

**Luiz Guilherme Barbosa Marzano**

**Otimização de Portfólio de Contratos de Energia em  
Sistemas Hidrotérmicos com Despacho Centralizado**

**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.

Orientadores: Reinaldo Castro Souza

Albert C. Geber de Melo

Rio de Janeiro, 07 de junho de 2004



**Luiz Guilherme Barbosa Marzano**

## **Otimização de Portfólio de Contratos de Energia em Sistemas Hidrotérmicos com Despacho Centralizado**

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.

**Dr. Reinaldo Castro Souza**  
Orientador  
DEE/PUC-Rio

**Dr. Albert Cordeiro Geber de Melo**  
Orientador  
CEPEL

**Dra. Claudia Alejandra Sagastizábal**  
IMPA

**Dra. Maria Elvira Piñeiro Maceira**  
CEPEL

**Dr. João Lizardo Rodrigues Hermes de Araujo**  
CEPEL

**Dr. Paulo Roberto de Holanda Sales**  
ELETROBRÁS

**Dr. Ricardo Bernardo Prada**  
DEE/PUC-Rio

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

Rio de Janeiro, 07 de junho de 2004

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

### **Luiz Guilherme Barbosa Marzano**

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro em 1995. Obteve o título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio em 1998. Desde 1996 trabalha no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).

#### Ficha Catalográfica

Marzano, Luiz Guilherme Barbosa

Otimização de portfólio de contratos de energia em sistemas hidrotérmicos com despacho centralizado / Luiz Guilherme Barbosa Marzano; orientadores: Reinaldo Castro Souza, Albert Cordeiro Geber de Melo. – Rio de Janeiro, PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

201 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. Comercialização de energia. 3. Otimização de portfólio. 4. Otimização estocástica. 5. Gerenciamento de riscos. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Melo, Albert Cordeiro Geber de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

À minha esposa, Nereida.

Ao meu filho, Breno.

Aos meus pais, Sérgio e Bete (em memória).

Aos meus avós João (em memória) e Diva.

## Agradecimentos

Ao orientador Albert Cordeiro Geber de Melo, pelo apoio e incentivo desde o meu ingresso no CEPEL, e pela excelente orientação dispensada ao longo deste trabalho.

Ao orientador Reinaldo Castro Souza, por ter proporcionado o intercâmbio PUC/CEPEL, sem o qual este trabalho não teria sido realizado.

A professora do IMPA Claudia Sagastizábal, pelo apoio, incentivo e inúmeras discussões, que muito auxiliaram na conclusão deste trabalho.

Ao demais membros da banca examinadora da proposta de tese, Maria Elvira Piñeiro Maceira e Paulo Roberto de Holanda Sales, pelas dicas que delinearam o caminho para a conclusão deste trabalho.

Aos colegas do CEPEL, André Diniz, André Marcato, Vítor e Débora, pelas inúmeras discussões sobre otimização estocástica.

Aos colegas do CEPEL, Ana Cláudia, Pablo, Rodrigo, Fábio, Valk, Márcia, José Francisco, Maria Luiza e Javier, pelo apoio e agradável ambiente de trabalho.

À ELETROBRÁS, em particular ao Departamento de Comercialização de Energia, pelos vários projetos desenvolvidos em conjunto.

Ao CEPEL, por ter disponibilizado o programa NEWAVE, sem o qual não teria sido possível o desenvolvimento deste trabalho.

À PUC-Rio, pelo suporte financeiro.

## Resumo

Marzano, Luiz Guilherme Barbosa. **Otimização de Portfólio de Contratos de Energia em Sistemas Hidrotérmicos com Despacho Centralizado**. Rio de Janeiro, 2004. 201p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Otimização de portfólio é uma técnica largamente utilizada para seleção de investimentos na área econômico-financeira. A primeira proposição neste sentido foi o modelo média-variância de Harry Markowitz, que utiliza, respectivamente, a média e a variância dos retornos do portfólio como medidas de retorno e de risco. Desde Markowitz muitas outras abordagens, que adotam medidas de risco alternativas, têm sido propostas, como por exemplo o modelo MiniMax, o modelo de desvio absoluto médio, a programação objetiva, o Value-at-Risk (VaR), o Conditional Value-at-Risk (CVaR) etc.

Neste trabalho a idéia de otimização de portfólio é aplicada à área de comercialização de energia. O objetivo é apresentar abordagens para otimização de portfólio de contratos de energia, de modo a se definir a estratégia de comercialização de energia que maximize o valor esperado dos valores presentes das remunerações líquidas de uma empresa geradora, sujeito ao controle de sua exposição ao risco. São propostas três abordagens: a primeira adota a variância dos valores presentes das remunerações líquidas como medida de risco, a segunda adota o mínimo da distribuição como medida de risco e a terceira adota o CVaR como medida de risco.

Em duas das três abordagens propostas, assume-se que os contratos candidatos a compor o portfólio são divididos em dois grupos: contratos de decisão imediata e possibilidades futuras de contratação. Com isto, a formulação do problema resulta em um modelo de otimização estocástica de dois estágios, que é resolvido via programação dinâmica dual estocástica.

Resultados numéricos para o sistema elétrico brasileiro são apresentados e discutidos.

## Palavras-chave

Comercialização de energia; Otimização de portfólio; Otimização estocástica; Gerenciamento de riscos.

## Abstract

Marzano, Luiz Guilherme Barbosa. **Portfólio Optimization of Energy Contracts in Hydrothermal Systems with Centralized Dispatch**. Rio de Janeiro, 2004. 201p. D.Sc. Thesis - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Portfolio optimization has been widely used to select investments in the financial area. The first proposal in this topic was the Markowitz mean-variance approach, which uses, respectively, the mean and the variance as measures of portfolio return and risk. Since Markowitz many other approaches, which adopt alternative risk measures, have been proposed, e.g. the MiniMax model, the Mean Absolute Deviation model, the Goal Programming, the Value-at-Risk (VaR) and the Conditional Value-at-Risk (CVaR) etc.

In this work the idea of portfolio optimization is applied to the energy commercialization area. The objective is to present approaches to portfolio optimization of energy contracts in order to determine the energy commercialization strategy that maximizes the expected present value of the cash flow of a generating company subject to the control of its risk exposure. Three approaches are proposed: the first adopts the variance of the present values as risk measure, the second adopts the minimum present value as risk measure and the third adopts the CVaR as risk measure.

In the second and in the third approaches are assumed that the candidate contracts are divided into two sets: those of immediate decision and those that can be contracted in the future. This modeling leads to a large-scale two-stage stochastic programming problem that is solved by stochastic dual dynamic programming.

Numerical results for the Brazilian power system are presented and discussed.

## Keywords

Energy commercialization; Portfolio optimization; Stochastic optimization; Risk Management.

## Sumário

1	Introdução.....	1
1.1.	Considerações Gerais .....	1
1.2.	Objetivo da Tese.....	2
1.3.	Contextualização da Tese com Relação ao Setor Elétrico Brasileiro .	3
1.4.	Estrutura da Tese .....	4
2	Estado da Arte em Otimização de Portfólio .....	6
2.1.	Introdução.....	6
2.2.	Otimização de Portfólio na Área Econômico-Financeira.....	7
2.2.1.	O Modelo Média-Variância de Markowitz .....	7
2.2.2.	O Modelo Desvio Absoluto Médio (MAD) .....	10
2.2.3.	O Modelo MiniMax.....	12
2.2.4.	O Modelo de Programação Objetiva.....	15
2.2.5.	O Value-at-Risk (VaR) .....	17
2.2.6.	O Conditional Value-at-Risk (CVaR).....	20
2.2.7.	Outras Formas de Mensurar o Risco.....	29
2.2.8.	O Conceito de Medidas Consistentes de Risco e de Desvio .....	31
2.3.	Otimização de Portfólio na Área de Comercialização de Energia Elétrica.....	35
2.4.	Conclusões.....	39
3	O Método de Programação Dinâmica Dual para Solução de Problemas de Programação Estocástica de Dois Estágios .....	43
3.1.	Introdução.....	43
3.2.	Modelo de Programação Estocástica de Dois Estágios .....	43
3.3.	O Método de Programação Dinâmica Dual para Problemas de Otimização Determinísticos de Dois Estágios .....	44
3.4.	Extensão do Algoritmo para Problemas Estocásticos de Dois Estágios.....	52



3.5. Tratamento de Inviabilidade nos Problemas de Segundo Estágio.....	56
3.5.1. Penalização na Função Objetivo .....	56
3.5.2. Corte de Viabilidade .....	58
3.6. Conclusões.....	59
4 Premissas quanto aos Modelos de Despacho de Geração, Formação do Preço da Energia e Comercialização de Energia .....	61
4.1. Introdução.....	61
4.2. Premissas quanto ao Modelo de Despacho de Geração e Formação do Preço da Energia.....	62
4.2.1. Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos em um Modelo <i>Tight Pool</i> .....	63
4.2.2. Processo de Formação do Preço da Energia no Modelo <i>Tight Pool</i> do Brasil.....	73
4.3. Premissas quanto ao Modelo de Comercialização de Energia.....	76
4.3.1. Comercialização de Energia Exclusivamente no Mercado a Vista .	76
4.3.2. Comercialização de Energia Via Contratos Bilaterais (e Conseqüentemente também no Mercado a Vista).....	78
4.4. Conclusões.....	80
5 Abordagens Propostas para Otimização de Portfólio de Contratos de Energia .....	82
5.1. Introdução.....	82
5.2. Características Relacionadas ao Problema de Otimização de Portfólio de Contratos de Energia.....	83
5.3. Principais Dados para Resolver o Problema de Otimização de Portfólio de Contratos de Energia.....	86
5.4. Primeira Abordagem: Modelo Média-Variância para Otimização de Portfólio de Contratos de Energia.....	89
5.5. Segunda Abordagem: Modelo Média-Mínimo da Distribuição para Otimização de Portfólio de Contratos de Energia .....	96
5.6. Terceira Abordagem: Modelo Média-CVaR para Otimização de Portfólio de Contratos de Energia.....	110
5.7. Conclusões.....	121

6 Resultados Numéricos.....	124
6.1. Introdução.....	124
6.2. Resultados – Modelo Média-Variância .....	124
6.3. Resultados – Modelos Média-Mínimo da Distribuição e Média-CVaR .....	131
6.4. Desempenho da Penalização na Função Objetivo e Corte de Viabilidade no Tratamento de Inviabilidades nos Problemas de Segundo Estágio .....	146
6.5. Conclusões.....	149
7 Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros.....	151
8 Referências Bibliográficas .....	161
9 Bibliografia.....	168
Apêndice A	
Relação entre o Semidesvio Absoluto Médio e o Desvio Absoluto Médio .....	171
Apêndice B	
Características do VaR.....	173
Apêndice C	
Prova de que a Minimização de $F_{\beta}(x, \alpha)$ em $\alpha$ Resulta no CVaR do Portfólio .....	175
Apêndice D	
Consistência do Par $D(X_1) = E[X_1] - \inf[X_1]$ e $R(X_1) = -\inf [X_1]$ .....	178
Apêndice E	
Consistência do CVaR.....	181

Apêndice F

Comportamento da Fronteira Eficiente de Contratação obtida com a  
Primeira Abordagem Proposta na Tese..... 185

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Fronteira Eficiente do Portfólio .....	9
Figura 3.1 – Processo de Decisão em Dois Estágios .....	45
Figura 3.2 – Processo de Decisão em Dois Estágios (Caso Estocástico).....	53
Figura 4.1 – Conseqüências Operativas de um Sistema Hidrotérmico.....	65
Figura 4.2 – Função de Custo Imediato e Função de Custo Futuro .....	66
Figura 4.3 – Decisão Ótima para o Uso da Água .....	67
Figura 5.1 – Conseqüências da Estratégia de Comercialização de Energia .....	85
Figura 5.2 – Determinação de Cenários Futuros de Despachos de Geração e de Preços da Energia no Mercado a Vista .....	87
Figura 5.3 – Principais Entradas e Saídas.....	88
Figura 6.1 – Evolução do Preço Médio Mensal no Mercado a Vista.....	126
Figura 6.2 – Probabilidade do Preço no Mercado a Vista Ser Maior que 35 \$/MWh, 50 \$/MWh, 75 \$/MWh e 100 \$/MWh (Submercado 1) ...	126
Figura 6.3 – Probabilidade do Preço no Mercado a Vista Ser Maior que 35 \$/MWh, 50 \$/MWh, 75 \$/MWh e 100 \$/MWh (Submercado 2) ...	127
Figura 6.4 – Fronteira Eficiente de Contratação .....	128
Figura 6.5 – Fronteira Eficiente de Contratação .....	133
Figura 6.6 – Volumes Ótimos dos Contratos de Decisão Imediata.....	134
Figura 6.7 – Evolução do Volume Médio Contratado, CVaR 90%.....	136
Figura 6.8 – Evolução do Volume Médio Contratado, CVaR 95%.....	136
Figura 6.9 – Evolução do Volume Médio Contratado, Mínimo da Distribuição.....	137
Figura 6.10 - Possibilidade Futura de Contratação F6 para o Ponto E da Fronteira Eficiente Obtida com o CVaR 95% .....	138
Figura 6.11 - Possibilidade Futura de Contratação F6 para o Ponto A a Fronteira Eficiente Obtida com o CVaR 95% .....	139
Figura 6.12 – Evolução de Contratação Devido Exclusivamente aos Contratos de Decisão Imediata e a Possibilidade Futura de Contratação	

F6, para o Ponto A da Fronteira Eficiente Obtida com o CVaR 95%.....	140
Figura 6.13 – Fronteira Eficiente de Contratação Obtida Com as Séries de Preços no Mercado a Vista em Ordem Inversa .....	141
Figura 6.14 – Evolução do Volume Médio Contratado Obtido com as Séries de Preços no Mercado a Vista em Ordem Inversa, CVaR 90% ..	143
Figura 6.15 – Evolução do Volume Médio Contratado Obtido com as Séries de Preços no Mercado a Vista em Ordem Inversa, CVaR 95% ..	143
Figura 6.16 – Evolução do Volume Médio Contratado Obtido com as Séries de Preços no Mercado a Vista em Ordem Inversa, Mínimo da Distribuição.....	144
Figura 6.17 – Evolução dos Preços do Primeiro Ano Associado à Série de Número 138.....	145
Figura B.1 – Perda do Portfólio versus Posição Investida no Ativo k .....	174

## Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Despacho Resultante na Primeira Hora.....	63
Tabela 4.2 – Despacho Resultante na Segunda Hora.....	64
Tabela 4.3 – Estratégia Alternativa de Operação .....	64
Tabela 6.1 – Contratos Bilaterais Candidatos .....	125
Tabela 6.2 – Volumes Ótimos de Contratação dos Pontos A e B .....	129
Tabela 6.3 – Estatísticas de Posição das Distribuições dos Valores Presentes Associados aos Pontos A e B.....	130
Tabela 6.4 – Curtose, Coef. de Assimetria e Estatística de Jarque-Bera das Distribuições Associadas aos Pontos A e B .....	131
Tabela 6.5 – Contratos Candidatos de Decisão Imediata.....	132
Tabela 6.6 – Possibilidades Futuras de Contratação .....	132
Tabela 6.7 – Resumo dos Resultados dos Contratos de Decisão Imediata.....	142
Tabela 6.8 – Tempo de Processamento para o Modelo Média-Mínimo da Distribuição (segundos) .....	147
Tabela 6.9 – Tempo de Processamento para o Modelo Média-CVaR para Nível de Confiança de 95% (segundos) .....	148