



**Patricia Soares de Andrade Caldas**

**Teoria das Opções Reais Aplicada a uma planta de  
Fertilizantes nitrogenados considerando a  
flexibilidade no Suprimento de energia**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Administração de Empresas da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Administração de Empresas

Orientador: Prof. Luiz Eduardo Teixeira Brandão

Rio de Janeiro

Abril de 2014



**Patricia Soares de Andrade Caldas**

**Teoria das Opções Reais Aplicada a uma planta de  
Fertilizantes nitrogenados considerando a  
flexibilidade no Suprimento de energia**

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

**Prof. Luiz Eduardo Teixeira Brandão**

Orientador

Departamento de Administração – PUC-Rio

**Prof. Leonardo Lima Gomes**

Departamento de Administração - PUC-Rio

**Prof. Carlos de Lamare Bastian Pinto**

Grupo IBMEC

**Prof<sup>a</sup>. Mônica Herz**

Vice-Decana de Pós-Graduação do CCS – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 02 de abril de 2014

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

### **Patricia Soares de Andrade Caldas**

Engenheira de produção graduada pela UFF (Universidade Federal Fluminense). Especialista em Engenharia de Processamento de Petróleo pela PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro). Possui interesse em avaliação de projetos de investimento que utilizam gás natural como insumo energético utilizando opções reais. Atua como Consultora de Planejamento na gerência de Implantação de Empreendimentos de Transformação Química do Gás na diretoria de Gás e Energia da Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.).

#### Ficha Catalográfica

Caldas, Patricia Soares de Andrade

Teoria das opções reais aplicada a uma planta de fertilizantes nitrogenados considerando a flexibilidade no suprimento de energia / Patricia Soares de Andrade Caldas; orientador: Luiz Eduardo Teixeira Brandão. – 2014.

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

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Administração, 2014.

Inclui bibliografia

1. Administração – Teses. 2. Opções reais. 3. Gás natural. 4. GNL. 5. Planta de fertilizantes nitrogenados. I. Brandão, Luiz Eduardo Teixeira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Administração. III. Título.

CDD: 658

## Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a minha família, por me transmitir todos os valores e ensinamentos que me fizeram alcançar diversas conquistas. Em especial minha mãe, Maria das Graças, meu maior exemplo de caráter, em quem me inspiro nos momentos em que preciso ser persistente, na busca por conhecimento e na contínua transformação da vida na busca por melhorias. Ao meu pai, Eduardo, por estar sempre ao meu lado e acreditar no potencial das minhas escolhas. À minha irmã, Caroline, por ser uma excelente escritora, por me inspirar e me fazer acreditar que esta não seria uma tarefa impossível.

Agradeço meu noivo Bruno, que esteve ao meu lado durante todo o período me apoiando, incentivando, e muitas vezes estudando comigo, abrindo mão de muito do seu tempo de lazer, contribuindo imensamente para a conclusão deste curso. Pelo carinho, compreensão e inspiração.

Ao meu orientador, Professor Luiz Brandão, devo a honra de compartilhar seus ensinamentos, conhecimento, orientação e apoio, não só técnico como psicológico, principalmente durante os intensos meses ao final do curso até a entrega da última versão deste trabalho. Agradeço a sua disciplina, cordialidade, prontidão, serenidade, metodologia objetiva em conjunto com uma excelente habilidade de orientação.

À Petrobras, como instituição, por me fornecer as ideias e material para a elaboração deste trabalho. Às minhas amigas Renata e Cyntia, por me incentivarem, apoiarem as minhas escolhas e pela amizade de todos os dias.

Aos meus colegas de classe, que tornaram os dias de aulas, muitas vezes cansativos, momentos muito agradáveis, descontraídos e divertidos. Em especial agradeço ao Armando Antunes, Fernando Teixeira, Rodrigo Gil e Ricardo Bastos, que me receberam de braços abertos nas aulas de finanças e fizeram valer a máxima de que a união faz a força.

Aos meus tios Delano e Maura, por me acolherem de forma generosa, diminuindo o estresse da rotina de morar distante do trabalho e da PUC, me incentivando a dar continuidade ao curso iniciado em 2010, e sem os quais a conclusão deste curso não seria possível. Agradeço de forma igual aos meus primos Ana Luísa, André Luís e Adriana Lília, por serem coniventes com o acolhimento oferecido pelos seus pais e por me fazerem me sentir em casa em Botafogo até os últimos instantes do mestrado.

Aos demais professores da PUC, agradeço por contribuírem com excelentes aulas e ensinamentos de alta qualidade transmitidos. Em último lugar, porém não menos importante, agradeço aos demais funcionários da PUC que sempre foram extremamente profissionais, atenciosos, organizados e prontos a atenderem aos alunos a qualquer momento.

## Resumo

Caldas, Patricia Soares de Andrade; Brandão, Luiz Eduardo Teixeira. **Teoria das Opções Reais Aplicada a uma planta de Fertilizantes Nitrogenados Considerando a Flexibilidade no Suprimento de Energia.** Rio de Janeiro, 2014. 96p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Administração, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este estudo tem como motivação as incertezas relacionadas ao suprimento de gás natural no Brasil nos próximos anos em função de possíveis atrasos nos projetos do Pré-Sal. Para mitigar o risco da produção de gás natural ficar aquém da planejada para os próximos anos, a Petrobras vem ampliando as alternativas para a oferta de gás natural através da construção de terminais de regaseificação de Gás Natural Liquefeito (GNL). Dentro deste cenário é analisada a viabilidade de construção de um Complexo Gás-químico para a produção de fertilizante nitrogenado e outros produtos químicos, considerando que a planta tem a opção de complementar o suprimento pleno do complexo por meio da importação de GNL nos períodos em que a oferta de gás natural for insuficiente para atender o consumo total desta planta. É utilizada a distribuição triangular e processos estocásticos de reversão à média para modelar as incertezas relativas às variáveis suprimento e preço, respectivamente, e simulação de Monte Carlo para o apreamento da opção de troca de insumos. Os resultados obtidos indicam que a opção por GNL como complementação do suprimento pleno do Complexo aumenta o valor do projeto, comprovando que este é uma alternativa economicamente viável e atrativa.

## Palavras-chave

Opções reais; gás natural; GNL e planta de fertilizantes nitrogenados.

## Abstract

Caldas, Patricia Soares de Andrade; Brandão, Luiz Eduardo Teixeira (Advisor). **Real Options Theory Applied to Nitrogenous Fertilizer Plant Considering the Flexibility in Energy Supply**. Rio de Janeiro, 2014. 96p. MSc. Dissertation – Departamento de Administração, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study was motivated by the uncertainties related to the natural gas supply in Brazil in the coming years due to possible delays in the Pre-Salt projects. To mitigate the risk of natural gas production falling short of planned for the coming years, Petrobras has been expanding the alternatives for the natural gas supply by building regasification of Liquefied Natural Gas (LNG) terminals. Within this scenario is analyzed the feasibility of building a gas chemical complex to produce nitrogenous fertilizer and other chemicals, considering that the plant has the option to complement the plentiful supply of the complex by importing LNG in periods that the natural gas supply is insufficient to meet the total consumption of this plant. The triangular distribution and stochastic mean reversion is used to model uncertainties regarding supply and price variables, respectively, and Monte Carlo simulation for pricing the option to switch inputs. The results indicate that the choice of LNG as a supply of full complementation of the complex increases the value of the project, proving that this is a viable and economically attractive alternative.

## Keywords

Real option; natural gas; LNG e Nitrogenous Fertilizer Plant.

# Sumário

1. Introdução	13
2. Referencial Teórico e Revisão da Literatura	17
2.1. Referencial Teórico	17
2.1.1. Metodologia de Opções Reais	17
2.1.2. Identificando as Flexibilidades: os Tipos de Opções Reais	19
2.1.3. Métodos de Precificação das Opções Reais	22
2.1.4. Processos Estocásticos: MAB, MGB e MRM	26
2.2. Revisão de Literatura de Estudos Aplicados às Commodities	31
3. A Indústria do Gás Natural no Brasil	34
3.1. Gás Natural	34
3.1.1. A Cadeia de Valor do Gás Natural	35
3.1.2. Oferta de Gás Natural	36
3.1.3. Demanda de Gás	39
3.2. Gás Natural Liquefeito (GNL)	41
3.2.1. A Cadeia de Valor do GNL	41
3.2.2. Projetos de Terminais Flutuantes de Regaseificação de GNL no Brasil	44
4. O Projeto Complexo Gás-químico	47
4.1. Descrição do Projeto	47
4.2. Mercado Potencial	48
4.2.1. Mercado de Ureia	48
4.2.2. Mercado de Metanol	50
4.2.3. Mercado de Melamina	52
4.2.4. Mercado de Ácido Fórmico	53
4.2.5. Mercado de Ácido Acético	55
5. O Modelo	57
5.1.1. Determinação do Processo Estocástico	58
5.1.2. O Modelo de Reversão à Média	61
5.2. Análise de Incertezas e Definição de Parâmetros	64
5.2.1. Modelagem do Preço de Gás Natural e GNL	64
5.2.2. Modelagem da Disponibilidade de Gás Natural	67
5.3. Premissas do Projeto	69
5.3.1. Cálculo da Receita do Projeto	71
5.3.2. Custo de Capital do Projeto e Taxa Livre de Risco	74
5.4. A Opção Real Avaliada para o Projeto	75
6. Resultados do Modelo de Opções Reais	78
6.1. Modelo Determinístico	78
6.2. Modelo Estocástico e Neutro ao Risco	80
6.3. Análise de Sensibilidade	84

7. Conclusões	88
8. Referências Bibliográficas	91



## Lista de figuras

Figura 1: Projetos de expansão da produção de amônia e uréia no Brasil	14
Figura 2: Participação da produção nacional e importações na oferta de fertilizantes (média 2006-2010)	15
Figura 3: Árvore Bimonial com Três Períodos	24
Figura 4: Cadeia de valor do Gás Natural e do GNL	35
Figura 5: Evolução da oferta interna de energia no Brasil (2003-2012)	37
Figura 6: Oferta interna de gás natural disponibilizado para o Mercado	38
Figura 7: Consumo de Gás Natural por setor (em MMm <sup>3</sup> /dia)	40
Figura 8: Configuração de uma planta de liquefação	42
Figura 9: Esquema dos fluxos envolvidos no Projeto GNL (adaptado de ABS CONSULTING, 2007)	44
Figura 10: Visão panorâmica do Projeto GNL de Pecém, mostrando o navio regasificador Golar Spirit	45
Figura 11: Visão panorâmica do Projeto GNL da Baía de Guanabara, mostrando o navio regasificador Golar Winter à esquerda e o navio supridor Excellence	46
Figura 12: Esquema simplificado do Complexo Gás-químico	47
Figura 13: Série de Preços de Gás Natural e GNL a preços de 2013 (US\$/MMBtu)	59
Figura 14: Série de disponibilidade de GN	68
Figura 15: Modelagem da série de disponibilidade de gás natural	69
Figura 16: Projeção de preços dos valores esperados de GN (US\$/MMBtu)	78
Figura 17: Fluxo de Caixa Líquido Descontado Acumulado (US\$ Milhões)	79
Figura 18: Distribuição de probabilidade da disponibilidade de GN do Modelo Estocástico (em%)	81
Figura 19: Distribuição do VPL sem Opção do Modelo Estocástico (US\$Milhões)	82
Figura 20: Quantas vezes a opção foi exercida ao longo do período analisado	83
Figura 21: Distribuição do VPL com Opção do Modelo Estocástico (US\$Milhões)	84
Figura 22: Distribuição do Valor da Opção do Modelo Estocástico (US\$Milhões)	84
Figura 23: Gráfico de Tornado de Sensibilidade	85
Figura 24: Sensibilidade do prêmio de risco do preço de GNL sobre o Valor da Opção	86
Figura 25: Análises de sensibilidades de impostos: (a) PIS/COFINS, (b) ICMS e (c) PIS/COFINS e ICMS	87

## Lista de tabelas

Tabela 1: Componentes do Gás Natural em % em mol	34
Tabela 2: Aplicação da Ureia por setor dominante	49
Tabela 3: Capacidade instalada de Ureia no Brasil	49
Tabela 4: Aplicação do Metanol por setor dominante	50
Tabela 5: Capacidade Instalada de Metanol no Brasil	51
Tabela 6: Aplicação da Melamina por setor dominante	52
Tabela 7: Aplicação do Ácido Fórmico por setor dominante	54
Tabela 8: Aplicação do Ácido Acético por setor dominante	55
Tabela 9: Capacidade Instalada de Ácido Acético no Brasil	56
Tabela 10: Teste de Raiz Unitária (ADF) do logaritmo (em nível e da primeira diferença) dos preços de Gás Natural	59
Tabela 11: Teste de Raiz Unitária (ADF) do logaritmo (em nível e da primeira diferença) dos preços de GNL	60
Tabela 12: Parâmetros para a série de preços de GN	67
Tabela 13: Parâmetros para a série de preços de GNL	67
Tabela 14: Composição dos preços internados dos produtos	72
Tabela 15: Composição dos preços internados dos produtos	73
Tabela 16: Resultados do Modelo de Fluxo de Caixa Determinístico	80

## Lista de siglas e abreviaturas

ADF –	AugmentedDickeyFuller
ANDA –	Associação Nacional para Difusão de Adubos
ANP –	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANEEL –	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN –	Balanço Energético Nacional
BNDES –	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CALL –	Opção de Compra
CAPEX –	Capital Expenditures
CAPM	Capital Asset Price Model
CIF –	Cost, Insurance and Freight
CEPEA –	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CPI –	ConsumerPrice Index
EPE –	Empresa de Pesquisa Energética
FCD –	Fluxo de Caixa Descontado
FOB –	Free on Board
FSRU –	Floating, Storage and Regasification Unit
GASBOL –	Gasoduto Bolívia-Brasil
GASENE –	Gasoduto Sudeste–Nordeste
GN –	Gás Natural
GNL –	Gás Natural Liquefeito
IGU –	InternationalGas Union
LGN –	Líquido de Gás Natural
MAB –	MovimentoAritméticoBrowniano
MDF –	Medium Density Fiberboard
MDP –	MediumDensityParticleboard
MGB –	Movimento Geométrico Browniano
MIT –	Massachusetts Institute of Technology
MME –	Ministério de Minas e Energia
MMBtu –	Milhões de Unidade Térmica Britânica
MMm <sup>3</sup> /dia –	Milhões de Metros Cúbicos por Dia
MRM –	Movimento de Reversão à Média
MW –	Megawatt
ONS –	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OU –	Movimento de Reversão a Média Aritmética ou Ornstein-Uhlenbeck
PAC –	Programa de Aceleração do Crescimento

P&D –	Pesquisa e Desenvolvimento
PDE –	Plano Decenal de Expansão de Energia
PIB –	Produto Interno Bruto
PNE –	Plano Nacional de Energia
PPT –	Programa Prioritário de Termoelectricidade
PUT –	Opção de Venda
TEP –	Tonelada Equivalente de Petróleo
TOR –	Teoria das Opções Reais
TRBA –	Terminal de Regaseificação da Baía de Todos os Santos
TRBGUA –	Terminal de Regaseificação da Baía de Guanabara
UEP –	Unidade Estacionária de Produção
UFN-III –	Unidade de Fertilizantes Nitrogenados III
UFN-IV –	Unidade de Fertilizantes Nitrogenados IV
UFN-V –	Unidade de Fertilizantes Nitrogenados V
UPGN –	Unidade de Processamento de Gás Natural
VPL –	Valor Presente Líquido