



**Sylvia Telles Ribeiro**

**Precificação Ótima dos Contratos de Gás Natural na  
Modalidade Interruptível**

**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. Alexandre Street de Aguiar

Co-orientador: Prof. Cristiano Augusto Coelho Fernandes

Rio de Janeiro

Abril de 2009



**Sylvia Telles Ribeiro**

**Precificação Ótima dos Contratos de Gás Natural na  
Modalidade Interruptível**

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.

**Dr. Alexandre Street de Aguiar**  
**Orientador**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Dr. Cristiano Augusto Coelho Fernandes**  
**Co-Orientador**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Dr. Luiz Augusto Nóbrega Barroso**  
PSR Consultoria

**Dr. Delberis Araújo Lima**  
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

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

Rio de Janeiro, 28 de abril de 2009

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

## **Sylvia Telles Ribeiro**

Graduou-se em Economia na PUC-RJ em 2003. Desde 2004, trabalha com gestão e otimização de Portfólio da área de Gás e Energia da Petrobras.

### Ficha Catalográfica

Ribeiro, Sylvia Telles

Precificação Ótima dos Contratos de Gás Natural na Modalidade Interruptível / Sylvia Telles Ribeiro; orientador: Alexandre Street de Aguiar; co-orientador: Cristiano Augusto Coelho Fernandes. – 2009.

78 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Precificação ótima. 3. Contratos Interruptíveis. 4. Otimização Estocástica 5 – Medidas de Risco. I. Aguiar, Alexandre Street de, II. Fernandes, Cristiano Augusto Coelho. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

À minha mãe, Marina Figueira de Mello. Por tudo.

## Agradecimentos

À Minha família, que me deu todo amor, proteção e suporte que precisei nessa vida, com especial carinho para meu irmão Guilherme, meu tio Sérgio, meu tio Gustavo, e Amilcar.

Às minhas amoras, que sempre me apoiaram em todos os momentos importantes da minha vida. Dentre elas, destaco Amanda Cavalcanti, Andrea Canedo, Luisa Prochnik, Izabel Ramos, Joana Cotrim, Julia Boohrem, Márcia Seixas, Patrícia Fernandes e Raquel Tessarollo.

Aos meus expoentes profissionais, estrelas que brilharam para mim e me ajudaram a brilhar profissionalmente: Mario Jorge, Alexandre Silvestre, , João Alberto, Marcus Moacyr, Luciana Rachid e Graça Foster.

Aos meus colegas de equipe da PAE, por todo apoio e compreensão durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus queridos professores, que me abriram tantas portas e acreditaram em mim, Rogério Werneck, Cristiano Fernandes e Marco Antônio Guimarães.

Um agradecimento especial ao meu orientador Alexandre Street, por ter sido incansável, um apoio mais que indispensável à realização desse trabalho.

## Resumo

Ribeiro, Sylvia Telles; Aguiar, Alexandre Street de (Orientador); Fernandes, Cristiano Augusto Coelho (Co-Orientador). **Precificação Ótima dos Contratos de Gás Natural na Modalidade Interruptível**. Rio de Janeiro, 2009. 78p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O segmento industrial desempenha um importante papel no desenvolvimento do setor de gás Brasileiro. Em função dos baixos preços e dos incentivos dados pelo governo para a conversão dos processos industriais (muitos deles dependentes do óleo combustível) para o gás natural, criou-se uma fonte de demanda “firme” deste combustível. Como as termelétricas operam em regime de complementariedade ao sistema hidrelétrico (sendo coordenadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) elétrico e chamadas a gerar apenas em situações hidrológicas “desfavoráveis”), o consumo de gás termelétrico ocorre de forma esporádica. Uma forma de se aumentar a eficiência do uso do gás, mesclando duas classes de consumidores se dá através dos contratos interruptíveis, que proporcionam ao produtor a capacidade de atender consumidores industriais bi-combustível (gás e óleo por exemplo) com o gás ocioso das termelétricas. Como a atratividade deste contrato depende do desconto dado com relação ao preço do contrato firme, que não é interrompido, o objetivo deste trabalho é a construção de um modelo analítico para a determinação do preço ótimo dos contratos de fornecimento de gás interruptíveis, por parte de um produtor monopolista. O consumo de gás das termelétricas será considerado como principal fonte de incerteza do modelo, que por sua vez será caracterizada através de cenários de operação ótima do sistema elétrico, simulados conforme a metodologia utilizada pelo ONS. O perfil de risco do produtor será caracterizado pelo Conditional Value-at-Risk (CVaR).

## Palavras-chave

Gás Natural, Termelétrica, GNL, Contratos de Fornecimento Interruptível, CVaR, Otimização Estocástica, Decisão sob Incerteza, risco.

## Abstract

Ribeiro, Sylvia Telles; Aguiar, Alexandre Street de (Advisor); Fernandes, Cristiano Augusto Coelho (Co-Advisor). **Optimal Pricing of Natural Gas Flexible Contracts**. Rio de Janeiro, 2009. 78p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Brazilian natural gas industry growth has been led by electricity supply. As hydro plants generate at lower costs, thermal units only produce when hydro electricity is insufficient. This makes natural gas consumption highly volatile: Either all thermal units generate together or don't. When all units generate together, the gas trader has to buy LNG - Liquefied Natural Gas at the spot market incurring price risk. This risk can be mitigated in case the gas trader is able to sell flexible contracts to the industrial sector that can be interrupted in case of thermal generation. Thus the gas volume sold under flexible contracts is used either by thermal generation or by the industrial sector, virtually reducing total demand and avoiding emergency LNG purchases. The determination of the optimal price for these contracts is the aim of this dissertation. The determination model proposed will try to maximize a convex combination of CVaR – Conditional Value at Risk NPV – Net Present Value and trader's profit NPV.

## Keywords

Natural gas, Thermal plants, Flexible Contracts, CVaR, Stochastic Optimization, Decision under Uncertainty, Risk.

## Sumário

1	Introdução	13
1.1	Histórico e Motivação	13
1.2	Lucro do Comercializador no fornecimento de gás natural	20
1.3	Objetivo	22
1.4	Organização da Dissertação	23
2	Mercado de Gás Natural no Brasil	25
2.1	Consumo de gás – termelétrico vs não termelétrico	25
2.2	Contratos Firmes	28
2.3	Contratos Preferenciais ou Termelétricos	29
2.4	Contratos Interruptíveis	30
3	Medidas de Risco e Decisão sobre incerteza	34
3.1	Decisão Sob Incerteza	34
3.2	Modelagem das Incertezas	35
3.3	Teoria da Utilidade	36
3.4	Medidas de Risco	36
3.4.1	Teoria de Portfólio de Markowitz	37
3.4.2	O VaR – <i>Value at Risk</i>	39
3.4.3	O CVaR – <i>Conditional Value at Risk</i>	40
4	Metodologia para Determinação do Preço Ótimo para Contratos Interruptíveis	43
4.1	Oferta e Demanda de Gás Natural no Brasil.	43
4.1.1	Composição da Oferta	43
4.1.2	Balanço de Compra e Venda	45
4.2	Equação de Lucro do Comercializador	46
4.2.1	Formação dos Custos	46
4.2.2	Formação das Receitas	50
4.3	O Problema de otimização do Comercializador	51
5	Estudo de caso	55
5.1	Premissas de Receitas e Custos	55
5.1.1	Preços Firme e Termoelétrico	55
5.1.2	Preços de GNL	56
5.1.3	Custo do Gás Firme	58
5.1.4	Quantidades Contratadas	59
5.2	Premissas de Despacho	60
5.3	Penalidades	60
5.4	Horizonte Temporal	61
5.5	Outras Premissas Relevantes	62
5.6	Resultados	62
5.7	Equilíbrio Competitivo versus Equilíbrio de Monopólio	64
5.8	Sensibilidades	67
5.8.1	Sensibilidades em relação à $\lambda$ :	67
5.8.2	Sensibilidades para Preço de GNL	69



5.8.3	Outras Sensibilidades de Interesse	70
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	72
6.1	Trabalhos Futuros	73
7	Referências bibliográficas	74
	ANEXO A – Cálculo da Curva de Disposição a Contratar dos Consumidores Industriais	77

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Histórico e Motivação.....	13
Figura 1.2 – Evolução da Matriz Energética Brasileira.....	16
Figura 1.3 – Balanço de Oferta e Demanda de Gás Natural no Brasil...	17
Figura 2.1 – Sazonalidade no Consumo de Gás Natural Argentino.....	26
Figura 2.1 – Tornando firme um consumo flexível.....	32
Figura 2-2 – Atendimento dos Contratos Flexíveis.....	32
Figura 3.1 – Decisões de Dois Estágios.....	35
Figura 3.2 – Fronteira Eficiente de Markowitz.....	38
Figura 3.3 – VaR – Value at Risk.....	39
Figura 3.4 – CVaR – Conditional Value at Risk.....	41
Figura 4.1 – Balanço de Compra e Venda.....	45
Figura 4.2 – Prêmio do GNL como Função do volume Demandado....	49
Figura 4.3 – Otimização pela escolha de $P^{I*}$ .....	54
Figura 5.1 – Métrica para $\lambda = 95\%$ .....	63
Figura 5.2 – Equilíbrio Competitivo vs Monopolista.....	66
Figura 5.3 – Sensibilidades para $\lambda$ .....	68
Figura 5.4 – Sensibilidades para Preços de GNL.....	69
Figura A.1 – Distribuição do consumo industrial de gás para geração de energia.....	78

## Lista de Tabelas

Tabela 5.1 – Premissas de Volume.....	59
Tabela 5.2 – Premissas de Preço.....	59
Tabela 5.3 – Comparação entre hipótese competitiva e modelo monopolista (desvio monopolista).....	66
Tabela 5.4 – Sensibilidades para $\lambda$ .....	68
Tabela A.1 - Curva de Demanda por contratos interruptíveis como função do preço.....	78

## Siglas utilizadas

GNL – Gás Natural Liquefeito

SDDP - stochastic **dual** dynamic programming

VaR – Value at Risk

cVaR – Conditional Value at Risk. Introdução