

Letícia de Almeida Costa

**Avaliação Econômica do Projeto GTL: uma  
Aplicação da Teoria de Opções Reais com  
Processo de Reversão à Média**

**Dissertação de Mestrado**

Departamento de Engenharia Industrial  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Carlos Patrício Samanez  
Co-orientador: Marco Antonio Guimarães Dias

Rio de Janeiro  
Março de 2007



**Letícia de Almeida Costa**

**Avaliação Econômica do Projeto GTL: uma Aplicação da  
Teoria de Opções Reais com Processo de Reversão à  
Média**

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

**Prof. Carlos Patrício Samanez**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Marco Antonio Guimarães Dias**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio / Petrobras

**Prof. José Paulo Teixeira**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Paulo Henrique Soto Costa**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador (a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, março de 2007

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

### **Letícia de Almeida Costa**

Graduou-se em Ciências Econômicas pela PUC-Rio em Janeiro de 2002, onde foi monitora em diversas disciplinas. Durante o mestrado, devido ao seu rendimento acadêmico, foi beneficiada com bolsas de desempenho da PUC e participou do Projeto PUC/Petrobras de Análise de Investimentos usando a Teoria de Opções Reais.

#### Ficha Catalográfica

Costa, Letícia de Almeida

Avaliação Econômica do Projeto GTL: uma Aplicação da Teoria de Opções com Processo de Reversão à Média / Letícia de Almeida Costa; orientador: Carlos Patrício Samanez. – 2007.

147 f.; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Análise de investimento. 3. Teoria das Opções Reais. 4. Movimento de Reversão à Média. I. Samanez, Carlos Patrício. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

À minha irmã, Aline, que me possibilitou ir atrás de um sonho e realizá-lo.

Muito obrigada, amo você.

“Um sonho que se sonha só é só um sonho.  
Mas, um sonho que se sonha junto, é realidade.”

(Raul Seixas)

Aos meus pais, José e Marisa, que sempre estão do meu lado  
Me apoiando e incentivando em todos os momentos. Que alguma dia eu faça  
pelos meus filhos o que vocês fazem por mim. Amo muito vocês.

## Agradecimentos

À minha família pela torcida e pelo carinho que sempre tiveram comigo. Em especial a minha avó, Joaquina pelo apoio e paciência nos momentos finais dessa dissertação.

Ao Pedro, pelo amor, compreensão e força durante os anos do mestrado.

Aos professores Carlos Patrício e Marco Antônio, pelo estímulo, paciência, amizade e orientação que me ofereceram, sempre priorizando o meu aprendizado.

Aos professores José Paulo e Tara pelos ensinamentos dados sem os quais eu não conseguiria obter o conhecimento necessário para fazer este trabalho.

Ao professor Paulo Henrique e amigo Ivar Lira pela ajuda nas correções para a última versão deste trabalho.

Aos amigos e colegas de estudo, pela companhia e amizade nesses anos, em especial, Felipe, Marcela e Eduardo.

Ao Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES), em especial à equipe da Célula GTL pelo suporte financeiro e pela troca de informações e conhecimento transmitidos pelos profissionais que nos auxiliaram bastante, principalmente Luís Alberto Leite, Alessandro Oliveira, Sirlei Sousa e Henrique Cerqueira. E ao programador da Petrobras, Edison Tito, pela ajuda computacional fornecida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio, pelos auxílios concedidos e pelo apoio financeiro.

## Resumo

Costa, Letícia de Almeida; Samanez, Carlos Patrício. **Avaliação Econômica do Projeto GTL: uma Aplicação da Teoria de Opções Reais com Processo de Reversão à Média**. Rio de Janeiro, 2007. 147p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade econômica de uma planta XTL usando a teoria das Opções Reais. Esta metodologia é a mais adequada para avaliar a capacidade que este tipo de projeto dispõe de trocar de *input* e/ou *output*, ou seja, eleger a cesta que maximiza o resultado final, de acordo com cada cenário. Essa política ótima permite avaliar a construção de uma planta com flexibilidades, com o investimento ocorrendo em um ambiente de incerteza, onde os preços (fatores de incerteza) serão considerados estocásticos e seguirão um Movimento de Reversão à Média. Os cálculos numéricos serão feitos através da simulação de Monte Carlo. A tecnologia, designada XTL, está dividida em duas etapas: um processo de gaseificação seguido de um processo GTL (gas-to-liquid). A gaseificação permite transformar sólidos, líquidos e gases em gás de síntese, que será usado como input do GLT. Já o GTL possibilita transformar o gás de síntese em líquidos de alta qualidade, tais como nafta, diesel, parafinas e lubrificantes. Por associação, esta dissertação faz parte de um projeto que visa aplicar a teoria de Opções Reais na avaliação de investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), com a finalidade de valorar e considerar as flexibilidades inerentes a este tipo de projeto.

## Palavras-chave

Análise de Investimento, Teoria das Opções Reais, Movimento de Reversão à Média.

## Abstract

Costa, Letícia de Almeida; Samanez, Carlos Patrício. **Valuation of GTL Project: a Real Option Application with Mean Reversion Model.** Rio de Janeiro, 2007. 147p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work has as objective to analyze the investment of a XTL plant using the Real Options Theory. This methodology is adjusted to evaluate the capacity that this project has to changes its *input* and/or *output*, in other words, to elect the option that maximizes *payoff*, in accordance with each scenario, allowing to evaluate the construction of a plant with flexibilities with the investments happening in an environment of economical and/or technical uncertainties, where the prices (uncertainty factors) are stochastic and will follow the Mean Reversion Model, calculated by the Monte Carlo Simulation. The XTL technology is divided in two stages: a gasification process followed by a GTL (gas-to-liquid) process. The gasification process allows you to transform solids, liquids and gases into synthesis gas, that will be used as input of the GLT. The GTL makes possible to transform the synthesis gas into high quality liquids, such as naphtha, diesel, paraffins and lubricants. This work is part of a project, with the objective to apply the Real Options Theory in the evaluation of investments in Research and Development (R&D), aiming to price and consider the flexibilities that are inherent to this project.

## Keywords

Project Valuation; Real Options; Mean Reversion Model.

## Sumário

|   |    |
|---|----|
| 1 Introdução  | 14 |
| 1.1.1. Posicionamento da Dissertação                          | 16 |
| 2 Análise de Investimentos: Método Clássico X TOR             | 21 |
| 2.1. Investimento   | 21 |
| 2.2. Método de Avaliação de Investimento Tradicional – FCD    | 23 |
| 2.3. Teoria das Opções Reais – TOR                            | 24 |
| 2.3.1. Opção  | 24 |
| 2.3.2. Evolução Histórica das OR                              | 26 |
| 2.3.3. Abordagem da TOR                                       | 28 |
| 2.3.4. Tipos de Opções  | 30 |
| 2.3.4.1. Opção de Espera                                      | 30 |
| 2.3.4.2. Opção de Expansão                                    | 31 |
| 2.3.4.3. Opção de Redução                                     | 31 |
| 2.3.4.4. Opção de Paralisação Temporária das Operações        | 32 |
| 2.3.4.5. Opção de Abandono                                    | 32 |
| 2.3.4.6. Opção de Troca de Input / output                     | 32 |
| 2.3.4.7. Opção de Investimento em Informação                  | 33 |
| 2.3.4.8. Interação entre Opções                               | 33 |
| 2.3.5. Considerações Finais                                   | 34 |
| 3 Base Teórica  | 36 |
| 3.1. Processos Estocásticos                                   | 36 |
| 3.1.1. Processo de Markov                                     | 37 |
| 3.1.2. Caminho Aleatório                                      | 38 |
| 3.1.3. Processo de Wiener                                     | 39 |
| 3.1.4. Processo Generalizado de Wiener ou Processo Aritmético | 40 |
| 3.1.5. Processo de Itô ou Processo Browniano Generalizado     | 41 |
| 3.1.6. Movimento Geométrico Browniano (MGB)                   | 42 |
| 3.1.7. Movimento de Reversão à Média (MRM)                    | 43 |
| 3.1.8. Processo de Poisson                                    | 46 |



|  |    |
|--|----|
| 3.1.9. Lema de Itô                                 | 48 |
| 3.2. Técnicas de Otimização Dinâmica sob Incerteza | 49 |
| 3.2.1. Programação Dinâmica                        | 49 |
| 3.2.2. Direitos Contingenciais                     | 51 |
| 3.3. Método de Avaliação de Opções                 | 52 |
| 3.3.1. Modelo Binomial                             | 52 |
| 3.3.2. Simulação de Monte Carlo (SMC)              | 54 |
| <br>   |    |
| 4 Tecnologia XTL                                   | 59 |
| 4.1. O Processo do XTL                             | 62 |
| 4.1.1. Estágios da Tecnologia                      | 63 |
| 4.1.1.1. Geração do Gás de síntese                 | 63 |
| 4.1.1.2. Processo de Fischer–Tropsch               | 65 |
| 4.1.1.3. Hidroprocessamento                        | 67 |
| 4.1.1.4. Gaseificação                              | 68 |
| 4.2. Benefícios da Tecnologia XTL                  | 71 |
| 4.3. Os Principais Players do Mercado XTL          | 75 |
| 4.4. Plantas XTL                                   | 78 |
| 4.4.1. Bintulu na Malásia                          | 79 |
| 4.4.2. Plantas da SASOL                            | 80 |
| 4.4.3. Plantas no Qatar                            | 81 |
| 4.4.4. Estudos de Plantas na América Latina        | 83 |
| 4.4.5. Estudos de Plantas no Brasil                | 84 |
| 4.4.6. Futuras Plantas no Mundo                    | 85 |
| <br>   |    |
| 5 ESTUDO DE CASO                                   | 86 |
| 5.1. Características do Projeto                    | 86 |
| 5.1.1. Custos da Planta GTL                        | 86 |
| 5.1.1.1. Investimento - CAPEX                      | 88 |
| 5.1.1.2. Custos Operacionais                       | 90 |
| 5.1.1.3. Custos do Gás Natural                     | 91 |
| 5.1.2. Custos das Plantas BTL, OTL e RTL           | 91 |
| 5.1.3. Receitas das Plantas XTL                    | 92 |
| 5.1.4. Rendimento dos inputs                       | 94 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.1.5. Outras Premissas do Projeto                            | 94  |
| 5.2. Projeto XTL: Caso Particular de uma Planta de 35.000 Bpd | 95  |
| 5.3. Cálculo dos Parâmetros das Séries de Preços              | 96  |
| 5.3.1. Cálculo Via Otimização                                 | 100 |
| 5.3.1.1. Teoria Darwiniana                                    | 101 |
| 5.3.1.2. Algoritmos Genéticos                                 | 102 |
| 5.3.2. Cálculo Via Regressão                                  | 103 |
| 5.3.3. Escolha e Análise dos Parâmetros                       | 108 |
| 5.4. Simulação do Processo de Reversão à Média                | 109 |
| <br>  |     |
| 6 Resultados  | 112 |
| 6.1. Análise de Sensibilidade                                 | 120 |
| 6.1.1. Números de Iterações                                   | 120 |
| 6.1.2. Correlações  | 122 |
| 6.1.3. Custos Operacionais                                    | 123 |
| 6.1.4. Investimento - CAPEX                                   | 125 |
| 6.1.5. Preços dos inputs                                      | 128 |
| 6.1.6. Preços dos Outputs                                     | 130 |
| 6.1.7. Perfil de Produção                                     | 133 |
| <br>  |     |
| 7 Conclusões  | 135 |
| <br>  |     |
| 8 Bibliografia  | 138 |
| <br>  |     |
| Apêndice A: Conversões das Séries de Preços                   | 144 |
| <br>  |     |
| Apêndice B: SMC para MRM real e neutro ao risco               | 145 |

## Lista de figuras

|   |     |
|---|-----|
| Figura 1 – Valoração da Flexibilidade Gerencial                 | 30  |
| Figura 2 – Processo Generalizado de Wiener                      | 41  |
| Figura 3 – Variância Crescente de um MGB                        | 43  |
| Figura 4 – MRM com tendência                                    | 45  |
| Figura 5 – Mercado de petróleo com saltos                       | 47  |
| Figura 6 – Árvore Binomial em três passos                       | 54  |
| Figura 7 – Funcionamento da SMC                                 | 56  |
| Figura 8 – Esquemático das etapas do processo do XTL            | 61  |
| Figura 9 – Esquema de Gaseificação da RAUDI                     | 69  |
| Figura 10 – Tecnologia GTL da planta ORYX                       | 83  |
| Figura 11 – Custos do GTL (US\$/bbl)                            | 89  |
| Figura 12 – Divisão do CAPEX                                    | 89  |
| Figura 13 – Divisão do CAPEX para plantas de BTL, OTL e RTL     | 91  |
| Figura 14 – Distribuição de Anderson-Schulz-Flory               | 93  |
| Figura 15 – Preço do Gás Natural                                | 97  |
| Figura 16 – Preço do Óleo Pesado                                | 97  |
| Figura 17 – Preço da Nafta                                      | 98  |
| Figura 18 – Preço do Diesel                                     | 98  |
| Figura 19 – Preço de Lubrificante                               | 99  |
| Figura 20 – Preço da Parafina                                   | 99  |
| Figura 21 – Regressão para o Óleo Pesado                        | 105 |
| Figura 22 – Regressão para o Gás Natural                        | 106 |
| Figura 23 – Regressão para o Diesel                             | 106 |
| Figura 24 – Regressão para a Nafta                              | 106 |
| Figura 25 – Regressão para a Parafina                           | 107 |
| Figura 26 - Regressão para Lubrificante                         | 107 |
| Figura 27 – Simulação Real e Neutra ao Risco para o preço do GN | 111 |
| Figura 28 – Caminhos do MRM para o Gás Natural                  | 112 |
| Figura 29 – Caminhos do MRM para o Óleo Pesado                  | 113 |
| Figura 30 – Caminhos do MRM para a Nafta                        | 113 |
| Figura 31 – Caminhos do MRM para o Diesel                       | 114 |
| Figura 32 – Caminhos do MRM para o Lubrificante                 | 114 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 33 – Caminhos do MRM para a Parafina                             | 115 |
| Figura 34 – Histograma do VPL fixo Usando só GN                         | 117 |
| Figura 35 - Histograma do VPL fixo Usando só OP                         | 118 |
| Figura 36 - Histograma do VPL fixo com opção de input                   | 118 |
| Figura 37 - Histograma do VPL com opção de output usando GN             | 119 |
| Figura 38 - Histograma do VPL com opção de output usando OP             | 119 |
| Figura 39 - Histograma do VPL com opção de input e output               | 120 |
| Figura 40 – VPL´s para diferentes números de iterações_01               | 121 |
| Figura 41 – VPL`s para diferentes números de iterações_02               | 121 |
| Figura 42 – VPL´s para diferentes correlações entre os inputs e outputs | 122 |
| Figura 43 – Aumento do OPEX para plantas com flexibilidade de input_01  | 123 |
| Figura 44 - Aumento do OPEX para plantas com flexibilidade de input_02  | 123 |
| Figura 45 – Aumento do OPEX para plantas com flexibilidade de output    | 124 |
| Figura 46 – Variações no CAPEX das plantas GTL_01                       | 126 |
| Figura 47 – Variações no CAPEX das plantas GTL_02                       | 126 |
| Figura 48 – Variações no CAPEX da Planta OTL_01                         | 127 |
| Figura 49 - Variações no CAPEX da Planta OTL_01                         | 127 |
| Figura 50 – Variações percentuais nos preços do GN                      | 128 |
| Figura 51 – Variações Percentuais no rendimento do GN                   | 129 |
| Figura 52 – Variações no Preço do Óleo Pesado frente ao Petróleo        | 129 |
| Figura 53 – Variações Percentuais no Rendimento do Óleo Pesado          | 130 |
| Figura 54 – Variações no preço do Lubrificante                          | 131 |
| Figura 55 – Variações no Preço da Parafina                              | 131 |
| Figura 56 – VPL´s para diferentes perfis de produção                    | 134 |

## Lista de tabelas

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 – Comparando opção financeira de compra e opção de investimento real               | 25  |
| Tabela 2 – Classificação das Opções   | 26  |
| Tabela 3 – Composição do GS da biomassa –Vol. Mol/mol (%)                                   | 69  |
| Tabela 4 – Comparação de Combustíveis   | 73  |
| Tabela 5 – Projetos industriais em Operação   | 79  |
| Tabela 6 – Estimativa de Custos de Investimento por Perfil de Escala                        | 90  |
| Tabela 7 – Rendimentos Estimados para diferentes matérias-primas                            | 94  |
| Tabela 8 – Alíquotas de Impostos e Taxas relevantes   | 95  |
| Tabela 9 – Parâmetros Estimados   | 100 |
| Tabela 10 – Parâmetros Via Regressão das séries originais                                   | 104 |
| Tabela 11 – Parâmetros Via Regressão das séries convertidas                                 | 105 |
| Tabela 12 – Parâmetros Utilizados   | 108 |
| Tabela 13 - Correlações   | 109 |
| Tabela 14 – VPL's Encontrados   | 116 |
| Tabela 15 – VPL's para diferentes OPEX  | 125 |
| Tabela 16 – Proporções Restritas para os Outputs  | 132 |
| Tabela 17 – VPL's com proporções restritas para outputs                                     | 132 |
| Tabela 18 – VPL's com proporções restritas para outputs e diferente preço para Lubrificante | 133 |