

Bruno Henriques Dias

**Modelo de Análise de Riscos Aplicado ao
Sistema Elétrico Brasileiro**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Jacques Szczupak
Co-orientadora: Leontina Maria V. G. Pinto

Rio de Janeiro, agosto de 2006



Bruno Henriques Dias

**Modelo de Análise de Riscos Aplicado ao
Sistema Elétrico Brasileiro**

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.

Prof. Jacques Szczupak
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Profa. Leontina Maria Viana Graziadio Pinto
Co-Orientadora

Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda.

Prof. André Luis Marques Marcato
UFJF

Marco Antonio Cetale Santos
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 31 de agosto de 2006

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

Bruno Henriques Dias

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, no ano de 2005. Desenvolveu projetos de pesquisa e trabalho de conclusão de curso na área de Processamento de Sinais, e hoje tem desenvolvido pesquisas na área de comercialização de energia e gestão de risco, tema desta dissertação.

Ficha Catalográfica

Dias, Bruno Henriques

Modelo de análise de riscos aplicado ao sistema elétrico brasileiro / Bruno Henriques Dias ; orientador: Jacques Szczupak ; co-orientadora: Leontina Maria V. G. Pinto. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

62 f. : il.(col.) ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Comercialização de energia. 3. Portfólio ótimo. 4. Otimização estocástica 5. Contratos. 6. Riscos. 7. Value-at-risk. I. Szczupak, Jacques. II. Pinto, Leontina Maria V. G. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 658.5

Ao meu pai,

Com todo o meu reconhecimento e gratidão,
por seu amor, exemplo e dedicação.

Agradecimentos

Agradeço inicialmente e, sobretudo, a Deus, pela vida, oportunidade constante de aprendizado.

A minha mãe, pela força, exemplo e carinho, cuja dedicação tornou possível que eu chegasse até aqui.

A minha irmã, por dividir comigo momentos tão importantes.

A Anne Karole, por todo carinho e amor.

A toda minha família, fonte de carinho e inspiração, em especial a meu tio Itamar Henriques, pelo desprendimento e dedicação, o que o torna, certamente, um dos maiores responsáveis por este importante passo. Agradeço também ao Roberto Dias e Marcílio Henriques, meus primos e eternos amigos, com os quais divido minhas dúvidas, mas principalmente, com os quais tenho a felicidade de compartilhar a busca incessante por um pouco mais de conhecimento.

Meus sinceros agradecimentos aos muitos amigos que me incentivam na minha caminhada. Agradeço em especial, a Cristina, Luciana e Carolina, que conheci na PUC, e Bruno Beloti, Murilo Soares e Leonardo Moraes, amigos que me acompanham desde a graduação, pela importância que tiveram, de alguma forma, na realização deste trabalho.

Agradeço à equipe da Gerência Gestão de Risco, da empresa AES Eletropaulo, pela colaboração técnica prestada no desenvolvimento deste trabalho, principalmente a Ricardo Cyrino, Rodrigo Maia, Leandro Tsunechiro, Bruno Vidal, Maurício Fernandes, Eliana Silva e Juliana Chade.

Aos meus orientadores, Jacques Szczupak e Leontina Pinto, por acreditarem na minha capacidade, me concederem a oportunidade e me incentivarem no desenvolvimento deste trabalho, meus mais sinceros agradecimentos.

Ao CNPq pelo apoio financeiro recebido durante a realização deste trabalho.

Resumo

Bruno Henriques Dias. **Modelo de Análise de Riscos Aplicado ao Sistema Elétrico Brasileiro**. Rio de Janeiro, 2006. 62p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O novo Modelo Energético Brasileiro trouxe um mundo de novos desafios para as Distribuidoras de Energia Elétrica. Elas têm que atender a carga através de contratos de longo prazo (cinco a quinze anos). As incertezas são enormes, desde a evolução da carga até a disponibilidade de energia, com seus preços associados. As restrições se encontram próximas a seus limites, sendo a sobre-contratação severamente punida - apenas 3% de excesso pode ser contratado na tarifa regulada e recuperado no preço ao consumidor. As distribuidoras devem então criar um portfólio de contratos sob incertezas, minimizar os custos (visando um preço competitivo) e os riscos (visando garantias a longo prazo). Este trabalho tem como objetivo ajudar o agente a construir seu portfólio ótimo, que corresponde a um problema não-linear, inteiro, misto, de larga escala, a princípio de difícil solução através de modelos atualmente disponíveis (tanto modelos econômicos como algoritmos de otimização). Neste trabalho, combina-se técnicas econômicas e de otimização, num novo modelo capaz de analisar um portfólio possível e/ou encontrar um conjunto de soluções ótimas. O modelo pode ser adaptado para acomodar diferentes funções-objetivo, tais como risco mínimo, custo mínimo, VaR (*Value-at-Risk*), etc. Espera-se que o modelo possa oferecer uma ferramenta eficiente e flexível, além de precisa, capaz de ajudar a encontrar uma comercialização justa, mitigando riscos e minimizando custos, levando a um melhor uso da energia e a um preço melhor para toda a sociedade.

Palavras-chave

Comercialização de Energia, Portfólio Ótimo, Otimização Estocástica, Contratos, Riscos, *Value-at-Risk*.

Abstract

Bruno Henriques Dias. **Risk Analysis Model Applied to the Brazilian Electrical System**. Rio de Janeiro, 2006. 62 pages. MSc. Thesis – Electrical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

The new Brazilian Energy Model brought a whole new world of challenges to Distribution Companies (DISCOS). They have to meet the load through long-term contracts (five to fifteen years). Uncertainties are enormous, from load evolution to energy availability and associated prices. Restrictions are tight – for instance overcontracting is punished – only a mere 3% excess may be included in the regulated tariff and thus recovered by consumer's prices. DISCOS must therefore build a contract portfolio under uncertainties, minimize costs (searching for a competitive price) and risks (searching for long-term guarantees). The objective of this work is to help the agent constructing its optimum portfolio - which corresponds to a large-scale non-linear mixed integer problem, in principle difficult to solve by available models (from economic to optimization algorithms). In this model economic and optimization techniques have been combined into a new model able to both analyze a possible portfolio and/or find a set of optimal solutions. The model may be adapted to accommodate different objective functions, such as minimum risk, minimum cost, VaR (Value-at-risk), etc. This model may offer an efficient and flexible, yet precise tool, able to help finding a fair trade, mitigating risks and minimizing costs, leading to a better use of energy and a better price for whole society.

Keywords

Energy Trading, Optimal Portfolio, Stochastic Optimization, Contracts, Risks, Value-at-Risk.

Sumário

1 Introdução	13
1.1. Considerações Gerais	13
1.2. Objetivo	14
1.3. Organização da Dissertação	14
2 O Novo Modelo e os Leilões de Energia	15
2.1. Breve Histórico da Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro	15
2.2. Os Agentes do Sistema Elétrico Brasileiro	17
2.2.1. Operador Nacional do Sistema (ONS)	17
2.2.2. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)	18
2.2.3. Câmara de Comercialização de Energia (CCEE)	19
2.3. Leilões de Contratação de Energia	20
3 Teoria do Portfólio	22
4 Programação Matemática Aplicada à Contratação de Energia	26
4.1. Introdução	26
4.2. Análise do Problema de Contratação por Programação Linear	29
4.3. A Construção de Cenários para a Programação Estocástica	35
4.4. Abordagem do Problema por Programação Estocástica	36
4.5. O Problema Real de Contratação de Energia no Setor Elétrico	42
4.5.1. Contratos de Compra e Venda em Leilões de Energia Elétrica	42
4.5.2. A Carteira de Contratos Celebrados	44
4.5.3. Os Consumidores Livres e as Reduções	44
4.5.4. Programação Estocástica no problema de Contratação de Energia Através de Leilões	45
5 Análise de Risco Aplicado à Contratação de Energia Através de Leilões	55
5.1. Value-at-Risk	55
5.1.1. Calculando o VaR	55
5.2. Value-at-Risk na Avaliação do Risco de Contratação de Energia por Leilões	57

6 Discussões e Conclusões	59
7 Referências Bibliográficas	61

Lista de figuras

Figura 1: Exemplo de Curva de Risco-Retorno, para o Caso de um Portfólio com Apenas 2 Ações.	24
Figura 2: Curva de Demanda ao Longo de 7 Anos.	26
Figura 3: Curva de Demanda para 6 Anos.	27
Figura 4: Representação Visual das Opções de Contratos	28
Figura 5: Preenchimento da Curva de Demanda com as Opções de Contratos	29
Figura 6: Planilha de Entrada de Dados do Problema de Contratação	31
Figura 7: Planilha de Restrições e Valores Calculados pelo WB para o Problema Proposto.	31
Figura 8: Gráfico de Demanda Prevista em Comparação com o Valor Contratado pelo PPL.	32
Figura 9: Planilha Contendo Variáveis de Folga e Resultados Calculados pelo WB para o Novo PPL.	33
Figura 10: Demanda Prevista em Comparação com o Valor Contratado pelo Novo PPL.	34
Figura 11: Demanda Prevista Versus Valor Contratado para Penalidade Igual a 10 Vezes o Custo do GWh.	35
Figura 12: Solução do Problema de Programação Estocástica, com Custo de Penalidade Igual a 10 Vezes o Valor do GWh.	39
Figura 13: Solução Obtida para o PPE, com 3 Cenários e Custo de Penalização Igual a 10 Vezes o Valor do GWh.	40
Figura 14: Solução Obtida para um Custo de Penalidade 1,5 Vezes Maior que o Custo do GWh, para o mesmo PPE com 3 Cenários.	41
Figura 15: Solução Obtida no PPE com Três Cenários de Demanda, para um Custo de Penalidade 1,5 Vezes Maior que o Custo do GWh.	42
Figura 16: Primeira Parte da Planilha de Entrada de Dados para o Problema Real de Contração de Energia.	50
Figura 17: Segunda Parte da Planilha de Entrada de Dados do Problema de Contratação de Energia.	51
Figura 18: Planilha de Solução do Problema de Contratação Ótima de Energia, Utilizada pelo Software WB.	52
Figura 19: Segunda Parte da Planilha de Solução do Problema de	

Contratação Ótima de Energia.	53
Figura 20: Gráfico da Contratação Ótima e Reduções Efetuadas para o Cenário 1 do Problema Proposto.	53
Figura 21: Gráfico da Contratação Ótima e Reduções Efetuadas para o Cenário 2 do Problema Proposto.	54
Figura 22: Representação Teórica do Cálculo do VaR com 95% de Confiança.	56
Figura 23: Cálculo do $\text{VaR}_{95\%}$ para um Caso de Renda Diária.	57
Figura 24: Curva de Probabilidade Acumulada, Simulando o VaR para o Problema da Contratação Ótima de Energia em 9 Cenários.	58

Lista de tabelas

Tabela 1: Sumário das Características dos Modelos do Setor Elétrico Antes e Depois da Reestruturação.	16
Tabela 2: Valores Esperados de Demanda para 3 Cenários.	37
Tabela 3: Requisitos para a Opção de Consumo em Ambiente Livre por Parte do Consumidor.	44