

**Leonardo Braga Soares**

**Seleção de Projetos de Investimento em  
Geração de Energia Elétrica**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: José Paulo Teixeira

Co-orientador: Sérgio Granville

Rio de Janeiro

Março de 2008

**Leonardo Braga Soares**

**Seleção de Projetos de Investimento em  
Geração de Energia Elétrica**

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

**José Paulo Teixeira**

Orientador

Departamento de Engenharia de Produção - PUC-Rio

**Sérgio Granville**

Co-Orientador

PSR Consultoria Ltda

**Carlos Patrício Samanez**

Departamento de Engenharia de Produção - PUC-Rio

**Alexandre Street**

Departamento de Engenharia de Elétrica - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de março de 2008

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

### **Leonardo Braga Soares**

Graduou-se em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Apoio à Decisão na PUC-Rio em 2005. Atuou nas empresas PSR e EPE, onde participou ativamente de estudos relacionados à avaliação econômica de projetos de geração, precificação de riscos, otimização de contratos e estudos de planejamento energético.

### Ficha Catalográfica

Soares, Leonardo Braga

Seleção de projetos de investimento em geração de energia elétrica / Leonardo Braga Soares; orientador: João Paulo Teixeira; co-orientador: Sérgio Granville. – 2008.

111 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Contratos de energia. 3. Dominância estocástica. 4. Leilões de energia. 5. Otimização estocástica. 6. Precificação de riscos. 7. Seleção de carteiras. 8. Value at risk. I. Teixeira, José Paulo. II. Granville, Sérgio. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

À minha mãe, Heloisa.  
Ao meu pai, Álvaro.  
À minha irmã, Viviane.

## Agradecimentos

Agradeço à Laura, meu amor, pelo carinho, paciência e incentivo.

À minha família, por tudo que fizeram por mim. Meu pai Álvaro, minha mãe Heloisa, minha irmã Viviane e todos os demais são os responsáveis por essa conquista.

Ao orientador José Paulo Teixeira, pelas excelentes aulas e pela confiança no meu trabalho.

Ao orientador e amigo Sergio Granville, pelo seu incomensurável conhecimento, pela paciência e por toda confiança no meu trabalho.

Aos amigos Luiz Augusto Barroso, Alexandre Street, Pedro David e Giacomo Chinelli, pela amizade e pelos incentivos acadêmicos e profissionais.

Ao mestre Mário Veiga Ferraz Pereira e a todos os amigos da PSR Consultoria.

A todos os amigos da Empresa de Pesquisa Energética.

Ao CNPQ e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos e pelo ótimo ambiente de estudo.

A todos os amigos e companheiros de estudo da PUC-Rio.

## Resumo

Soares, Leonardo Braga; Teixeira, José Paulo. Seleção de Projetos de Investimento em Geração de Energia Elétrica. Rio, 2008. 111p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

A reestruturação do setor de energia elétrica, iniciada nos anos 90, teve como uma de suas principais implicações a introdução da competição na atividade de geração. A expansão do parque gerador, necessária para garantir o equilíbrio estrutural entre oferta e demanda, é estimulada por contratos de longo prazo negociados em leilões, na modalidade de menor tarifa. Destarte, o investidor deve oferecer um limite de preço para que o seu projeto seja competitivo (de forma a ganhar a licitação), mas que ao mesmo tempo seja suficiente para remunerar seu investimento, custos de operação e, sobretudo, protegê-lo contra todos os riscos intrínsecos ao projeto. Nesse contexto, as duas principais contribuições do presente trabalho são: (i) a proposição de uma metodologia de precificação de riscos, utilizando o critério do *Value at Risk* (VaR), que indica a máxima perda admitida pelo investidor avesso a risco, com um determinado nível de confiança, e (ii) a aplicação de diferentes modelos de seleção de carteiras, que incorporam o critério do VaR para otimizar um *portfolio* com diferentes tecnologias de geração de energia. Os resultados da precificação de riscos são úteis para determinar os componentes críticos do projeto e calcular a competitividade (preço) de cada tecnologia. A aplicação de diferentes métodos de seleção de carteiras busca determinar o modelo mais indicado para o perfil das distribuições de retorno dos projetos de geração, que apresentam assimetria e curtose elevada (caldas pesadas).

## Palavras-chave

Contratos de Energia, Dominância Estocástica, Leilões de Energia, Otimização Estocástica, Precificação de Riscos, Seleção de Carteiras, Value at Risk.

## **Abstract**

Soares, Leonardo Braga; Teixeira, José Paulo. Power Generation Investments Selection. Rio, 2008. 111p. MSc. Thesis – Department of Industrial Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro (PUC-Rio).

The new structure of the Brazilian electric sector, consolidated by the end of the 90's, has as its main implication the introduction of competition in the power generation activity. The expansion of generation capacity, responsible to ensure structural equilibrium between supply and demand, is stimulated by long-term contracts negotiated through energy auctions. Therefore, the investor must give a competitive price (in order to win the auction), but also sufficient to pay his investment, operational costs and, especially, protect him against all project risks. In this role, the two main contributions of this work are: (i) to suggest a methodology of risk pricing, using the Value at Risk (VaR) criterium, which gives the maximum loss admitted by the risk averse investor, with a specified confidence level, and (ii) to apply different portfolio selection models, which incorporate the VaR criterium to optimize a portfolio with different power generation technologies. The risk pricing results are useful to determine the project critical components and to calculate the competitiveness (price) of each technology. The study of different portfolio selection methods aims to investigate the most suitable model for the return distribution shape, characterized by having asymmetry and kurtosis (heavy tails).

## **Keywords**

Energy Contracts, Stochastic Dominance, Energy Auctions, Stochastic Optimization, Risk Pricing, Portfolio Selection, Value at Risk.

# Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>14</b>
1.1. Panorama do Setor de Energia Elétrica Brasileiro.....	14
1.1.1. O Novo Modelo Institucional.....	15
1.1.2. Mercado de Curto Prazo e os Sinais para a Expansão da Oferta.....	16
1.1.3. Contratos de Longo Prazo e os Leilões de Energia Nova.....	17
1.2. Seleção de Projetos de Investimento em Geração de Energia Elétrica.....	18
1.2.1. Riscos em Projetos de Geração .....	18
1.2.2. Avaliação sob Incerteza e Precificação de Riscos.....	18
1.2.3. Conjunto Eficiente das Alternativas de Investimento.....	19
1.2.4. Seleção da Carteira de Projetos .....	20
1.3. Objetivo da Dissertação.....	20
1.4. Organização da Dissertação.....	21
<b>2. Formação de Preços no Mercado de Curto Prazo.....</b>	<b>22</b>
2.1. Estratégia de Operação de Sistemas Hidrotérmicos .....	22
2.1.1. Despacho Econômico e Custos de Oportunidade.....	23
2.1.2. Custos Operacionais Imediatos e Futuros.....	24
2.1.3. Cálculo da Função de Custo Futuro.....	26
2.1.4. Formulação do Problema de Despacho Hidrotérmico.....	29
2.1.5. Solução do Problema e Custos Marginais de Operação .....	31
2.2. Volatilidade da Receita no Mercado Spot .....	33
<b>3. Contratos de Compra e Venda de Energia.....</b>	<b>36</b>
3.1. Respaldo Físico .....	36
3.2. Contratos de Quantidade .....	38
3.2.1. Mecanismo de Realocação de Energia .....	40
3.3. Contratos de Disponibilidade .....	42
<b>4. Leilões de Energia Nova.....</b>	<b>45</b>
4.1. Segurança de Suprimento e Modicidade Tarifária .....	45
4.2. Leilões de Contratos de Quantidade.....	46
4.3. Leilões de Contratos de Disponibilidade.....	47
4.3.1. Índice de Custo Benefício - ICB.....	48



<b>5. Modelos Computacionais e Metodologia .....</b>	<b>51</b>
5.1. Metodologia.....	51
<b>6. Riscos em Projetos de Geração de Energia .....</b>	<b>55</b>
6.1. Mapeamento dos Fatores de Risco .....	55
6.1.1. Risco de Conclusão do Projeto.....	56
6.1.2. Risco Hidrológico.....	58
6.1.3. Risco de Performance.....	60
6.2. Avaliação de Investimentos sob Incerteza.....	61
6.2.1. Critério do Value at Risk.....	62
6.3. Precificação de Riscos em Projetos de Geração de Energia .....	64
<b>7. Seleção de Carteiras de Projetos via <i>Value-at-Risk</i> .....</b>	<b>67</b>
7.1. Conjunto Eficiente das Alternativas de Investimento.....	67
7.1.1. Dominância Estocástica de Primeira Ordem - DEP .....	68
7.1.2. Dominância Estocástica de Segunda Ordem - DES .....	69
7.2. Modelos para Seleção de Carteiras.....	71
7.2.1. Modelo Média-Variância.....	71
7.2.2. Modelo MiniMax.....	73
7.2.3. Modelo Conditional Value at Risk .....	75
<b>8. Seleção de Projetos de Investimento em Geração de Energia</b>	
<b>Elétrica: um Exemplo .....</b>	<b>77</b>
8.1. Definição dos Projetos.....	77
8.1.1. Custos e Parâmetros Técnicos .....	77
8.1.2. Cálculo dos Parâmetros Energéticos .....	79
8.1.3. Impostos, Encargos e Financiamento .....	81
8.1.4. Fluxo de Caixa.....	82
8.2. Resultados da Simulação .....	83
8.2.1. Precificação de Riscos .....	84
8.2.2. Conjunto Eficiente.....	85
8.2.3. Seleção de Carteiras.....	89
<b>9. Conclusões .....</b>	<b>93</b>
<b>10. Referências Bibliográficas.....</b>	<b>96</b>
<b>11. Apêndice A - Metodologia de Cálculo do Preço do Contrato .....</b>	<b>102</b>

<b>12. Apêndice B - Algoritmos de Cálculo da Carteira Ótima</b>	
<b>Incorporando o Critério do VaR.....</b>	<b>104</b>
12.1. Modelo MV – Algoritmo iterativo de convergência da TIRVaR.....	104
12.2. Modelo MM – Algoritmo iterativo de convergência da TIRVaR .....	106
12.3. Modelo CVaR – Algoritmo iterativo de convergência da TIRVaR .....	108
<b>13. Apêndice C – Especificação dos Riscos das Tecnologias Simuladas.....</b>	<b>110</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Diagrama Esquemático de um Sistema Hidrotérmico.....	22
Figura 2.2 – Processo Decisório em Sistemas Hidrotérmicos.....	24
Figura 2.3 – Função de Custo Imediato .....	25
Figura 2.4 – Função de Custo Futuro.....	25
Figura 2.5 – Despacho Ótimo .....	26
Figura 2.6 – Enfoque Árvore .....	27
Figura 2.7 – Cálculo da Função de Custo Futuro (Primeira Iteração) .....	28
Figura 2.8 – Cálculo da Função de Custo Futuro (Segunda Iteração) .....	28
Figura 2.9 – Balanço Hídrico do Reservatório .....	30
Figura 2.10 – Função de Custo Futuro do Sistema.....	32
Figura 2.11 – Histórico do Preço <i>Spot</i> no Sudeste – Patamar de Carga Média.....	34
Figura 2.12 – Distribuição do Preço <i>Spot</i> (Dez/2007) .....	34
Figura 3.1 – Relação entre Garantia Física (GF), Inflexibilidade e Custo de Operação.....	37
Figura 4.1 – Perfil do Índice K em Função do Custo de Operação .....	50
Figura 6.1 - Percentual da Capacidade Instalada Prevista com Restrições para a Entrada em Operação (previsão da ANEEL) .....	57
Figura 6.3 – Preço Spot x Nível de Armazenamento (Sudeste) .....	58
Figura 6.4 – Curva de Preço em Função do Montante Contratado.....	59
Figura 6.6 - Distribuição de probabilidade acumulada da TIR. ....	66
Figura 7.1 – Distribuições Acumuladas - DEP.....	69
Figura 7.2 – Distribuições Acumuladas - DES.....	70
Figura 7.3 – Distribuição de Retornos da Carteira MV .....	73
Figura 8.1 – Fronteira Eficiente do Modelo Média-Variância .....	87
Figura 8.2 – Fronteira Eficiente do Modelo Minimax .....	88
Figura 8.3 – Fronteira Eficiente do Modelo CVaR.....	88
Figura 8.4 - Distribuição Acumulada do Retorno das Carteiras.....	91
Figura 8.5 - Distribuição dos Retornos Abaixo da TIR-VaR de 8% (95% de Confiança) .....	92

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Características das Termoelétricas.....	32
Tabela 2.2 – Características da Hidrelétrica.....	32
Tabela 2.3 – Despacho Ótimo do Sistema.....	33
Tabela 6.1 - Decomposição do Preço da Energia (Investidor Neutro ao Risco). ..	65
Tabela 7.1 – Retornos dos Ativos $A$ e $B$ .....	75
Tabela 8.1 – Descrição dos Empreendimentos Simulados.....	78
Tabela 8.2 – Custos e Inflexibilidade de cada Tecnologia.....	78
Tabela 8.3 – Parâmetros energéticos dos empreendimentos .....	79
Tabela 8.4 – Hidrelétricas: Contratação Ótima .....	80
Tabela 8.5 - Impostos .....	81
Tabela 8.6 - Encargos.....	81
Tabela 8.7 – Condições de Financiamento.....	81
Tabela 8.8 – Preços e Prêmios de Risco.....	85
Tabela 8.9 – Eficiência de cada tecnologia por DEP e DES .....	86
Tabela 8.10 – Carteiras Ótimas.....	89
Tabela 8.11 – Risco e Retorno das Carteiras Ótimas.....	90
Tabela 13.1 – Ciclo combinado a gás natural.....	110
Tabela 13.2 – Ciclo combinado a GNL.....	110
Tabela 13.3 – Turbina a vapor de biomassa de cana de açúcar .....	110
Tabela 13.4 – Turbina a vapor de carvão importado .....	111
Tabela 13.5 – Turbina a vapor de carvão nacional .....	111
Tabela 13.6 – Hidrelétrica .....	111

## Lista de Símbolos e Abreviações

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEC	Custo Econômico Esperado no Mercado de Curto Prazo
CCEAR	Contrato de Compra e Venda de Energia no Ambiente Regulado
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CMR	Custo Marginal de Referência
CMO	Custo Marginal de Operação
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
COP	Custo Operativo Esperado
CVaR	<i>Conditional Value at Risk</i>
DES	Dominância Estocástica de Segunda Ordem
DEP	Dominância Estocástica de Primeira Ordem
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCF	Função de Custo Futuro
GF	Garantia Física
ICB	Índice de Custo Benefício
LEN	Leilão de Energia Nova
MM	Minimax
MME	Ministério de Minas e Energia
MV	Média-Variância
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PDDE	Programação Dinâmica Dual Estocástica
PLD	Preço de Liquidação de Diferenças
VaR	<i>Value at Risk</i>