



Marcio Augusto Leone Koenigsdorf

**Avaliação de Projetos de Exploração e Produção
de Petróleo via Opções Reais: Abordagem por
Mínimos Quadrados de Monte Carlo**

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. Reinaldo Castro Souza

Co-Orientador: Prof. Marco Antonio Guimarães Dias

Rio de Janeiro

Agosto 2009



Marcio Augusto Leone Koenigsdorf

**Avaliação de Projetos de Exploração e
Produção de Petróleo via Opções Reais:
Abordagem por Mínimos Quadrados de Monte
Carlo**

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. Reinaldo Castro Souza

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dr. Marco Antonio Guimarães Dias

Co-Orientador

Petrobrás

Dra. Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dr. José Paulo Teixeira

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico

Rio de Janeiro, 24 de agosto de 2009

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

Marcio Augusto Leone Koenigsdorf

É formado em Ciências Econômicas pela Universidade Federal de Juiz de Fora e atualmente é aluno de doutorado em Métodos de Apoio a Decisão no programa de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Têm experiência na área de Modelagem de Séries Temporais, Análise de Riscos e vem atuando na construção de modelos matemáticos e econométricos.

Ficha Catalográfica

Koenigsdorf, Marcio Augusto Leone

Avaliação de projetos de exploração e produção de petróleo via opções reais: abordagem por mínimos quadrados de Monte Carlo / Marcio Augusto Leone Koenigsdorf ; orientador: Reinaldo Castro Souza ; co-orientador: Marco Antonio Guimarães Dias. – 2009.

129 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. Métodos tradicionais. 3. Opções reais. 4. Avaliação de projetos. 5. Mínimos quadrados de Monte Carlo. 6. Regressão polinomial. 7. Solução analítica. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Dias, Marco Antonio Guimarães. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que tem me proporcionado.

Minha família pelo amor, incentivo e voto de confiança depositados.

A Anita pela fundamental importância que tem na minha vida.

A todos os amigos sempre presentes... Álvaro Rocha, Luiz Albino, Sócrates, Caio Farne e Rodrigo Macedo.

Aos professores e funcionários do DEE-PUC-Rio pelo apoio e suporte.

Ao Professor Reinaldo pelo apoio fornecido.

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao professor Marco Antonio Guimarães Dias co-orientador desse trabalho pelas diretrizes, ensinamentos, e, sobretudo, pela atenção irrestrita fornecida durante a execução do mesmo.

Gostaria de agradecer a CAPES bela bolsa de estudos concedida fundamental para a conclusão do presente trabalho.

Resumo

Koenigsdorf, Marcio Augusto Leone; Castro, Souza, Reinaldo Castro (Orientador); Dias, Marco Antonio Guimarães (Co-Orientador). **Avaliação de Projetos de Exploração e Produção de Petróleo via Opções Reais: Abordagem por Mínimos Quadrados de Monte Carlo.** Rio de Janeiro, 2009. 129p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No mundo competitivo e globalizado, dadas as inúmeras possibilidades de alocação de capital e as incertezas econômicas intrínsecas às decisões de investimento, a seleção de projetos lucrativos é um elemento de fundamental importância para o sucesso das empresas. Os métodos tradicionais de avaliação de investimentos, como o fluxo de caixa descontado (FCD), vêm sendo muito criticados por não capturarem de maneira adequada as flexibilidades existentes nos projetos. As vantagens de incluir a flexibilidade gerencial e a utilização mais freqüente da teoria de opções reais na avaliação de projetos permitem ampliar as discussões teóricas dos métodos utilizados para tal avaliação. A presente dissertação tem por finalidade a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados de Monte Carlo (LSM) na avaliação econômica de projetos de Exploração e Produção de Petróleo (E&P). Para o cálculo das opções reais com o LSM foi construído um programa em VBA (Visual Basic for Applications) que, além de calcular o valor das opções, permite executar análises de sensibilidade. Para a validação do método, utilizou-se a aproximação analítica de Bjerksund & Stensland, por ser uma das mais utilizadas na avaliação de opções reais e por produzir a curva de exercício ótimo dessas opções. Na busca dos parâmetros a serem utilizados neste estudo, simulou-se um fluxo de caixa de um projeto de E&P. Por fim, os resultados obtidos não podem ser considerados definitivos, apenas poderão balizar o desenvolvimento e o aprimoramento da utilização do método LSM em Opções Reais.

Palavras-chave

Métodos tradicionais, opções reais, avaliação de projetos, mínimos quadrados de Monte Carlo, regressão polinomial, solução analítica

Abstract

Koenigsdorf, Marcio Augusto Leone; Souza, Reinaldo Castro (Advisor); Guimarães, Dias, Marco Antonio Guimarães (Co-Advisor). **Oil Upstream Project Evaluation With Real Options: Approach by Least Squares Monte Carlo**. Rio de Janeiro, 2009. 129p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In a globalized and competitive world, given the many possibilities of capital allocation and inherent economic uncertainties in investment decisions, the selection of profitable projects is an element of fundamental importance for companies' success. The traditional methods for investments valuation, such as discounted cash flow (DCF), have been being criticized for not capturing adequately projects flexibilities. The advantages of including management flexibility and more frequent use of the real options theory in the evaluation of projects allow us to expand the theoretical discussions of the methods used for valuation. This study aims to apply the least squares Monte Carlo (LSM) method in economic valuation of upstream oil projects. For calculating real options with the LSM, a program in VBA (Visual Basic for Applications) language was built. Besides calculating the options value, it lets you run a sensitivity analysis. To validate the method, the analytical solution of Bjerksund & Stensland was used, as it is one of the most used in real options valuation and produces a graph of the optimal exercise for those options. In search for parameters to be used, a cash flow for an upstream oil project was simulated. Finally, the results can not be considered definitive; they can only guide the development and improvement of the use of LSM in Real Options.

Keywords

Traditional methods, real options, evaluation of projects, the least squares Monte Carlo, polynomial regression, analytical solution.

Sumário

1. Introdução	12
1.1. Justificativa e Relevância	13
1.2. Descrição da Tese	14
2. Discussão Teórica acerca dos Métodos Tradicionais e a Teoria de Opções Reais	16
2.1. Metodologia Tradicional	16
2.2. Críticas e Limitações dos Métodos Tradicionais	21
2.3. Teoria das Opções Reais	22
2.4. Técnicas de Otimização sob Incerteza na Avaliação de Opções Reais	36
3. Processos Estocásticos	39
3.1. Random Walk	40
3.2. Processo Auto-regressivo de Primeira Ordem (AR1)	41
3.3. Processo de Markov	42
3.4. Processo de Wiener	42
3.5. Processo de Reversão a Média	46
3.6. Lema de Ito	49
3.7. Processo de Poisson	50
3.8. Métodos Numéricos	52
4. Mínimos Quadrados de Monte Carlo (LSM)	68
4.1. Abordagem LSM proposta por Longstaff e Schwartz (2001)	68
4.2. Avaliação de Opções Reais pela metodologia de André Gamba (2003)	80
4.3. Método LSM aplicado em Opções Reais	83
4.4. Exemplo Numérico utilizando o modelo de Gamba (2003)	86
5. Opções Reais em Projetos de Exploração de Petróleo (E&P)	96
5.1. Premissas Básicas Adotadas para Valoração de Projeto de Exploração	97
5.2. Análise das Opções do Projeto	102
5.3. Validação do LSM utilizando o Movimento Geométrico Browniano WTI e Sondas	106
6. Conclusão	124
Referências bibliográficas	126

Lista de figuras

Figura 3.1 – Simulação do Movimento Geométrico Browniano com drift	46
Figura 3.2 – Movimento de Reversão a Média com Nível de Equilíbrio	48
Figura 3.3 – Simulação de um Processo de Poisson Puro	52
Figura 3.4 – Exemplo de uma árvore binomial com 3 períodos de tempo	53
Figura 3.5 – Grid Diferenças Finitas	58
Figura 3.6 – Área da integral na Simulação de Monte Carlo	58
Figura 3.7 – Problemas com alta dimensão	62
Figura 3.8 – Círculo unitário onde um ponto aleatório $(u_1; u_2)$ determina em relação ao eixo u_1	65

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Simulação dos Preços	72
Tabela 4.2 – Matriz de Preços Simulados	74
Tabela 4.3 – Matriz Fluxo de Caixa $\Phi_{8 \times 3}$	74
Tabela 4.4 – Valores de Exercício da Opção	75
Tabela 4.5 – Matriz de Exercício Antecipado	75
Tabela 4.6 – Regressão Linear em $t=2$	76
Tabela 4.7 – Estratégia de Exercício no instante $t=2$	76
Tabela 4.8 – Matriz $\Phi_{8 \times 3}$	77
Tabela 4.9 – Cálculo $(\Theta_{8 \times 3} \cdot \Phi_{8 \times 3})$	77
Tabela 4.10 – Regressão Linear em $t=1$	78
Tabela 4.11 – Estratégia de Exercício no instante $t=1$	78
Tabela 4.12 – Matriz de Exercício Antecipado Resultante	79
Tabela 4.13 – Matriz de Decisão	79
Tabela 4.14 – Simulação do Valor do Projeto	88
Tabela 4.15 – Valores das Opções do Projeto	89
Tabela 4.16 – Definição do Valor da Estratégia Ótima	89
Tabela 4.17 – Valor do Projeto no instante imediatamente inferior a T	90
Tabela 4.18 – Vetores da Regressão	90
Tabela 4.19 – Valor de Continuação obtido na regressão	91
Tabela 4.20 – Estratégias Ótimas no instante $t=2$	91
Tabela 4.21 – Resultados obtidos após a definição da estratégia ótima	92
Tabela 4.22 – Decisão ótima	92
Tabela 4.23 – Vetores da Regressão Linear	92
Tabela 4.24 – Valor de Continuação	93
Tabela 4.25 – Valores da Estratégia Ótima	93
Tabela 4.26 – Estratégia Ótima	94
Tabela 4.27 – Pay-off da Matriz Resultante	94
Tabela 5.1 – Teste de Estacionariedade do Preço do Petróleo WTI	107
Tabela 5.2 – Análise Comparativa da Volatilidade	120
Tabela 5.3 – Análise Comparativa dos Dividendos	121
Tabela 5.4 – Análise Comparativa da Taxa de Juros	122

Lista de gráficos

Gráfico 2.1 – Valor da Opção de Compra na Data de Expiração	24
Gráfico 2.2 – Valor da Opção de Venda na Data de Expiração	25
Gráfico 2.3 – Expectativa de exercício da opção antes do vencimento	31
Gráfico 2.4 – Valor da Opção de Espera	34
Gráfico 5.1 – Volume de Produção Diária Barris	104
Gráfico 5.2 – Fluxo de Caixa Livre do Projeto	105
Gráfico 5.3 – Preço Spot Petróleo	107
Gráfico 5.4 – Simulação de Preços utilizando Movimento Browniano Geométrico	108
Gráfico 5.5 – Simulação da distribuição de probabilidade do WTI	111
Gráfico 5.6 – Simulação da distribuição de probabilidade das Sondas	112
Gráfico 5.7 – Projeção de Fluxo de Caixa com fatores de risco seguindo um MGB	113
Gráfico 5.8 – Curva de Gatilho comparando solução analítica com LSM	114
Gráfico 5.9 – Efeito da Volatilidade no Valor da Opção LSM	115
Gráfico 5.10 – Efeito da Taxa de Juros no Valor da Opção LSM	116
Gráfico 5.11 – Efeito do Tempo para o Vencimento no Valor da Opção LSM	117
Gráfico 5.12 – Efeito dos Dividendos no Valor da Opção LSM	117
Gráfico 5.13 – Efeito do Número de Simulações no Valor da Opção LSM	118
Gráfico 5.14 – Efeito do Polinômio da Regressão no Valor da Opção LSM	119
Gráfico 5.15 – Análise Comparativa do Tempo para o Vencimento	120
Gráfico 5.16 – Análise Comparativa da Volatilidade	121
Gráfico 5.17 – Análise Comparativa dos Dividendos	122
Gráfico 5.18 – Análise Comparativa da Taxa de Juros	123

Lista de quadros

Quadro 3.1 – Exemplo Numérico da utilização da Variável Antitética	66
--	----