



**André Gustavo Salcedo Teixeira Mendes**

**Impactos da Criação do Mercado  
Interruptível de Gás Natural**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Álvaro de Lima Veiga Filho

Co-orientador: Mário Veiga Ferraz Pereira

Rio de Janeiro

Junho de 2006



**André Gustavo Salcedo Teixeira Mendes**

**Impactos da Criação do Mercado  
Interruptível de Gás Natural**

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. Álvaro de Lima Veiga Filho**  
**Orientador**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. Mario Veiga Ferraz Pereira**  
**Co-orientador**

PSR Consultoria Ltda

**Profa. Mônica Barros**

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Prof. Sérgio Granville**

PSR Consultoria Ltda

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 23 de junho de 2006

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

### **André Gustavo Salcedo Teixeira Mendes**

Graduou-se em Engenharia de Produção e Elétrica na PUC-RJ em 2000 na área de Sistemas de Apoio à Decisão e Controle de Processos. Atuou em análise de risco de mercado e financeiro no Banco do Brasil. Atualmente trabalha na Área de Mercado de Capitais do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES.

#### Ficha catalográfica

Mendes, André Gustavo Salcedo Teixeira

Impactos da Criação do Mercado Interruptível de Gás Natural / André Gustavo Salcedo Teixeira Mendes ; orientador: Álvaro de Lima Veiga Filho ; co-orientador: Mário Veiga Ferraz Pereira. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

94 f. ; 30 cm

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Mercado secundário. 3. Mercado flexível. 4. Contratos de fornecimento interruptível. 5. Gás natural. 6. Otimização estocástica. 7. Programação linear. 8. Risco de contratação. I. Veiga Filho, Álvaro de Lima. II. Pereira, Mário Veiga Ferraz. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 624

À minha família.  
À minha esposa Aline.

## Agradecimentos

À minha família, pela educação e apoio em todas as etapas da minha vida, em especial à minha esposa Aline pelo carinho, amor e suporte neste longo trabalho.

Aos colegas e amigos do Banco do Brasil pelo incentivo em iniciar o Mestrado, dentre eles cito, Francisco Cláudio Duda, Francisco Mamede, Augusto Frederico e Luiz Gonzaga.

Em especial, agradeço ao orientador Mario Veiga Pereira pela oportunidade de realização deste trabalho e pela orientação indispensável em todas as etapas do desenvolvimento. Dentre os integrantes da sua equipe, destaco Luiz Augusto Barroso pela inabalável disposição na ajuda em confeccionar este trabalho.

Ao professor e orientador Dr. Álvaro Lima Veiga pelas aulas, motivação e estímulo nestes anos.

Aos amigos Raphael Chabar e Alexandre Street pelo incentivo e ajuda, de forma direta e indireta, para a realização deste trabalho.

Às empresas PSR e Mercados por disponibilizarem espaço e infra-estrutura imprescindíveis ao desenvolvimento deste trabalho.

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos e pela ótima infra-estrutura.

## Resumo

Mendes, André Gustavo Salcedo Teixeira; Veiga Filho, Álvaro de Lima (Orientador). **Impactos da Criação do Mercado Interruptível de Gás Natural**. Rio de Janeiro, 2005, 94p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

O desenvolvimento da indústria de Gás Natural pelo mundo resultou em um processo de integração entre os setores de gás natural e eletricidade em diversos países. Entretanto, em alguns casos, como o Brasil, apesar de a demanda de gás para uso convencional (industrial, comercial, residencial, GNV) ter crescido a taxas relativamente altas, ela sozinha ainda não justifica novos grandes investimentos na produção e no transporte de gás. Verifica-se que, neste caso, o setor de energia desempenha um papel indispensável por se tratar do maior mercado potencial de gás natural, com a escala suficiente para ser a âncora de demanda que viabiliza os investimentos em produção e transporte do gás. Todavia, devido à predominância hidrológica no sistema elétrico Brasileiro, o despacho das térmicas é bastante volátil e, por consequência, o consumo de gás das térmicas é bastante variável. Assim, o produtor de gás está sujeito a um fluxo de caixa muito volátil e incerto e cláusulas de compra compulsória de gás (*take-or-pay*) e de remuneração do custo da infra-estrutura (*ship-or-pay*) são observadas. Enquanto estas cláusulas trazem certeza necessária para viabilizar a produção, elas oneram excessivamente os custos das Usinas Térmicas, que se vêem obrigadas a pagar pelo combustível e, portanto, gerar, mesmo quando o preço da energia esteja inferior ao seu custo marginal de produção. Tendo em vista este cenário, foi recentemente discutida no âmbito do Governo Federal a criação de um mercado flexível de gás natural, onde contratos interruptíveis de gás (lastreados no *take-or-pay* das térmicas) seriam fornecidos a consumidores industriais. Nestes contratos, o fornecimento seria interrompido se a Usina Térmica fosse despachada. O objetivo desta tese é analisar a criação deste mercado sob a ótica dos consumidores. Será verificada a “disposição” a pagar por um contrato interruptível de gás levando em consideração a incerteza associada ao suprimento (que depende da prioridade de uso do gás pelas térmicas) e o perfil de risco destes consumidores.

## Palavras-chave

Engenharia Elétrica, Mercado Secundário, Gás Natural, VAR, Otimização Estocástica, Programação Linear, Risco de Contratação

## Abstract

Mendes, André Gustavo Salcedo Teixeira, Veiga Filho, Álvaro de Lima (Advisor). **Impacts due to the Creation of a Secondary Market of Natural Gas**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. 94p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

With the development of the gas industry worldwide, a process of strengthening the integration between the natural gas and the electricity sectors is underway in several countries. However, although gas demand has been growing at relatively high rates, this demand growth solely is unlikely to justify new large investments in gas production and transportation. This means that the power sector ends up being the largest potential market for natural gas, with the needed scale to provide the necessary anchor demand to spur these production and infrastructure investments. The hydro predominance in the country creates volatility on the dispatch of the gas-fired plants, which ends up creating an undesirable (from the gas-sector point of view) volatility in the natural gas consumption. Since the gas-market is still incipient, gas contracts are typically of long-term with high “take or pay” and “ship or pay” clauses to ensure financing of the production-transportation infrastructure. From the power sector point of view, these clauses are undesirable: due to the uncertainty of dispatch gas-based generators want to negotiate a higher flexibility. As such, the aim of this work is to determine the impacts due to the creation of a flexible (secondary) gas market from the costumers’ point of view. It will be also developed the costumers’ will-to-contract curve, which will take into account the uncertainty of thermoelectric dispatch (that rules the gas availability over this new proposed market) and the risk-profile of costumers.

## Keywords

Electrical Engineering, Secondary Market, Natural Gas, VAR, Stochastic Optimization, Linear Programming, Contract RisksSumário

# Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Imperfeições do Mercado de Gás Natural.....	13
1.1.1	Importância das Térmicas.....	14
1.1.2	Volatilidade do Despacho Térmico em Sistemas Hidrotérmicos.....	15
1.1.3	Cláusulas de <i>Take-or-Pay/Ship-or-Pay</i> .....	15
1.1.4	Estratégia Operativa da Usina Termoelétrica.....	16
1.2	Mercados Flexíveis.....	17
1.2.1	Pontos Relevantes.....	18
1.3	Objetivo.....	19
1.4	Organização da Tese.....	19
2	O MERCADO DE GÁS NATURAL.....	21
2.1	Reservas e Oferta de Gás Natural.....	21
2.2	Exploração, Produção, Transporte e Distribuição.....	24
2.3	Consumo.....	26
3	OPERAÇÃO DAS TÉRMICAS E SISTEMAS HIDROTÉRMICOS.....	28
3.1	Sistemas Hidrotérmicos.....	28
3.1.1	Custos de oportunidade.....	28
3.1.2	Árvore de decisões.....	29
3.1.3	Custos Operacionais Imediatos e Futuros.....	30
3.1.4	Valor da água.....	31
3.1.5	Formulação do Despacho Hidrotérmico para uma Etapa.....	32
3.1.6	Solução do Problema e Custos Marginais.....	34
3.1.7	Exemplo.....	34
3.2	Cálculo da Função de Custo Futuro.....	36
4	MERCADO FLEXÍVEL DE GÁS.....	37
5	EQUILÍBRIO ENTRE RISCO E GANHO.....	42
5.1	O Modelo de Otimização de Portfolios de Markowitz.....	43
5.2	Value at risk (VaR).....	47
5.3	Downside Risk.....	48
5.4	Arrependimento.....	52
5.5	Funções de Utilidade.....	52
5.5.1	O Equivalente à Certeza.....	53
5.5.2	Exemplo.....	54
6	CÁLCULO DO VOLUME DE GÁS NATURAL DISPONÍVEL PARA O MERCADO FLEXÍVEL.....	57
6.1	Estudo de Caso.....	59



7	CURVA DE DISPOSIÇÃO A CONTRATAR DOS CONSUMIDORES .....	61
7.1	Cálculo da despesa .....	62
7.2	Formação da CDC .....	64
7.3	Medida de aversão ao risco .....	69
7.3.1	Exemplo.....	74
8	PERFIL DE AVERSÃO AO RISCO DOS CONSUMIDORES.....	76
9	CÁLCULO DO PREÇO DE EQUILÍBRIO DO LEILÃO POR MEIO DA CDC.....	78
9.1.1	Simulação do Leilão .....	80
10	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	82
11	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	85
	ANEXO I – Despacho Hidrotérmico Centralizado .....	87
	ANEXO II – Contratos de Combustível com Cláusulas de <i>Take-or-Pay</i> .....	87
	ANEXO III – CÁLCULO DA FUNÇÃO DE CUSTO FUTURO EM SISTEMAS HIDROTÉRMICOS .....	91
	ANEXO IV – Relação entre Valor Esperado da Renda e Equivalente a Certeza.....	91

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Redução da Demanda devido à criação do Mercado Flexível de Gás Natural.....	18
Figura 2.1 – Estrutura física do setor de gás natural ( <i>Fonte: Petrobrás</i> ).....	24
Figura 2.2 – Esquema ilustrativo das etapas de exploração, produção, transporte e distribuição.....	25
Figura 3.1 – Processo Decisório em Sistemas Hidrotérmicos.....	29
Figura 3.2 – Custos Imediatos e Futuros contra Armazenamento Final.....	30
Figura 3.3 – Cálculo da FCF.....	31
Figura 3.4 – Programação Hidrelétrica Ótima.....	32
Figura 3.5 – Balanço hídrico do reservatório.....	33
Figura 3.6 – Função de Custo Futuro.....	35
Figura 4.1 – Histórico de preços spot do Sudeste (janeiro/00 a julho/06).....	37
Figura 4.2 – Projeção da demanda total (distribuidora + lastro + refinarias da Petrobrás).....	39
Figura 5.1 – Distribuição da Geração.....	44
Figura 5.2 – Medida de Risco.....	45
Figura 5.3 – Portfolios de Variância Mínima.....	46
Figura 5.4 – O Conceito de VaR.....	47
Figura 5.5 – Distribuições de Retorno Assimétricas.....	49
Figura 5.6 – Fronteira Eficiente – Downside Risk.....	50
Figura 5.7 – Tipos de Função de Utilidade.....	53
Figura 5.8 – Calculo do Equivalente a Certeza (avesso a risco).....	54
Figura 5.9 – Possível Função Utilidade.....	55
Figura 5.10 – Equivalente a Certeza.....	56
Figura 6.1 – Percentual de Gás utilizado pelas Usinas Térmicas ao longo do período 2010-2012.....	59
Figura 7.1 – Curva de Disposição a Contratar – Caso Simplificado.....	65
Figura 7.2 – Exemplificação Gráfica do Problema.....	67
Figura 7.3 – Exemplificação Gráfica do Problema (1).....	67
Figura 7.4 – Exemplificação Gráfica do Problema (2).....	68

Figura 7.5 – Exemplificação Gráfica do Problema (3).....	68
Figura 7.6 – Curva de Disposição a Contratar – Sem restrição de risco .....	69
Figura 7.7 – Representação Gráfica do problema com restrição de risco (1) .....	71
Figura 7.8 – Representação Gráfica da adaptação gerada pela restrição de risco (1).....	72
Figura 7.9 – Representação Gráfica do problema com restrição de risco (2) .....	73
Figura 7.10 – Representação Gráfica da adaptação gerada pela restrição de risco (2) .....	73
Figura 7.11 – Curva de Disposição a Contratar – Caso Hipotético com Restrição de Risco .....	74
Figura 7.12 – Curva de Disposição a Contratar de 5 consumidores – Caso Hipotético com Restrição de Risco .....	75
Figura 8.1 – Distribuição do consumo industrial de gás para geração de energia – Fonte: Ministério das Minas e energia .....	76
Figura 9.1 – Estratégia de Contratação de Cada Consumidor.....	79
Figura 9.2 – CDC Acumulada .....	80
Figura 9.3 – CDC Agregada com Preço de Equilíbrio do Leilão.....	81
Figura A.1 – Histórico de preços spot do Sudeste.....	89
Figura A.1 – Definição dos Estados do Sistema. ....	91
Figura A.2 – Cálculo da Decisão Ótima por Cenário - Último Estágio .....	91
Figura A.3 – Cálculo do primeiro segmento da FCF .....	92
Figura A.4 – FCF Linear por partes para o Estágio T-1 .....	92
Figura A.5 – Cálculo do custo operativo para o estágio T-1 e FCF para T-2. ....	93

## Lista de Tabela

Tabela 2.1 – produção doméstica de gás natural (fonte: ANP).....	23
Tabela 2.2 – Vendas anuais de gás natural pelas distribuidoras ( <i>fonte: ANP</i> ).....	27
Tabela 3.1 – Características da Hidrelétrica.....	34
Tabela 3.2 – Despacho Ótimo – Sistema Hidrotérmico.....	35
Tabela 5.1 – Geração das Usinas.....	43
Tabela 8.1 – Consumidores .....	76
Tabela 8.2 – Consumidores (Perfil de Risco e Preço Alternativo).....	77