



**Luís Alberto Melchíades Leite**

**Opções Reais sob Incerteza Knightiana na  
Avaliação Econômica de Projetos de Pesquisa e  
Desenvolvimento (P&D)**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. José Paulo Teixeira

Rio de Janeiro

Dezembro de 2011



**Luís Alberto Melchíades Leite**

**Opções Reais sob Incerteza Knightiana na Avaliação Econômica de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D)**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. José Paulo Teixeira**

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio - PUC-Rio

**Prof. Marco Antonio Guimarães Dias**

Pontifícia Universidade Católica do Rio - PUC-Rio

**Prof. Carlos Frederico da Silva Crespo**

Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

**Prof. Reynaldo Taylor de Lima**

Fundação Universitária José Bonifácio - FUJB

**Prof. Carlos Patricio Samanez**

Pontifícia Universidade Católica do Rio - PUC-Rio

**Prof. Leonardo Pereira Santiago**

Universidade Federal Minas Gerais - UFMG

**Dra. Roberta Chasse Vieira**

Petrobras

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de dezembro de 2011

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

### **Luís Alberto Melchíades Leite**

Graduado em Administração e Economia pela Universidade Federal do Amazonas (1991 e 1999), Mestre em Economia pela Universidade Federal Fluminense (2005). Economista da Petrobras desde 2001. Tem experiência na área de Economia, com ênfase em Organização Industrial e Estudos Industriais, e Avaliação Econômica de Investimentos e Aquisições, atua principalmente nos seguintes temas: Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), Petróleo e Gás Natural; Teoria das Opções Reais; Teoria dos Jogos; Incerteza Knightiana; Econometria; Economia Matemática;

### Ficha Catalográfica

Leite, Luís Alberto Melchíades

Opções reais sob incerteza Knightiana na avaliação econômica de projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) / Luís Alberto Melchíades Leite; orientador: José Paulo Teixeira. – 2011.

153 f. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Investimento sob incerteza. 3. Opções reais. 4. Incerteza Knightiana. 5. Projetos de P&D. 6. Avaliação econômica. 7. Petrobras. 8. Decisão sob incerteza. 9. Inovação em processo. I. Teixeira, José Paulo Teixeira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

A minha esposa Ana Claudia, e minhas filhas Ana Luísa, Letícia e Alice.  
Mulheres da minha vida.

## **Agradecimentos**

A Deus, pela bênção da vida.

Aos meus pais, Cesonan e Lia, pela solidez de minha constituição física e moral.

As mulheres da minha vida, pela paciência e compreensão em muitas ausências.

A Petrobras, pelo apoio institucional e financeiro.

Ao meu orientador, José Paulo Teixeira, pela confiança.

Aos membros da banca, pelas críticas e valiosas contribuições ao texto.

Aos professores da PUC e FGV, pela excelência didática nas disciplinas ministradas.

Aos funcionários da PUC, em especial os do Departamento de Engenharia Industrial, pela qualidade do atendimento.

A todos os familiares e amigos próximos, companheiros de jornada terrena e simpatizantes do êxito de minhas iniciativas.

## Resumo

Leite, Luís Alberto Melchíades; Teixeira, José Paulo (Orientador). **Opções Reais sob Incerteza Knightiana na Avaliação Econômica de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D)**. Rio de Janeiro, 2011. 153p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A tese busca aprimorar, em termos teóricos e práticos, a modelagem de valoração econômica de investimentos sob alto grau de incerteza, tais como os projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), sobretudo os de natureza incremental. Partindo de um modelo de valoração de projetos baseado na Teoria das Opções Reais, incorpora uma concepção de incerteza mais completa, que alcança aspectos ligados ao ato decisório, conhecida como “Incerteza knightiana”, onde são separados os conceitos de risco e incerteza. A aplicação integral da concepção de Knight (1921) em modelos quantitativos é possível em função do desenvolvimento matemático de Schmeidler (1982), que resultou em nova fórmula de cálculo de valores esperados, baseada na integral de Choquet (1953). O novo modelo compreende um cálculo de valor esperado que reconhece no agente uma aversão à incerteza nessa conceituação, conhecido como valor esperado de Choquet.

## Palavras-chave

Investimento sob incerteza; Opções Reais; Incerteza Knightiana; Projetos de P&D; Avaliação Econômica; Petrobras; Decisão sob Incerteza; Inovação em Processo.

## Abstract

Leite, Luís Alberto Melchiádes; Teixeira, José Paulo (Advisor). **Real Options under Knightian Uncertainty in Economic Evaluation of Research and Development Projects (P&D)**. Rio de Janeiro, 2011. 153p. DSc. Thesis – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Thesis aims to improve, on theoretical and practical terms, the modeling of economic valuation of investments under high uncertainty, such as Research and Development projects (R&D), especially those that are incremental in nature. From a valuation model based on the design of Real Options Theory, it incorporates a more complete view of uncertainty, which reaches the decision-making aspects of the act, known as "knightian Uncertainty," where the concepts of risk and uncertainty are separated. The full implementation of the concept of Knight (1921) on quantitative models is possible according to the mathematical development of Schmeidler (1982), which resulted in a new formula for calculation of expected values, based on the Choquet integral (1953). The new model includes a calculation of expected value that makes it possible for the agent to recognize an uncertainty aversion in this concept, known as the Choquet expected value.

## Keywords

Investment under Uncertainty; Real Options; Knightian Uncertainty; R&D Projects; Economic Evaluation; Petrobras; Decision under Uncertainty; Process Innovation ;

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>13</b>
1.1	Orçamento de Capital em P&D para Empresas não_Tecnológicas.....	13
1.2	Contribuições e Organização da Tese.....	16
1.3	A Inaplicabilidade das Técnicas Convencionais.....	18
1.4	Das Opções Financeiras às Opções Reais.....	19
1.5	Projetos de P&D como Opções Reais para as Corporações .....	24
1.6	Avaliações de Projetos de P&D: Exemplos da Literatura .....	27
1.7	Incerteza Knightiana .....	38
1.8	Discussão Final .....	40
<b>2</b>	<b>Avaliação Econômica em Projeto de P&amp;D Incremental em Modelo de Opções Reais .....</b>	<b>42</b>
2.1	Introdução .....	42
2.2	Os Modelos de Avaliação .....	45
2.2.1	O Modelo com Tempo Determinístico .....	45
2.2.2	Introduzindo o Tempo Estocástico .....	48
2.3	A Firma e Seu Mercado .....	51
2.4	O Projeto de P&D .....	53
2.4.1	A Incerteza Técnica .....	54
2.4.2	A Incerteza no Tempo de Desenvolvimento .....	56
2.4.3	Custos de Desenvolvimento .....	58
2.4.4	Curva de Payoff.....	59
2.5	Resultados da Avaliação .....	64
2.5.1	Modelo Com Visão de Tempo Determinístico.....	65
2.5.2	Modelo Com Visão de Tempo Estocástico .....	70
2.6	Discussão Final .....	73
<b>3</b>	<b>Opções Reais sob Incerteza Knightiana .....</b>	<b>76</b>
3.1	Introdução .....	76
3.2	Capacidades Convexas, Valor Esperado de Choquet e Grau de Aversão à Incerteza.....	83
3.2.1	Capacidades Convexas .....	84
3.2.2	Valor Esperado de Choquet.....	84
3.2.3	Capacidades Simples .....	86
3.2.4	Grau de Aversão à Incerteza.....	88
3.3	Um modelo de Opções Reais para P&D com Aversão à Incerteza .....	90
3.3.1	Algumas Implicações Analíticas do Novo Modelo .....	94
3.4	Aplicação e Resultados .....	100
3.5	Conclusões .....	108
<b>4</b>	<b>Considerações Adicionais sobre o Parâmetro “C”: Avaliação em Múltiplos Cenários e um Exemplo de Escala para a Aversão à Incerteza Knightiana.....</b>	<b>110</b>
4.1	Caso Hipotético.....	110
4.2	Valor Esperado Normal .....	113
4.3	Valor Esperado de Choquet .....	114
4.4	Escala para a Aversão à Incerteza.....	115



4.5	Decisão Final considerando a Aversão à Incerteza.....	116
<b>5</b>	<b>Conclusões e Sugestões para Novas Pesquisas.....</b>	<b>119</b>
<b>6</b>	<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>124</b>
<b>7</b>	<b>Apêndices e Anexos .....</b>	<b>129</b>
7.1	Demonstração da fórmula de “Black-Scholes” .....	129
7.2	Lema de Itô .....	145
7.3	Processo Wiener.....	147
7.4	Uso de Taxa Livre de Risco em P&D.....	148
7.5	Valor Esperado de Choquet .....	149
7.6	Gráficos de <i>Payoff</i> em 2D.....	152
7.7	Manipulações Algébricas para o Quadro Resumo da Figura 26.....	153

## Lista de figuras

Figura 1: Árvore de decisão para processos sequenciais em P&D.....	25
Figura 2: Efeitos de P&D sobre lucro de uma empresa em monopólio .....	26
Figura 3: Ilustração simplificada do processo de P&D .....	28
Figura : Árvore de decisão, com custos, incertezas e retornos.....	31
Figura 5: Quadro resumo .....	33
Figura 6: Árvore compacta do projeto.....	34
Figura 7: Árvore compacta do projeto revisada .....	35
Figura 8: Árvore compacta do projeto revisada e podada .....	35
Figura 9: Caminho simulado para custo e fluxo de caixa .....	37
Figura 10: Dinâmica de transição, custos de desenvolvimento e payoff.....	48
Figura 11: Visão gráfica dos prováveis nós a serem atingidos no estágio .....	51
Figura 12: Tecnologia da firma em seu estado atual. ....	53
Figura 13: Projeto de P&D visando melhorar a tecnologia.....	53
Figura 14: Tecnologia da firma no estado pretendido.....	54
Figura 15: Árvore de incerteza: dinâmica de transição do nível de .....	56
Figura 16: Árvore de incerteza com incerteza no tempo.....	58
Figura 17: Projeção de preço para o produto A.....	61
Figura 18: Projeção de preço para o produto B. ....	62
Figura 19: Payoff do projeto no domínio tempo-desempenho.....	64
Figura 20: Avaliação do projeto no modelo determinístico, com a.....	65
Figura 21: Avaliação do projeto no modelo determinístico, com a.....	67
Figura 22: Avaliação do projeto no modelo determinístico, com a.....	68
Figura 23: Avaliação do projeto no modelo determinístico, com a.....	69
Figura 24: Avaliação do projeto no modelo de tempo estocástico.....	71
Figura 25: Modelo de valoração econômica de projetos de P&D.....	93
Figura 26: Quadro resumo das relações entre as variáveis que .....	98
Figura 27: Espaço de continuidade dos projetos. ....	99
Figura 28: Resultados de avaliação de projeto de P&D por modelo de .....	102
Figura 29: Resultados de avaliação de projeto de P&D por modelo de .....	103
Figura 30: Detalhes dos cálculos do projeto, com destaque para as.....	103
Figura 31: Sensibilidade sobre os VPLs a variações na aversão à .....	105

Figura 32: Sensibilidade sobre os VPLs a variações na aversão à .....	107
Figura 33: Cenários futuros de Preço para Carro-chefe. ....	111
Figura 34: Gráfico da distribuição de probabilidade dos cenários. ....	112
Figura 35: VPLs de cada cenário e VPL multicenário. ....	114
Figura 36: Sensibilidade sobre os valores esperados. ....	115
Figura 37: Sugestão de escala qualitativa para o parâmetro c (aversão à.....	116
Figura 38: VPLs de cada cenário, VPL esperado multicenário e VPL .....	117

## Lista de tabelas

Tabela 1: Distribuição dos custos do projeto por estágio e por opção. ....	60
Tabela 2: Payoff no caso de tempo determinístico.....	62
Tabela 3: Payoffs tempo estocástico (coluna correspondente ao tempo .....	63
Tabela 4: Sumário das avaliações nos dois modelos: Tempo .....	73
Tabela 5: Principais parâmetros adotados por cada modelo. ....	74
Tabela 6: Principais valores de referência para cada modelo.....	74
Tabela 7: Principais variáveis do modelo de opções reais para P&D. ....	91
Tabela 8: Distribuição de probabilidade dos cenários.....	112
Tabela 9: VPLs do projeto “Menina-dos-Olhos”. ....	113