



Hermes Trigo Dias da Silva

**Análise dos Impactos da Utilização das Curvas de
Aversão a Risco no Modelo de Planejamento da
Operação Energética de Médio Prazo**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Reinaldo Castro Souza

Rio de Janeiro
Março de 2012



Hermes Trigo Dias da Silva

**Análise dos Impactos da Utilização das Curvas de
Aversão a Risco no Modelo de Planejamento da
Operação Energética de Médio Prazo**

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. Reinaldo Castro Souza

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. José Francisco Moreira Pessanha

UERJ

Prof. Amaro Olimpio Pereira Junior

COPPE/UFRJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 23 de março de 2012

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

Hermes Trigo Dias da Silva

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2006. Trabalhou 4 anos no Operador Nacional do Sistema Elétrico na área de planejamento da operação energética e, atualmente, trabalha na Empresa de Pesquisa Energética na área de planejamento da geração de energia.

Ficha catalográfica

Silva, Hermes Trigo Dias da

Análise dos Impactos da Utilização das Curvas de Aversão a Risco no Modelo de Planejamento da Operação Energética de Médio Prazo / Hermes Trigo Dias da Silva ; orientador: Reinaldo Castro Souza. – , 2012.

112 f. : il. (color.) ; 30 cm.

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Planejamento da Operação Energética. 3. Sistema Interligado Nacional. 4. Segurança Energética. 5. Curva de Aversão a Risco. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

A Deus, pela existência e por todas as oportunidades de crescimento e aprendizados oferecidas.

À minha família, pelo amor, pelo carinho, pela atenção e pelo apoio constante em todos os momentos da minha vida.

Aos meus amigos Murilo Pereira Soares, Alexandre Rodrigues Nunes, Marcella Lanzetti Daher de Deus e Silvia Regina Gonçalves pelo apoio e incentivo para a conclusão desta dissertação.

Aos meus amigos Manoel Vieira Júnior, Nathalie Vera Mouron e Murilo Pereira Soares pelas trocas de ideias, pelas revisões e pelas contribuições ao presente trabalho.

Aos meus amigos da GPO2 do ONS pelo incentivo e pelos momentos e experiências compartilhados.

Ao meu orientador, prof Reinaldo Castro Souza, pela confiança, pela atenção e pelas orientações fornecidas.

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus amigos da EPE pelo interesse e pelo apoio.

Aos meus amigos da PUC, pela amizade, pelos momentos de estudo e também pelos momentos de confraternização, assim como de incentivo mútuo e constante para com as atividades acadêmicas.

Resumo

Trigo Dias da Silva, Hermes; Souza, Reinaldo Castro. **Análise dos Impactos da Utilização das Curvas de Aversão a Risco no Modelo de Planejamento da Operação Energética de Médio Prazo.** Rio de Janeiro, 2011. 112p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O planejamento da operação energética do Sistema Interligado Nacional - SIN – tem como objetivo a utilização ótima dos recursos do sistema, visando a modicidade tarifária e respeitando-se critérios de segurança e o atendimento a diversas restrições inerentes ao problema da operação do sistema como os usos consuntivos da água, os limites de intercâmbio de energia entre regiões, o despacho de determinadas usinas por razões elétricas entre várias outras. Devido à grande relevância da geração hidroelétrica no sistema elétrico brasileiro é de suma importância para a segurança sistêmica o armazenamento de energia nos reservatórios de usinas hidráulicas através do estoque da água. Esta reserva energética, em montantes satisfatórios, permite o pleno atendimento ao mercado de energia elétrica mesmo em condições hidrológicas desfavoráveis evitando-se o racionamento de energia causador de prejuízos enormes para a economia e a sociedade brasileiras. O mecanismo de segurança através da representação de curvas de armazenamento dos reservatórios equivalentes dos subsistemas passou a ser utilizado após o racionamento de energia ocorrido em 2001. Desde então, diversas alterações ao longo dos anos foram incorporadas ao sistema elétrico brasileiro como o aumento da capacidade de intercâmbio entre regiões, a expansão de usinas termoelétricas com altos custos variáveis unitários, a diminuição da capacidade de regularização, assim como a evolução mercadológica e a expansão das fronteiras do SIN. A presente dissertação analisa os impactos da consideração das curvas de aversão a risco no modelo utilizado para o planejamento da operação energética de médio prazo do SIN levando-se já em consideração o aumento da complexidade sistêmica ao longo desses anos.

Palavras-chave

Curva de aversão a risco; Planejamento da operação energética; Segurança energética; Sistema Interligado Nacional.

Abstract

Trigo Dias da Silva, Hermes; Souza, Reinaldo Castro (Advisor). **Impacts Analysis of the Use of Risk Aversion Curve in Medium-Term Energy Operation Planning Model**. Rio de Janeiro, 2011. 112p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The energy operation planning of National Interconnected System - SIN - aims at optimal utilization of system resources, seeking low tariffs and respecting the criteria of safety and compliance with restrictions inherent to the problem of system operation as consumptive water uses, the limits of energy exchange between regions, the generation demand of certain power plants for electrical reasons among many others. Due to the great importance of hydroelectric generation in the Brazilian electric system, the energy storage in the reservoirs of hydroelectric plants through the water supply is critical for systemic security. This energy reserve, in satisfactory amounts, enables the full market power supply even in unfavorable hydrological conditions avoiding rationing that causes huge losses to the Brazilian economy and society. The security mechanism through the representation of storage curves of the subsystems equivalent reservoirs has been used after the energy rationing occurred in 2001. Since then, many changes over the years have been incorporated into the Brazilian electrical system such as the increased ability of interregional exchanges, the expansion of power plants with high unit variable costs, the decreased ability to regulate the affluences, the market development and the expansion of the SIN boundaries. This dissertation analyzes the impacts with the consideration of the risk aversion curves in the model used for the SIN medium-term energy operation planning already taking into account the increase in systemic complexity over the years.

Palavras-chave

Risk aversion curve; Energy operation planning; Energy security; National Interconnected System.

Sumário

1	Introdução	13
1.1.	Considerações Iniciais	13
1.2.	Objetivo	14
1.3.	Estrutura da Dissertação	14
2	Características do Sistema Interligado Nacional	16
2.1.	Predominância Hidroelétrica	17
2.2.	Complementação Termoelétrica	19
2.3.	Inserção de Fontes Alternativas	23
2.4.	Interligações dos Sistemas Regionais	25
3	Planejamento da Operação Energética de Médio Prazo	27
3.1.	Características Gerais	27
3.2.	Formulação do Problema	29
3.2.1.	Função Objetivo	31
3.2.2.	Restrições do Problema	32
4	Curvas de Aversão a Risco	37
4.1.	Metodologia de Cálculo da CAR	38
4.2.	Curva de Aversão a Risco da Região Sudeste/Centro-Oeste	40
4.3.	Curva de Aversão a Risco da Região Sul	43
4.4.	Curva de Aversão a Risco da Região Nordeste	46
4.5.	Curva de Operação da Região Norte	50
5	Casos de Estudo	54
5.1.	Introdução	54
5.2.	Cenário de Referência	55
5.2.1.	Carga de Energia	56
5.2.2.	Limites de Intercâmbio de Energia entre Regiões	58
5.2.3.	Geração de Pequenas Usinas	60
5.2.4.	Oferta de Energia Hidráulica	61
5.2.5.	Oferta de Energia Térmica	62
5.3.	Cenários de Sensibilidade	64
5.4.	Resultados	67

5.4.1. Cenário de Referência	67
5.4.2. Cenário de Sensibilidade 1 (CS1)	88
5.4.3. Cenário de Sensibilidade 2 (CS2)	96
6 Conclusões e Trabalhos Futuros	105
6.1. Considerações Gerais	105
6.2. Conclusões	106
6.3. Trabalhos Futuros	108

Lista de figuras

Figura 2.1 – Capacidade instalada do SIN – 31/12/2010	17
Figura 2.2 – Média mensal da Energia Natural Afluente – Histórico de 1931 a 2009	18
Figura 2.3 – Complementação térmica – Geração verificada no ano de 2010	20
Figura 2.4 – Distribuição dos custos variáveis unitários por fonte	21
Figura 2.5 – Participação das fontes na capacidade térmica instalada	22
Figura 2.6 – Previsão de geração das usinas não simuladas – PMO Jan/2011	24
Figura 2.7 – Integração eletroenergética das bacias hidrográficas do SIN	26
Figura 3.1 – Tomada de decisão e possíveis consequências operativas	28
Figura 3.2 – Funções de custo imediato, custo futuro e custo total de operação	29
Figura 3.3 – Sistema equivalente de energia	30
Figura 4.1 – Histórico das Curvas de Aversão a Risco do subsistema SE/CO	41
Figura 4.2 – Comparação dos armazenamentos verificados e das CAR para o subsistema Sudeste/Centro-Oeste	42
Figura 4.3 – Curva de Aversão a Risco 2011-2012 do subsistema Sudeste/Centro-Oeste	43
Figura 4.4 – Histórico da Curvas de Aversão a Risco do subsistema Sul	44
Figura 4.5 – Comparação dos armazenamentos verificados e das CAR para o subsistema Sul	45
Figura 4.6 – Curva de Aversão a Risco 2011-2012 do subsistema Sul	46
Figura 4.7 – Histórico da Curvas de Aversão a Risco do subsistema Nordeste	47
Figura 4.8 – Comparação dos armazenamentos verificados e das CAR para o subsistema Nordeste	48
Figura 4.9 – Curva de Aversão a Risco 2011-2012 do subsistema Nordeste	49
Figura 4.10 – Histórico da Curvas de Operação do Norte	51
Figura 4.11 – Comparação dos armazenamentos verificados e das CON para o subsistema Norte	52

Figura 4.12 – Curva de Operação do Norte 2011-2015	52
Figura 5.1 – Representação dos subsistemas equivalentes	55
Figura 5.2 – Carga de energia do subsistema Sudeste/Centro-Oeste	56
Figura 5.3 – Carga de energia do subsistema Sul	57
Figura 5.4 – Carga de energia do subsistema Nordeste	57
Figura 5.5 – Carga de energia do subsistema Norte	58
Figura 5.6 – Cenários de mercado de energia alternativos – Subsistema Sudeste/Centro-Oeste	65
Figura 5.8 – Cenários de mercado de energia alternativos – Subsistema Nordeste	66
Figura 5.9 – Cenários de mercado de energia alternativos – Subsistema Norte	66
Figura 5.10 – Energia armazenada ao final de cada mês – CR – Sudeste/Centro-Oeste	69
Figura 5.11 – Energia armazenada ao final de cada mês – CR – Sul	69
Figura 5.12 – Energia armazenada ao final de cada mês – CR – Nordeste	70
Figura 5.13 – Energia armazenada ao final de cada mês – CR – Norte	70
Figura 5.14 – Energia armazenada ao final de cada mês – CR – SIN	71
Figura 5.15 – Custo marginal de operação – CR – Sudeste/Centro-Oeste	72
Figura 5.16 – Custo marginal de operação – CR – Sul	73
Figura 5.17 – Custo marginal de operação – CR – Nordeste	73
Figura 5.18 – Custo marginal de operação – CR – Norte	74
Figura 5.19 – Vertimento – CR – Subsistema Sudeste/Centro-Oeste	75
Figura 5.20 – Vertimento – CR – Subsistema Sul	75
Figura 5.21 – Vertimento – CR – Subsistema Nordeste	76
Figura 5.22 – Vertimento – CR – Subsistema Norte	76
Figura 5.23 – Geração Hidráulica – CR – Subsistema Sudeste/Centro-Oeste	77
Figura 5.24 – Geração Hidráulica – CR – Subsistema Sul	77
Figura 5.25 – Geração Hidráulica – CR – Subsistema Nordeste	78
Figura 5.26 – Geração Hidráulica – CR – Subsistema Norte	78
Figura 5.27 – Geração Térmica – CR – Subsistema Sudeste/Centro-Oeste	80
Figura 5.28 – Geração Térmica – CR – Subsistema Sul	81
Figura 5.29 – Geração Térmica – CR – Subsistema Nordeste	81
Figura 5.30 – Geração Térmica – CR – Subsistema Norte	82

Figura 5.31 – CMO médio anual – CR – Subsistema Sudeste/Centro-Oeste	83
Figura 5.32 – CMO médio anual – CR – Subsistema Sul	83
Figura 5.33 – CMO médio anual – CR – Subsistema Nordeste	84
Figura 5.34 – CMO médio anual – CR – Subsistema Norte	84
Figura 5.35 – Valor esperado da energia não suprida – CR – Subsistema Sudeste/Centro-Oeste	85
Figura 5.36 – Valor esperado da energia não suprida – CR – Subsistema Sul	86
Figura 5.37 – Valor esperado da energia não suprida – CR – Subsistema Nordeste	86
Figura 5.38 – Valor esperado da energia não suprida – CR – Subsistema Norte	87
Figura 5.39 – Custo total de operação – CR	88
Figura 5.40 – Energia armazenada ao final de cada mês – CS1	89
Figura 5.41 – Energia armazenada ao final de cada mês – CS1 – SIN	90
Figura 5.42 – Custo marginal de operação – CS1	91
Figura 5.43 – Vertimento – CS1	92
Figura 5.44 – Geração hidráulica – CS1	92
Figura 5.45 – Geração térmica – CS1	93
Figura 5.46 – CMO médio anual – CS1	94
Figura 5.47 – Valor esperado da energia não suprida – CS1	95
Figura 5.48 – Custo total de operação – CS1	96
Figura 5.49 – Energia armazenada ao final de cada mês – CS2	97
Figura 5.50 – Energia armazenada ao final de cada mês – CS2 – SIN	98
Figura 5.51 – Custo marginal de operação – CS2	99
Figura 5.52 – Vertimento – CS2	99
Figura 5.53 – Geração hidráulica – CS2	100
Figura 5.54 – Geração térmica – CS2	102
Figura 5.55 – CMO médio anual – CS2	102
Figura 5.56 – Valor esperado da energia não suprida – CS2	103
Figura 5.57 – Custo total de operação – CS2	104

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Curva de Aversão a Risco 2011-2012 do subsistema Sudeste/Centro-Oeste	43
Tabela 4.2 – Curva de Aversão a Risco 2011-2012 do subsistema Sul	46
Tabela 4.3 – Curva de Aversão a Risco 2011-2012 do subsistema Nordeste	49
Tabela 4.4 – Curva de Operação do Norte 2011-2015	53
Tabela 5.1 – Aproveitamentos hidroelétricos existentes no SIN	61
Tabela 5.2 – Usinas térmicas despachadas centralizadamente	62
Tabela 5.3 – Usinas térmicas despachadas centralizadamente	63
Tabela 5.4 – Energia armazenável máxima – Sudeste/Centro-Oeste	68
Tabela 5.5 – Energia armazenável máxima – Sul	68
Tabela 5.6 – Energia armazenável máxima – Nordeste	68
Tabela 5.7 – Energia armazenável máxima – Norte	68