TWh – Tera Watt-hora

VaR – Value at Risk

VP – Valor Presente

VPL – Valor Presente Líquido

W – Watt

Wh – Watt-hora

“ ... If I have seen a little further it is by standing on the shoulders of Giants.”

Sir Isaac Newton