

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PEDRO LUIS DE AVILA

**O Valor da Flexibilidade na Utilização do Gás
Natural Veicular como Combustível Alternativo em
Ônibus**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de *Mestre em Engenharia de Produção*.

Área de Concentração: Economia e Finanças

Orientador: Prof. Edson de Oliveira Pamplona, Dr.

Março de 2009

Itajubá – MG

S584c

AVILA, Pedro Luis de

O Valor da Flexibilidade na Utilização do Gás Natural Veicular como Combustível Alternativo em Ônibus / Pedro Luis de Avila. – Itajubá: UNIFEI, 2009.

130p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2009.

Orientador: Edson de Oliveira Pamplona

1. Valor da Flexibilidade. 2. Análise de Opções Reais. 3. Gás Natural Veicular (GNV). 4. Combustível Alternativo. 5. Ônibus.

I.Pamplona, Edson de Oliveira, orient. II. Universidade Federal de Itajubá III. O Valor da Flexibilidade na Utilização do Gás Natural Veicular como Combustível Alternativo em Ônibus

CDD 658.5

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PEDRO LUIS DE AVILA

**O Valor da Flexibilidade na Utilização do Gás
Natural Veicular como Combustível Alternativo em
Ônibus**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 12 de março de 2009, conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia de Produção*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edson de Oliveira Pamplona (Orientador)

Prof. Dr. José Arnaldo Barra Montevechi (UNIFEI)

Prof. Dr. Diógenes Manoel Leiva Martin (UPM)

Março de 2009

Itajubá – MG

Dedicatória

*Ao meu pai, Benedito e a minha mãe, Fátima,
com quem sempre pude contar nos
momentos decisivos da vida.*

*Aos meus irmãos, Fernando e Guilherme,
agradeço o apoio incondicional que
sempre compartilhamos entre nós.*

*À Natália, a pessoa mais fantástica que conheci
na vida, agradeço por seu amor.*

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção por todo o conhecimento transmitido. Sem seus conhecimentos e dedicação, esta etapa não seria vencida.

Um agradecimento especial ao meu orientador Edson Pamplona, pelo apoio que me deu, principalmente no começo do mestrado. Sua ajuda foi essencial para a minha continuidade no curso.

Agradeço o apoio da ANP, sob a coordenação do Professor Jamil Haddad e do Pesquisador Visitante Erick Azevedo. Desde o começo, me incentivaram e apoiaram a realização do trabalho.

Agradeço a minha família pela força e incentivo nas etapas mais difíceis da caminhada.

Aos amigos da Junta Tribo. A todos que moram lá hoje e também a todos que passaram por lá. Aprendi muito com todos, e acredito que o que estamos construindo vai durar pra sempre.

Agradeço a Unifei e a toda a comunidade Itajubense por terem me acolhido de forma tão gentil. Foi um prazer imenso morar em Itajubá. Voltarei sempre.

Por fim, quero agradecer à Natália, pessoa que está comigo nessa caminhada. Espero que continuemos assim, sempre aprendendo um com o outro.

Epígrafe

*“Que a inspiração chegue não depende de mim.
A única coisa que posso fazer é garantir
que ela me encontre trabalhando”*

Frase atribuída a Pablo Picasso

Resumo

Neste trabalho se buscou capturar o valor da flexibilidade proporcionada pela utilização do Gás Natural Veicular (GNV) como combustível alternativo em ônibus. O valor da flexibilidade é calculado através da Análise de Opções Reais. Na análise, considera-se a decisão de investimento em um ônibus movido por combustíveis alternativos, podendo operar com diesel ou GNV. A operação com GNV pode ser realizada através de duas rotas tecnológicas: através da conversão do motor diesel para utilização do GNV; ou através do motor *flex*, que pode operar tanto com diesel quanto com GNV. Investimentos desse tipo possuem uma opção embutida, a opção de troca de insumos. Assim, para capturar o valor dessa opção foi feito um levantamento literário dos modelos de opções reais mais adequados para o caso proposto. E na aplicação prática, optou-se pelo modelo de solução discreto representado por nós de decisão binomial. Para abordar corretamente a incerteza na decisão de investimento, é apresentado o contexto no qual o problema está inserido. Ou seja, as considerações a respeito da utilização do ônibus movido à GNV, destacando sua inserção no transporte coletivo urbano e o atual nível de desenvolvimento tecnológico e de mercado para o gás natural no Brasil. Ainda, além de capturar o valor da opção de troca de insumos, o modelo indica as condições ótimas para o exercício da opção, monitorada através da diferença entre os preços dos combustíveis.

Palavras-chave: Valor da Flexibilidade; Análise de Opções Reais; Gás Natural Veicular (GNV), Combustível Alternativo; Ônibus.

Abstract

This work aims to capture the value of the flexibility provided by the use of Natural Gas Vehicles (NGV) as an alternative fuel in buses. The value of the flexibility is calculated using the Real Options Analysis. In the analysis, the decision to invest in a bus powered by alternative fuels that can operate with diesel or NGV is considered. The operation can be performed with NGV through two technological routes: through the conversion of diesel engines for NGV use, or through the flex engine, which can operate with both diesel and NGV. Such investments have an embedded option, the option of exchanging inputs. Thus, to capture the value of that option a survey of the most appropriate models for the proposed event presented in the literature of real options has been made. And for a practical application, the model of discrete solution represented by nodes in binomial decision was chosen. To properly address the uncertainty in the investment decision, it is necessary to consider the context in which the problem is inserted. That is, the considerations regarding the use of NGV powered buses to the urban public transport and the current level of technological development and market for natural gas in Brazil. Still, in addition to capturing the value of the option of exchanging inputs, the model indicates the optimal conditions for the exercise of the option, monitored by the difference between the prices of fuels.

Keywords: Value of Flexibility; Real Options Analysis; Natural Gas Vehicle (NGV); Alternative Fuels; Buses.

Lista de Figuras

Figura 1.1	Metodologia da Pesquisa	20
Figura 2.1	Análise por Árvore de Decisão	27
Figura 2.2	Analogia entre oportunidade de investimento e opções de compra	35
Figura 2.3	FC livre de incertezas	41
Figura 2.4	FC livre com incertezas	42
Figura 3.1	Matriz energética mundial	50
Figura 3.2	Oferta mundial de energia primária	51
Figura 3.3	Destino do Gás Natural Produzido no Brasil	54
Figura 3.4	Responsabilidade Legal da Cadeia Produtiva	71
Figura 3.5	Evolução das Reservas de GN	73
Figura 3.6	Demanda de GN por Segmento	75
Figura 4.1	Estrutura de um Modelo de Opções Reais	80
Figura 4.2	Problema de Otimização	85
Figura 4.3	Árvore Binomial	89
Figura 4.4	Cone da Incerteza	91
Figura 4.5	Árvore de Eventos Quadrinomial	93
Figura 4.6	Superfície de Resposta	98
Figura 5.1	Sensibilidade do Valor da Opção para os Custos de Troca	115
Figura 5.2	Sensibilidade do Valor da Opção para a Volatilidade	116

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	As falhas do FCD	30
Tabela 2.2	Classificação de Opções	34
Tabela 3.1	Emissões por tipo de motor	66
Tabela 3.2	Premissas Operacionais de Frotas de Ônibus Urbanos	67
Tabela 3.3	Transporte público urbano	69
Tabela 3.4	Produção Nacional de GN	73
Tabela 3.5	Importação Brasileira de gás Natural	74
Tabela 5.1	Variáveis do Projeto	102
Tabela 5.2	Parâmetros de Entrada do Modelo	103
Tabela 5.3	Árvore Binomial das Alternativas	110
Tabela 5.4	Árvore do VPL das Alternativas	112
Tabela 5.5	Árvores de Flexibilidade e de Decisão das Alternativas	113
Tabela 5.6	Sumário dos Resultados	114

Lista de Abreviaturas e Siglas

- AAD - Análise por Árvore de Decisão
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e B combustíveis
- CAPM - *Capital Asset Pricing Model*
- CNE - Comissão Nacional de Energia
- CNPE - Conselho Nacional de Política Energética
- EDP - Equação Diferencial Parcial
- EEV - Veículo Ambientalmente Avançado (do inglês “*Enhanced Environmentally Vehicle*”)
- ENGVA - *European Natural Gas Vehicle Association*
- FC - Fluxo de Caixa
- FCD - Fluxo de Caixa Descontado
- GASBOL - Gasoduto Bolívia-Brasil
- GLP - Gás Liquefeito de Petróleo ou Gás de Cozinha
- GN - Gás Natural
- GNC - Gás Natural Comprimido
- GNL - Gás Natural Liquefeito
- GNV - Gás Natural Veicular
- INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
- LGN - Líquido de Gás Natural
- MME - Ministério de Minas e Energia (MME)
- MP - Materiais Particulados
- MRM - Movimento de Reversão à Média (MRM)
- PCS - Poder Calorífico Superior
- PETROBRAS - Petróleo Brasileiro S.A.
- PLANGAS - Plano Nacional de Gás Natural
- PROCONVE - Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
- ROA - Análise de Opções Reais (do inglês “*Real Options Analysis*”)
- SMC - Simulação de Monte Carlo
- TBG - Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil S/A
- TIR - Taxa Interna de Retorno
- TMA - Taxa Mínima de Atratividade

UPGN - Unidades de Processamento de Gás Natural

VAU - Valor Anual Uniforme

VF - Valor Futuro

VFL - Valor Futuro Líquido

VP - Valor Presente

VPL - Valor Presente Líquido

Lista de Símbolos

B_0 - Títulos de dívida

B_j - Custos referentes a consumo de combustível

C - Valor da opção

CO_2 - Dióxido de carbono

D - Composição das dívidas da empresa

d_a e d_b - Movimento de descida dos ativos a e b

dY_t - Logaritmo do preço da *commodity*

dZ - Incremento de Wiener padrão

E - Patrimônio líquido da empresa

g_a e g_b - Taxa de crescimento esperado dos ativos a e b

H_j - Custos de Manutenção

l - Litro

m^3 - Metro cúbico

P_{ij} - Preço do combustível j na data i

r - Taxa de desconto constante

T - Número de períodos em um ano

u_a e u_b - Movimento de subida dos preços dos ativos a e b

V_0 - Ativo subjacente sujeito a risco

x_t - Função de variáveis exógenas

y_t - Equação de variável dependente

\bar{Y} - Logaritmo do preço médio a longo prazo

α - parâmetro de “*drift*”, ou inclinação da curva

ε - Distribuição normal padronizada $N(0,1)$

σ_t - Volatilidade

ω - Média histórica

ε_t - Termo de erro

ε_{t-1}^2 - Quadrado do residual da equação média

η - Coeficiente de reversão à média

$\rho_{a,b}$ - Correlação entre os preços dos ativos a e b

σ_a e σ_b - Volatilidade dos preços dos ativos a e b

θ_j - Incremento nos custos de manutenção

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Considerações Iniciais	17
1.2	Objetivo	18
1.3	Relevância e Justificativa da Pesquisa	18
1.4	Metodologia de Pesquisa	19
1.5	Estrutura da Pesquisa	22
2	AVALIAÇÃO ECONÔMICA E FINANCEIRA COM RISCO EM PROJETOS DE INVESTIMENTOS	23
2.1	Considerações Iniciais	23
2.2	Métodos Tradicionais de Avaliação de Investimentos	23
2.2.1	O Fluxo de Caixa Descontado	24
2.2.2	Árvores de Decisões	26
2.2.3	Simulação de Monte Carlo	28
2.3	Opções Reais	28
2.3.1	Investimento em Condições de Incerteza e Risco	29
2.3.2	Origem das Opções Reais	32
2.3.3	Opções Financeiras	33
2.3.4	Relações entre Opções Reais e Opções Financeiras	34
2.3.5	ROA na Avaliação de Projetos	35
2.3.6	Principais Componentes da ROA	36
2.3.7	A Opção de Troca de Insumos	37
2.3.8	Precificação de Opções Reais	39
2.3.9	Volatilidade	41
2.3.10	O Valor da Flexibilidade na Tomada de Decisão	46
2.3.11	Teorias complementares	47
2.4	Considerações Finais	48
3	CONTEXTO DO PROBLEMA DE INVESTIMENTO: A UTILIZAÇÃO DO GNV EM ÔNIBUS	49
3.1	Considerações Iniciais	49
3.2	Gás Natural (GN)	49
3.2.1	Diversificação da Matriz Energética	51
3.2.2	A Cadeia do Gás Natural	53

3.2.3	Segmentos de Consumo	55
3.2.4	O GNV no Mundo	56
3.2.5	O GNV no Brasil	57
3.3	Utilização do GNV em Motores Diesel	59
3.3.1	GNV no Motor Diesel	60
3.3.2	Vantagens e Desvantagens do Uso do GNV	62
3.3.3	Questão Ambiental	64
3.3.4	O GNV no Transporte Coletivo Urbano	66
3.4	O Impacto da Incerteza na Conversão dos Veículos versus o Valor da Flexibilidade	69
3.4.1	Regulamentação do Mercado de Gás Natural no Brasil	70
3.4.2	Previsão de Oferta	72
3.4.3	Situação da Demanda	74
3.4.4	Flutuação do Preço de uma <i>Commodity</i>	76
3.4.5	Estratégia de Investimentos	77
3.5	Considerações Finais	78
4	MODELAGEM E SIMULAÇÃO NA PRECIFICAÇÃO DE OPÇÕES REAIS	79
4.1	Considerações Iniciais	79
4.2	Estrutura de um Modelo de Tomada de Decisão de Investimento com Opções Reais Embutidas	79
4.3	Previsão da Incerteza Através de um Processo Estocástico	81
4.3.1	Movimento Browniano Geométrico (MBG)	82
4.3.2	Movimento de Reversão à Média (MRM)	82
4.4	Otimização Dinâmica Sob Incerteza	84
4.4.1	Ativos Contingentes	85
4.4.2	Programação Dinâmica	86
4.5	Os Modelos de Opções Reais	86
4.5.1	Solução Contínua para a Precificação de Opções Reais	87
4.5.2	Avaliação de Opções Através da Simulação de Monte Carlo	87
4.5.3	Modelo Binomial	88
4.5.4	Modelo Quadrinomial	91
4.6	Modelo de Análise Econômica	95
4.6.1	Característica da Opção de Investir	95
4.6.2	Modelando a Opção de Troca de Insumo	96

4.6.3	Saídas do Modelo	97
4.7	Considerações Finais	98
5	TOMADA DE DECISÃO DE INVESTIMENTO EM TECNOLOGIAS FLEXÍVEIS: O VALOR DA FLEXIBILIDADE PROPORCIONADA POR COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS	99
5.1	Considerações Iniciais	99
5.2	Premissas do Modelo	99
5.3	Fluxo de Caixa Descontado do Projeto	100
5.3.1	Opções Estratégicas do Projeto	100
5.3.2	Variáveis do Projeto	101
5.3.3	Parâmetros de Entrada	102
5.4	Tratamento das Incertezas	104
5.4.1	Incerteza sobre os Custos de Manutenção	104
5.4.2	Incerteza nos Custos e Aprendizado	105
5.4.3	Economias de Escala versus Flexibilidade	106
5.4.4	Incerteza sobre as Taxas de Juros	107
5.4.5	Cálculo da Volatilidade	107
5.5	Análise de Opções Reais	108
5.5.1	Visualização do Valor da Opção	108
5.5.2	Modelo Binomial	109
5.6	Sensibilidade das Opções	115
5.6.1	Custos de Conversão	115
5.6.2	Volatilidade	115
5.7	Considerações Finais	116
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	118
6.1	Conclusões	118
6.2	Recomendações para Trabalhos Futuros	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
	ANEXO 1	129

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Em um mundo real, as condições de risco e incerteza devem ser consideradas nas avaliações de investimentos. Sendo assim, um estudo detalhado das premissas e variáveis de um projeto deve ser realizado. Além disso, a aplicação correta dos métodos de análise, que incorporam a volatilidade dessas variáveis irá justificar, de forma adequada, se um investimento deve ser realizado ou não. O risco e a incerteza em um projeto, além de criar a possibilidade de se exercer uma opção, dão mais valor a ela.

Segundo Dixit & Pindyck (1994), para avaliar investimentos em condições de incerteza e risco é necessário haver flexibilidade na tomada de decisão, e como características principais a irreversibilidade de parte dos investimentos, a incerteza das variáveis subjacentes e o momento ótimo (ou *timing*) para a realização dos desembolsos de capital.

Estas características podem ser observadas quando se considera a decisão de investimento em um ônibus movido por combustíveis alternativos. O veículo pode operar com o combustível diesel ou com o Gás Natural Veicular (GNV). A possibilidade de trocar o insumo principal do veículo é uma opção embutida na oportunidade de investimento, e seu valor pode ser capturado através de uma Análise de Opções Reais (ou ROA do inglês “*Real Options Analysis*”).

O valor da opção embutida no investimento representa o valor da flexibilidade proporcionada pela utilização de combustíveis alternativos. Assim, a pesquisa na literatura de opções reais busca identificar os modelos apropriados para a tomada de decisão de investimentos considerando a opção de troca de insumo.

Para abordar corretamente a incerteza na decisão de investimento, é apresentado o contexto no qual o problema está inserido. Ou seja, as considerações a respeito da utilização do ônibus movido à GNV, destacando sua inserção no transporte coletivo urbano e o atual nível de desenvolvimento tecnológico e de mercado para o gás natural no Brasil.

Ao incorporar a incerteza e considerar a possibilidade de adiamento da decisão de investimento, a ROA permite um gerenciamento ativo dos projetos. Essa flexibilidade gerencial permite ao tomador de decisão minimizar os custos de operação do veículo dependendo da relação entre os preços dos combustíveis.

1.2 Objetivo

O objetivo da pesquisa é aplicar a ROA para capturar o valor da flexibilidade de se poder optar pela troca do combustível de operação de um ônibus, considerando um período pré-determinado.

Ainda, além de capturar o valor da opção de troca de insumos, o modelo usado indica as condições ótimas para o exercício da opção, monitorada através da diferença entre os preços do combustível diesel e do GNV.

1.3 Relevância e Justificativa da Pesquisa

O GNV, uma forma de utilização do energético Gás Natural (GN), por ser competitivo em relação ao álcool e a gasolina, tornou-se uma alternativa de combustível bastante econômica quando usado em veículos leves. Por esse motivo, o aumento do consumo do segmento automotivo do mercado de GN, pode contribuir para o crescimento da rede de distribuição e revenda, assegurando a oferta do energético.

Ainda, devido aos padrões de emissões veiculares cada vez menores e restritivos, o que impacta principalmente os veículos pesados movidos a óleo diesel, os custos para se adequar aos padrões são cada vez maiores. O veículo à GNV, por sua vez, já atende a padrões muito baixos, sendo até considerado Veículo Ambientalmente Avançado (ou EEV do inglês “*Enhanced Environmentally Vehicle*”), ou seja, atende a padrões de emissões que só serão adotados no futuro.

Dessa forma, a aquisição de um ônibus que pode operar com combustíveis alternativos torna-se uma oportunidade de investimento a ser examinada cuidadosamente, visto que, tanto o diesel quanto o GNV derivam de formas de energia não renováveis. Porém, mesmo sendo um recurso não renovável, o GN é considerado um combustível limpo e suas reservas provadas são significativas (ANP, 2008).

Assim, a relevância da pesquisa está na determinação do valor da flexibilidade proporcionada pela utilização de combustíveis alternativos, conseguido através da avaliação da opção troca de insumo da alternativa de investimento. Ainda, além de fornecer valor adicional à alternativa de investimento, considera as condições ótimas onde essa opção deve ser exercida. O valor adicional advém da possibilidade de optar pelo combustível de operação, considerando que com o passar do tempo, as incertezas se resolvem e as informações a respeito da relação entre os preços dos combustíveis se tornam conhecidas.

O resultado mais importante, do ponto de vista do investidor, é saber quando será melhor continuar usando o combustível corrente e qual é o melhor momento para efetuar a

troca entre os combustíveis, avaliando o ponto onde os custos do combustível corrente superam os custos do combustível alternativo.

1.4 Metodologia de Pesquisa

Dentre as várias formas de classificação das pesquisas científicas, Silva e Menezes (2005) destacam que as formas clássicas se referem à natureza da pesquisa – podendo ser básica ou aplicada –, também quanto à forma de abordagem do problema – podendo ser quantitativa ou qualitativa –, e ainda segundo Gil (1991) *apud* Silva e Menezes (2005), as pesquisas se classificam quanto aos seus objetivos – podendo ser exploratória, descritiva ou explicativa – e com relação aos procedimentos técnicos utilizados – podendo ser pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa experimental, levantamento (ou “*survey*”), estudo de caso, pesquisa *expost-facto*, pesquisa-ação, pesquisa participante e modelagem (seguida/ou não de simulação).

De acordo com a classificação apresentada por Silva e Menezes (2005) e, do ponto de vista da sua natureza, o presente trabalho se classifica como pesquisa aplicada, pois pretende gerar conhecimento para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais. Do ponto de vista da forma de abordagem do problema, classifica-se como pesquisa quantitativa, pois há o desenvolvimento e a análise de modelos de relação causal entre as variáveis de controle e variáveis de performance.

Em relação aos seus objetivos a pesquisa se classifica como exploratória, pois visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito. Em relação aos procedimentos técnicos utilizados, a pesquisa se utiliza da metodologia de modelagem seguida de simulação.

Miguel (2007) destaca que a importância metodológica de um trabalho de pesquisa pode ser justificada pela necessidade de embasamento científico adequado e pela busca da melhor abordagem para endereçar as questões da pesquisa. Busca-se através da metodologia, garantir a qualidade de replicação dos resultados da pesquisa, contribuindo para o aperfeiçoamento do conhecimento teórico.

Interessados em definir uma metodologia adequada para tratar o problema de pesquisa, Bertrand e Fransoo (2002) estabelecem algumas diretrizes para o desenvolvimento de modelagem e simulação. Os autores distinguem a pesquisa quantitativa baseada em modelagem entre pesquisa axiomática e pesquisa empírica, destacando ainda, que dentro de cada uma delas o pesquisador pode se deparar com a pesquisa de caráter normativa ou descritiva.

A pesquisa axiomática produz conhecimento sobre o comportamento de certas variáveis no modelo, baseado em hipóteses sobre o comportamento de outras variáveis desse modelo. Tanto na pesquisa axiomática quanto na pesquisa empírica existem duas vertentes. A pesquisa axiomática normativa está originalmente interessada em desenvolver políticas, estratégias e ações para melhorar os resultados disponíveis na literatura existente, descobrindo uma solução ótima para um problema definido recentemente, ou comparar varias estratégias para tratar de um problema específico. A pesquisa axiomática descritiva está originalmente interessada em analisar um modelo, o qual guia para um entendimento e explanação de suas características (BERTRAND E FRANSOO, 2002).

A pesquisa empírica descritiva está originalmente interessada em criar um modelo que descreva adequadamente as relações de causa e efeito que existem na realidade, as quais guiam para um bom entendimento do processo em andamento. A pesquisa empírica normativa (quantitativa) está originalmente interessada em desenvolver políticas, estratégias e ações para melhorar a situação atual. Segundo os autores, em contraste com a pesquisa quantitativa axiomática, o modelo baseado na pesquisa empírica não tem sido muito produtivo (BERTRAND E FRANSOO, 2002).

Baseado na classificação descrita, a presente pesquisa se classifica como modelagem quantitativa axiomática normativa. Na seqüência, será apresentada a metodologia de desenvolvimento da pesquisa de acordo com os conceitos de pesquisa axiomática normativa apresentada por Bertrand e Fransoo (2002).

A **Figura 1.1** apresenta de forma esquemática a metodologia de pesquisa utilizada nessa dissertação.

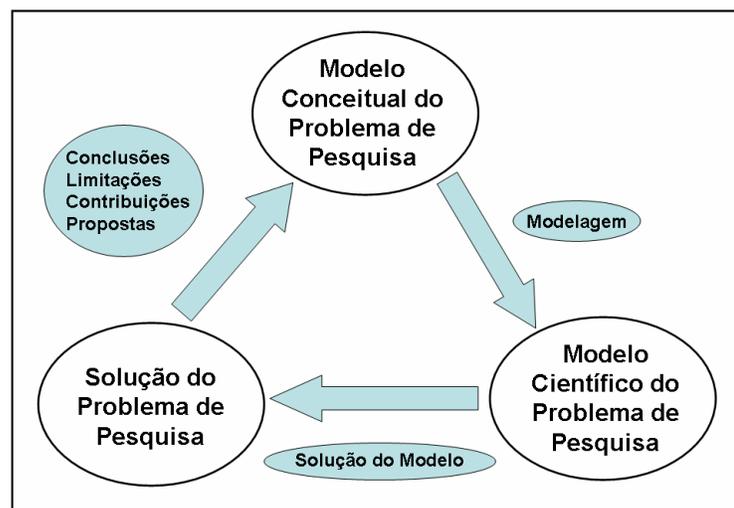


Figura 1.1 – Metodologia de Pesquisa
Fonte: Mitrof et al. (1974)

A primeira etapa da pesquisa inicia-se com uma descrição condensada das características do problema de decisão operacional que está sendo estudado. Isto corresponde com o modelo conceitual. O modelo conceitual deve conter tanto quanto possível conceitos e termos que são aceitos como padrão, encontrados na literatura científica de engenharia de produção, e relativos ao assunto sob estudo.

Conseqüentemente, para o desenvolvimento do modelo conceitual é necessário o levantamento do estado da arte da teoria. Sendo assim, é necessário apresentar a descrição das características gerais do problema estudado na linha de pesquisa na qual o trabalho se ajusta, e os recentes artigos que estudam problemas relacionados com o problema sob estudo. Desta forma, o problema sob estudo deve estar claramente posicionado na literatura científica.

A modelagem conceitual é o primeiro passo da metodologia de pesquisa proposta. Através dela é possível discorrer sobre o tema proposto de forma abrangente – posicionando o conteúdo da revisão bibliográfica no tempo e no espaço –, e sistemática – concatenando as idéias e conclusões a respeito do tema. Na revisão literária são identificados os componentes da teoria sob estudo, apresentados através da definição das variáveis observáveis, do domínio onde a teoria se aplica e no conjunto exato de circunstâncias onde é possível aplicar esses conhecimentos.

A segunda etapa da pesquisa é a especificação do modelo científico do problema. O modelo científico é apresentado em termos matemáticos formais, a fim de que se possa utilizar a análise matemática ou a análise numérica para sua resolução. Caso não seja possível a resolução do modelo através dos métodos de análise acima mencionados, é necessária a utilização de uma simulação computacional.

A terceira etapa da pesquisa consiste na solução do problema de investimento proposto. Nesse ponto utiliza-se uma simulação matemática discreta através da utilização de modelos de nós de decisão binomial. Essa primeira aproximação serve como entrada de dados para cálculos mais sofisticados que podem ser realizados através de análise numérica computacional ou através da simulação computacional.

Depois de obtida a solução do modelo científico do problema, procede-se com a interpretação dos resultados das análises relativas à questão da pesquisa no modelo conceitual. Neste ponto, os resultados são considerados no contexto do problema conceitual descrito e são derivadas conclusões sobre a extensão para a qual a questão original é endereçada e quais novas questões emergem destes resultados.

Uma contribuição importante que pode ser obtida através da simulação é a análise de sensibilidade dos parâmetros que mais impactam na solução do problema. Esses parâmetros,

relacionados com os resultados da solução do modelo, definem as características da opção de investir.

De posse da análise resultante da interpretação dos resultados obtidos com a solução do modelo, são obtidas as conclusões da pesquisa, como dito anteriormente. Dessas conclusões, emergem as contribuições da pesquisa, suas limitações e as propostas para trabalhos futuros. Essas considerações são novamente levadas ao modelo conceitual, como mostrado na **Figura 1.1**. Com isso, pode-se avaliar melhor a contribuição da pesquisa no que compete ao problema de tomada de decisão de investimento analisado.

1.5 Estrutura da Pesquisa

A pesquisa se estrutura seguindo a metodologia de pesquisa. O modelo conceitual o é desenvolvido nos capítulos 2 e 3 do presente trabalho. O capítulo 2 apresenta o estado da arte da ROA, necessário para o desenvolvimento do modelo científico (cerne da pesquisa). A estrutura lógica do capítulo compreende uma breve explanação sobre os métodos tradicionais de avaliação de investimentos e sua evolução para a ROA.

O capítulo 3 apresenta a revisão da literatura a respeito da utilização do GNV em ônibus, principalmente sua inserção no transporte coletivo urbano. A relevância do capítulo se mostra devido à necessidade de se conhecer as características do problema de decisão identificado, e também para a correta formulação do problema de pesquisa ou modelo conceitual. Através da correta formulação do problema é possível identificar as variáveis relevantes ao processo de tomada de decisão sob estudo.

O capítulo 4, que corresponde ao modelo científico do problema, apresenta os modelos de apreçamento de opções reais disponíveis na literatura, identificando suas características e formas de utilização. O conhecimento dos modelos de apreçamento disponíveis na literatura é necessário para a escolha do melhor modelo que se ajuste ao problema proposto ou questão a investigar. Uma boa aderência do modelo de apreçamento ao problema proposto contribui para a qualidade científica da pesquisa, além de possibilitar certo nível de inovação à teoria sob análise.

No capítulo 5 é realizada uma aplicação prática da teoria através da modelagem discreta de um problema de investimento específico. Este capítulo corresponde à terceira parte da metodologia seguida. Por fim são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

2 AVALIAÇÃO ECONÔMICA E FINANCEIRA COM RISCO EM PROJETOS DE INVESTIMENTOS

2.1 Considerações Iniciais

Já em Wellington (1887), pode-se encontrar uma síntese da utilização da matemática financeira na análise de viabilidade econômica, no caso para a avaliação de investimentos em ferrovias. Basicamente, o que se buscava e se busca – atualmente com uma complexidade cada vez maior de métodos e modelos – é estabelecer critérios duradouros e confiáveis para as decisões de investimentos.

Entretanto, é salutar destacar que métodos complexos, baseados em conceitos incorretos ou incompletos dificilmente levam a boas decisões de investimento. Por essa razão, o mínimo que um critério de decisão de alternativas de investimento deve fazer é reconhecer o valor do dinheiro no tempo.

Neste sentido, os métodos tradicionais, baseados no método do Fluxo de Caixa Descontado (FCD), avaliam corretamente as alternativas de investimento. Ainda, de acordo com Damodaran (2002), mesmo sendo um dos três métodos mais utilizados para avaliar ativos reais, o FCD é o pilar onde os outros métodos de avaliação são construídos. Para uma correta avaliação é necessário entender os fundamentos do FCD.

É na área das finanças corporativas, mais especificamente no orçamento de capital que se encontra toda a teoria financeira que direciona como as firmas devem avaliar projetos e tomar decisões de investimento de capital.

Este capítulo remete ao referencial teórico da literatura de avaliação de investimentos em ativos reais. Primeiramente são apresentados os métodos tradicionais de avaliação de investimentos representados pelo método do FCD – com o critério do Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR) –, pela Análise por Árvore de Decisão (AAD) e pela Simulação de Monte Carlo (SMC). Na seqüência é apresentado o estado da arte da ROA. Por fim, uma avaliação qualitativa do valor da flexibilidade na tomada de decisão de investimentos.

2.2 Métodos Tradicionais de Avaliação de Investimentos

“Valuation is at the heart of every investment decision, whether that decision is to buy, sell or hold” (DAMODARAM, 2002).

A análise de investimentos é uma metodologia comumente usada quando se deseja elevar a rentabilidade da empresa. Sendo assim, quando se está interessado em evidenciar a viabilidade de um determinado empreendimento, um estudo detalhado das premissas e variáveis do projeto deve ser realizado, seguido da aplicação correta dos métodos de análise em condições de incerteza e risco.

Com uma análise prévia de investimentos é possível racionalizar a utilização dos recursos de capital. Ainda, de acordo com as contingências ligadas aos investimentos, a avaliação envolverá desde critérios puramente monetários (situação mais simples) até critérios de mensuração mais complexa, como vantagens estratégicas ou impacto ambiental (CASAROTTO FILHO & KOPITTKE, 1998).

Para solução de um problema de análise de investimento de capital é necessário o conhecimento de técnicas estudadas em uma disciplina normalmente conhecida como engenharia econômica.

Segundo Gitman (2003), investimento de capital é o processo total que consiste em gerar, selecionar e acompanhar alternativas de dispêndio de capital. Um dispêndio de capital é uma despesa que a empresa faz, visando gerar benefícios durante um período superior a um ano. Um dispêndio representa basicamente um comprometimento de recursos. Pode ser feito sob a forma de desembolso de caixa ou troca de ativos.

2.2.1 O Fluxo de Caixa Descontado

O método mais comumente usado na avaliação de investimentos é o do FCD, de onde se obtém o VPL, e a TIR, entre outros critérios.

Para utilizar o método é necessário conhecer o Fluxo de Caixa (FC) referente a um empreendimento. Este deve compor-se de contribuições que refletem, com grande probabilidade de acerto, as entradas e saídas de dinheiro que realmente vão atuar ao longo do prazo analisado. Condensando todas as contribuições periódicas de um empreendimento, podem-se destacar os seguintes conjuntos importantes: investimentos; resultados operacionais, isto é, receitas operacionais subtraídas das despesas operacionais; receitas eventuais e gastos eventuais (CASAROTTO FILHO & KOPITTKE, 1998).

Segundo Hirschfeld (1984), a análise de viabilidade de um empreendimento compõe-se dos seguintes aspectos: legais, através do exame do objetivo do empreendimento; jurídicos; administrativos; mercadológicos; técnicos; econômicos e financeiros. Tanto quanto possível, quantifica-se estes aspectos em termos financeiros e se examina o FC previsto para o

empreendimento dentro de um prazo de interesse. Este FC é então descontado – daí o nome do método – a valor presente gerando os critérios de decisão VPL e TIR, por exemplo.

O critério do VPL tem como finalidade determinar um valor no instante considerado inicial (data 0), a partir de um FC formado por uma série de recebimentos e desembolsos. Ao transportar os recebimentos e desembolsos para a data zero de um diagrama de FC, estes são descontados a uma taxa de juros considerada (ROSS, WESTERFIELD & JAFFE, 2002).

Na sua forma mais simples, a taxa de juros normalmente usada é a conhecida Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Em virtude de se usar frequentemente a expressão desconto ou valor descontado em uma operação onde se determina o VPL, a TMA ou a taxa de juros envolvida recebe, muitas vezes, o nome de taxa de desconto.

Outros critérios conhecidos como Valor Futuro Líquido (VFL) e Valor Anual Uniforme (VAU) podem ser considerados como variações do critério do VPL, sendo que a única diferença é a referência temporal, ou seja, para onde os fluxos de caixa são deslocados (ou nivelados, no caso do VAU).

Segundo Dixit & Pindyck (1994), o conceito por traz do critério do VPL remonta da formulação proposta por Tobin (1969), onde o princípio subjacente é a regra básica do VPL. Tal regra compara o valor capitalizado do investimento marginal com o seu custo de compra. O valor pode ser observado diretamente se o proprietário do investimento puder negociá-lo em um mercado secundário.

De outra forma, esse é um valor computado como o valor presente esperado do fluxo de lucros que ele deseja obter. A razão deste para o preço de compra (ou *replacement cost*) da unidade do ativo negociado, chamado q de Tobin, governa a decisão de investimento.

Valendo-se da matemática financeira, em se tendo, após n períodos, um Valor Futuro (VF), sendo i a taxa de juros, teremos o Valor Presente (VP) referente a este único VF o valor VP igual a equação (1) abaixo:

$$VP = VF (1 + i)^{-n} \quad (1)$$

Ao se analisar um FC referente à determinada alternativa financeira j , há vários valores envolvidos, ora como receitas, ora como dispêndios. A somatória algébrica de todos os valores envolvidos nos n períodos considerados, reduzidos ao instante considerado inicial ou instante zero e sendo i a taxa de juros comparativa, se chama VPL.

O VPL de um FC equação (2) de uma alternativa j é, portanto, a somatória algébrica dos vários valores presentes (VP) envolvidos nesse FC. Logo:

$$VPL_j = \sum_{i=1}^n FC_n (1 + i)^{-n} \quad (2)$$

onde:

VPL_j = Valor Presente Líquido de um fluxo de caixa da alternativa j ;

n = número de períodos envolvidos em cada elemento da série de receitas e dispêndios do fluxo de caixa;

FC_n = cada um dos diversos valores envolvidos no fluxo de caixa e que ocorrem em n ;

i = Taxa de Juros Comparativa ou Taxa Mínima de Atratividade, também chamada de Taxa de Desconto.

Quando todo o FC previsto para um determinado projeto é trazido à data zero, fazendo com que o VPL esperado se iguale à zero, obtém-se a TIR para o projeto. A TIR é o percentual de retorno obtido sobre o saldo investido e ainda não recuperado em um projeto de investimento. Em outras palavras, a TIR pode ser entendida como a taxa de remuneração do capital empregado (ROSS, WESTERFIELD & JAFFE, 2002).

Na análise da viabilidade de um projeto, a TIR é sempre comparada à TMA para a conclusão de aceitação ou não de um projeto. Se a TIR é maior que a TMA têm-se um projeto atrativo. Se por outro lado, a TIR é menor que a TMA, o projeto passa a ser considerado sem atratividade.

Segundo Graham & Harvey (2001), em um levantamento sobre as principais práticas de finanças corporativas utilizadas por empresas americanas e canadenses, o critério do VPL, juntamente com o critério da TIR são os mais utilizados pelos tomadores de decisão na avaliação dos projetos da empresa. A relevância do trabalho pode ser notada pela amostra coletada, composta pelos diretores financeiros de tais empresas, ou seja, aqueles que tomam as decisões finais.

Porém, considerando a dinâmica atual do ambiente de negócios, competitivo e com uma incerteza em relação ao futuro cada vez maior, há uma necessidade premente de evolução dos métodos tradicionais de avaliação de investimentos. Isso se mostra através da necessidade de incorporar tais incertezas e dinamismo do mercado nos métodos e critérios de avaliação das oportunidades de investimento.

2.2.2 Árvores de Decisões

Existem variações sobre os diversos elementos que compõem o FC que precisam ser considerados para o total sucesso na escolha da melhor alternativa. Essas variações,

entretanto, não são consideradas no método do FCD, tornando o VPL e a TIR valores determinísticos (CASAROTTO FILHO & KOPITTKE, 1998).

Estas variações são decorrentes das incertezas e do risco a que todo fluxo de caixa de um empreendimento real está sujeito. Sendo assim, um valor determinístico não é capaz de incorporar na avaliação os efeitos acarretados por estes elementos. É necessário, neste caso, proceder com uma análise probabilística.

Ao calcular uma distribuição de probabilidades associada a um resultado do FC (VPL ou TIR), pode-se analisar o risco e as chances do projeto se tornar inviável. As técnicas mais usuais para se proceder com a análise de risco de um projeto correspondem à Análise por Árvore de Decisão (AAD) e a simulação dos fluxos de caixa previstos para o projeto, realizada principalmente através da Simulação de Monte Carlo (SMC) (CASAROTTO FILHO & KOPITTKE, 1998).

O modelo de avaliação de investimentos através da AAD é uma maneira gráfica de visualizar as conseqüências de decisões atuais e futuras bem como os eventos aleatórios relacionados. Permite o entendimento e o controle de um bom número de problemas de investimentos sujeitos a riscos (ROSS, WESTERFIELD & JAFFE, 2002).

Nos ramos de uma árvore de decisão devem ser anotadas: as probabilidades após os nós de incerteza (representados por um círculo); os valores de investimentos nos nós de decisão (representados por um quadrado); e os retornos do investimento no final os ramos. A **Figura 2.1** mostra um esquema básico de uma AAD para dois períodos.

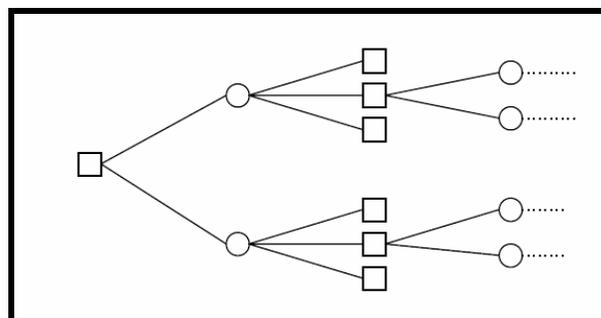


Figura 2.1 – Análise por Árvore de Decisão

As árvores de decisão permitem mapear de maneira clara as alternativas e recompensas de várias decisões, atribuindo probabilidades de ocorrência a elas. Apesar disso, não é um método muito sofisticado para tratar o risco, pois se apóiam em estimativas subjetivas de probabilidades (GITMAN, 2003).

2.2.3 Simulação de Monte Carlo

Outra forma de avaliar o risco em alternativas de investimentos é através da simulação do seu FC. Através deste método é possível auxiliar a tomada de decisão informando o valor esperado dos resultados econômicos e, também, o risco das alternativas de investimentos, através da dispersão destes resultados. Outra informação de interesse é a probabilidade de inviabilidade dos investimentos (CASAROTTO FILHO & KOPITTKKE, 1998).

O objetivo da simulação é obter a média e a variância do VPL, ou outro resultado econômico do FC. Isto é feito atribuindo valores aleatórios para as variáveis que mais impactam os fluxos de caixa do projeto. Ou seja, no lugar de um valor para o fluxo líquido, podem ocorrer vários fluxos possíveis, cada um com sua respectiva probabilidade de ocorrência¹.

Um modelo de simulação simples e conhecido é o Método de Simulação de Monte Carlo, desenvolvido em Hertz (1964). Em seu trabalho intitulado “*Risk Analysis in Capital Investments*”, Hertz, inspirado nos jogos de chance do cassino Monte Carlo, Mônaco, desenvolveu uma metodologia para calcular o valor esperado e o desvio padrão de um FC.

O comportamento aleatório dos jogos de chance é similar a forma como a SMC seleciona os valores atribuídos às variáveis no modelo de simulação. Para cada variável, são definidos seus possíveis valores com sua respectiva distribuição de probabilidades. Durante a simulação, o valor atribuído a cada variável é escolhido aleatoriamente dentro dos valores possíveis.

2.3 Opções Reais

Em um mundo real, as condições de risco e incerteza devem ser consideradas nas avaliações de investimentos. Sendo assim, um estudo detalhado das premissas e variáveis de um projeto deve ser realizado. Além disso, a aplicação correta dos métodos de análise, que incorporam a volatilidade dessas variáveis irá justificar, de forma adequada, se um investimento deve ser realizado ou não.

A possibilidade de se ter opção durante a vida de um projeto normalmente é desconsiderada nas avaliações tradicionais, sendo que o risco e a incerteza em um projeto, além de criar a possibilidade de se exercer uma opção, atribuem mais valor a ela.

A partir dessas considerações a respeito da avaliação de investimentos, e da revisão dos métodos tradicionais feita na seção anterior, fica evidente que os métodos baseados no FCD, por si só não são capazes de atribuir o correto valor aos projetos. Isto por que falham em capturar a flexibilidade proporcionada por opções embutidas nos projetos.

1. Ver Casarotto Filho & Kopittke (1998) para o desenvolvimento matemático da média e do desvio padrão do VPL

A metodologia de análise através do paradigma das opções reais é capaz de fornecer valor às flexibilidades embutidas em investimentos que têm como características principais: a irreversibilidade de parte dos investimentos; a incerteza das variáveis subjacentes; e o momento ótimo (ou *timing*) para a realização dos desembolsos de capital (DIXIT & PINDYCK, 1994).

De acordo com Dias (2005), a base da moderna teoria financeira se inicia, na década de 50, com os trabalhos de Markowitz (1952) sobre a teoria do portfólio e as proposições de Modigliane & Miller (1958) sobre estrutura de capital. Sendo que as bases para a teoria de opções reais se iniciaram na década de 60, com os trabalhos de Sharpe (1964) sobre apreçamento de ativos (CAPM – *Capital Asset Pricing Model*) e Samuelson & McKean (1965) que introduziram o cálculo estocástico em finanças.

A teoria de opções reais se situa dentro da teoria de finanças corporativas e de outros conhecimentos correlatos. Entre eles estão: a engenharia econômica, fundamentada na ciência exata matemática financeira, e outras disciplinas de apoio como a estatística, a simulação e métodos de análise de decisão (CASAROTTO FILHO & KOPITTKKE, 1998).

A capacidade de incorporar a incerteza e considerar a possibilidade de adiamento de uma decisão de investimento é o ponto principal onde a ROA é capaz de complementar a avaliação pelo método do FCD.

2.3.1 Investimento em Condições de Incerteza e Risco

Para que se possam analisar projetos de investimento através da abordagem das opções reais, é necessário que estes possuam as características de irreversibilidade (parte dos investimentos não pode ser recuperada), *timing* (há a possibilidade de se tomar decisões durante o projeto) e a incerteza em relação às variáveis do projeto (DIXIT & PINDYCK, 1994).

Nesse ínterim, é possível verificar que projetos de investimento em condições de incerteza e risco, não podem ser corretamente avaliados se for usado apenas o método do FCD, com seu VPL, por exemplo. Isso porque, o FCD, por ser um método que considera decisões do tipo “agora ou nunca”, não é possível avaliar a possibilidade de alterações na configuração do FC durante o projeto.

Ainda, por considerar fluxos de caixa previsíveis e determinísticos, não é possível avaliar o risco do projeto. De certa forma, esse problema pode ser em parte sanado através de uma simulação. Porém, quando há opções embutidas, surgem alguns problemas, como será visto mais adiante.

Segundo Santos (2001), a utilização das técnicas de análise tradicionais tende a subavaliar certos investimentos, principalmente aqueles que tenham as características de *timing*, irreversibilidade e incerteza. Isso pode conduzir a resultados errados que comprometeriam a introdução de projetos que podem gerar resultados significativos para o empreendedor, colocando em risco a sobrevivência da empresa. Segundo o autor, a abordagem de opções reais é capaz de suprir as lacunas das técnicas tradicionais de orçamento de capital.

Em projetos de investimentos em ativos reais, parte do investimento realizado não pode ser recuperado, mas também, em contrapartida, uma parcela do investimento total necessária à implementação do projeto como um todo pode ser adiada. Esse *timing*, ou momento ótimo para a realização de um desembolso de capital, fornece a possibilidade de se tomar decisões durante a realização do projeto. Somado a esses fatores está a incerteza em relação às variáveis que mais impactam o valor do projeto.

De acordo com Dixit & Pindyck (1994), é através da interação dessas três características que se pode determinar a decisão ótima de investimento.

Muitos acadêmicos e administradores, agora reconhecem que o método do FCD, usado no orçamento de capital é inadequado, no sentido de que não pode capturar propriamente a flexibilidade administrativa para adaptar e revisar decisões posteriores em resposta a um desenvolvimento inesperado do mercado. O método do VPL tradicional assume para o negócio um “cenário esperado”, e presume uma passividade administrativa, confiando em uma determinada estratégia operacional (TRIGEORGIS, 1993, grifo do autor).

Mun (2002) apresenta uma tabela com as principais falhas do método do FCD. No lado esquerdo apresenta as hipóteses por traz do método e no lado direito a realidade contrastante com essas hipóteses. A **Tabela 2.1** na abaixo apresenta de forma resumida alguns aspectos apresentados no livro do autor.

Hipóteses	Realidade
Decisões do tipo “agora ou nunca”, ignorando as “flexibilidades operacionais”	Possibilidade de adiar as decisões
Gerenciamento passivo dos projetos	Gerenciamento ativo
FC livres previsíveis e determinísticos ²	FC livres são incertos de natureza estocástica
Todos os riscos do projeto estão inseridos na taxa de desconto	Várias fontes de incerteza
Taxa de desconto constante	O risco varia durante o projeto

Tabela 2.1 – As Falhas do FCD

Fonte: Mun (2002)

2. Através da Simulação de Monte Carlo é possível estabelecer FC probabilísticos.

Através da **Tabela 2.1** pode-se verificar que a realidade do ambiente de negócios está distante do que se estabelece como hipóteses do método. Porém, a incorporação dessa realidade no valor da opção de investimento, mesmo através da metodologia de avaliação de opções reais, não seria possível sem a utilização do método do FCD.

Consequentemente é importante ressaltar que tanto o valor gerado pelo critério do VPL quanto pela ROA são abordagens de FCD. Todavia, elas são fundamentalmente diferentes e o VPL é um caso especial da abordagem através das opções reais. Pode-se dizer que o VPL é resultado de uma ROA onde se pressupõe não haver flexibilidade na tomada de decisões (COPELAND & ANTIKAROV, 2001).

Mais especificamente, o VPL é um caso especial da ROA. Isto ocorre porque quando as incertezas relativas ao projeto se resolvem, ou no ponto de expiração da opção, o valor do projeto é exatamente o resultado do VPL. Ou seja, quando a volatilidade da variável subjacente do projeto é aproximadamente zero, e quando não é mais possível adiar a decisão de investimento, o valor da opção real neste ponto é zero (MUN, 2002).

Quando uma empresa tem a possibilidade de alterar seus insumos em decorrência de alguma variação, satisfatória ou não do mercado, têm-se uma opção valiosa de flexibilidade. Por esta tecnologia flexível, a empresa deveria estar disposta a pagar um prêmio se comparado a uma alternativa rígida que não confere escolhas ou se estas são menores (SANTOS, 2001).

Portanto, o resultado dessa assimetria causada pela adaptabilidade administrativa é chamado de método do VPL expandido, composto pelo VPL tradicional (estático ou passivo), derivado do FC direto, e o valor da opção de investimento embutida, derivada da adaptabilidade estratégica e operacional do projeto. Sendo assim, tem-se que equação (3):

$$VPL_{\text{EXPANDIDO}} = VPL_{\text{ESTÁTICO}} + \text{Valor da Opção} \quad (3)$$

Copeland & Antikarov (2001) salientam que, apenas quando se começa a entender as limitações do FCD, é que se pode verificar que as opções reais estão presentes na maioria dos projetos de investimento de capital. E mesmo que se utilize a ROA para captar a flexibilidade na tomada de decisões, o primeiro passo sempre será a estimativa do VPL sem flexibilidade ($VPL_{\text{ESTÁTICO}}$).

Além do VPL e da TIR, a taxa de desconto utilizada para descontar os fluxos de caixa também traz problemas. Segundo Brennan e Schwartz (1993): “é justamente a taxa de desconto o calcanhar de Aquiles da abordagem clássica”.

A abordagem de opções reais, por outro lado, sugere que várias fontes de incerteza sobre os ganhos futuros, tais como flutuação no preço dos produtos, custos de insumos, taxas de câmbio e políticas regulatórias, têm efeitos muito mais importantes no investimento do que o nível das taxas de desconto (DIXIT & PINDYCK, 1994).

O uso da taxa de desconto correta não é uma questão esotérica e teórica, mas um aspecto fundamental para a tomada correta de decisões. Para avaliar vários cenários possíveis pode-se fazer uma AAD, mas apesar de “tentar captar o valor da flexibilidade gerencial” falha, pois pressupõem uma taxa de desconto constante ao longo de toda a árvore, quando na verdade o risco do FC varia de acordo com a localização na árvore (COPELAND E ANTIKAROV, 2001).

Para Kulatilaka (1993), a análise econômica convencional, baseada no método do FCD falha em capturar o impacto estratégico de projetos. O método do FCD ignora as “flexibilidades operacionais” que dão aos gerentes dos projetos à opção de revisar suas decisões em resposta às mudanças exógenas das condições econômicas. A importância de tais opções operacionais torna-se crítica quando o ambiente é altamente volátil e a tecnologia é flexível, permitindo assim a intervenção gerencial na maximização do retorno e minimização dos custos de um projeto.

Em um projeto de investimento de capital, onde há opções embutidas, o valor de se perder uma opção é um custo de oportunidade que deve ser incluído como parte do custo do investimento. Como resultado, a regra do VPL, “investir quando o valor de uma unidade de capital é no mínimo tão grande quanto seu custo de aquisição e instalação” deve ser modificada. O valor da unidade deve exceder o custo de aquisição e instalação, por um montante igual ao valor de manter a opção de investir viva (DIXIT & PINDYCK, 1994).

2.3.2 Origem das Opções Reais

Originalmente, acadêmicos da seara financeira, principalmente a partir do fim da década de 60 e início da década de 70, segundo Dias (2005), começaram a olhar para os desenvolvimentos alcançados na teoria de apreçamento de opções financeiras e fazer analogias com as opções presentes no desenvolvimento de ativos reais. Foi então que Myers (1977) criou o termo “opções reais”, após a publicação dos artigos de Black & Scholes (1973) e Merton (1973) sobre valoração de opções financeiras.

Desde então, muitas publicações e estudos teóricos e empíricos têm sido realizados, contribuindo para o desenvolvimento da teoria emergente de opções reais. Assim, da teoria

das opções financeiras foi fundamentada a base para o desenvolvimento da teoria de opções reais.

Essa surgiu através da percepção de acadêmicos e praticantes que, analisando projetos de investimento, descobriram que esses possuíam opções embutidas que deveriam ser consideradas no valor do projeto.

Uma analogia interessante entre opções financeiras e opções reais é encontrada em Santos (2001). Segundo o autor, um projeto de investimento de capital pode ser considerado como um conjunto de opções reais sobre um ativo real, o projeto. Assim, para que seja possível uma boa avaliação do projeto de forma que se possa maximizar seu retorno, faz-se necessário o conhecimento das oportunidades embutidas no mesmo, de tal forma que o administrador possa saber quando e qual será a melhor decisão a ser tomada.

2.3.3 Opções Financeiras

Segundo Bodie, Kane & Marcus (2000), títulos derivativos, ou simplesmente, derivativos, são títulos cujos preços são determinados por, ou “derivados de”, preços de outros títulos. Esses títulos permitem aos investidores mudar o formato da distribuição de probabilidades dos retornos sobre os investimentos. Os contratos de opções financeiras são títulos derivativos. Esses são escritos sobre ações ordinárias, índices de bolsas, câmbios estrangeiros, mercadorias agrícolas, e taxas futuras de juros.

Opções é um tipo especial de contrato financeiro, pois dão ao seu titular o direito, mas não a obrigação, de exercer a opção. O comprador usa a opção somente se é interessante fazê-lo; em caso contrário a opção pode ser descartada (HULL, 1993).

Existem dois tipos básicos de opções: opção de compra (*call options*), que é o direito de comprar o ativo em certa data, por determinado preço; e opção de venda (*put options*), que é o direito de vender o ativo em certa data, por determinado preço. O preço do contrato é considerado como “preço de exercício” e sua data de expiração é conhecida como “data de vencimento ou de exercício”.

Existe também o prêmio ou valor da opção, que é a quantia de dinheiro paga na data da contratação da opção. O titular é o comprador de uma opção e vendedor é o lançador de uma opção. Uma opção americana pode ser exercida – ato de compra ou venda do ativo-objeto (“exercício da opção”) – a qualquer momento, até a data de vencimento. Uma opção européia difere de uma opção americana no sentido de que só pode ser exercida na data de vencimento (ROSS, WESTERFIELD & JAFFE, 2002).

A **Tabela 2.2** mostra a classificação das opções quanto à probabilidade de exercício.

Classificação	Opção de compra	Opção de venda
Dentro do dinheiro (in-the-money)	Preço do ativo-objeto é maior que o preço de exercício	Preço do ativo-objeto é menor que o preço de exercício
No dinheiro (at-the-money)	Preço do ativo-objeto é igual ao preço de exercício	Preço do ativo-objeto é igual ao preço de exercício
Fora do dinheiro (out-of-money)	Preço do ativo-objeto é menor que o preço de exercício	Preço do ativo-objeto é maior que o preço de exercício

Tabela 2.2 – Classificação de Opções

Fonte: Ross et al. (2002)

Black & Scholes (1973) e Merton (1973) publicaram os primeiros trabalhos sobre apreamento de opções. Atualmente, a fórmula de Black & Scholes é a mais usada na avaliação das opções financeiras negociadas no mercado. É um dos primeiros modelos e certamente o mais conhecido. Sua fórmula geral é mostrada nas equações (4), (5) e (6).

$$C = S * N(d_1) - E * e^{-rt} * N(d_2) \quad (4)$$

para:

$$d_1 = \left[\ln\left(\frac{S}{E}\right) + \left(r + \frac{1}{2}\sigma^2\right)t \right] / \sqrt{\sigma^2 t} \quad (5)$$

$$d_2 = d_1 - \sqrt{\sigma^2 t} \quad (6)$$

onde:

S = preço corrente da ação;

E = preço de exercício da opção;

r = taxa de retorno livre de risco capitalizada continuamente (em termos anuais);

σ^2 = variância (anual) da taxa de retorno continua da ação;

t = prazo (em anos) até a data de vencimento da opção.

Além disso, é usado na fórmula o conceito estatístico:

$N(d)$ = probabilidade de que uma variável aleatória com distribuição normal padronizada tenha valor menor ou igual a d .

2.3.4 Relações entre Opções Reais e Opções Financeiras

Luherman (1998a) apresenta um quadro onde faz uma analogia interessante entre as variáveis de uma oportunidade de investimento e de uma opção de compra. Para simplificar a apresentação, apenas foram consideradas as variáveis presentes no modelo de Black & Scholes. A **Figura 2.2** apresenta a analogia proposta pelo autor.

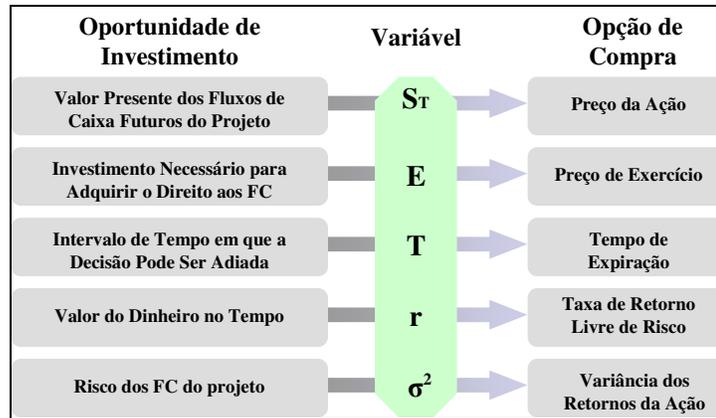


Figura 2.2 – Analogia entre oportunidade de investimento e opções de compra
 Fonte: Luherman (1998a)

Segundo Santos (2001), um projeto de investimento de capital pode ser considerado como um conjunto de opções reais sobre um ativo real, o projeto. Assim, para que seja possível uma boa avaliação do projeto de forma que se possa maximizar seu retorno, faz-se necessário o conhecimento das oportunidades embutidas no mesmo, de tal forma que o administrador possa saber quando e qual será a melhor decisão a ser tomada.

O princípio da abordagem de opções reais é considerar uma oportunidade de investimento como uma opção financeira, ou seja, existe o direito de realizar o investimento em uma data futura, mas não a obrigação. Sendo assim, um projeto pode ser estruturado como uma seqüência de decisões administrativas ou opções reais ao longo do tempo (FIGUEIREDO NETO, MANFRINATO E CREPALDI, 2003).

Projetos de investimento de capital, avaliação de propriedades intelectuais, avaliação de terras, de fontes de recursos naturais (minas, poços de petróleo, etc.) e avaliação de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) são exemplos de ativos reais que podem ser avaliados utilizando essa teoria (SANTOS, 2001).

É consenso que a teoria das opções financeiras pode ser considerada como a “pedra fundamental” da ROA.

2.3.5 ROA na Avaliação de Projetos

Segundo Dias (2005), a ROA, não é uma solução revolucionária, mas parte de um processo evolutivo. Isto porque não se pode ignorar a incerteza e o valor do aprendizado no gerenciamento ativo de projetos. Portanto, a aprendizagem e o valor da informação num contexto dinâmico são destaques fundamentais da motivação prática de uso da ROA nas empresas.

Tourinho (1979), pesquisador brasileiro, utiliza a ROA na valoração de recursos naturais. Este é um campo onde se encontra o maior número de publicações de aplicação da teoria, principalmente na avaliação de campos de petróleo.

Luius (2001), em pesquisa a respeito do estado de desenvolvimento das opções reais, destaca que a interpretação e avaliação de opções reais através da teoria de apreçamento de opções financeiras pode ser considerada como um novo paradigma na teoria de investimentos. Ainda, enfatizam que quanto maior a afinidade dos tomadores de decisão com os conceitos da moderna teoria financeira, mais a teoria de avaliação irá se desenvolver. Principalmente a aplicação do paradigma de opções reais.

Porém, consideram que ainda há lacunas entre as pesquisas e a adoção do método em casos práticos. Já Triantis & Borison (2001), buscando saber como as opções reais são praticadas e qual seu impacto nas empresas, identificaram 34 companhias (que utilizam a ROA) de sete diferentes setores industriais.

O artigo identificou os três principais usos das opções reais no meio corporativo: como uma forma de pensar estrategicamente; uma ferramenta de avaliação analítica; e um amplo processo organizacional de avaliação, monitoramento e gerenciamento de investimentos de capital.

De acordo com a pesquisa de Triantis & Borison (2001), as áreas onde mais se aplicam as opções reais são os setores que se caracterizam por apresentarem grandes investimentos com retorno incerto. Destaque para a indústria de petróleo e gás, investimentos em plantas de geração de energia, projetos de pesquisa e desenvolvimento e indústrias de alta tecnologia.

Segundo Dias (2005), a ROA é o estado da arte da avaliação de investimentos em projetos. Seu trabalho apresenta uma evolução bibliográfica precisa, com os principais e mais citados artigos de opções reais. Também aborda a questão da utilização das opções reais pelas empresas.

2.3.6 Principais Componentes da ROA

Para que se possa obter uma sólida avaliação através do paradigma das opções reais é necessário conhecer seus principais componentes. Isso é feito através da definição do domínio onde ela se aplica (em que tipos de projetos). Da definição do conjunto exato de circunstâncias onde é possível aplicar esses conhecimentos (em que tipos de problemas de tomada de decisão). E da definição das variáveis observáveis (ou necessárias) para a formulação e solução do problema.

Sendo assim, é necessário estabelecer um método adequado para abordar o problema através das opções reais. Mun (2002) propõe uma metodologia genérica, e que pode ser usada na avaliação de qualquer tipo de projeto, desde que possuam as características de *timing*, irreversibilidade e incerteza.

Mun (2002) chama esta metodologia de Processo de Opções Reais. Toda a sequência de passos, proposta pelo autor, será abordada no capítulo 5, durante a aplicação da ROA em um caso específico.

De acordo com Trigeorgis (1993), as categorias mais comuns de opções reais encontradas são:

- Opção de Adiamento;
- Opção *time-to-build* (investimento em etapas);
- Opção de alteração da escala de operação (expandir, contrair, parar temporariamente e reiniciar);
- Opção de abandono;
- Opção de troca (produtos, insumos, mercados e outros);
- Opção de crescimento;
- Opção composta (interação múltipla entre opções).

Nesta pesquisa, a opção identificada na alternativa de investimento analisada é a opção de troca de insumos. Segundo Mun (2002), uma opção de troca de insumo fornece o direito e a capacidade, mas não a obrigação, de trocar entre diferentes tipos de condições operacionais de negócios, incluindo diferentes tecnologias, mercados, ou produtos.

2.3.7 A Opção de Troca de Insumos

Em Margrabe (1978) se encontra a primeira avaliação do valor de uma opção de trocar um ativo por outro. Baseado nas soluções de Black & Scholes (1973) e Merton (1973), o autor desenvolveu uma equação para o valor da opção de trocar um ativo de risco por outro. Sua solução se referia especificamente às opções financeiras.

Um ponto importante colocado por Margrabe (1978) é que, o valor da opção não depende somente do valor corrente dos dois ativos que podem ser transacionados. Depende também da matriz de variância e covariância das taxas de retorno dos dois ativos, além, é claro, da vida da opção.

Já na avaliação de opções reais, um dos trabalhos mais importantes foi o de Kulatilaka (1988), que analisou o valor de um sistema de manufatura flexível. Através da justificativa de que os métodos tradicionais não podiam capturar uma vantagem importante de tal sistema, o

valor da flexibilidade. O trabalho avalia a flexibilidade de trocar entre diferentes modos de produção. O modelo proposto captura o valor derivado da habilidade de uma empresa competir em condições de incerteza.

Nessa mesma linha, Kulatilaka (1993) avalia o valor da flexibilidade de se poder optar pela troca dos combustíveis de aquecimento do vapor de uma caldeira industrial. O equipamento, hipoteticamente, poderia operar tanto com óleo combustível como com gás natural.

Segundo Kulatilaka e Trigeorgis (1994), um investimento com escolhas potenciais, ou opções embutidas, deve ser mais valioso do que investimentos com escolhas restritas. Sendo assim, o valor da flexibilidade justifica o custo extra do investimento com opções embutidas.

Ainda no fim da década de 80 e início de 90, outros autores também trataram da questão da flexibilidade de troca. Entre eles pode-se destacar Carr (1988), Fine & Freund (1990), He & Pindyck (1992), Upton (1994) e Fu (1996). Carr (1988), em particular, avaliou opções de troca compostas. Seu trabalho avaliou oportunidades de troca sequenciais para ativos financeiros.

Alves (2007) avalia a flexibilidade na escolha do combustível *flex fuel*, para o caso brasileiro, considerando a incerteza em relação ao preço do álcool e da gasolina. Segundo a autora, essa incerteza em relação aos combustíveis agrega valor ao veículo, pois, confere ao consumidor o direito de escolha do combustível mais barato toda a vez que abastece. O trabalho utiliza o método de simulação com fluxos de caixa dinâmicos, e também compara as vantagens da SMC com o modelo de nós de decisão quadrimiais. Os resultados indicam que a flexibilidade chega a representar, de acordo com Alves (2007), de 5% a 10% do valor do veículo.

Sodal, Koekebakker & Aadland (2004), avaliam a opção de trocar entre dois tipos de mercado para navios cargueiros híbridos. Ainda, avaliam a capacidade de operar nos dois mercados. O modelo considera um processo estocástico de reversão a média para os preços dos carregamentos.

A opção de troca tem sido analisada de várias formas. Entre elas, destacam-se: a opção de trocar entre escavar e deixar uma mina ociosa; trocar as instalações de uma empresa, considerando os mercados nacionais e internacionais (como o trabalho de Kogut & Kulatilaka (1994)); trocar fornecedores (doméstico e externo); optar por combustíveis alternativos; e sistemas de produção flexíveis, entre outros (SUBRAMANIAN, MURTHY & SHIRKHANDI, 2002).

2.3.8 Precificação de Opções Reais

Após Black & Scholes (1973) e Merton (1973) publicarem seus trabalhos, muitos desenvolvimentos foram feitos a fim de atribuir o correto valor às opções. Desde então, principalmente no caso das opções reais, diferentes formas, cada uma com seu grau de complexidade, foram sendo desenvolvidas para valorar as opções.

Por não se ajustar adequadamente as opções do tipo americana, a maioria dos casos de opções reais, o modelo de Black & Scholes (1973) não pode ser usado diretamente. Assim, Copeland & Antikarov (2002) salientam que é importante lembrar as sete hipóteses do modelo Black-Scholes para entender suas limitações para a análise de opções reais. O modelo Black-Scholes pressupõe que:

- A opção só pode ser exercida no vencimento – é uma opção européia;
- Só há uma fonte de incerteza;
- A opção está embasada em um único ativo subjacente sujeito à risco; portanto, as opções compostas estão excluídas;
- O ativo subjacente não paga dividendos;
- O preço de mercado corrente e o processo estocástico seguido pelo ativo subjacente são conhecidos (observáveis) – o que na maioria dos casos não é possível;
- A variância do retorno sobre o ativo subjacente é constante ao longo do tempo – volatilidade constante;
- O preço de exercício é conhecido e constante.

Dessa forma, quando se necessita de uma análise rápida, o Modelo de Black-Sholes geralmente aponta para a melhor alternativa. Mesmo se a resposta não for minuciosa, ela proporciona uma metodologia para enquadrar o problema e determinar as variáveis que afetam a avaliação (COPELAND & ANTIKAROV, 2001).

Já existe uma grande quantidade de trabalhos na literatura de opções reais que tratam das técnicas utilizadas no apreçamento das opções embutidas nos projetos. As mais utilizadas, entretanto, são as abordagens realizadas através do Modelo de Black-Scholes, do Modelo Binomial, da SMC e através do desenvolvimento de um modelo matemático contínuo para o valor da alternativa de investimento, representado por uma EDP.

Porém, qualquer problema de investimento exige cuidadosa análise específica e é raro que uma única fórmula ofereça sempre a resposta correta. Precisa-se dispor de um método simples, mas genérico e poderoso, para avaliar as opções reais e financeiras complicadas que

surgem na prática. Felizmente, esse enfoque existe e é ao mesmo tempo simples e intuitivo. Também é o método básico de avaliação de opções em situações reais nas quais a fórmula de Black-Scholes não se ajusta perfeitamente. Esse método é o enfoque de dois estados, ou modelo binomial (ROSS, WESTERFIELD & JAFFE, 2002).

Quase todos os problemas de opções reais podem ser resolvidos aplicando-se grades binomiais, porque o valor presente dos ativos reais segue um Movimento Browniano Geométrico (MBG) – um importante processo de tempo contínuo, que é um bloco de construção fundamental para o desenvolvimento do modelo matemático contínuo –, quando modelado por grades binomiais (COPELAND & ANTIKAROV, 2001).

Cox, Ross e Rubinstein (1979) recorrem à teoria da probabilidade para desenvolver uma abordagem de grade binomial para o apreçamento de opções, que emprega matemática simples, alcançando resultados aproximados aos do Modelo Black-Scholes.

Em termos gerais, as grades são mais versáteis do que as soluções de cálculo estocástico nos problemas de apreçamento, embora sejam menos elegantes. No entanto, dividindo-se os períodos anuais das grades simples em intervalos muito menores, tem-se que, no limite, os resultados se aproximam de uma solução contínua ao longo do tempo.

Existem basicamente duas abordagens para avaliação de opções através do Modelo Binomial: a abordagem da probabilidade neutra em relação ao risco; e a abordagem do portfólio replicante. A vantagem da abordagem da probabilidade neutra em relação ao risco sobre a abordagem do portfólio replicante é que as probabilidades neutras ao risco permanecem constantes de nó para nó. Consequentemente, a abordagem neutra em relação ao risco é de implementação mais fácil no computador do que a abordagem do portfólio replicado (COPELAND & ANTIKAROV, 2001).

A idéia básica do portfólio replicado é encontrar o número certo de unidades do ativo subjacente sujeito a risco, V_0 , mais alguns títulos, B_0 , de modo que o portfólio tenha exatamente o mesmo retorno que a opção, em todas as situações. Como os preços de mercado dos componentes individuais V_0 e B_0 são conhecidos, o valor de uma opção de compra, por exemplo, é exatamente o mesmo que o valor do portfólio replicado.

Para se obter uma EDP considerando um processo estocástico – no qual se estuda a evolução no tempo de uma variável aleatória –, e uma otimização dinâmica sob incerteza – necessária para modelar corretamente as decisões de investimento, é necessário o desenvolvimento de um modelo matemático que possa representar a interação entre todas as variáveis do projeto.

2.3.9 Volatilidade

Na ROA, o risco é simplesmente quantificado em termos da volatilidade de mercado dos retornos sobre o ativo subjacente. Os fluxos de caixa esperados, corrigidos pelo risco, são descontados a taxa livre de risco, e o risco de mercado fica caracterizado na volatilidade dos fluxos de caixa modelados (COPELAND & ANTIKAROV, 2001).

Segundo Mun (2002), para se calcular o valor das opções reais de um projeto é necessário estabelecer várias hipóteses, como será visto adiante. Entretanto, os fatores de ordem operacional, tecnológica, de mercado, além de outros fatores são assuntos para incerteza e mudança. Sendo assim, uma opção real tem valor estratégico somente quando:

- Houver incerteza;
- A incerteza tem grande impacto no valor do projeto;
- A gerência tem flexibilidade;
- As estratégias flexíveis são confiáveis e executáveis; e
- A gerência é racional na execução das estratégias.

Desta forma, é necessário estabelecer um método capaz de quantificar as incertezas presentes em projetos. Estas incertezas se apresentam na forma de volatilidade do retorno do ativo subjacente ao projeto em análise.

A observação e sentimento da incerteza podem ser vistas através de um gráfico que represente os FC livres versus o tempo de maturação de um projeto. A **Figura 2.3** mostra um gráfico desse tipo, considerando que não há incerteza, ou seja, a volatilidade é zero.

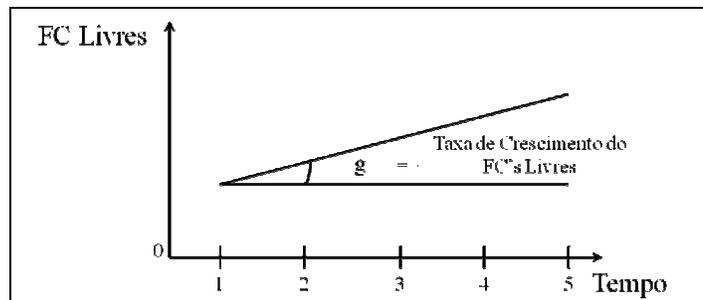


Figura 2.3 – FC livre de incertezas

Fonte: Mun (2002)

Previsões similares podem ser construídas usando dados históricos e ajustando estes dados para um modelo de série temporal ou uma análise de regressão. Qualquer que seja o método de obtenção dessas previsões ou a forma da curva de crescimento, estas são estimativas pontuais da incerteza futura. Realizar uma análise neste FC estático fornece um valor preciso do projeto, assumindo que todos os futuros FC são conhecidos com certeza, isto

é, não existe incerteza. Nesse caso, a volatilidade é zero para todos os valores previstos (MUN, 2002).

Na realidade as condições de negócios são difíceis de prever. Com isso, dificilmente um FC se comporta como o da **Figura 2.3**. Por exemplo, ao simular o mesmo FC, mas considerando agora que este segue um processo estocástico com volatilidade positiva, tem-se a **Figura 2.4**.

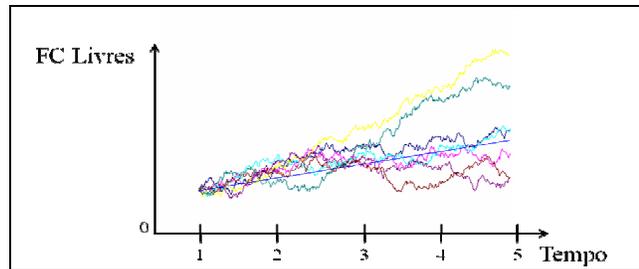


Figura 2.4 – FC com incertezas
Fonte: Mun (2002)

A SMC pode ser aplicada para quantificar os níveis de incerteza em FC's. Entretanto, a simulação não considera as alternativas estratégicas que a gerência pode ter. Por exemplo, ela contabiliza o intervalo e a probabilidade que o atual FC pode ser acima ou abaixo do nível previsto, mas não considera o que a administração pode fazer se tais condições ocorrerem (MUN, 2002).

Dessa forma, é necessária a utilização de métodos mais apropriados para capturar a real volatilidade das variáveis subjacentes aos projetos. Segundo Engle & Patton (2001), um modelo de volatilidade deve ser capaz de prever a volatilidade de um ativo, considerando que ele foi requisitado para uma aplicação financeira.

A abordagem mais amplamente aceita para abordar o risco em mercados financeiros foca na medição da volatilidade do retorno de determinado ativo. A volatilidade do retorno do portfólio depende da variância e da covariância entre os fatores de risco do portfólio, e a sensibilidade de ativos individuais para esses fatores de risco (ALEXANDER, 1999).

Segundo Copeland & Antikarov (2001), uma interessante implicação macroeconômica é que, quando aumenta a incerteza na economia, em razão, talvez, da instabilidade política, é de prever que o investimento reaja mais lentamente, pois vale mais “esperar para ver como é que fica”. A probabilidade de superar o preço de exercício da opção aumenta em consequência da maior volatilidade. É por isso que a volatilidade aumenta o valor das opções.

No caso das opções reais, como o ativo subjacente não costuma ser transacionado em mercados de conhecimento público, é necessário encontrar uma variável substituta (ou *proxy*).

Essa variável substituta pode ser derivada de uma SMC para o valor do projeto, outro ativo transacionado em mercados de conhecimento público, ou um portfólio sintético de ativos. Pode ser difícil encontrar a variável substituta, e isso é o maior problema teórico associado à ROA (COPELAND & ANTIKAROV, 2001).

Quando combinadas todas as incertezas decorrentes das variáveis do projeto, na incerteza única do valor do projeto (distribuição dos retornos do projeto), dá-se a este método o nome de abordagem consolidada da incerteza. Quando as decisões devem ser amarradas a um tipo específico de incerteza, então não haverá vantagem em combiná-las com outras incertezas do projeto. Neste caso, tem-se que usar a abordagem separada, em que duas ou mais fontes de incerteza tem de ser estimadas separadamente (MUN, 2002).

Provavelmente um dos parâmetros de entrada mais difícil de estimar em uma ROA é a volatilidade do FC. Existem vários métodos usados para calcular a volatilidade, cada um com potenciais vantagens e desvantagens.

Abordagem do retorno logarítmico dos fluxos de caixa

Calcula-se a volatilidade da estimativa individual do FC futuro e seu correspondente retorno logarítmico. Iniciando com uma série de FC previsto para o futuro, convertem-se eles em retornos relativos. O desvio padrão desse retorno logaritmo natural equação (7) é a volatilidade da série de fluxos de caixa usados na ROA. Deve-se observar que o número de retornos é um a menos que o número total de períodos.

$$Volatilidade = \sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

Este método é muito simples de implementar e não necessita da SMC para obter uma estimativa de volatilidade pontual. Esta abordagem é matematicamente válida e amplamente usada para estimar a volatilidade de ativos financeiros.

Entretanto, para a ROA, há várias advertências que merecem mais atenção, incluindo casos em que há FC negativo sobre certos períodos de tempo. O retorno relativo será um número negativo, e o logaritmo natural de um número negativo não existe. Em FC auto-correlacionados (estimados usando técnicas de previsão de séries de tempo) ou FC seguindo uma taxa de crescimento estática, o método irá produzir estimativas de volatilidade incorretas (MUN, 2002).

Abordagem através da SMC

A SMC pode ser usada para criar modelos de FCD, rodando por exemplo, 1000 tentativas, e reduzindo o risco de obter uma única estimativa de volatilidade errônea. Realizar

uma SMC no nível do FCD é altamente apropriado porque uma distribuição de volatilidade pode ser obtida e usada como entrada na ROA.

Os resultados de tais análises fornecerão uma distribuição da previsão de valores de opções reais, com suas probabilidades de ocorrência, antes do que uma estimativa de ponto único.

Abordagem do valor presente logarítmico

Esta abordagem colapsa todas as estimativas de FC futuras em dois tipos de VP. Um para o primeiro período e outro para o tempo presente. O cálculo assume uma taxa de desconto constante (r) de 10%. Os FC são todos descontados para a data 0.

Através da equação (8), realiza-se uma SMC no modelo de FCD e obtém-se o resultado da previsão de distribuição de X . O desvio padrão da previsão de distribuição de X é a volatilidade estimada usada na ROA. É importante notar que somente o numerador é simulado e o denominador está inalterado.

O lado negativo de se estimar a volatilidade dessa maneira é que a SMC é requerida, mas o cálculo da volatilidade medida é uma estimativa de dígito único, se comparada com a abordagem do FC logarítmico, o qual fornece uma distribuição de volatilidade. A principal objeção ao uso deste método é sua dependência na variabilidade da taxa de desconto usada.

$$X = \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n VPFC_i}{\sum_{i=0}^n VPFC_i} \right) = \ln \left(\frac{\frac{FC_1}{(1+r)^0} + \frac{FC_2}{(1+r)^1} + \frac{FC_3}{(1+r)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+r)^{n-1}}}{\frac{FC_0}{(1+r)^0} + \frac{FC_1}{(1+r)^1} + \frac{FC_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+r)^n}} \right) \quad (8)$$

A principal crítica desta abordagem é que na ROA a variabilidade do valor presente dos FC é o elemento condutor de valor da opção e não a variabilidade da taxa de desconto usada na análise. Modificações neste método incluem duplicar o FC e simular somente o FC do numerador. Com isso, para se providenciar diferentes valores de numeradores, mas um valor de denominador estático para cada tentativa simulada pode-se manter a taxa de desconto constante. Esta abordagem reduz a medida de risco de FC auto-correlacionados e FC negativos.

GARCH (*Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity*)

Os modelos GARCH são usados principalmente na análise financeira com dados de séries temporais, para determinar suas variâncias condicionais e volatilidades. Estas volatilidades são usadas para valorar opções, mas a quantidade de dados históricos necessários para uma boa estimativa de volatilidade permanece significativa. Usualmente,

dúzias - acima de centenas - de pontos de dados são requeridas para obter uma boa estimativa GARCH (BOLLERSLEV, 1986).

Um modelo GARCH, equações (9) e (10), toma a forma de:

$$y_t = x_t \gamma + \varepsilon_t \quad (9)$$

$$\sigma_t^2 = \omega + \alpha \times \varepsilon_{t-1}^2 + \beta \times \sigma_{t-1}^2 \quad (10)$$

A equação (9), de variável dependente (y_t) é uma função de variáveis exógenas (x_t) com um termo de erro (ε_t). A equação (10), estima a variância (quadrado da volatilidade σ_t^2) no tempo t , que depende de uma média histórica (ω), notícias sobre a volatilidade do período anterior, medida como um atraso do quadrado do residual da equação média (ε_{t-1}^2), e a volatilidade do período anterior (σ_{t-1}^2).

Abordagem das suposições gerenciais

Nesta abordagem, puramente qualitativa e subjetiva, a volatilidade é estimada através de suposições gerenciais a respeito do comportamento futuro do FC do projeto. Procedese com a SMC e a volatilidade estimada é o desvio padrão sobre a média do valor do projeto ou outro valor.

Abordagem do substituto de mercado (*Market Proxy Approach*)

É um método freqüentemente usado para estimar a volatilidade aplicada à avaliações onde há conhecimento público de dados de mercado. Isto é, para um projeto particular sobre revisão, uma série de preços de ações negociadas no mercado, são usadas para comparação. Estas firmas teriam funções, mercados, e riscos similares para aqueles do projeto sobre análise. Então, usando um preço de ação aproximado, o desvio padrão do logaritmo natural do retorno relativo é calculado.

A metodologia é idêntica àquela usada na abordagem do retorno logaritmo dos FC. O problema com este método é que ele assume que os riscos inerentes da firma comparável são idênticos aos riscos inerentes ao projeto específico sob análise. O problema é que os preços de equilíbrio para a firma são subjetivos de investidores, bem como inúmeras outras variáveis exógenas que são irrelevantes quando se estima os riscos do projeto.

Também, a avaliação do mercado de uma grande empresa, com informações públicas, depende de múltiplas interações e projetos diversificados. Por fim, firmas são alavancadas, mas projetos específicos são usualmente não alavancados. Conseqüentemente, a volatilidade usada na ROA deveser ajustada para descontar esse efeito de alavancagem. Isso pode ser

feito dividindo a volatilidade dos preços de equilíbrio pelo $(1+D/E)$, onde D/E é a razão entre as dívidas (D) e o patrimônio líquido da empresa (E), equação (11) (MUN, 2002).

$$\sigma_{opções_reais} = \frac{\sigma_{ações_mercado}}{(1 + D / E)} \quad (11)$$

Volatilidade Anualizada

Dependendo da periodicidade do FC ou dos dados de preços de ações usados, a volatilidade calculada devesse ser convertida em valores anualizados. Isto é feito multiplicando a volatilidade (σ) pela raiz de T, onde T é o número de períodos em um ano.

2.3.10 O Valor da Flexibilidade na Tomada de Decisão

Segundo Minardi (2004), a possibilidade de se adaptar as mudanças do mercado é o cerne da estratégia empresarial. Nesse sentido, a teoria das opções é a melhor abordagem para integrar estratégia e finanças. Isto ocorre, pois na ROA, é possível se adaptar as mudanças empresariais através da flexibilidade administrativa proporcionada pelas opções intrínsecas aos projetos.

Copeland & Antikarov (2001) consideram que a alta gerência tem horizontes temporais curtos. Salientam que a maioria das pessoas é pragmática e não idealista, aceita as regras e trabalha em conformidade com as normas em lugar de procurar melhores maneiras de fazer o trabalho. Com isso, tentam mostrar que a ROA não é apenas um método, mas também uma nova forma de encarar a dinâmica da decisão de investir.

O raciocínio por trás das opções reais muda radicalmente o que se pensa em relação à estratégia. Tradicionalmente, desenvolve-se um conjunto de estratégias que se excluem mutuamente, utilizando alguns indicadores de avaliação (em geral o impacto sobre o valor do projeto) para compará-las e, depois, uma delas é selecionada. Na ROA, o valor do projeto contempla essas alternativas que antes eram consideradas mutuamente exclusivas (COPELAND & ANTIKAROV, 2001).

De acordo com Mun (2002), a nova economia fornece um grande desafio aos tomadores de decisão corporativos. Investimentos estratégicos com grande incerteza e risco ou decisões corporativas irreversíveis, junto com a flexibilidade administrativa são as melhores candidatas para uma ROA. Como destaca o autor, a ROA é de fato uma nova forma de pensar, antes do que uma simples aplicação de procedimentos analíticos avançados.

Nos mercados atuais, caracterizados por mudanças, incertezas e interações competitivas, a realização de fluxos de caixa irão provavelmente diferir do que a

administração esperava inicialmente. A todo o momento chegam novas informações, fazendo com que as incertezas sobre as condições do mercado e os futuros fluxos de caixa sejam gradualmente resolvidas. Deste modo, a gerência pode ter uma valiosa flexibilidade para alterar suas estratégias operacionais, e na seqüência, capitalizar oportunidades em um futuro favorável ou aliviar as perdas (TRIGEORGIS, 1993).

Conforme destaca Santos (2001), opções criam flexibilidade, e para se fazer escolhas de investimentos inteligentes, devem-se considerar o valor de se manter suas opções abertas. Sendo que o objetivo principal da análise econômica de projetos maximizar o valor da firma.

Por sua vez, a flexibilidade frequentemente não é explicitamente levada em consideração pela análise padrão do FCD. A incorporação do valor da flexibilidade através do apreçamento de opções pode aumentar o valor total do projeto e também aumentar a sua probabilidade de aceitação, sendo um incentivo para os analistas financeiros a sua aplicação em orçamentos de capital (KEMNA, 1993).

Segundo Ross, Westerfield & Jaffe (2002), a capacidade que uma empresa tem de adiar suas decisões de investimento e operacionais até a obtenção de informações é uma opção. Como as opções possuem valor, os administradores estarão avaliando mal os projetos de suas empresas se os cálculos de orçamento de capital ignorarem esta flexibilidade.

2.3.11 Teorias complementares

Uma maneira de sofisticar a avaliação de oportunidades de investimentos é complementá-la com uma análise da concorrência feita através da Teoria dos Jogos.

Copeland & Antikarov (2001) salientam que a Teoria dos Jogos e as Opções Reais se complementam mutuamente, pois, enquanto a primeira modela o valor criado pelas empresas em uma situação concorrencial, a segunda ajuda a descontar esse valor de forma adequada e a formular e avaliar corretamente uma estratégia competitiva dinâmica.

Segundo Dias (2005), opções reais híbridas é a combinação da teoria de opções reais com outras teorias. Esta combinação é feita para que seja possível analisar de forma mais abrangente e realista os problemas complexos da indústria do petróleo.

As duas principais combinações analisadas por Dias (2005) são: jogos de opções reais, combinação da teoria de opções reais com a teoria dos jogos; e as opções reais *Bayesianas*, que é combinação da teoria das opções reais com métodos probabilísticos e de decisão estatística *Bayesianos*.

2.4 Considerações Finais

Este capítulo cumpre parte dos objetivos necessários para o desenvolvimento do trabalho de acordo com a metodologia proposta. Estabelece o estado da arte da ROA e indica algumas formas de como são tomadas as decisões de investimento de capital pelas empresas.

O objetivo deste capítulo, em particular, é estabelecer as bases para a aplicação da ROA em um caso específico. Esta aplicação será realizada no capítulo 5 deste trabalho. Basicamente o que se busca é aplicar a teoria a um problema de tomada de decisão de investimento em uma tecnologia flexível.

Para tanto, será realizada uma ROA, considerando a opção de troca de insumos. Como pode ser visto, há uma literatura extensa sobre a teoria de opções reais. Porém, em relação ao apreçamento da opção de troca ainda há desenvolvimentos e lacunas a serem preenchidas.

De acordo com a metodologia proposta no capítulo 1, o capítulo 5 busca contribuir para o desenvolvimento do modelo conceitual, ou seja, o primeiro passo para a solução do problema de análise de investimento proposto.

No capítulo 3 será feita uma análise do contexto onde a ROA será aplicada. Esta parte do trabalho complementa as informações necessárias para o desenvolvimento do modelo conceitual. O contexto que se apresenta é o da utilização do GNV em ônibus.

Capítulo 3

3 CONTEXTO DO PROBLEMA DE INVESTIMENTO: A UTILIZAÇÃO DO GNV EM ÔNIBUS

3.1 Considerações Iniciais

Como já abordado nos capítulos anteriores, a presente pesquisa pretende capturar o valor de uma alternativa de investimento com opções embutidas. Para tanto, será realizada uma ROA.

Este capítulo busca identificar e caracterizar a alternativa de investimento, bem como suas opções embutidas. Porém, não é possível avaliar corretamente uma alternativa de investimento sem antes posicioná-la corretamente no tempo. Por isso, é necessário, primeiro, analisar o contexto no qual as decisões serão tomadas.

Então, apresenta-se de início um panorama geral da utilização do GN como insumo energético no mundo, com considerações a respeito da necessidade de diversificação da matriz energética dos países. Na segunda seção deste capítulo será dado enfoque na situação da utilização do GN no Brasil.

A terceira seção aborda a questão da regulamentação do mercado, mostrando o quadro político e a atuação do órgão regulador, a cadeia de produção, e os segmentos de consumo. Sendo que, na quarta seção, será dado enfoque no segmento automotivo, onde se encontra a alternativa de investimento que se busca capturar o valor.

Por fim, são estabelecidas as variáveis exógenas incertas que podem impactar o valor do investimento. Para serem modeladas, tais variáveis devem incorporar certas premissas. Sendo assim, a quinta seção fecha o modelo conceitual do problema de investimento que se pretende avaliar.

3.2 Gás Natural (GN)

O GN é uma mistura de hidrocarbonetos leves, em estado gasoso à temperatura ambiente e pressão atmosférica normais, sendo encontrado em acumulações rochosas porosas marítimas ou terrestres, associado ou não ao petróleo (THOMAS, 2004).

O gás associado é encontrado nos reservatórios de petróleo, dissolvido no óleo ou sob a forma de capa de gás do reservatório. Sua produção se dá conjuntamente com óleo, sendo separado durante o processo de produção e configurando-se em co-produto do petróleo. Já o

gás não associado encontra-se em reservatórios de hidrocarbonetos isoladamente ou com pequenas quantidades de óleo, sendo a produção comercial apenas do GN (THOMAS, 2004).

A composição físico-química do GN varia de campo para campo, em função da matéria orgânica do qual é originário, bem como dos processos naturais ao qual foi submetido. Predominantemente, o GN é composto por metano e quantidades menores de etano, propano e outros hidrocarbonetos de maior peso molecular, apresentando ainda impurezas contaminantes, tais como nitrogênio, dióxido de carbono, água e compostos de enxofre (THOMAS, 2004).

O GN é inodoro, incolor, inflamável e asfíxiante. Devido a isso, são adicionados compostos a base de enxofre em concentração suficiente para lhe dar cheiro marcante, mas sem atribuir características corrosivas (THOMAS, 2004).

Estas características o colocam como um dos 3 energéticos mais consumidos no mundo, como mostra o gráfico da **Figura 3.1**.

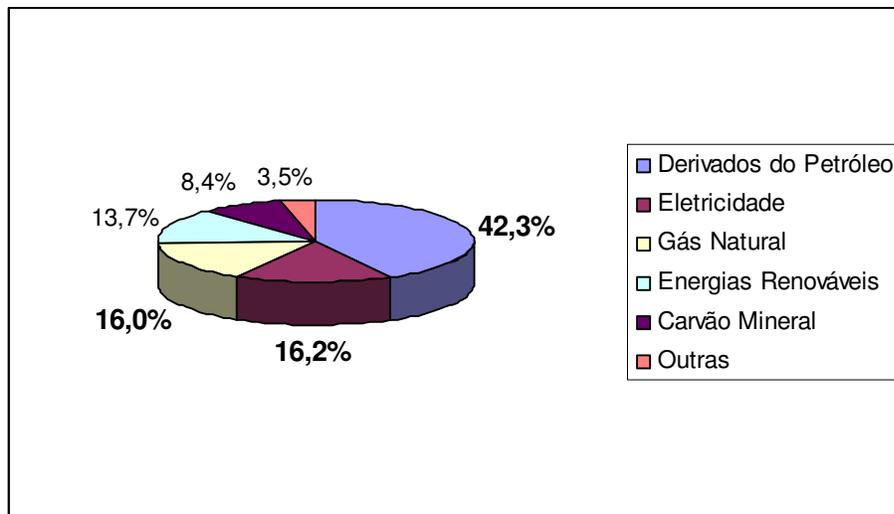


Figura 3.1 – Matriz energética mundial
Fonte: IEA, 2007

Também, o GN é combustível que mais vem aumentando sua participação na matriz energética mundial. Em 1990, por exemplo, o GN representava apenas 6 % de todo o consumo energético do mundo (IEA, 1990).

Já a oferta mundial de energia (energia primária³) está distribuída da seguinte maneira, como mostrado na **Figura 3.2**.

3. O Balanço Energético Nacional (MME, 2004b), classifica a energia primária como “produtos energéticos providos pela natureza na sua forma direta”, tais como: petróleo; gás natural; carvão vapor e metalúrgico; urânio (U3O8); energia hidráulica; eólica; solar; e produtos da cana.

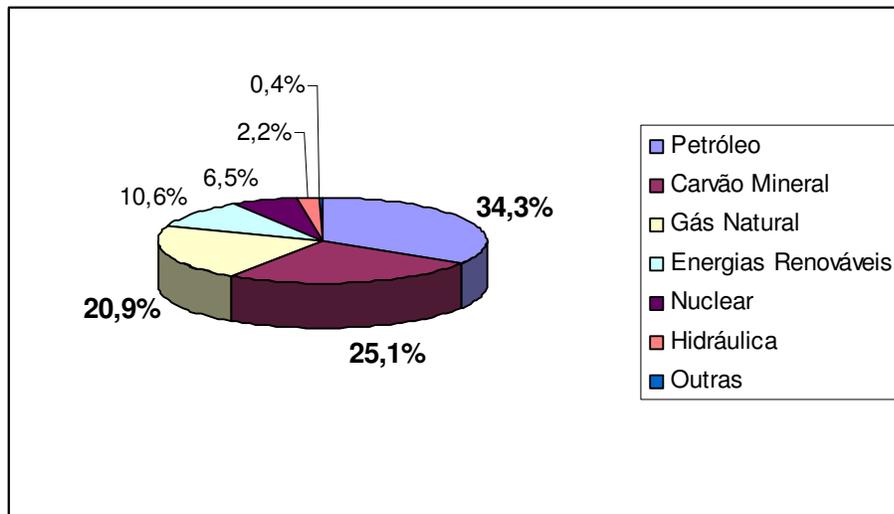


Figura 3.2 – Oferta mundial de energia primária
Fonte: IEA, 2007

Entre os anos de 1964 e 2007, as reservas provadas de gás natural no mundo cresceram a uma taxa média de 8% a.a. No início da década de 70, eram 80 bilhões de metros cúbicos, saltando para 200 bilhões de metros cúbicos em 2007 (IEA, 2007). No Brasil, para o mesmo período, as reservas provadas de gás cresceram a uma taxa média de 7,7% a.a. (ANP, 2008).

O encontro entre a oferta e demanda pelo produto se faz por uma cadeia de produção, distribuição e consumo, criando um mercado para o energético.

Grandes campos de gás têm sido descobertos e as tecnologias que permitem o seu transporte em longas distâncias continuam avançando, com reduções de custo bastante significativas. Consumidores e produtores aproximam-se cada vez mais ao longo da cadeia do gás (SANTOS et al., 2002).

3.2.1 Diversificação da Matriz Energética

Há alguns anos o GN contribui significativamente na matriz energética de vários países da Europa, dos Estados Unidos e de vários países da América Latina, destacando-se a Argentina.

Segundo Santos et al. (2002), o maior uso do GN nas indústrias, residências e no transporte contribui grandemente para melhoria dos padrões ambientais do setor energético, cooperando principalmente para o aumento da qualidade do ar em grandes áreas urbanas.

Além da questão ambiental, para Santos et al. (2002), na realidade brasileira, a incorporação do GN na matriz energética nacional se apresenta como uma forma de se ter maior racionalidade energética da matriz. Isso porque, nas décadas de 70 e 80, com uma

política energética de auto-suficiência, baseada no desenvolvimento dos recursos energéticos domésticos, o Brasil construiu um parque hidroelétrico capaz de produzir 95% da eletricidade demandada pelo país.

Com a oferta abundante de eletricidade, veio o consumo inadequado, visando seu uso térmico (produção de calor ou frio) em alguns segmentos da cadeia (residencial, comercial e industrial) (SANTOS et al., 2002).

As formas de energia diretamente conversíveis em trabalho, como a eletricidade, apresentam um processo de conversão de alta qualidade, em termos de exergia (capacidade de realizar trabalho). Em contrapartida, os processos de conversão da energia térmica em trabalho apresentam uma baixa qualidade, pois nem todo o calor pode ser revertido em trabalho (STRAPASSON, 2004).

Porém, de acordo com Strapasson (2004), na década de 90 os potenciais hidrelétricos localizados nas proximidades de grandes centros urbanos se tornaram cada vez mais escassos. Assim, o país dá início a uma nova estratégia de política energética, buscando aumentar a participação do GN em sua matriz.

Incorporando novas tecnologias e novos conceitos de utilização, o GN tem um grande potencial para promover um ganho ambiental importante e uma maior eficiência energética em vários setores da atividade econômica (SANTOS et al., 2002).

O GN, assim como a eletricidade, constitui uma forma de “energia nobre”, pois ambos podem ser usados diretamente pelos consumidores finais, sendo facilmente controláveis. Dessa forma, o gás caracteriza-se por sua grande maleabilidade estratégica pelo lado do consumo (SANTOS et al., 2002).

Mais abundante que o petróleo em muitos países, o GN se apresenta especialmente estratégico para o Brasil em face de sua grande disponibilidade e da crescente perspectiva de sua oferta em longo prazo, tanto por importação de países vizinhos como originário das reservas nacionais. Diante desses aspectos, iniciativas que estimulem o uso do GN têm sido consideradas de grande conveniência para a segurança energética nacional.

Para Santos et al. (2002), a indústria do gás pode representar um importante motor de desenvolvimento econômico para o Brasil, gerando empregos, abrindo oportunidades de novos negócios e permitindo o domínio de tecnologias de ponta que conduzirão a importantes ganhos econômicos para a nação.

Do ponto de vista da eficiência e do uso racional da energia, faz-se necessário analisar globalmente as várias estratégias de utilização do gás, considerando não somente os impactos

relacionados com o uso do gás propriamente dito, mas também os possíveis efeitos de complementaridade ou substituição dos demais energéticos pelo gás (SANTOS et al., 2002).

3.2.2 A Cadeia do Gás Natural

A cadeia produtiva do GN, como a do petróleo, pode ser dividida em duas partes: a primeira, chamada de “*up-stream*”, se refere à exploração e produção de gás; e a segunda, chamada “*down-stream*”, se refere ao processamento e distribuição do produto.

A exploração é a etapa inicial do processo e consiste em duas fases: a pesquisa, onde são feitos o reconhecimento e o estudo das estruturas propícias ao acúmulo de petróleo e/ou GN, e a perfuração do poço, para comprovar a existência desses produtos e sua viabilidade comercial. Nesta etapa, também, se tem a definição se o gás está associado ao petróleo ou não.

Na etapa de produção, uma parte do gás é utilizada no próprio sistema de produção, em processos conhecidos como “reinação de gás” ou “*gas lift*”, com a finalidade de aumentar a recuperação de petróleo do reservatório com gás associado. O restante do gás é enviado para o processamento primário ou separação (THOMAS, 2004).

A produção do GN pode ocorrer em regiões distantes dos centros de consumo e, muitas vezes, de difícil acesso, como, por exemplo, a floresta amazônica e a plataforma continental. Por esse motivo, tanto a produção como o transporte normalmente são atividades críticas do sistema. Em plataformas marítimas, por exemplo, o gás deve ser desidratado antes de ser enviado para terra, evitando a formação de hidratos que são compostos sólidos que podem obstruir os gasodutos. (CONPET, 2005).

Na etapa de processamento, o gás segue para Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGN). Nestas unidades, o GN deve passar inicialmente por vasos separadores, que são equipamentos projetados para retirar a água, os hidrocarbonetos que estiverem em estado líquido e as partículas sólidas (pó, produtos de corrosão, etc.). Se estiver contaminado por compostos de enxofre, o gás é enviado para Unidades de Dessulfurização, onde esses contaminantes serão retirados.

Nesta etapa, o gás é fracionado, gerando as seguintes correntes: metano e etano (que formam o gás processado ou residual); propano e butano (que formam o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) ou Gás de Cozinha); e um produto na faixa da gasolina, denominado C5+ ou gasolina natural (SCMGN, 2003).

No processamento ocorre a separação dos componentes mais pesados, de maior valor agregado, permitindo que o GN adquira as suas especificações corretas. Então, o gás pode ser encaminhado para o transporte e distribuição.

Segundo a ANP (2008, p. 16), o volume de GN produzido na sua totalidade se destina basicamente a:

- Consumo próprio – parcela da produção utilizada pra suprir as necessidades das instalações de produção;
- Queima e perda – parcela do volume extraído do reservatório que foi queimada ou perdida na área de produção;
- Reinjeção – parcela do gás natural produzido que é injetada de volta nos reservatórios;
- Líquido de Gás Natural (LGN) – parcela de hidrocarbonetos mais pesados (etano, GLP e gasolina natural) extraída do gás natural nas plantas de processamento;
- Comercialização – volume disponível para o mercado, se encontrando na forma líquida ou gás comprimido.

A **Figura 3.3** apresenta o percentual referente a cada parcela apresentada acima. O gráfico mostra que 50% se destinam ao mercado consumidor.

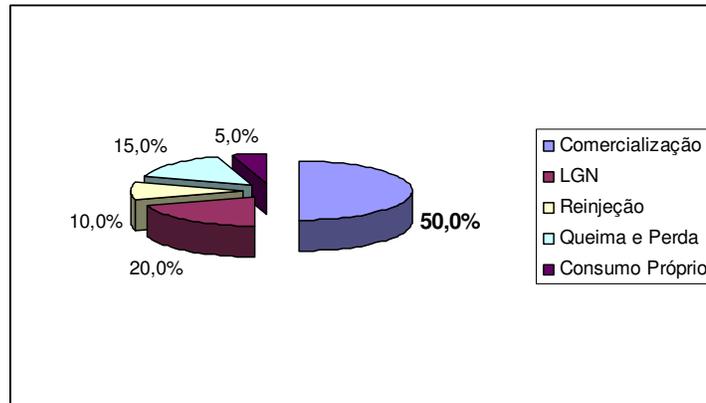


Figura 3.3 – Destino do Gás Natural Produzido no Brasil
Fonte: ANP, 2005

No estado gasoso, o transporte do gás natural é feito por meio de dutos ou, em casos muito específicos, em cilindros de alta pressão na forma de GNC – Gás Natural Comprimido. No estado líquido, pode ser transportado na forma de GNL – Gás Natural Liquefeito, por meio de navios, barcaças e caminhões criogênicos (mantém o gás a -160 °C). Dessa forma, seu volume é reduzido em cerca de 600 vezes, facilitando o armazenamento. Nesse último caso, para ser utilizado, o gás deve ser revaporizado em equipamentos apropriados (SANTOS et al., 2002).

O gasoduto de transporte é uma rede de tubulações que leva o GN das fontes produtoras até os centros consumidores. Transporta grandes volumes de gás, possui tubulações de diâmetro elevado, opera em alta pressão e somente se aproxima das cidades para entregar o gás às companhias distribuidoras, constituindo um sistema integrado de transporte de gás.

As redes de distribuição transportam volumes menores de GN, em menor pressão, com tubulações de diâmetros menores que do gasoduto. É esta rede que recebe o gás nos gasodutos e o leva até as indústrias, aos centros urbanos e por fim, até as residências. A rede de GN é tão importante e segura quanto as redes de energia elétrica, telefone, água ou fibra ótica, além de contribuir para facilitar a vida das pessoas e impulsionar o comércio e as indústrias (SCMGN, 2003).

A distribuição é a etapa final do sistema, quando o gás chega ao consumidor, que pode ser residencial, comercial, industrial ou automotivo. Nesta fase, o gás já deve estar atendendo a padrões rígidos de especificação e praticamente isento de contaminantes, para não causar problemas aos equipamentos onde será utilizado como combustível ou matéria-prima. Quando necessário, deverá também estar odorizado, para ser detectado facilmente em caso de vazamentos.

3.2.3 Segmentos de Consumo

Segundo Santos et al. (2002), a versatilidade é uma das grandes vantagens do GN. A sua amplitude de usos o faz um competidor potencial de quase todos os demais combustíveis alternativos.

O GN pode ser usado na geração de eletricidade em termelétricas, seja operando continuamente, na base de grandes sistemas com predominância térmica, seja complementando sistemas hidrotérmicos.

O GN utilizado na indústria se destina basicamente à: queima direta (permitindo um aumento de competitividade e qualidade de fabricação de diversos produtos como cerâmicas, vidros têxteis e alimentos); na geração de vapor (a qual pode ser associada à geração elétrica através de sistemas de cogeração); e como matéria prima da indústria petroquímica (SANTOS et al., 2002).

Há varias oportunidades de se utilizar o GN no plano residencial, podendo adquirir um grau de penetração tão importante quanto aquele da eletricidade ou do GLP. No segmento comercial, o consumo de calor e frio muitas vezes representa o principal elemento da demanda energética (SANTOS et al., 2002).

No segmento automotivo, é utilizado o GNV, que é o GN comprimido a uma pressão de aproximadamente 220 atmosferas e armazenado em cilindros que são embarcados no veículo.

Portanto, o crescimento internacional da utilização do GN como energético concentrou-se em quatro segmentos – geração de energia elétrica, indústrias, residências e veículos – com variações na importância relativa entre eles em função das características de cada país. O crescimento do segmento veicular está particularmente relacionado à manutenção de preços competitivos em relação aos outros combustíveis, ao menor impacto ambiental, sobretudo em substituição ao diesel no transporte público nas grandes cidades e a infra-estrutura de abastecimento (SANTOS, 2005).

Para Santos et al. (2002), o uso do GNV tende a acentuar-se no âmbito mundial, deslocando principalmente o diesel, mas também a gasolina, e o álcool veicular.

3.2.4 O GNV no Mundo

De acordo com dados fornecidos pela SCMGN (2003), a primeira utilização do GN como combustível veicular teve lugar na Itália, em meados da década de 1930. Este país manteve a liderança mundial em termos de veículos movidos a GNV até o princípio da década de 1990, quando foi suplantado pela Argentina.

Atualmente, a Argentina possui uma frota de 926 mil veículos contra 434 mil veículos italianos. O Brasil teve sua frota estimada, no ano 2002, em 380 mil veículos, se posicionando, então, no terceiro lugar neste ranking, ultrapassando, assim, o Paquistão com uma frota de 280 mil veículos. Desde março 2003, o Brasil chegou ao segundo lugar, na frente da Itália, com uma frota de 400 mil veículos. Desta maneira, o país se encontra entre os maiores mercados de GNV do mundo, refletindo o grande impulso de conversões de veículos registradas nos últimos 5 anos (IEA, 2007; ANFAVEA, 2007).

Em outros países europeus, o combustível só começou a ter uma maior penetração no mercado após a criação, em 1994, da “*European Natural Gas Vehicle Association – ENGVA*”, que possibilitou o início do processo de regulação e difusão do GNV na Comunidade Européia. Nos Estados Unidos, a utilização do combustível iniciou-se em 1969. Atualmente, o país conta com uma frota de 120 mil veículos, um número relativamente pequeno, quando comparado a países pequenos, com frotas de automóveis menores, como a Itália e a Argentina, por exemplo.

3.2.5 O GNV no Brasil

Em meados dos anos 80, a fim de minimizar o impacto dos preços do petróleo no mercado internacional sobre a economia brasileira, criou-se o PLANGAS – Plano Nacional de Gás Natural, desenvolvido pela CNE – Comissão Nacional de Energia, que direcionava o uso do GN como substituto do óleo diesel utilizado no transporte de cargas e passageiros, principalmente nos grandes centros urbanos. O óleo diesel representava, então, 52% do consumo energético do país (MME, 1987).

Durante o período de 1990 a 1994, a taxa de crescimento anual do mercado de GNV brasileiro foi de 115% (ABgnv, 2005). Em termos absolutos, o consumo saltou dos 2,0 milhões de m³/ano, em 1990, para 45 milhões de m³/ano em 1994. No ano 1995, em função da estabilização da economia e dos preços dos combustíveis, a demanda nacional pelo combustível energético em questão apresentou um declínio de 14%.

A estabilização de preços dos combustíveis energéticos concorrentes tornou a conversão dos veículos para utilização do GNV pouco atrativa, resultando em um menor número de novos adeptos a este combustível. Ademais, o incentivo fiscal proporcionado aos taxistas para a aquisição de veículos “0 km” e a suspensão da garantia dada pelas montadoras aos veículos convertidos, contribuíram para a estagnação do programa.

Em 1996, o governo brasileiro, por meio do Decreto Federal 1.787/96 (15 de janeiro), autorizou o uso de GNV para veículos particulares com o objetivo de estimular as conversões. No entanto, devido a dois acidentes de grande repercussão, em São Paulo, neste mesmo ano, o programa de conversões passou a apresentar maior adesão apenas no ano de 1998.

A partir de 1999, o programa começou a dar sinais de recuperação, sendo observado o renascimento do mercado, com um crescimento de 63,4% a.a. no período de 2000 a 2002. No ano de 2002, os Estados de São Paulo e do Rio de Janeiro concentraram 65% da demanda brasileira pelo combustível, contra 85% em 1999, traduzindo a expansão geográfica da utilização do GNV.

Neste enfoque, os Estados de Sergipe, Minas Gerais e Bahia foram os que apresentaram maior taxa de crescimento no período, 130,0% a.a., 123,2% a.a. e 104,0% a.a., respectivamente. Projeções realizadas pelas distribuidoras brasileiras, no final de 2001, estimavam um volume de 5,0 milhões de m³/dia de GNV a ser comercializado no ano de 2005. Apesar desse aumento em âmbito nacional, os estados de RJ e SP devem continuar detendo mais de 60% do consumo do energético.

No Brasil, esse energético passou vários anos sem conseguir penetrar no mercado, apesar dos grandes esforços de algumas empresas. Porém, há alguns anos verifica-se uma

mudança completa nesse quadro, incluindo o novo posicionamento da Petrobras quanto ao aproveitamento do GN produzido e comprado no Brasil.

Segundo José Goldemberg, em prefácio do livro de Santos et al. (2002), as causas dessa mudança não são difíceis de identificar, destacando-se principalmente as seguintes:

- Novas descobertas de GN no Brasil pela própria Petrobras;
- A Construção do gasoduto Bolívia-Brasil que hoje pode trazer para o mercado brasileiro mais de 30 milhões de metros cúbicos por dia de gás boliviano;
- A evolução tecnológica das turbinas de gás de alta eficiência que revolucionaram os métodos de geração de eletricidade;
- Uma série de novas tecnologias para a utilização direta do gás que deverão transformar completamente o papel do gás na matriz energética mundial.

O gasoduto Bolívia-Brasil transporta o gás proveniente da Bolívia para atender os Estados de Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. O gás é comercializado através de contratos de fornecimento com as Companhias Distribuidoras de cada Estado, detentoras da concessão de distribuição. A TBG (Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil S/A), proprietária do gasoduto, é responsável pelo transporte do gás até os pontos de entrega.

Devido à relativa recente utilização do GNV, tornou necessária ao poder legislativo a adoção de algumas novas leis e normas que regulamentassem seu uso, tanto para os consumidores quanto para aqueles que queriam vender esse combustível. O primeiro ato legal consta de 1986.

O proprietário do posto pode adquirir o combustível da distribuidora com a qual tenha contrato ou da companhia de gás canalizado que atende a região. Com exceção da companhia de gás, todos os outros agentes têm sua atuação condicionada à aprovação de autorização por parte da agência reguladora (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bicompostíveis – ANP). No caso do posto estar localizado numa região não atendida pela rede local de distribuição de GN, o proprietário poderá adquirir o combustível diretamente do produtor ou de uma companhia de gás, que não necessariamente atende a região.

O transporte do energético será feito em sua forma comprimida, GNC, por caminhões fiscalizados e autorizados pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial). O serviço de transporte de GNC deverá ser autorizado pela ANP. Na distribuição a varejo, realizada pelos postos, o GN é admitido, filtrado e medido por meio de

dispositivos instalados na entrada dos postos de abastecimento. Tais equipamentos são de propriedade da concessionária de gás.

As instaladoras, ex-oficinas convertedoras, são o principal elo entre o usuário e o restante da cadeia do GNV. Os resultados dos trabalhos destas empresas são vitais para a satisfação e a segurança do usuário. O credenciamento e a fiscalização exercidos pelo INMETRO visam à manutenção da qualidade da prestação do serviço.

O kit instalado deve obedecer a certos critérios tecnológicos, atendendo à norma NBR-11.353 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas) e ao RTQ-37(INMETRO), assim como não ultrapassar os índices de emissões estabelecidos pela PROCONVE (Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores). É com este objetivo que o INMETRO, nos últimos anos, vem revendo e elaborando regulamentos e portarias no intuito de garantir a segurança do usuário e das estações de abastecimento.

3.3 Utilização do GNV em Motores Diesel

Devido à crise do petróleo, foi iniciado na década de 80 o programa de uso do GNV visando à substituição do óleo diesel em veículos pesados. Nessa época, a Petrobras participou junto com outras empresas no desenvolvimento de tecnologias de conversão para a substituição parcial do diesel por GNV através de sistemas conhecidos como diesel-gás.

Foram feitos trabalhos de desenvolvimento em banco de provas de motores e testes de campo em algumas empresas de ônibus, verificando-se a viabilidade técnica e econômica desse tipo de conversão. Devido a fatores, tais como, pequena malha de distribuição de GN no Brasil, falta de infra-estrutura de suporte técnico adequado para as conversões e falta de cultura no uso do GN, o programa não avançou e a experiência foi temporariamente interrompida (ANP, 2008).

Em paralelo, outras experiências foram conduzidas no Brasil com a utilização de motores dedicados a gás natural (ciclo Otto) desenvolvidos e fabricados no país para utilização em ônibus urbano.

Atualmente existe um cenário favorável ao retorno do incentivo ao uso do gás natural em veículos pesados pelos seguintes fatores (CENPES, 2003):

- Aumento da malha de distribuição de GNV, devido ao elevado crescimento da frota de veículos leves a GNV no país, resolvendo em parte os problemas de logística do passado;
- Pressões dos órgãos ambientais por valores de emissões de particulados e de gases poluentes cada vez menores nos grandes centros urbanos;

- Possibilidade de aumento da oferta de GN no mercado nacional devido a novas descobertas no Brasil e contratos de importação de GN tipo “*take or pay*” firmados com a Bolívia;
- Necessidade de se substituir a importação de diesel, que pesa na balança comercial do país.

Além da forte presença entre os veículos leves, o GNV também pode cumprir sua vocação original no mercado brasileiro: abastecer caminhões e ônibus, reduzindo as necessidades de importação de diesel e ampliando o mercado combustível (ANP, 2008).

Por estar no estado gasoso, o GN não precisa ser atomizado para queimar. Isso resulta numa combustão limpa, com reduzida emissão de poluentes e melhor rendimento térmico, o que possibilita redução de despesas com manutenção e colabora com a diminuição do índice de emissão de poluentes no meio ambiente (ANP, 2008).

A composição do GN pode variar bastante, predominando o gás metano, principal componente, etano, propano, butano e outros gases em menores proporções. Apresenta baixos teores de dióxido de carbono, compostos de enxofre, água e contaminantes, como nitrogênio.

As especificações do gás para consumo são ditadas pela Portaria n. 41 de 15 de abril de 1998, emitida pela ANP, a qual agrupou o GN em 3 famílias, segundo a faixa de poder calorífico. O gás comercializado no Brasil enquadra-se predominantemente no grupo M (médio), cujas especificações são (WILLE, 2005):

- Poder Calorífico Superior (PCS) a 20 °C e 1 atm: 8.800 a 10.200 kcal/m³;
- Densidade relativa ao ar a 20 °C: 0,55 a 0,69;
- Enxofre total: 80 mg/m³ máximo;
- H₂S: 20 mg/m³ máximo;
- CO₂: 2 % em volume máximo;
- Inertes: 4 % em volume máximo;
- O₂: 0,5 % em volume máximo;
- Ponto de orvalho da água a 1 atm: -45 °C máximo.

O GN é isento de poeira, água condensada, odores objetáveis, gomas, elementos formadores de goma, hidrocarbonetos condensáveis, compostos aromáticos, metanol ou outros elementos sólidos ou líquidos.

3.3.1 GNV no Motor Diesel

A maioria dos ônibus é constituída de veículos diesel de grande porte (cerca de 45 passageiros sentados). A partir dos anos 80, ônibus articulados também passaram a compor

frotas urbanas, sendo que, nos anos 90, ônibus bi-articulados foram adotados por alguns operadores brasileiros. Mais recentemente, como reflexo das mudanças no mercado de transporte, foram introduzidos os microônibus, cuja circulação antes estava restrita a serviços especiais (ANFAVEA, 2007).

O motor movido a GNV se faz através do ciclo Otto, ou seja, a combustão no interior da câmara ocorre somente após o centelhamento, que se dá a cada dois ciclos da biela (motor 4 tempos). Assim faz-se necessário à utilização de velas.

Segundo a ANP (2008), as rotas tecnológicas para utilização do GNV em ônibus são:

- Ottolizada: motor ciclo diesel transformado para ciclo otto funcionando 100% a GNV;
- Dedicada: motor movido a GNV original de fabrica;
- Diesel-gás: motores que funcionam com os dois combustíveis simultaneamente.

Motores do ciclo Otto a GNV começaram a ser desenvolvidos pela Mercedes-Benz no Brasil na década de oitenta. Segundo a empresa, cerca de 400 unidades deste motor foram vendidas até o ano de 1992. Já nos anos oitenta a Mercedes-Benz dispunha de motores dedicados a GNV para o mercado da América do Sul.

Atualmente observa-se que no mundo a tecnologia diesel/gás já é dominada, porém sua aplicação ainda não atingiu níveis que possam ser considerados representativos.

Existem experiências na América do Norte, Europa e Ásia com a conversão de caminhões e ônibus. As conversões são realizadas por empresas fabricantes de componentes empregados na utilização do GNV como combustível em geral. Muitas dessas empresas possuem como parte de sua carteira de produtos “kits” para conversão de veículos leves e, com uma expressão bem menor, “kits” para conversão de veículos pesados.

Alguns fabricantes de motores/veículos pesados têm parcerias de desenvolvimento com essas empresas para aplicação desses “kits” em motores de sua linha produtiva, muitas vezes buscando uma redução mais efetiva do nível de emissões, porém a escala ainda é pequena e pouco representativa.

O desenvolvimento neste segmento de mercado continua a trazer inovações e algumas novidades podem começar a surgir para melhorar ainda mais a tecnologia utilizada para fazer um motor diesel/gás efetivamente eficiente e econômico.

Cabe ressaltar que o desenvolvimento de um “kit” diesel/gás é específico para o motor em que será aplicado, sendo assim, esses kits não são intercambiáveis com diferentes motores

e requerem uma otimização criteriosa para atingir desempenho satisfatório com emissões reduzidas.

Segundo Ingersoll (1996), a inovação tecnológica, na qual o deslocamento da gasolina e do óleo diesel pelo GN constitui um exemplo de que o avanço tecnológico não se dá por si mesmo. Uma confluência de outros fatores deve estar presente para a inovação tecnológica ocorrer. A viabilidade econômica é um parâmetro muito importante. Isso porque os veículos a diesel e a gasolina, por exemplo, representam uma tecnologia madura, que se aproveita de uma significativa vantagem competitiva.

Fulton & Schipper (2001), realizam uma pesquisa importante sobre as condições ideais para o desenvolvimento de sistemas de transporte por ônibus. O trabalho incorpora novas abordagens para projetar os sistemas de utilização dos ônibus, assim como as novas tecnologias para utilização de diferentes combustíveis. O trabalho tem como objetivo dar subsídios para que o transporte urbano das grandes cidades siga num caminho sustentável.

3.3.2 Vantagens e Desvantagens do Uso do GNV

O GNV apresenta importantes vantagens técnicas que, se comparadas com os combustíveis tradicionais, gasolina e óleo diesel, o indicam como alternativa promissora em termos de combustível automotivo.

São elas: temperatura de ignição superior, o que o torna mais seguro quanto ao manuseio; menor densidade que o ar atmosférico, o que em caso de vazamento, possibilita sua rápida dissipação na atmosfera, reduzindo a probabilidade de ocorrência de concentrações na faixa de inflamabilidade; não é tóxico nem irritante no manuseio; a combustão do GNV é muito próxima da combustão completa, reduzindo os resíduos de dióxido de carbono e vapor d'água, e assim inibindo a formação de resíduos de carbono no motor, o que aumenta sua vida útil e os intervalos entre os períodos de manutenção; o GNV é comercializado dentro de elevados padrões de segurança, e em função das altas pressões de operação, praticamente elimina a possibilidade de escape do produto para o meio ambiente (SANTOS, 2005).

Ainda em caso de vazamentos, que muito mais facilmente pode ser detectado por equipamentos de controles do que seus concorrentes líquidos, não produz o efeito destes, em contaminar o subsolo e conseqüentemente os lençóis freáticos em função da baixa formação de resíduos da combustão. Por ser um combustível limpo e seco, não se mistura nem contamina o óleo lubrificante, além de permitir um maior intervalo entre trocas de óleo sem comprometer a integridade das partes e componentes do motor.

A combustão do GNV, não produz óxido de enxofre, chumbo e particulados. Dentre os hidrocarbonetos, o GNV é o que produz a menor quantidade de monóxido de carbono, não emite fumaça preta nem odores e sua combustão é mais lenta permitindo significativa redução de ruído dos motores, especialmente os que utilizam diesel.

As vantagens técnicas mencionadas são rigorosamente relacionadas com as vantagens econômicas e com os problemas de manutenção dos veículos. A principal vantagem econômica, diz respeito ao menor preço de comercialização do GNV se comparado com a gasolina, o álcool hidratado e o diesel. Também, segundo a Petrobras (2004), estuda-se estabelecer o preço do metro cúbico (m^3) do GNV em no máximo 55% do preço do litro (l) de óleo diesel.

Dentre as desvantagens podemos dizer que o GN, por ser um combustível fóssil, formado a milhões de anos, trata-se de uma energia não renovável, portanto finita, assim como o petróleo.

O GN apresenta riscos de asfixia, incêndio e explosão. Por outro lado, existem meios de controlar os riscos causados pelo uso do GN. Por ser mais leve que o ar, o GN tende a se acumular nas partes mais elevadas quando em ambientes fechados. Para evitar risco de explosão, devem-se evitar, nesses ambientes, equipamentos elétricos inadequados, superfícies superaquecidas ou qualquer outro tipo de fonte de ignição externa. Em caso de fogo em locais com insuficiência de oxigênio, poderá ser gerado monóxido de carbono, altamente tóxico.

Uma grande desvantagem do uso do GNV em ônibus para o transporte coletivo das grandes cidades se encontra na dificuldade de revenda do veículo para cidades do interior. Como por lei, as cidades metropolitanas não podem utilizar os ônibus por mais de cinco anos, a revenda torna-se um ponto crucial na aquisição desses ônibus. Na maioria das cidades para quais esses ônibus são revendidos não há abastecimento de GNV, fica bastante prejudicada a aquisição de ônibus movidos exclusivamente a GNV. Porém com o motor diesel/gás, essa situação não ocorre, já que o motor pode rodar somente com diesel, fazendo com que seja possível revende-lo a cidades que não possuem rede de abastecimento de GNV.

No entanto, o amadurecimento da tecnologia do diesel ao longo de várias décadas consolidou um sistema confiável, de alta penetração regional e baixo custo de manutenção, proporcionado a formação de uma frota nacional considerável, apoiada por uma ampla rede de postos de abastecimento. A indústria automobilística estruturou-se fortemente neste segmento, e da mesma forma desenvolveu-se uma eficiente logística de suprimento de combustíveis líquidos, tornando-se difícil a entrada de uma tecnologia concorrente nesse mercado (OLIVEIRA FILHO, 2006).

Na linha de conversões, muitos trabalhos acadêmicos tem sido realizados no intuito de fazer comparações entre os combustíveis alternativos que podem ser usados em ônibus para transporte coletivo urbano. Entre eles, têm-se o trabalho de Ahouissoussi & Wetzstein (1997), que comparam os custos de operação dos veículos para quatro combustíveis alternativos, o diesel, o GNV, o biodiesel e o metano.

Almeida (1991) realiza uma análise comparativa do desempenho operacional de um ônibus movido a GNV em relação a um ônibus diesel convencional. Além dos fatores de desempenho operacionais dos veículos, usado na análise comparativa, o autor estimou o prazo de retorno do investimento efetuado na adaptação do ônibus diesel a partir da receita proveniente com a economia de óleo diesel. Também foram avaliados os impactos ambientais e os impactos na balança comercial do Brasil, decorrentes da inserção de ônibus à GNV no meio urbano.

Conceição (2006) avalia a viabilidade técnica, ambiental e econômica da inserção do GNV em substituição ao diesel no transporte público urbano de passageiros. A análise técnica compara a tecnologia de motor GNV com a tecnologia diesel convencional, sob a ótica de desempenho energético e ambiental. O estudo de viabilidade econômica compara a utilização do GNV em duas rotas tecnológicas (veículos bicompostíveis e veículos dedicados).

3.3.3 Questão Ambiental

A queima de combustíveis em todo mundo é a principal causa das emissões de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases que contribuem para o efeito estufa. Nas grandes cidades, o setor de transportes rodoviários é o grande responsável pela poluição local. Além de grande emissor de CO₂, ainda é responsável pela emissão de outros gases, como os óxidos de nitrogênio, os óxidos de enxofre, os aldeídos e o material particulado (RIBEIRO, 2001).

Não restam muitas dúvidas de que algumas características químicas do GN, como a sua composição e teor de contaminantes, são os seus grandes trunfos ambientais em relação aos combustíveis automotivos tradicionais. O GNV proporciona queima mais completa que a apresentada pela gasolina, pelo álcool e pelo diesel, reduzindo, portanto as emissões de poluentes (CONPET, 2005).

O motivo para que os governos tenham interesse na conversão de ônibus urbanos para o GNV, assim como outros veículos, parte do princípio que, mesmo em poucas quantidades (em comparação ao diesel), é interessante para um município que sua atmosfera seja mais limpa, pois assim, a qualidade de vida de sua população aumenta (SANTOS, 2005).

È importante destacar que os países desenvolvidos têm estabelecido limites de emissão muito restritivos para as emissões dos veículos leves e pesados. Tal fato promove uma contínua inserção, no mercado automobilístico, de novos veículos com diferentes características de emissões, que estão associados a determinados padrões regulatórios pré-estabelecidos.

Na União Européia, as diretivas para os novos modelos são estabelecidas pelos padrões Euro, sendo que desde o ano 2000, vigora na Europa a Euro 3. Já nos Estados Unidos a legislação é mais complexa, pois além das regulamentações federais existem também as estaduais, além de outros programas voltados para controle dos combustíveis alternativos e dos motores com baixas emissões, por exemplo. As regulamentações federais americanas em vigor são, desde 2004, as Tier II (RIBEIRO, 2001).

No Brasil, o PROCONVE, desde 1986, estabelece as diretrizes, prazos e padrões legais admissíveis para as diferentes categorias de veículos e motores, nacionais e importados. Esses padrões legais que vigoram no Brasil são praticamente os mesmos que na Europa, porém, com uma defasagem de aproximadamente seis anos. O PROCONVE só assumirá como padrão os níveis de emissão estabelecidos pela Euro 3 no início de 2006 e a partir de 2009 já terá assumido o ainda mais rigoroso padrão Euro 4 (PROCONVE, 2004).

A principal finalidade das diretrizes nacionais e estrangeiras é reduzir a contaminação atmosférica provocada pelo transporte rodoviário, mediante a fixação de limites de emissão que assegurem níveis baixos de poluição para os veículos novos e baixas taxas de deterioração destes níveis, ao longo da vida útil dos veículos.

Sobre os veículos pesados, especificamente os ônibus, a comparação do desempenho ambiental envolve não somente a troca do combustível, de diesel para GNV, como também a substituição do motor do ciclo diesel por ciclo Otto. Ainda não se dispõe de resultados dos ensaios de emissões efetuados com veículos do tipo diesel/gás (RIBEIRO, 2001).

Há ainda a expectativa de que o GNV ganhe mais espaço, à medida que os países se adaptem às exigências do Protocolo de Kyoto.

A **Tabela 3.1** apresenta o nível de emissão de poluentes por tipo de motor, se operando com diesel ou operando com GNV.

Os ônibus à GNV emitem praticamente 100% menos MP (Materiais Particulados) e 60% menos NOx que o similar a diesel, porém emitem mais HC, e principalmente CO. No entanto, os danos à saúde humana causados por emissões de CO são menos prejudiciais que os efeitos do NOx e do MP. As emissões de hidrocarbonetos do ônibus a gás correspondem a

metano não-reativo, que não é um poluente local importante, embora seja um poderoso gás de efeito estufa (FULTON, 2001).

Emissões unidade =>	DIESEL		GAS (injeção mono ponto)	
	ton./dia	g/KWh	ton./dia	g/KWh
MP	2	0,136		0
NOx	95,7	6,480		2,580
HC	5,8	0,390		0,400
CO	11,7	0,790		1,830
TOTAL	115,1	7,796		4,810

Tabela 3.1 – Emissões por tipo de motor

Fonte: Ribeiro (2001)

Alguns trabalhos na literatura avaliam a qualidade do ar promovida pela redução da poluição através da melhoria de tecnologia dos ônibus para transporte coletivo de passageiros. Entre eles, destacam-se: o trabalho de Gwilliam, Kojima & Johnson (2004), realizado através do Banco Mundial, onde reúne especialistas das áreas de meio ambiente, transporte, minas e energia; o trabalho de Eberwein (2004), que avaliou a melhoria das condições ambientais para a cidade de Berlin – Alemanha; e o trabalho de Baldassarri, Battistelli & Conti (2005), que avalia a emissão de poluentes tóxicos em ônibus urbanos, comparando o GNV com combustíveis líquidos. Os trabalhos consideram a utilização do GNV na operação dos veículos.

3.3.4 O GNV no Transporte Coletivo Urbano

Segundo Oliveira Filho & Fagá (2005), “as frotas de ônibus se consolidaram como o principal sistema de transporte coletivo de passageiros das grandes cidades”.

As iniciativas de conversão do diesel para o GNV se devem principalmente a: questão energética da dependência da importação de petróleo, onde se busca reduzir o consumo de diesel e petróleo; e por questões ambientais, como forma de reduzir a poluição atmosférica das grandes cidades (Oliveira Filho & Fagá, 2005).

Autoridades do setor de transportes de diversas cidades em todo o mundo têm buscado alternativas ao diesel convencional como força motriz de suas frotas de ônibus. As principais tecnologias experimentadas têm sido: mistura diesel-gás em motores de ciclo diesel; emulsão de diesel e água; GNC em motores de ciclo Otto; GNL em motores de ciclo Otto; veículo híbrido-elétrico; diesel com baixo teor de enxofre, chamado de “diesel limpo” e catalisadores; biodiesel; e células à combustível.

Dentre as tecnologias citadas, as mais difundidas têm sido o GNC e o GNL (as formas em que o GNV é encontrado), sendo estas as primeiras alternativas ao diesel comercialmente

disponíveis no mundo. As demais opções são em sua maioria utilizadas apenas de modo experimental, geralmente em pequena escala ou ainda não estão disponíveis comercialmente.

A **Tabela 3.2** apresenta algumas premissas operacionais de frotas de ônibus urbanos.

Ônibus	Diesel	GNV	Unidades
Regime de Rodagem	8.000	8.000	Km/mês
Consumo médio urbano	0,40	0,59	l/Km; m ³ /Km
	2,50	1,69	Km/l; Km/m ³
Consumo Energético		50	tep
Rendimento Térmico			%
Taxa de Compressão			[-]

Tabela 3.2 – Premissas Operacionais de Frotas de Ônibus Urbanos
Fonte: Oliveira & Fagá (2005)

Para Oliveira Filho & Fagá (2005), a proposta de uso mais intenso do GNV em ônibus é pertinente no contexto atual e desperta o interesse da sociedade como um todo. Entretanto, a corroboração do pressuposto de que pode ser vantajosa a substituição do diesel por gás no transporte de passageiros requer uma análise das reais dimensões dos benefícios esperados. As principais vantagens potenciais desta substituição de combustível são:

- Redução da importação de petróleo e diesel;
- Contribuição à massificação do uso do gás natural e diversificação da matriz energética;
- Redução das emissões atmosféricas nas cidades.

A substituição de combustível nos ônibus implica na redução de consumo do diesel, atualmente responsável por cerca de 40% do total de derivados de petróleo consumidos no país (MME, 2004).

Parte do petróleo importado se presta basicamente para atender à demanda de diesel, pois enquanto há uma necessidade de importar petróleo com essa finalidade, por outro lado há um excesso de outros derivados. A substituição de diesel por gás reduziria a importação de petróleo, economizando divisas para o país (OLIVEIRA FILHO, 2006).

Estes percentuais (redução na importação do diesel) são consideráveis e significativos, colocando a redução da importação de diesel como um forte argumento em favor do ônibus a gás.

O abastecimento de GNV no Brasil, salvo algumas exceções, é realizado em postos de abastecimento de combustível, e a organização do mercado energético obedece aos mesmos padrões do mercado de combustíveis líquidos. Para o abastecimento de ônibus, geralmente, uma estação de compressão de alta vazão é instalada na garagem do próprio frotista. Neste estudo, para efeito de cálculo, o abastecimento será considerado na bomba de GNC em um

posto autorizado. O investimento necessário para a instalação dessa estação de compressão é relativamente alto, entretanto, com uma estação de compressão, o preço pago pelo frotista por m³ de GNV é menor (ANP, 2008).

No Brasil foram feitas algumas tentativas de conversão de veículos à diesel para utilização do GNV, a maioria sem sucesso. Dentre as causas desses insucessos estão os problemas tecnológicos relativos aos motores, a penetração insuficiente das redes de distribuição de GN, os custos operacionais e depreciação mais elevada dos veículos a gás que para os ônibus a diesel. Alguns desses problemas estão superados tecnologicamente, no entanto as seqüelas da experiência negativa pregressa constitui por si mesma uma barreira a ser transposta (SANTOS, FAGÁ & BERMUDO, 2003).

Algumas experiências internacionais tiveram resultados animadores, como por exemplo, os Estados Unidos têm atualmente cerca de um décimo da frota total de ônibus movidos a GNV (WATT, 2001).

Frotas a gás de mais de uma dezena de outros países podem ser referências úteis para novos programas brasileiros, dos quais se podem extrair premissas de sucesso e lições aprendidas em cada caso, para se evitar a repetição de equívocos e situações indesejáveis.

Segundo Oliveira Filho (2006), os programas de ônibus a gás no Brasil tem sido sistematicamente mal sucedidos diante de barreiras operacionais e financeiras. Em seu trabalho, o autor avaliou os impactos, a conveniência e as perspectivas do uso do GNV em ônibus para transporte coletivo em grandes cidades brasileiras.

Baseado na hipótese de que a substituição do diesel por GNV em ônibus urbanos tem o potencial de gerar benefícios ambientais e energéticos, o autor destaca que o êxito dos programas requer a observação de um conjunto de premissas envolvendo condições, recursos e ações.

Os resultados dessas análises revelam vantagens no uso do ônibus a gás, mas indicam a necessidade de análises econômicas e financeiras para avaliar o balanço entre os benefícios oferecidos e os custos envolvidos.

O transporte público urbano presente nos municípios com mais de 30 mil habitantes, está disponível para cerca de 122 milhões de pessoas. O ônibus é o principal meio de locomoção disponível, inclusive nas localidades que disponibilizam os serviços de metrô e trem urbano. Estimativas indicam que circulam hoje nas cidades brasileiras por volta de 115 mil ônibus, transportando cerca de 94% do total diário de passageiros (ANTP, 2005).

Verifica-se ainda que o transporte público urbano, na modalidade ônibus, representa cerca de 93,8% do total nacional (**Tabela 3.3**), circulando cerca de 50.000 veículos nas

principais regiões metropolitanas. Somente nas metrópoles do Rio de Janeiro e São Paulo circulam metade desse total, que respondem a um consumo anual aproximado de 1 bilhão de litros de diesel (ANTP, 2005).

Serviços	Municípios	Passageiros/dia	%
Ônibus	920	55.140.000	93,8%
Trem/Metro	64	3.479.000	5,9%
Barcas	12	140.000	0,2%
Total		58.759.000	100%

Tabela 3.3 - Transporte público urbano
Fonte: ANTP (2005)

Além dos benefícios ambientais decorrentes do uso de um energético menos poluente, os projetos contribuem para o desenvolvimento econômico sustentável, através de investimentos nas diversas cadeias produtivas do GN.

3.4 O Impacto da Incerteza na Conversão dos Veículos versus o Valor da Flexibilidade

Nas seções anteriores deste capítulo foi feita uma análise contextual e técnica do problema de investimento, objeto de estudo dessa pesquisa. Primeiro foi realizado uma explanação a respeito do GN, com suas características, sua participação na matriz energética do Brasil, a cadeia de produção e os segmento de consumo.

Em seguida, foi dado foco no segmento automotivo, onde o GN é usado na forma de GNV. Foram apresentadas referências técnicas sobre a utilização do GNV em motores a ciclo diesel, suas vantagens e desvantagens, a questão ambiental, e principalmente a sua utilização no transporte coletivo urbano.

Sendo assim, o objeto de estudo dessa pesquisa, no qual será realizada uma avaliação de investimento através da abordagem de opções reais, é a utilização do GNV em ônibus.

O que se pretende avaliar é o valor da flexibilidade proporcionada por um ônibus que podem operar com combustíveis alternativos. Neste caso específico, será avaliada a possibilidade de operar ou com combustível diesel ou com o GNV.

Em uma avaliação através da abordagem de opções reais, onde se busca avaliar investimentos em condições de incerteza e risco, é extremamente importante conhecer as incertezas que rondam o setor, para avaliar seu impacto na decisão de investir.

Esta seção aborda a questão do impacto das incertezas na conversão dos veículos. Inicialmente será abordada a questão da regulamentação do mercado de GN, que afeta

profundamente a oferta do energético. Na seqüência, apresentam-se as incertezas em relação à oferta, e a situação da demanda. Por fim, são avaliadas as características da flutuação dos preços das *commodities* petróleo e GN.

3.4.1 Regulamentação do Mercado de Gás Natural no Brasil

A Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, conhecida como Lei do Petróleo, dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), a ANP, e dá outras providências.

A lei estabelece a propriedade da União dos depósitos de petróleo, GN e outros hidrocarbonetos fluidos existentes no território nacional, nele compreendidos a parte terrestre, o mar territorial, a plataforma continental e a zona econômica exclusiva.

Com a lei, fica instituída a ANP, entidade integrante da Administração Federal indireta, submetida ao regime autárquico especial, como órgão regulador da indústria do petróleo, GN e combustíveis renováveis, vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME).

O Art. 8º estabelece que a ANP tem como finalidade promover a regulação, a contratação e a fiscalização das atividades econômicas integrantes da indústria do petróleo, GN e combustíveis renováveis. O artigo contém XVI parágrafos com as atribuições da agência.

A lei estabelece que a Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRAS, sociedade de economia mista vinculada ao MME, e até então detentora do monopólio da exploração, produção, transporte e comercialização dos hidrocarbonetos nacionais, passa a operar em caráter de livre competição com outras empresas, em função das condições de mercado.

Todas as atividades referentes à exploração e produção de hidrocarbonetos fazem parte da concessão dos campos petrolíferos/gasíferos outorgados pela ANP. A importação e o transporte são objeto de autorização outorgada pela ANP, assim como as atividades de compressão e liquefação.

No Brasil, a distribuição de GN canalizado é de atribuição dos Estados e do Distrito Federal, que poderão, em seus territórios, explorar diretamente ou através de concessão, nos termos definidos pelo Art. 25 da Constituição Federal. A **Figura 3.4** apresenta de forma esquemática a situação legal da cadeia produtiva do GN no Brasil.

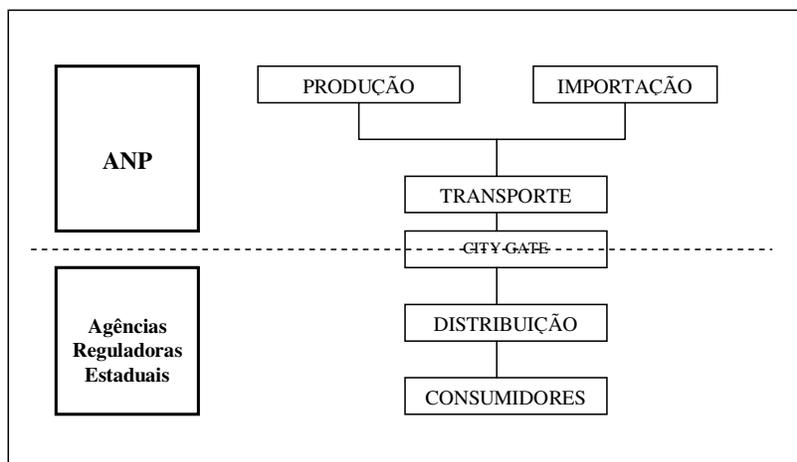


Figura 3.4 – Responsabilidade Legal da Cadeia Produtiva
 Fonte: Martins (2006)

Mesmo com a Lei do Petróleo, a única empresa que produz GN no Brasil é a Petrobras, apesar de outras empresas se encontrarem em processo de exploração de petróleo e gás. Na atividade de processamento, encontram-se em funcionamento no Brasil 28 UPGN, das quais 27 são de propriedade integral da Petrobrás, que também participa acionariamente da unidade restante, detendo 20% do capital da UPGN-UEG Araucária (MARTIS, 2006).

Martins (2006) observa que o sistema Petrobras, através de participações cruzadas, tem o domínio do mercado de transporte de GN no Brasil, destacando que a Transpetro, subsidiária integral da Petrobras, isoladamente detém 45,9% da malha de transportes brasileira e que a TBG, 51% da Gaspetro, detém 47,6% da malha total.

No mercado de distribuição, encontram-se constituídas 24 concessionárias de distribuição estadual de gás canalizado, sendo que a Petrobras participa acionariamente de 19 companhias, através de sua subsidiária Gaspetro, além de deter 100% da concessão do Estado do Espírito Santo através da subsidiária integral Petrobras Distribuidora – BR. As 4 empresas que não tem participação da Petrobras são as 3 do estado de São Paulo e a CEG, na região metropolitana do Rio de Janeiro (MARTINS, 2006).

É importante destacar ainda que a Petrobras, além de deter direta ou indiretamente participação nas atividades anteriormente descritas, também possui 96% da capacidade nominal do refino nacional de petróleo, responsável pela produção de alguns dos produtos deslocados pelo gás natural, tais como gasolina, óleo combustível, óleo diesel, GLP e querosene iluminante. Ainda, nas vendas dos derivados de petróleo no Brasil, a Petrobras Distribuidora – BR, subsidiária integral da Petrobras, responde por 22% do mercado de GLP, 28% do mercado de Diesel e 69% do mercado de óleo combustível (MARTINS, 2006).

Com o que foi exposta acima, e também de acordo com Martins (2006), a Petrobras detém o monopólio de praticamente toda a cadeia do GN. Essa é uma constatação importante, principalmente para a avaliação de investimentos dessa indústria. Isso porque, desta forma, é possível avaliar as condições de mercado, e as interações entre os agentes.

Aguardando sanção presidencial, o Projeto de Lei nº 6.673/06, conhecida como Lei do Gás, regulamenta o transporte, a exploração, a estocagem, o processamento e a comercialização do GN. O que se pretende com a lei é dar maior segurança jurídica ao setor, conciliando os interesses entre produtores, distribuidores e consumidores de gás natural. Isso pode proporcionar maior segurança aos investidores e consumidores, que assim poderão atuar em condições estáveis (ANP, 2008).

Como pode ser observado, ainda não se tem um marco regulatório definido para o GN. Isso gera muitas incertezas, fazendo com que os projetos de investimentos no setor tenham um alto risco. Essas condições criam oportunidades, e essas oportunidades podem ser mais bem avaliadas através das opções reais.

Dentre alguns trabalhos de interesse em opções reais, que tratam da incerteza na regulação, pode-se destacar: o trabalho de Teisberg (1993 e 1994), que avalia investimentos de estratégicos de capital no setor elétrico, considerando a incerteza na regulamentação do mercado; o trabalho de Santos, Guerra & Nunes (2001), que utilizaram opções reais como instrumento de regulação de mercado, também para o setor elétrico; e o trabalho de Gonçalves & Medeiros (2002), com foco no setor de telecomunicações.

3.4.2 Previsão de Oferta

De acordo com Martins (2006), entende-se como reservas os recursos descobertos de GN comercialmente recuperáveis a partir de uma data de referência. A estimativa desses valores incorpora um certo grau de incerteza quanto as informações de geociências, engenharia e de natureza econômica. Em função disso, elas são classificadas como:

- Reservas Provadas – são aquelas que, com base na análise de dados geológicos e de engenharia, se estima recuperar comercialmente com elevado grau de certeza;
- Reservas Prováveis – são aquelas cuja análise dos dados geológicos e de engenharia indica uma maior incerteza na sua recuperação quando comparada com a estimativa de reservas provadas;
- Reservas Possíveis – são aquelas cuja análise dos dados geológicos e de engenharia indica uma maior incerteza na sua recuperação quando comparada com a estimativa de reservas prováveis;

- Reservas Totais – representa o somatório das reservas provadas, prováveis e possíveis.

No período compreendido entre os anos de 1994 e 2005, as reservas provadas de gás natural cresceram 54%, correspondendo a uma taxa média anual de 4,5%. Este crescimento está relacionado principalmente a descobertas decorrentes do esforço contínuo do país para diminuir o grau de dependência do petróleo (ANP, 2006).

A evolução das reservas de GN no país apresenta um comportamento muito próximo ao das reservas de petróleo, devido principalmente a ocorrência de gás natural sob a forma associada. A **Figura 3.5** apresenta um gráfico com a evolução das reservas de GN, de 1994 até 2005, de acordo com a sua forma de ocorrência (associado ou não ao petróleo).

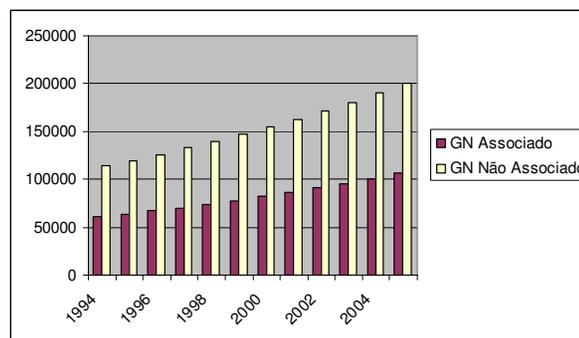


Figura 3.5 – Evolução das Reservas de GN
Fonte: ANP (2006)

A produção nacional de gás natural refere-se, quase que exclusivamente, à produção da Petrobras. No período de 1994-2005, a produção de GN cresceu em 129,5%, há uma taxa média anual de cerca de 10,8%, principalmente em decorrência do início de operação das jazidas da Bacia de Campos, sendo 58,3% originária dos campos marítimos. A **Tabela 3.4** apresenta a produção de GN, por estado da federação, para os anos de 2000 até 2005.

Produção Nacional de gás natural em mil m³/dia						
ESTADO	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Alagoas	2.023	2.090	2.142	2.515	3.253	3.202
Amazonas	5.480	6.650	7.516	8.199	9.920	9.773
Bahia	5.194	5.388	5.526	5.934	6.182	5.436
Ceará	274	255	302	274	345	304
Espirito Santo	869	1.066	1.155	1.396	1.397	1.422
Paraná	129	105	26	155	179	186
Rio de Janeiro	5.674	6.352	8.867	8.247	8.573	1.828
Rio Grande do Norte	3.466	3.281	3.727	3.476	3.741	3.607
São Paulo	888	942	1.080	1.064	1.050	1.040
Sergipe	2.393	2.224	2.196	2.007	1.856	1.692
TOTAL	26.390	28.353	32.537	33.267	36.496	28.490

Tabela 3.4 – Produção Nacional de GN
Fonte: ANP (2006)

As importações brasileiras (**Tabela 3.5**) de GN tiveram início em julho de 1999, quando a Petrobras passou a adquirir gás boliviano através do Gasoduto Bolívia-Brasil – GASBOL.

Em 2000 foi iniciada a importação do gás argentino pela SULGAS, que foi seguida, em 2001, por duas outras empresas importadoras, a EPE – Empresa Produtora de Energia Ltda e a BG Comercio e Importação Ltda, adquirindo gás da Bolívia.

Os preços do gás natural importado são estabelecidos na forma pactuada através dos respectivos contratos de fornecimento.

Ano	Gás Natural (mil m ³ /dia)
2000	6.056
2001	12.611
2002	14.436
2003	16.293
2004	22.154
2005	24.651

Tabela 3.5 – Importação Brasileira de gás Natural
Fonte: ANP (2006)

3.4.3 Situação da Demanda

Dada a sua flexibilidade de uso e fácil manipulação direta pelos consumidores, o gás torna-se tão nobre quanto à eletricidade, adentrando nos lares, nas indústrias, nos estabelecimentos comerciais e mesmo nos automóveis (SANTOS et al., 2002).

Essa flexibilidade de uso está diretamente à relacionada tecnologia usada. Em todos os segmentos de mercado é possível verificar que, de alguma maneira, o GN é capaz de se adaptar à tecnologia utilizada, deslocando o energético convencional.

O GN utilizado como combustível nas indústrias substitui todos os outros energéticos, tais como óleo combustível, óleo diesel, carvão, lenha e energia elétrica. Na indústria química e petroquímica o GN é usado em larga escala como matéria-prima e combustível. Na siderurgia, o GN é aplicado como redutor na fabricação de ferro-esponja, que é a matéria-prima utilizada na produção de aço.

No setor comercial, o GN é utilizado em substituição ao GLP e em cogeração, alimentando sistemas de refrigeração e iluminação, substituindo a energia elétrica. No setor residencial, o GN é usado em cocção e aquecedores, substituindo o GLP e energia elétrica, respectivamente.

O consumo automotivo do gás apresenta-se, de modo geral, como complementar aos outros combustíveis, tais como gasolina, diesel e álcool. No setor elétrico, o GN vem sendo usado na geração termelétrica, em substituição ao gás combustível, óleo diesel e carvão.

A flexibilidade de uso coloca o GN como um combustível alternativo em potencial. Podendo ser inserido em qualquer mercado e nichos de mercado. Porém, ainda há muito no campo tecnológico e de infra-estrutura a ser realizado.

Nos países industrializados, o GN iniciou a sua entrada nos mercados através das infra-estruturas de distribuição previamente existentes para o gás de rua produzido a partir do carvão. A substituição foi imediata e o GN concentrou-se nos mercados residencial, comercial e industrial (SANTOS et al., 2002).

Segundo relatório setorial do BNDES (2006), no ano de 2005, o maior consumidor de GV em volume de vendas foi o segmento industrial, seguido do segmento de geração e cogeração de eletricidade, consumo automotivo, residencial e comercial (**Figura 3.6**). De acordo com o relatório, os segmentos industrial e de geração de eletricidade, como também o GNV, são estratégicos para a ampliação da malha de transporte e distribuição de GN, embora possuam dinâmicas diferentes.

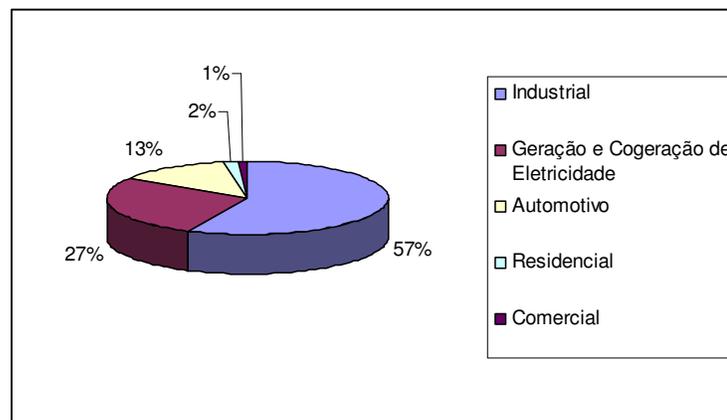


Figura 3.6 – Demanda de GN por Segmento
Fonte: BNDES (2006)

Moraes (2005) analisa as tendências da demanda de energia no setor de transportes no Brasil. A pesquisa aborda tanto os modais de transporte como os combustíveis utilizados, analisando a estrutura e evolução do sistema de transporte mundial e nacional para projetar a demanda de combustíveis nos transportes brasileiros no período de 2000 a 2025.

A pesquisa acima citada, busca identificar possibilidades de redução do consumo energético no setor, dentro desse horizonte de tempo. Apresenta resultados interessantes,

destacando a tendência de diminuição no número de passageiros no transporte coletivo das grandes cidades brasileiras de 1994 a 2000.

Observa-se assim, uma demanda reprimida, fruto de uma pequena infra-estrutura de distribuição de gás. Somado a isso está o fato de que ainda há tecnologia a ser desenvolvida para utilização do GN nos segmentos citados. Com o desenvolvimento tecnológico, diminuem os custos e principalmente o consumo de energia.

Portanto, do lado da demanda, as incertezas estão relacionadas ao fator tecnológico e ao fator político-econômico. Esse último, pois sem investimentos em infra-estrutura de distribuição não é possível estimular a demanda pelo produto.

3.4.4 Flutuação do Preço de uma *Commodity*

Para Martins (2006), a questão da definição dos preços do GN apresenta-se como o fator de maior instabilidade dessa indústria. Além da instabilidade do preço da *commodity* GN, há o imbróglio legal quanto à tarifação do produto.

Os critérios tarifários de transporte de GN são definidos pela ANP em função da distância do ponto de entrega do produtor e do ponto de recebimento da distribuidora. No entanto, a definição de gasoduto de transporte e gasoduto de distribuição varia de Estado para Estado, ocasionando disparidade de tarifas muito grandes para distâncias semelhantes, quando comparados todos os Estados da Federação (MARTINS, 2006).

As tarifas de distribuição também variam de um Estado para o outro, em decorrência dos diferentes contratos de concessão firmados entre os governos estaduais e as companhias distribuidoras de gás canalizado. Outro fator diferenciador das tarifas de distribuição refere-se à origem do gás, se nacional ou importado, este último definido por contrato.

A Lei do Petróleo prevê preços livres com base na livre concorrência. Não havendo concorrência, os preços devem ser fixados pelo Governo Federal. Este, por sua vez, pode adotar medidas, através da ANP, resguardando os consumidores de um monopólio natural.

Na ROA que será realizada no próximo capítulo, será considerada a variação do preço da *commodity* GN, negociada no mercado. Schwartz (1997) comparou três modelos de previsão do comportamento do preço de *commodities* para avaliar sua capacidade de precificar contratos futuros de compra e venda do produto. A análise revela tendência a um Movimento de Reversão à Média (MRM) para os preços de *commodities*.

Pindyck (1999) examinou o comportamento de longo prazo dos preços do petróleo, carvão e GN, usando dados históricos. Comparou o comportamento passado dos preços buscando prever o comportamento estocástico dos preços através de um MRM. Dois anos

mais tarde, Pindyck (2001) discute a dinâmica de curto prazo do preço de *commodities*. Porém não avalia para o caso do GN.

3.4.5 Estratégia de Investimentos

Segundo Santos (2005), os principais desafios para a inserção do GN na matriz energética brasileira é a identificação dos principais gargalos tecnológicos, assim como o dimensionamento correto das ações necessárias para dar suporte tecnológico ao desenvolvimento do mercado.

A estratégia para o desenvolvimento do mercado será orientada por uma ampla análise da cadeia produtiva do GN, relativizando-a com outras indústrias de rede, como o setor de petróleo e de energia elétrica. Para dessa maneira, buscar sinergias e complementaridades entre elas e, como resultado, mitigar riscos que possam provocar ou a competição predatória entre os energéticos que sustentam o mercado, ou a exposição dos agentes (SANTOS, 2005).

No Brasil, uma das ações possíveis para expansão do mercado de GN no segmento automotivo é atuar junto à indústria automobilística, em particular o transporte público urbano, no sentido de viabilizar e expandir a produção de veículos a GNV e estimular a conversão de veículos utilizando produtos certificados e com garantia de qualidade.

Com o aumento da possibilidade de oferta de GN surge a necessidade de se criar grandes blocos de consumo. Isso porque os enormes investimentos de risco na exploração e descobertas de novos campos de gás só podem ser recuperados com a venda do produto aos consumidores (SANTOS et al., 2002).

Mais ainda, de acordo com Santos et al. (2002), é preciso vender o gás para poder atrair os investimentos ainda necessários à construção das infra-estruturas de transporte e distribuição do gás, conectando as áreas de produção às áreas de consumo. Apenas aumentar a oferta de gás está muito aquém da necessidade de se cumprir a meta de política nacional para aumentar a sua participação na matriz energética do país.

Em termos de estratégia para massificação do uso do gás em veículos pesados, talvez, em um primeiro momento, a conversão de veículos usados para operar com diesel-gás seja mais interessante, pois o empresariado do setor teria a opção de reconverter o veículo, podendo revendê-lo para locais sem disponibilidade de GN.

O diesel-gás poderia entrar como formador de uma cultura de utilização do gás natural em veículos pesados, contribuindo para uma ampliação da rede de distribuição de gás por todo o país. Num segundo momento, isso estimula a demanda por veículos novos dedicados a

gás natural ou mesmo, quem sabe, veículos originais diesel-gás, conforme opção das montadoras e/ou do mercado.

Caso não haja viabilidade econômica, o empresariado do setor de transportes não trocará a tecnologia diesel, já consagrada em décadas de utilização e perfeitamente dominada, por outras ainda incipientes e que requerem um tempo natural de maturação. A questão ambiental é importante uma vez que essa consciência vem aumentando nos últimos anos na sociedade como um todo, mas ela não é suficiente para iniciar e sustentar a difusão do GNV no setor de transportes. A viabilidade econômica torna-se essencial nessa questão (WILLE, 2005).

3.5 Considerações Finais

Do contexto analisado, observa-se a necessidade de uma melhor avaliação dos projetos de investimento em GN no Brasil, o que pode contribuir para o desenvolvimento do mercado.

Dessa forma, ao analisar o contexto do GN no Brasil, verifica-se que as condições de risco e incerteza devem ser consideradas nas avaliações de investimento, visto que ainda há muitos desafios tecnológicos, regulatórios e de mercado a serem equacionados para que se alcance o desenvolvimento desejado do mercado.

Um estudo detalhado das premissas e variáveis de projetos de investimento nessa área deve ser realizado. Isto deve ser feito através da aplicação correta dos métodos de análise de investimentos, que incorporam a volatilidade das variáveis envolvidas nos projetos, justificando de forma adequada se um investimento deve ser realizado ou não.

A avaliação de investimentos através da abordagem de opções reais possibilita a identificação de opções durante a vida de um projeto, o que normalmente é desconsiderada nas avaliações tradicionais. Com isso, o desafio intrínseco da pesquisa é avaliar o risco e a incerteza de investimentos na utilização do GN no seu segmento. A avaliação de risco e incerteza, além de criar a possibilidade de se exercer opções nesses projetos, dão mais valor a elas.

Seguindo a metodologia de pesquisa proposta, esse capítulo fecha o modelo conceitual do problema de investimento. Após concluir o modelo conceitual, através da formulação do problema e conseqüentemente a formulação da questão a que a pesquisa pretende endereçar, a próxima etapa é a modelagem matemática ou o modelo científico.

Capítulo 4

4 MODELAGEM E SIMULAÇÃO NA PRECIFICAÇÃO DE OPÇÕES REAIS

4.1 Considerações Iniciais

A definição prévia de uma metodologia é muito importante para endereçar corretamente a questão de pesquisa. Da mesma forma, para se modelar corretamente o problema de investimento através da abordagem das opções reais, é também importante estabelecer uma estrutura a ser seguida. Aqui, será seguida uma estrutura para modelar problemas de opções reais proposta por Dias (1996).

Os capítulos 3 e 4 foram importantes para que fosse possível desenvolver o modelo conceitual do problema a ser investigado. Sua correta formulação contribui para que o desenvolvimento do modelo matemático se aproxime ao máximo das condições reais de negócios. Neste capítulo será apresentado as formas de modelar matematicamente o problema de pesquisa.

Aqui será visto que é possível modelar um problema de investimento tratando a variável tempo de duas maneiras: de forma discreta e de forma contínua. Uma solução discreta busca uma aproximação à solução contínua. No limite, a solução discreta tende para a solução contínua.

Apesar de sua construção ser mais complexa, e de serem menos flexíveis, os modelos de tempo contínuo têm importante contribuição para a pesquisa científica. Neste caso, representado tanto pelo avanço da teoria de opções reais quanto dos processos utilizados para tomada de decisão de investimentos.

Este capítulo trata, primeiramente, da estrutura metodológica necessária para modelar o valor de uma opção real. As seções seguintes seguirão a estrutura proposta, apresentando três blocos de construção importantes: a previsão da incerteza através de um processo estocástico; a otimização dinâmica sob incerteza; e a modelagem das opções reais. Por fim, será iniciado o desenvolvimento de um modelo de análise econômica do valor da opção de troca de insumos.

4.2 Estrutura de um Modelo de Tomada de Decisão de Investimento com Opções Reais Embutidas

Para uma correta precificação do valor das opções embutidas nos projetos, é necessária a aplicação de um modelo adequado. A presente seção identifica alguns modelos

disponíveis na literatura, bem como a adequação de um modelo específico para avaliar a alternativa de investimento caracterizada como objeto de estudo dessa pesquisa.

Ao se adotar um modelo de opções reais para avaliar investimentos em GN, principalmente em projetos de larga escala como a análise econômica de uma opção de troca de insumos, algumas características são desejadas.

Dias (1996), destaca a importância das qualidades que o modelo deve ter, e que se referem: a simplicidade, a confiabilidade, a adequabilidade e a flexibilidade. Segundo o autor, essas características são importantes para que se consiga um elevado grau de replicabilidade no trabalho.

Um modelo simples é de fácil entendimento, interpretação dos resultados e uso. Um modelo confiável pode ser usado em larga escala. O modelo adequado ao caso avaliado gera resultados mais precisos. E um modelo flexível, oferece alternativas no método de aplicação do modelo (DIAS, 1996).

Devido às características acima apontadas, a presente pesquisa adotou uma estrutura de aplicação de um modelo de opções reais, proposto por Dias (1996). Essa estrutura é apresentada de forma esquemática na **Figura 4.1**.

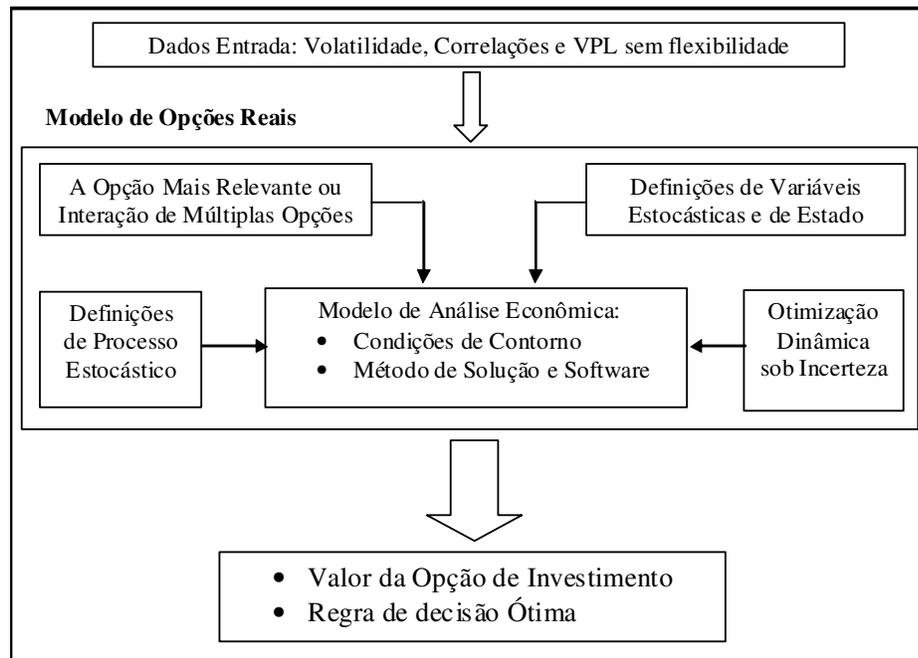


Figura 4.1 – Estrutura de um Modelo de Opções Reais

Fonte: Dias (1996)

Cada elemento de construção do modelo de opções reais, necessário para avaliar um projeto de investimento, será apresentado através de uma revisão teórica. A partir da próxima

seção, o capítulo trata de processos estocásticos, seguido dos métodos de otimização dinâmica sob incerteza. Mais adiante, um estudo dos métodos de solução de problemas de opções reais.

4.3 Previsão da Incerteza Através de um Processo Estocástico

De acordo com Kellerhals (2004), os modelos de precificação financeira em tempo contínuo são construídos sob processos estocásticos hipotéticos. Isso é feito para se criar modelos dinâmicos no tempo e que consideram o ambiente econômico.

Por convenção, um processo estocástico é definido como o espaço probabilístico que representa a incerteza intertemporal da economia estocástica. Um método comum e conveniente para descrever a evolução das variáveis modeladas é especificar seu comportamento probabilístico através de um processo de Itô (KELLERHALS, 2004).

Segundo Dias (1996), os três principais processos estocásticos de interesse em aplicações econômicas e de finanças são: o Movimento Browniano Geométrico (MBG); o Movimento de Reversão à Média (MRM); e o processo de Poisson, geralmente acoplado ao MBG.

Um processo estocástico não é nada mais do que uma equação matemática definida que cria uma série de resultados sobre o tempo, resultados que não são determinísticos em sua natureza. Isto é, uma equação ou processo que não segue qualquer regra visível simples tal como o preço aumentar X% a cada ano. Um processo estocástico é por definição não determinístico, podendo-se colocar números em uma equação de processo estocástico e obter diferentes resultados a cada momento.

O processo é fixo e predeterminado, mas os resultados não são. Conseqüentemente, pela simulação estocástica, pode-se criar múltiplos caminhos de preços, obtendo uma amostragem estatística destas simulações, e fazer inferências nos caminhos potenciais que o atual preço pode empreender dada a sua natureza, e parâmetros do processo estocástico usado para gerar a série de tempo.

Segundo Dixit & Pindyck (1994), a utilização do cálculo estocástico, da programação dinâmica e da análise de ativos contingentes são úteis para se estudar decisões de investimento usando uma “aproximação de tempo contínuo”. Destacam ainda, que estes conceitos e técnicas estão se tornando amplamente usados em um grande número de áreas econômicas e financeiras.

4.3.1 Movimento Browniano Geométrico (MBG)

O Processo de Wiener ou MBG, é um importante processo de tempo contínuo que se apresenta como um bloco de construção fundamental para o desenvolvimento de um modelo matemático de tempo contínuo. O Processo de Wiener pode ser derivado como o limite contínuo de um processo de tempo discreto que segue caminhos aleatórios. Com isso, pode ser generalizado para uma ampla classe de processos estocásticos de tempo contínuo, chamado de processo de Itô (DIXIT & PINDYCK, 1994).

O processo de Itô pode ser usado para representar a dinâmica de valor de um projeto, preços dos produtos, custos dos insumos, e outras variáveis que evoluem estocasticamente sobre o tempo e que afetam a decisão de investir (DIXIT & PINDYCK, 1994).

Para um projeto de valor V , a equação estocástica para sua variação no tempo (equação (12)), considerando um MBG é:

$$dV = \alpha V dt + \sigma V dZ \quad (12)$$

onde dZ é chamado de incremento de Wiener, sendo igual a $\varepsilon\sqrt{dt}$. A variável ε é a distribuição normal padronizada $N(0,1)$. Tem-se também o coeficiente α , que representa o parâmetro de “*drift*” – ou inclinação da curva –, e σ representa a volatilidade de V . O primeiro termo da equação representa a tendência ou expectativa de valor, e o segundo termo representa a variabilidade dessa tendência, ou termo de incerteza.

De acordo com Dixit & Pindyck (1994), um processo estocástico envolve tempo e aleatoriedade. Nesse processo, ensinam os autores, a variável estocástica não tem derivada em relação ao tempo no sentido convencional. Assim, o cálculo ordinário é insuficiente, o que demanda o uso do cálculo estocástico e do processo de Itô – às vezes chamado de Teorema Fundamental do Cálculo Estocástico. Este é um importante resultado que permite diferenciar e integrar funções de processos estocásticos.

4.3.2 Movimento de Reversão à Média (MRM)

Nem todas as variáveis subjacentes aos projetos podem ser corretamente representadas pelo MBG, principalmente quando se quer avaliar uma opção de troca de insumos, onde as variáveis incertas são representadas pelos preços de *commodities*.

Embora tanto o MBG quanto o MRM satisfaçam a propriedade de Markov, na reversão à média não há incrementos independentes, ou seja, a mudança esperada de uma variável x qualquer depende da diferença entre x e seu valor médio a longo prazo. Por

exemplo, se x é maior (ou menor) que seu valor médio, é mais provável que haja um decréscimo (ou acréscimo) em seu valor no próximo intervalo de tempo.

Segundo Hahn (2005), muitos problemas de opções reais têm ativos subjacentes que seguem um processo estocástico de reversão à média. Isso, pois o FC esperado para estes ativos dependem do MRM do preço de *commodities*.

Esta constatação decorre de estudos empíricos de dados históricos de preços de *commodities*, como o de Schwartz (1997). O resultado da análise revela que modelos de reversão à média capturam com mais precisão a evolução dos preços de *commodities*.

Resultados semelhantes foram encontrados por Bessembinder et al. (1995). Os resultados empíricos indicam um MRM para os preços das *commodities* dos mercados de petróleo e agrícola. Para o mercado de metais o MRM é menor, porém estatisticamente significativo. Já o preço de ativos financeiros mostra evidência fraca do MRM.

Bhattacharya (1978) demonstrou que um FC que segue um MRM, em geral, é mais realista para muitos projetos de investimento em economias competitivas. Isso desde que se tenha a expectativa de que o FC reverta para níveis médios.

A forma simples do processo de reversão à média, conhecido como processo de reversão à média aritmético, ou processo Ornstein-Uhlenbeck de um fator é apresentada na equação (13).

$$dY_t = \eta(\bar{Y} - Y_t)dt + \sigma dz_t \quad (13)$$

Onde:

$dY_t \equiv$ logaritmo do preço da *commodity*;

$\eta \equiv$ coeficiente de reversão à média;

$\bar{Y} \equiv$ logaritmo do preço médio a longo prazo;

$\sigma \equiv$ processo de volatilidade;

$dz \equiv$ processo de Wiener padrão.

O logaritmo do preço assume que o preço da *commodity* se distribui como uma curva log-normal, fazendo com que se $Y = \log(y)$, então y não pode ser negativo. Com isso, tem-se que o valor esperado e a variância de um processo Ornstein-Uhlenbeck seja (equações (14) e (15)):

$$E[Y_t] = \bar{Y} + (Y_0 - \bar{Y})e^{-\eta t} \quad (14)$$

$$\text{Var}[Y_t] = \frac{\sigma^2}{2\eta} (1 - e^{-2\eta T}) \quad (15)$$

Então, se $T \rightarrow \infty$ temos que a $\text{Var}[Y_t] \rightarrow \frac{\sigma^2}{2\eta}$ e não para o infinito como é o caso com um MBG.

Há também outros processos de reversão à média como, por exemplo, o processo de reversão à média geométrico, encontrado em Dixit & Pindyck (1994) e que é regido pela equação (16).

$$\frac{dY_t}{Y_t} = \eta(\bar{Y} - Y_t)dt + \alpha dz_t \quad (16)$$

Outra forma de modelagem estocástica para o preço de uma *commodity* é o conhecido modelo de Battacharya (1978) ou modelo MBG Não-Homogêneo representado pela equação (17).

$$dS_t = \eta(\bar{S} - S_t)dt + \sigma S_t dZ_t \quad (17)$$

A lógica básica do processo de reversão à média vem da microeconomia. Esta estabelece que quando os preços estão baixos (ou abaixo de sua média de longo prazo), a demanda para o produto tende a aumentar enquanto a sua produção tende a diminuir.

Hahn & Dyer (2006) desenvolvem um modelo na forma de árvore de nós binomiais recombinantes para avaliação numérica de ativos que seguem um MRM. Os autores mostram que a abordagem convencional para a construção da árvore de nós binomiais resulta em probabilidades inválidas quando modeladas para um MRM. Neste caso é necessário o uso de probabilidades condicionais.

Pinto, Brandão e Hahn (2007), modelaram a opção de troca de insumos através de um MRM para o preço de *commodities*. Segundo os autores, os preços de *commodities* são geralmente melhor modelados por processos de reversão a média. Mais ainda, argumentam que o uso do MBG pode superestimar o valor da opção, bem como o valor do projeto em si, para o caso de *commodities*.

4.4 Otimização Dinâmica Sob Incerteza

Um problema geral de investimento sob incerteza pode ser visto como um problema de maximização de riqueza, e sujeito a um processo estocástico. Portanto, o próximo elemento do modelo a ser considerado é o método de otimização dinâmica sob incerteza. Em

Dias (1996), o autor identifica o método dos ativos contingentes e a programação dinâmica como os dois métodos mais usados em otimização dinâmica sob incerteza.

O que se busca em um problema de otimização é encontrar as condições ótimas dentro dos parâmetros especificados, e restrições estabelecidas. Em um problema de investimento, geralmente, essas condições ótimas se referem à maximização da riqueza ou a minimização dos custos. A equação que representa o que se deseja otimizar é chamada de função objetivo do problema. A **Figura 4.2** representa de forma esquemática um problema de otimização.

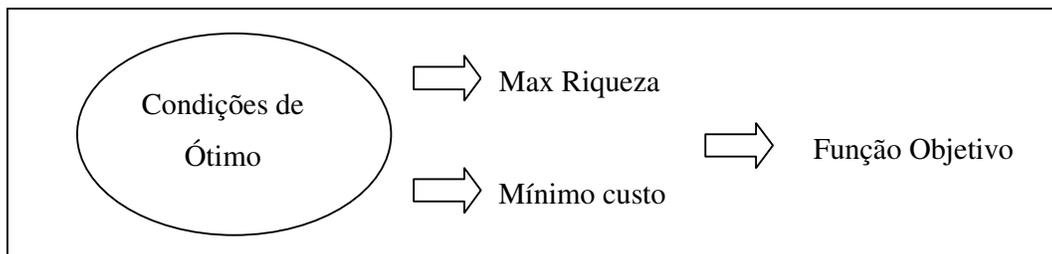


Figura 4.2 – Problema de Otimização

O objetivo da análise econômica de projetos é maximizar o valor da firma, e esse é um problema de otimização sob incerteza. As receitas dos investimentos feitos por uma empresa hoje, resultam em um fluxo de caixa de receitas futuras, e são afetadas pela incerteza e por outras decisões que a empresa ou seus rivais tomarão mais tarde. A empresa deve olhar além de todos esses desenvolvimentos quando tomar suas decisões correntes (DIAS, 1996).

Um aspecto desse futuro é uma oportunidade de tomar a mesma decisão mais tarde, conseqüentemente a opção de adiar deve ser incluída hoje no menu de opções. Desta forma, as técnicas matemáticas – programação dinâmica e análise de ativos contingentes – empregadas para modelar decisões de investimentos, devem ser capazes manipular todas essas considerações (DIXIT & PINDYCK, 1994).

4.4.1 Ativos Contingentes

De acordo com Dixit & Pindyck (1994), a análise de ativos contingentes foi construída na idéia de economia financeira. De acordo com os autores é possível observar que um projeto de investimento é definido por um fluxo de custos e receitas que variam através do tempo e dependem do desdobramento de eventos incertos. A empresa ou os indivíduos que detém o direito de uma oportunidade de investimento, ou de um fluxo de receitas operacionais de um projeto, detém um ativo que tem um valor.

Se o projeto ou oportunidade de investimento for um ativo negociado no mercado, ele terá um preço de mercado conhecido. Entretanto, até se ele não for diretamente negociado, pode-se computar um valor implícito para ele, relacionando-o com outros ativos negociados no mercado (DIXIT & PINDYCK, 1994).

4.4.2 Programação Dinâmica

A otimização por programação dinâmica, e a por ativos contingentes, tomam diferentes hipóteses sobre o mercado financeiro e as taxas de desconto que as empresas usam para o valor futuro dos fluxos de caixa. A programação dinâmica quebra uma seqüência completa de decisões em apenas dois componentes: a decisão imediata; e uma função avaliação que condensa as conseqüências de todas as decisões subsequentes, iniciando com a posição que resulta da decisão imediata (DIXIT & PINDYCK, 1994).

Uma solução matemática para problemas de otimização pode ser encontrada através de derivação parcial e o conhecido Multiplicador de LaGrange. Sua formulação matemática segue:

Função objetivo: $f(x,y)$

Coleção de restrições: $c(x,y)$

Multiplicador de LaGrange: $\ell(x,y,\lambda) = f(x,y) + \lambda c(x,y)$

A otimização é resultado de uma diferenciação parcial:

$$\partial \ell / \partial \lambda = 0$$

$$\partial \ell / \partial x = 0$$

$$\partial \ell / \partial y = 0$$

Se o horizonte de planejamento é finito, há uma decisão final, que pode conseqüentemente ser descoberta usando métodos padrão de otimização estática. Esta solução fornece a função avaliação apropriada para a penúltima decisão. Na seqüência, têm-se a decisão de dois estágios do fim e assim sucessivamente, até a condição inicial (DIXIT & PINDYCK, 1994).

4.5 Os Modelos de Opções Reais

Inicialmente, é necessário definir o modelo de opções reais adotado, onde serão inseridos os elementos que compõem esse modelo. Aqui, o objetivo é apresentar as formas de modelar matematicamente o valor de uma opção real embutida em uma oportunidade de investimento.

Os principais métodos e que são mais amplamente usados para avaliar opções reais são: a solução matemática contínua ou simulação contínua, representada por uma EDP; a simulação de caminhos dependentes; e as árvores de nós binomiais e multinomiais (MUN, 2002).

4.5.1 Solução Contínua para a Precificação de Opções Reais

Soluções contínuas são modelos como o de Black & Scholes, onde existem equações que podem ser resolvidas dando uma coleção de hipóteses de entrada. Eles são exatos, rápidos, de fácil implementação com o auxílio de algum conhecimento básico de programação, mas são difíceis de explicar, pois eles tendem a aplicar pesadas técnicas de cálculo matemático estocástico. Eles também são muito específicos em sua natureza, com limitada flexibilidade de modelagem (MUN, 2002).

A solução contínua do problema de investimento proposto nesse trabalho vem do desenvolvimento de uma EDP para avaliação da opção de troca de insumos presente em alternativas de investimento em tecnologias flexíveis. Há alguns modelos na literatura, mas mesmo assim, sua utilização requer modificações.

Porém, é possível encontrar o valor da opção através de uma simulação ou através de uma solução matemática de tempo discreto. A primeira aplica o método de SMC, com algumas nuances. A solução discreta é um modelo de árvore de nós binomiais, ou somente modelo binomial.

4.5.2 Avaliação de Opções Através da Simulação de Monte Carlo

Uma das primeiras aplicações da SMC na avaliação de opções foi realizada por Boyle (1977). Neste artigo, o autor desenvolveu um método para simular o processo de geração de retorno de um ativo subjacente e assumiu como hipótese a neutralidade ao risco para derivar o valor da opção.

A SMC pode ser aplicada para resolver problemas de opções reais, isto é, para obter um resultado para o valor da opção. Na abordagem de simulação, uma série de valores previstos para um ativo é criada usando o MBG. O cálculo de maximização é aplicado para o ponto final da série, e descontado até a data zero, à taxa livre de risco. Isto é, iniciando com uma semente inicial do valor do ativo subjacente, simulam-se múltiplos caminhos futuros usando o MBG (equação (18)).

$$\delta S_t = S_{t-1} (rf(\delta_t) + \sigma \varepsilon \sqrt{\delta_t}) \quad (18)$$

Isto é, a mudança no valor do ativo δS_t no tempo t é o valor do ativo no período anterior S_{t-1} multiplicado pelo MBG dado por $(r_f(\delta_t) + \sigma\varepsilon\sqrt{\delta_t})$.

Pelo ε mudar em cada tentativa da simulação, cada tentativa de simulação irá produzir um caminho de evolução do ativo totalmente diferente. No fim do n -ésimo intervalo de tempo, o processo de maximização é então aplicado (MUN, 2002).

Na solução através da simulação, quanto maior o número de simulações e quanto maior o número de passos na simulação, maior a precisão dos resultados.

Segundo Mun (2002), a SMC pode ser usada facilmente para resolver opções do tipo européias, mas é notadamente difícil aplicar a SMC para resolver opções do tipo americanas. Isto ocorre, pois as propriedades matemáticas das opções americanas requerem o conhecimento de qual o tempo ótimo de parada, e qual a barreira ótima de execução dos projetos.

Simulação pode ser aplicada tanto para simular os a variabilidade das variáveis de entrada de uma ROA, quanto para obter uma faixa de resultados para a opção real. Também se podem resolver problemas de opções reais através da modelagem de caminhos dependentes.

Entretanto, deve-se ter certa cautela nesse ponto. Sendo a volatilidade um parâmetro de entrada na ROA, a qual captura a variabilidade do valor do ativo no tempo, uma árvore de nós binomiais é uma técnica de simulação discreta, enquanto uma solução fechada é obtida usando modelos de simulação contínua. Sendo assim, ao simular as opções reais, os parâmetros de entrada podem duplicar a contagem da verdadeira variabilidade da opção real (MUN, 2002).

Uma abordagem interessante é realizada por Whiteside, Drown & Levy (2001), que apresentam uma solução para o problema de avaliação de um campo de produção de petróleo flexível, usando um método de Monte Carlo ramificado. O trabalho busca investigar o valor da obtenção de informação adicional, a fim de reduzir as incertezas do campo. Os autores justificam o método mostrando que não é possível usar árvores de decisão em problemas com várias incertezas, e quando se tem que avaliar uma sequência de múltiplas decisões.

4.5.3 Modelo Binomial

Na maioria das modelagens acadêmicas, utilizam-se modelos de tempo contínuo que são complexos até mesmo para solução computacional, especialmente quando o objetivo final é avaliar opções compostas, tal como as opções de troca. No entanto, pode-se “discretizar” o modelo contínuo, replicando-o por um modelo de nós simples que são de fácil entendimento,

requerem somente conhecimentos matemáticos básicos, e aproximam o modelo contínuo muito bem. Isso pode ser feito através da escolha de um grande número de passos e pode ser muito seguro e útil no auxílio à tomada de decisão gerencial (KHANSA & LIGINLAL, 2007).

Esse modelo discreto foi proposto inicialmente por Cox, Ross & Rubinstein (1979). Conhecido como modelo binomial, é simples de se utilizar, flexível, depende de um número limitado de parâmetros, e converge para um MBG quando o intervalo de tempo considerado diminui. A idéia do método é a construção de uma árvore de eventos binomiais que represente os valores futuros do ativo subjacente ao projeto.

A árvore binomial serve como uma aproximação do modelo contínuo. Diferentemente de uma estrutura de árvore de decisão, no qual existe um único caminho entre cada par de nós, uma estrutura de árvore binomial permite ciclos, como o mostrado na **Figura 4.3**.

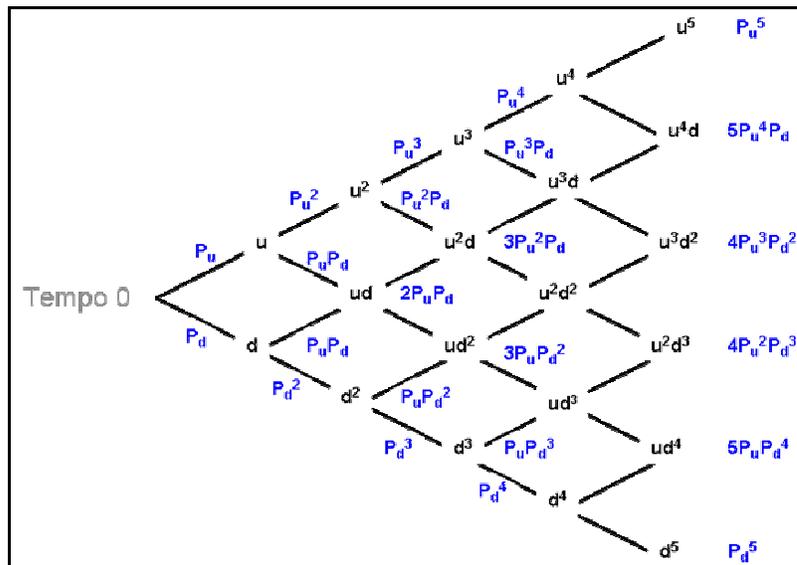


Figura 4.3 – Árvore Binomial

A Figura 4.3 apresenta esquematicamente um modelo binomial, mostrando a evolução de um processo do período de tempo 0 para o período de tempo 5, inclusive. Em cada nó da árvore existe uma escolha ascendente e uma escolha descendente, que ocorre com certa probabilidade. Dado o valor de um ativo no início do tempo 0, o preço final deste ativo é o preço inicial multiplicado por um fator ascendente (u) ou um fator descendente (d), dependendo do caminho escolhido. Os fatores u e d são escolhidos considerando $u > 1 > d$ ou $u > 1 + rf > d$ (se for utilizado um ativo livre de risco).

Deve-se notar que conforme se evolui na árvore, multiplicam-se os fatores, dependendo do caminho escolhido. Por exemplo, o nó u^2 corresponde ao caminho alcançado,

partindo-se do tempo 0, e escolhendo o nó ascendente por duas vezes consecutivas. Já o nó ud corresponde ao caminho alcançado, partindo-se do tempo 0, e escolhendo uma vez o nó ascendente e uma vez o nó descendente, fechando um ciclo.

O fator ascendente u é dado pela equação (19), onde σ representa a volatilidade do ativo subjacente sujeito a risco, enquanto o fator descendente é dado pela equação (20). Cada nó é alcançado com certa probabilidade, ascendente (“ up ”) ou descendente (“ $down$ ”), que corresponde à probabilidade neutra ao risco, e é representada respectivamente pela equação (21) e pela equação (22), onde R representa a taxa livre de risco composta continuamente e dada por $e^{(r_f-b)(\Delta t)}$.

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (19)$$

$$d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}} = \frac{1}{u} \quad (20)$$

$$pu = \frac{R - d}{u - d} \quad (21)$$

$$pd = \frac{u - R}{u - d} \quad (22)$$

Considerando uma árvore binomial de apenas 2 estágios, por exemplo, há três possíveis estados finais no estágio 2, chamados u^2 , ud , e d^2 . Para se obter o nó u^2 há somente um caminho possível, que ocorre com probabilidade pu^2 . Para se obter o nó ud há dois caminhos possíveis (chamados ud e du), que correspondem à probabilidade $2pupd$. Finalmente, o nó d^2 é alcançado através de um único caminho com probabilidade pd^2 . Estes resultados são mostrados na **Figura 4.3**.

Para computar corretamente o valor de uma opção, através do modelo binomial, é necessário usar uma taxa de desconto adequada. Para tanto, duas formas são mais utilizadas: a abordagem pelo portfólio replicado; e a abordagem da probabilidade neutra ao risco. A formulação apresentada acima remete ao uso da probabilidade neutra ao risco.

As hipóteses predominantes do portfólio replicado de mercado são que não há oportunidades de arbitragem, e que existe um número de ativos negociados no mercado que podem ser obtidos para replicar o perfil de pagamento do ativo existente.

De Reyck, Degraeve & Vandenborre (2008), propõem uma abordagem alternativa para a ROA, baseada na certeza equivalente da fórmula do VPL, que segundo eles, elimina a necessidade de identificar um ativo negociado no mercado.

Na essência, uma árvore binomial é simplesmente uma simulação discreta de um “cone de incerteza” (Figura 4.4). Considerando que um MBG é uma simulação de um processo estocástico contínuo, uma árvore binomial é uma simulação de um processo discreto (MUN, 2002).

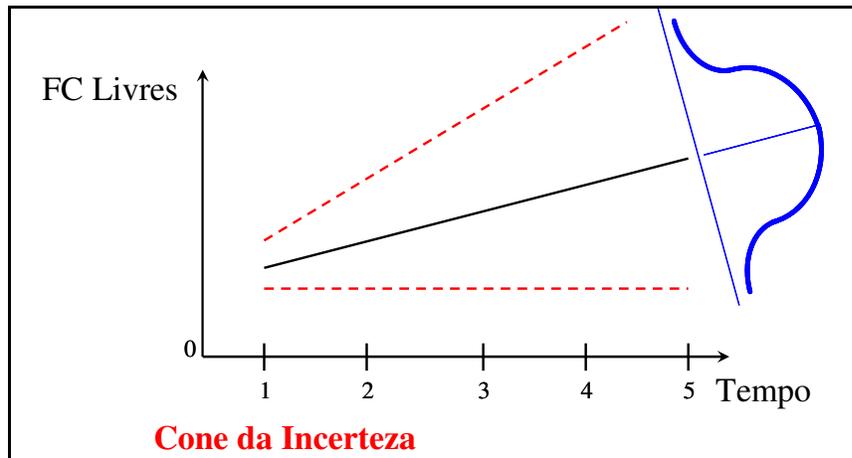


Figura 4.4 – Cone da Incerteza
Fonte: Mun (2002)

No limite, onde o intervalo de tempo se aproxima de zero e o número de passos aproxima do infinito, os resultados de uma árvore binomial aproximam daqueles obtidos através de um MBG. Resolvendo um MBG em um sentido discreto, resulta na equação binomial. Resolvendo em um sentido contínuo, resulta em uma EDP, como o modelo de Black & Scholes e seus modelos derivados e auxiliares.

No capítulo 5 será apresentada uma aplicação do modelo binomial para o objeto de estudo dessa pesquisa. Lá serão abordados mais detalhes da utilização do método. Agora, será apresentado o modelo quadrinomial para avaliação de opções reais. Isto é necessário, pois apresenta o problema de investimento que se quer analisar tem duas variáveis incertas impactando o valor do projeto.

4.5.4 Modelo Quadrinomial

Segundo Copeland e Antikarov (2001), a árvore quadrinomial é uma árvore binária com duas fontes de incerteza e que possui quatro ramificações em cada nó. Para calcular o valor da opção através de uma árvore quadrinomial é necessário encontrar a volatilidade de cada uma das fontes de incerteza, levando também a um grande número de combinações entre os dois ativos.

Para o cálculo das probabilidades neutras ao risco da árvore quadrinomial, pode-se recorrer à formulação proposta por Brandão & Dyer (2006). O desenvolvimento matemático

do modelo quadrinomial baseia-se no MBG, de onde se podem retirar as probabilidades neutras ao risco (equações (23), (24), (25) e (26)).

$$Pu_a u_b = \frac{1}{4} \times \left[1 + \left(\frac{v_a}{\sigma_a} + \frac{v_b}{\sigma_b} \right) \times \Delta t^{\frac{1}{2}} + \rho_{a,b} \right] \quad (23)$$

$$Pd_a u_b = \frac{1}{4} \times \left[1 + \left(\frac{v_a}{\sigma_a} - \frac{v_b}{\sigma_b} \right) \times \Delta t^{\frac{1}{2}} - \rho_{a,b} \right] \quad (24)$$

$$Pu_a d_b = \frac{1}{4} \times \left[1 - \left(\frac{v_a}{\sigma_a} - \frac{v_b}{\sigma_b} \right) \times \Delta t^{\frac{1}{2}} - \rho_{a,b} \right] \quad (25)$$

$$Pd_a d_b = \frac{1}{4} \times \left[1 - \left(\frac{v_a}{\sigma_a} + \frac{v_b}{\sigma_b} \right) \times \Delta t^{\frac{1}{2}} + \rho_{a,b} \right] \quad (26)$$

Onde:

u_a e u_b \equiv movimento de subida dos preços dos ativos a e b;

d_a e d_b \equiv movimento de descida dos ativos a e b;

g_a e g_b \equiv taxa de crescimento esperado dos ativos a e b;

$\rho_{a,b}$ \equiv correlação entre os preços dos ativos a e b;

σ_a e σ_b \equiv volatilidade dos preços dos ativos a e b;

$$v_a = \frac{g_a - (\sigma_a)^2}{2};$$

$$v_b = \frac{g_b - (\sigma_b)^2}{2};$$

$$\Delta t = \frac{1}{\text{número_de_steps_entre_os_periodos}}.$$

Segundo Cuthbertson & Nitzsche (2001), o FC de pagamentos desta opção será:

$$\text{Payoff} = \text{Max}(S_1 - S_2 - CS; 0), \text{ onde:}$$

S_1 = VPL do modo de operação corrente;

S_2 = VPL do modo de operação 2;

CS = custo de conversão do modo de operação 1 para o 2;

$$T = n \times \Delta t.$$

Porém, para a modelagem de um problema de investimento que seja capaz de calcular o valor da flexibilidade conseguida através da opção troca de insumos, é necessário utilizar

outro tipo de árvore de eventos encontrada na literatura. Isso se deve a dois motivos principais:

(a) na avaliação da opção de troca de insumos, o modelo deve considerar a substituição de um ativo por outro, logo, devem ser consideradas duas fontes de incerteza;

(b) outro ponto é que o modelo de nós binomiais de Cox, Ross & Rubinstein (1979) aproxima a árvore de eventos para um MBG, o que não é o caso, como já foi dito anteriormente, para a avaliação dos preços de *commodities*.

Para realizar a modelagem proposta deve-se construir uma árvore de eventos bivariada, que considera duas incertezas, e que se aproxime, no limite, de um MRM. Apesar de não ser tão simples como a árvore de eventos binomiais, já é possível encontrar na literatura aproximações para o caso proposto.

Pinto, Brandão e Hahn (2007), desenvolveram uma árvore quadrimomial usando a aproximação para um MRM proposta por Nelson & Ramaswamy (1990), para avaliar a opções de troca de insumos no setor sucroalcooleiro. O trabalho dos segundos autores contemplava uma árvore binomial simples, e os primeiros autores extrapolaram-na para o caso onde há duas variáveis incertas⁴.

Então, baseado na formulação proposta por Pinto, Brandão e Hahn (2007), pode ser construída uma árvore de eventos quadrimomial para representar o processo estocástico, em tempo discreto, dos preços dos ativos de conversão, considerando um MRM. O conceito de construção de eventos é similar ao da árvore binomial simples, porém considerando agora quatro possibilidades em cada nó. A **Figura 4.5** mostra de forma simplificada, uma árvore quadrimomial.

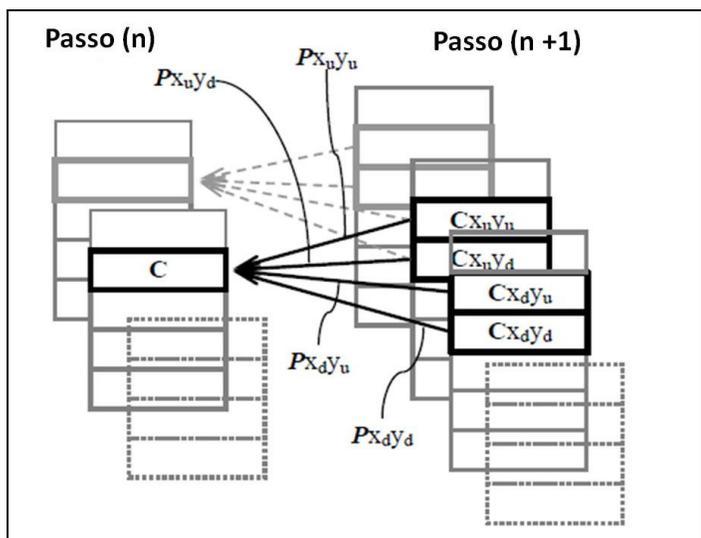


Figura 4.5 – Árvore de Eventos Quadrimomial
Fonte: Pinto, Brandão e Hahn (2007)

4. Ver Hahn & Dyer (2006) para a demonstração da convergência para o MRM

A grande contribuição de Pinto, Brandão e Hahn (2007) foi na determinação das probabilidades neutras ao risco da árvore quadrinomial. Na figura acima, o valor da opção (C) no passo (n) depende de quatro nós subsequentes no passo ($n + 1$), multiplicado pelas suas respectivas probabilidades de ocorrência.

Considerando duas variáveis, x e y , que representam os preços das *commodities* substitutas, tal que $X(t) = \log(x(t))$, $Y(t) = \log(y(t))$, e que seguem diferentes processos estocásticos de reversão à média tem-se (equações (27) e (28)):

$$dX = \eta(\bar{X} - X)dt + \sigma dZ \quad (27)$$

$$dY = \eta(\bar{Y} - Y)dt + \sigma dZ \quad (28)$$

Onde:

$$\Delta X = \sigma_x \sqrt{\Delta t} \quad (29)$$

$$\Delta Y = \sigma_y \sqrt{\Delta t} \quad (30)$$

Para esses processos, Pinto, Brandão e Hahn (2007) estabeleceram as seguintes probabilidades:

$$P_{x_u y_u} = (\Delta X \Delta Y + \Delta Y v_x \Delta t + \Delta X v_y \Delta t + \rho_{xy} v_x v_y \Delta t) / 4 \Delta X \Delta Y \quad (31)$$

$$P_{x_u y_d} = (\Delta X \Delta Y + \Delta Y v_x \Delta t - \Delta X v_y \Delta t - \rho_{xy} v_x v_y \Delta t) / 4 \Delta X \Delta Y \quad (32)$$

$$P_{x_d y_u} = (\Delta X \Delta Y - \Delta Y v_x \Delta t + \Delta X v_y \Delta t - \rho_{xy} v_x v_y \Delta t) / 4 \Delta X \Delta Y \quad (33)$$

$$P_{x_d y_d} = (\Delta X \Delta Y - \Delta Y v_x \Delta t - \Delta X v_y \Delta t + \rho_{xy} v_x v_y \Delta t) / 4 \Delta X \Delta Y \quad (34)$$

Onde, $P_{x_u y_u} + P_{x_u y_d} + P_{x_d y_u} + P_{x_d y_d} = 1$.

Estas probabilidades são dependentes do parâmetro de tendência de preço de cada *commodity* (x ou y) e sua correlação (ρ_{xy}). Esses parâmetros são dados pelas seguintes equações:

$$v_x = \eta_x (\bar{X} - X_t) - 1/2 \sigma_x^2 \quad (35)$$

$$v_y = \eta_y (\bar{Y} - Y_t) - 1/2 \sigma_y^2 \quad (36)$$

Estes desenvolvimentos serão úteis no capítulo 5, onde será realizada a aplicação para o objeto de estudo da pesquisa.

4.6 Modelo de Análise Econômica

Como indicado no início do capítulo, o resultado da modelagem matemática é apresentada na forma de uma EDP derivada do processo estocástico pelo qual às variáveis do projeto evoluem. Uma solução em tempo contínuo do problema de investimento analisado.

Definido o modelo de opções a ser usado, com seus elementos componentes, busca-se uma EDP, que representa o modelo de análise econômica para o caso em estudo. Encontrada a EDP, é necessário inserir as condições de ótimo e os contornos econômicos do projeto.

4.6.1 Característica da Opção de Investir

Ao valorar uma opção de troca de insumos é possível obter o valor da alternativa de investimento com flexibilidade, isto é, o valor da flexibilidade proporcionada por combustíveis alternativos, mais especificamente, tecnologias de motor flexíveis.

Fluxos de caixa futuros são incertos por natureza. Isto se deve as condições de risco e incerteza pelos quais as variáveis geradoras desses fluxos de caixa estão sujeitas. Sendo assim, para modelar o valor da alternativa de investimento com flexibilidade torna-se necessário primeiramente estabelecer o processo estocástico que modela a evolução da variável incerta que mais impactam os fluxos de caixa esperados para o projeto.

As razões para a escolha desse modelo remetem ao fato de que ele satisfaz a seguinte condição (a qual parece razoável): se o preço de uma unidade do combustível reverte para algum valor médio, então o preço de duas unidades reverte para duas vezes esse mesmo valor médio.

Sendo assim, será considerado um processo estocástico de reversão à média. Este pode ser modelado a partir da equação (28).

$$dY_t = \eta(\bar{Y} - Y_t)dt + \sigma dz_t \quad (28)$$

Estabelecido o processo estocástico, procede-se com a formulação do problema de investimento. Genericamente, a fim de se avaliar a flexibilidade embutida em projetos com combustíveis alternativos, é introduzido, nesse ponto, uma função que representa os fluxos de caixa futuros esperados quando se está em operação com a tecnologia em análise. A equação (37) representa esses fluxos de caixa no tempo.

$$FC_t = H_j(1 + \theta_j)^t + P_{ij}B_j \quad (37)$$

Na equação, H_j representa os custos de manutenção do veículo quando operando com o energético j , θ_j a taxa de crescimento dos custos de manutenção quando operando com o

energético j . P_{jt} é o preço do energético j no intervalo de tempo t e B_j uma constante relacionada ao consumo específico do energético j .

Da análise pelo método do FCD tradicional resulta a equação (38).

$$VP_j = \sum_{i=1}^n \left(\frac{FC_i}{(1+r)^i} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{H_j(1+\theta_j)^i + P_{ij}B_j}{(1+r)^i} \right) \quad (38)$$

Ao inserir o processo estocástico da variável preço dos combustíveis na equação do VP, surge a necessidade de uma diferenciação parcial, pois apenas a variável preço muda com o passar do tempo.

Assim, ao inserir o processo de Itô, obtém-se a equação que representa o valor da opção embutida no projeto. Mas é necessário, ainda, criar um portfólio livre de risco, a fim de descontar os fluxos de caixa a uma taxa livre de risco apropriada. A equação (39) introduz o processo de Itô e a equação (40) monta o portfólio livre de risco, onde F é a função valor da opção $F(VP_j, t)$.

$$dVP_j = \frac{\partial VP_j}{\partial t} dt + \frac{\partial VP_j}{\partial P_j} dP_j + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 VP_j}{\partial P_j^2} (dP_j)^2 \quad (39)$$

$$\phi = F + nVP_j \quad (40)$$

Para a solução da equação (40) é necessário inserir as condições de contorno do problema. Pode-se verificar três condições:

- 1) para $P_j = 0$, $F(0, t) = 0$;
- 2) para $t = T$ (maturação da opção), $F(P_j, T) = \text{MÁX}(VP_j - I_j, 0)$;
- 3) para $P = P^*$ (onde P^* é o limite em que o investimento imediato é ótimo), $F(P^*, t) = VP_j^* - I_j$.

Esta equação pode ser resolvida usando métodos numéricos ou uma aproximação analítica. Pode-se usar a aproximação analítica proposta por Barone-Adesi & Whaley (1987), pois a avaliação por opções reais esta considerando uma opção do tipo americana.

De posse da equação que determina o valor da opção de troca de insumos, caminha-se no sentido da obtenção de uma regra de decisão ótima, ou seja, qual é o momento ideal para a realização do investimento. Para tanto, é necessário utilizar técnicas de otimização dinâmica sob incerteza.

4.6.2 Modelando a Opção de Troca de Insumo

Um dos elementos a ser definido nesta estrutura de aplicação de um modelo de opções reais é a opção mais relevante, ou a interação de múltiplas opções. Esta pesquisa busca avaliar

a opção de troca de insumo, considerada a mais relevante, pois representa com clareza a flexibilidade presente na alternativa de investimento analisada.

A habilidade de trocar o uso fornece valor adicional a um projeto, como um mecanismo de “*hedge*” à riscos, no caso do valor de outra tecnologia ou projeto tornar-se mais econômico no futuro, sujeito a um custo de troca (MUN, 2002).

Há a possibilidade de que o valor do segundo ativo ultrapasse o do primeiro ativo. Assim, devido ao coeficiente de correlação negativa, a capacidade de trocar para o segundo ativo fornece um efeito de diversificação de risco para o primeiro ativo, tornando a flexibilidade de troca valiosa.

Uma correlação positiva fornece menos diversificação ao risco e conseqüentemente reduz o valor da opção de troca. A capacidade de trocar o uso é importante se ambos os ativos se movem inversamente um em relação ao outro. Isto é, quando o valor do ativo existente decresce, o detentor da opção trocará o uso para o segundo ativo que teve um acréscimo no seu valor, isto devido à correlação negativa (MUN, 2002).

Se o valor das opções é incluído, a decisão ótima, dado o ambiente tecnológico incerto de hoje, pode tornar o veículo flexível extremamente valioso no futuro.

4.6.3 Saídas do Modelo

O resultado da modelagem gera o valor da alternativa de investimento com flexibilidade, ou seja, considerando a opção de troca de insumos, e a regra de decisão ótima. Este regra de decisão diz qual o momento ótimo onde a troca do combustível de operação de determinada tecnologia minimiza os custos com o combustível.

Graficamente, estes resultados podem ser representados conforme a **Figura 4.6**. Este gráfico representa, em três eixos, as três variáveis mais importantes para a tomada de decisão de investimentos em tecnologias flexíveis. Mais especificamente, este gráfico busca mostrar as coordenadas da superfície de resposta que pode ser obtida através da modelagem matemática contínua.

O eixo x representa a variável tempo (t), o eixo y o valor da alternativa de investimento com flexibilidade, ou o valor da opção. No eixo z têm-se a variável volatilidade. Através da correta modelagem matemática de tempo contínuo, é possível representar através de uma superfície plana as interações entre estas variáveis.

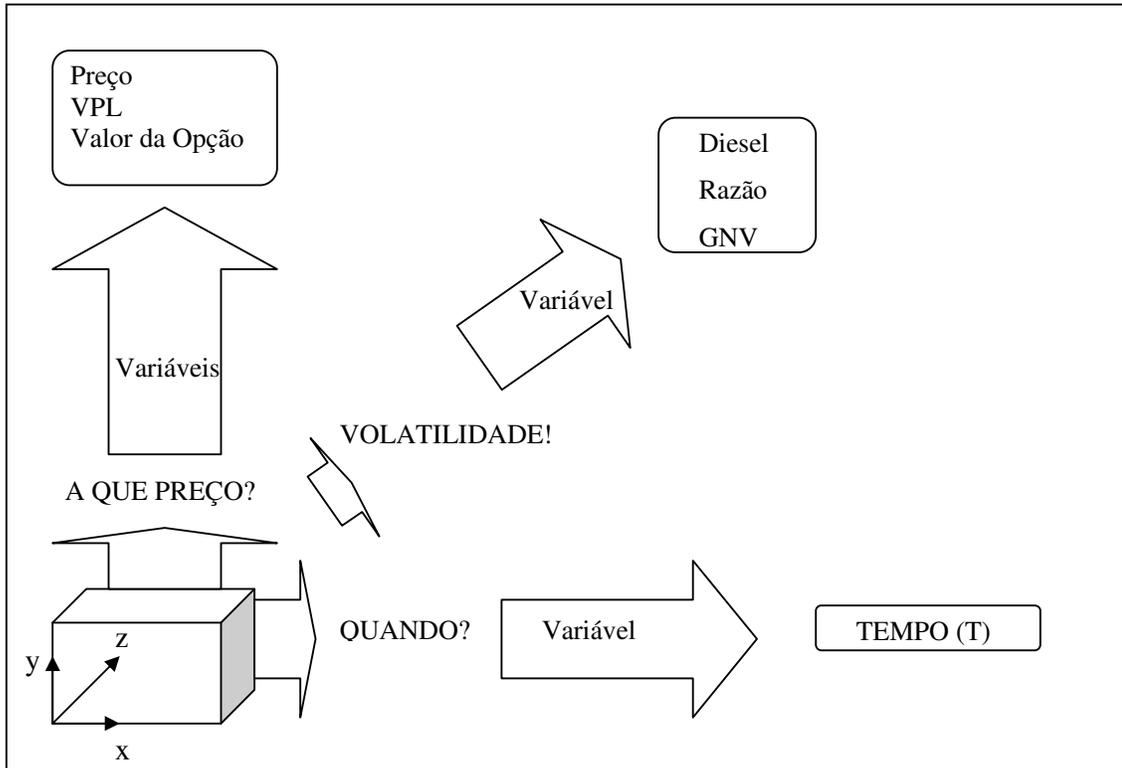


Figura 4.6 – Superfície de Resposta

4.7 Considerações Finais

A ROA adiciona valor para projetos com incerteza, mas quando a incerteza se resolve através da passagem do tempo, velhas hipóteses e previsões tornam-se fatos históricos. Conseqüentemente, os modelos existentes devem ser atualizados para refletir novos fatos e dados. Este aperfeiçoamento e monitoramento contínuo são vitais para uma clara, precisa e definitiva tomada de decisão ao longo do tempo (MUN, 2002).

Como salientado por Mun (2002), com a resolução das incertezas, surgem novos fatos, dados e condições de negócios, tornando-se necessário a atualização dos modelos existentes.

Assim, resta agora a aplicação da teoria a fim de corroborar o que foi exposto até aqui. Isso será realizado no próximo capítulo, onde a aplicação é realizada para a decisão de investimento em um ônibus que pode operar tanto com o combustível diesel como com GNV.

Capítulo 5

5 TOMADA DE DECISÃO DE INVESTIMENTO EM TECNOLOGIAS FLEXÍVEIS: O VALOR DA FLEXIBILIDADE PROPORCIONADA POR COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo busca realizar uma avaliação econômica e financeira, considerando a incerteza e o risco na tomada de decisão. Para tanto, será realizada a avaliação de um projeto de aquisição de um ônibus considerando combustíveis alternativos. O veículo pode operar tanto com óleo diesel como com GNV.

O que se busca através da ROA é capturar o valor da flexibilidade proporcionada pela opção de trocar o combustível de operação do veículo. Esta opção pode ocorrer de duas formas, ou através da conversão do motor diesel para utilização do GNV, ou através do veículo com tecnologia de motor *flex*, ou seja, vem de fábrica pronto para operar com os dois combustíveis.

Para avaliar o investimento através da ROA, será aplicado o modelo binomial, considerando um MBG. Primeiramente são estabelecidas as premissas do modelo, e realizada a análise do caso base, através do método do FCD.

Após a determinação do FCD é feita uma abordagem sobre as incertezas que mais impactam o valor do projeto e sua flexibilidade. Assim, é mostrado como tratar as incertezas no projeto e estabelecer a volatilidade da variável incerta, que será usada na ROA.

Por fim, é realizada a ROA propriamente dita. Nesse ponto, primeiramente será explanado sobre as opções estratégicas do projeto, seguindo com sua avaliação. Ao final, apresenta-se uma análise de sensibilidade do valor da opção em relação ao investimento inicial, relação de preços entre os energéticos, custos de conversão e volatilidade.

5.2 Premissas do Modelo

A primeira decisão que o detentor de capital deve tomar antes de realizar uma avaliação de investimento é qual projeto, ativo, iniciativas ou estratégias são viáveis de serem analisadas, considerando a missão, visão, metas ou estratégia global do negócio.

Este capítulo propõe realizar uma avaliação de investimento através do método de opções reais para auxiliar um hipotético proprietário de uma frota de ônibus a decidir

converter veículos monocombustíveis para bicomcombustíveis. Os primeiros são movidos a óleo diesel apenas, e os segundos, podem operar tanto com óleo diesel quanto com GNV.

Por todo o capítulo, será usada a seguinte convenção: o veículo monocombustível será considerado como a tecnologia de motor sem flexibilidade; e o veículo bicomcombustível será considerado como a tecnologia de motor com flexibilidade, ou motor *flex*.

Como observado até o momento, esta escolha deve estar pautada na missão, visão, objetivos ou estratégia global do negócio. Sendo assim, considerando este tomador de decisão hipotético, sua decisão deve guiar o negócio segundo sua estratégia de penetração no mercado, vantagens competitivas, questões técnicas, de crescimento, sinergias e de globalização.

A avaliação financeira é realizada através da utilização de métodos de valoração de ativos, ou seja, através da ROA. E a avaliação econômica, através da compreensão das características do projeto e suas interfaces com o ambiente econômico.

Em relação às preferências e expectativas dos investidores, assume-se que os investidores preferem mais a menos (maximização de riqueza ou minimização de custos), e que todos concordam com o valor da volatilidade (σ). Esta premissa está de acordo com o conceito econômico mais geral de expectativas racionais.

5.3 Fluxo de Caixa Descontado do Projeto

Considera-se como oportunidade de investimento para avaliação, a alternativa para a aquisição de um ônibus movido por combustíveis alternativos. O Anexo 1 trás os dados relevantes à alternativa de investimento analisada, de acordo com Pamplona e Avila (2006), usados na análise determinística.

A alternativa se refere à aquisição de um ônibus VW 17.260E OT com motor movido a óleo diesel. Porém, essa alternativa oferece uma flexibilidade operacional porque pode ser adaptada para operar com GNV, ou seja, realizada uma conversão. Os dados referentes aos ônibus foram coletados através de pesquisa realizada na Volkswagen Caminhões e Ônibus (Resende - RJ), em 2005.

5.3.1 Opções Estratégicas do Projeto

Analisando a alternativa de investimento em questão, verifica-se a presença da opção de troca de insumos. Desta forma, o tomador de decisão defronta-se com a seguinte escolha:

- (i) Pode investir na aquisição de um ônibus movido por combustível diesel e operar assim até a sua renovação.

- (ii) Ou pode adquirir esse mesmo ônibus, nesse caso pagando um prêmio pela alternativa, mas com a opção de converter o veículo para a utilização do GNV, ou seja, para ter o direito de trocar o combustível de operação do veículo em condições favoráveis.

Para poder adaptar o veículo, e utilizar o GNV, é necessário desembolsar um valor representado pelo custo de troca, na data de exercício da opção. Em analogia com opções financeiras, esse valor pode ser considerado como o preço de exercício da opção.

Neste caso, têm-se:

- Uma opção de venda do tipo americana, pois se considera hipoteticamente a venda do ativo referente ao motor diesel, e a opção pode ser exercida a qualquer momento;
- E uma opção de compra do tipo americana, pois, ao fazer a conversão do veículo, se considera a compra do ativo referente ao motor GNV, e a opção pode ser exercida a qualquer momento.

Então, o objetivo do modelo de decisão proposto é auxiliar os tomadores de decisão a decidir entre: investir em um veículo que utiliza uma tecnologia de motor sem flexibilidade, podendo funcionar somente com combustível diesel; ou investir em um veículo que utiliza uma tecnologia de motor com flexibilidade, que pode ser convertido para utilizar tanto o combustível diesel quanto o GNV, permitindo a troca entre os combustíveis alternativos.

O modelo é capaz de sugerir também quando será melhor continuar usando o combustível corrente e qual é o melhor momento para efetuar a troca entre os combustíveis, avaliando o ponto onde os custos do combustível corrente superam os custos do combustível alternativo.

As diferenças relevantes entre as tecnologias de motor para combustível diesel e GNV são as seguintes:

- a) Devido a possibilidade de conversão, a tecnologia flexível, capaz de utilizar tanto o GNV quanto o diesel, custa mais que a tecnologia diesel no momento do investimento inicial ($I_{\text{GNV/DIESEL}} > I_{\text{DIESEL}}$). Em relação aos custos de troca, só há desembolso de capital quando feita a conversão do diesel para o GNV ($C_{\text{DIESEL} \rightarrow \text{GNV/DIESEL}}$). Após a conversão, não há custos de troca para operar com diesel ($C_{\text{GNV/DIESEL} \rightarrow \text{DIESEL}} = 0$);
- b) A tecnologia GNV é mais econômica e menos poluente do que a tecnologia diesel, porém sua utilização depende do nível de preços dos combustíveis.

5.3.2 Variáveis do Projeto

Seguindo a estrutura proposta por Dias (1996), o segundo elemento do modelo de opções reais necessita que se identifiquem as variáveis estocásticas e de estado. Como

variável estocástica mais importante tem-se a diferença de preço entre o combustível diesel e o combustível GNV. Como variáveis de estado têm-se: o tempo de renovação da frota; o preço de exercício da opção, ou seja, o custo para a conversão do veículo; e os rendimentos quando se está utilizando diesel ou GNV. A **Tabela 5.1** mostra a representação matemática das variáveis, bem como a função matemática do modelo, representada pelo valor da opção de investimento e a regra de decisão ótima.

Tipo de Variável	Descrição	Representação Matemática
Variável Estocástica	Preço Combustível Diesel	X1
Variável Estocástica	Preço Combustível GNV	X2
Variável Estocástica Derivada	Diferença de preço entre os combustíveis substitutos	$\theta = 1 - (P_{GNV}/P_{DIE})$
Variável de Estado (ou custo de troca)	Preço de Exercício da Opção	X3
Variável de Estado	Tempo de Renovação da Frota	X4
Variável de Estado (condições operacionais)	Rendimento Motor GNV	X5
Variável de Estado	Correlação	ρ
Função Matemática: $F(Y1, Y2) = f(X1, X2, X3, X4, X5)$ $Y1 \Rightarrow \text{Valor da Opção de Investimento (VPL}_{EXPANDIDO})$ $Y2 \Rightarrow \text{Regra de Decisão Ótima (P*)}$		

Tabela 5.1 – Variáveis do Projeto

As variáveis estocásticas consideradas são representadas pelos preços do combustível diesel (P_{DIESEL}) e do combustível GNV (P_{GNV}). Cada variável tem sua volatilidade particular, porém há correlação entre elas. Mais adiante será abordada a questão das incertezas relacionadas ao projeto, onde será apresentada a volatilidade de cada variável e sua correlação.

5.3.3 Parâmetros de Entrada

Para realizar a análise determinística do projeto, alguns parâmetros de entrada devem ser conhecidos. Para tanto, consideram-se dois fluxos de caixa determinísticos, para um intervalo de tempo de cinco anos, com períodos anuais. O primeiro avalia os custos fixos e os custos variáveis de operação do ônibus, em função do preço do combustível, utilizando o combustível diesel. O segundo FC avalia os mesmos custos, também em função do preço do combustível, agora utilizando o combustível GNV.

Para determinação do valor da alternativa de investimento sem flexibilidade, é necessário conhecer os fluxos de caixa futuros previstos para o projeto. A equação (37)

representa o FC futuro previsto para a alternativa de investimento na data i . O índice j representa o combustível que está sendo usado, ou seja, ou o diesel ($j = 1$) ou o GNV ($j = 2$).

$$FC_i = H_j(1 + \theta_j)^i + P_{ij}B_j \quad (37)$$

Onde,

$FC_{jt} \equiv$ Fluxo _de_ Caixa _ Alternativa _ j _ na _ Data _ t ;

$H_j \equiv$ Custos _de_ Manutenção ;

$\theta_j \equiv$ Incremento _nos_ Custos _de_ Manutenção ;

$B_j \equiv$ Custos _Re ferente_ Consumo _ Combustível ;

$P_{ij} \equiv$ Preço _do_ combustível _j _ na _ data _ t.

Ainda, para determinar o $VPL_{\text{TRADICIONAL}}$ da alternativa sem flexibilidade, alguns parâmetros precisam ser fixados. A **Tabela 5.2** apresenta os valores dos parâmetros que serão usados para o cálculo do $VPL_{\text{TRADICIONAL}}$. Mais adiante será mostrado como foram encontrados os valores para a volatilidade dos preços dos combustíveis.

	Combustível Diesel	Combustível GNV
Custos Manutenção (H)	R\$ 31.910,00	R\$ 33.090,00
Taxa Crescimento de H (θ)	5%	7%
Consumo Específico (B)	30.000 litros	35.088 m ³
Preço Corrente (P)	R\$ 2,00	R\$ 1,70
Volatilidade (σ)	15%	35%
Correlação (ρ)	0,5	0,5
Investimento não flex (I_{DIESEL})	R\$ 200.000,00	----
Investimento flex ($I_{\text{GNV/DIESEL}}$)		R\$ 250.000,00
Taxa Livre de Risco (r_f)	8%	8%
Taxa Mínima de Atratividade (r)	15%	15%

Tabela 5.2 – Parâmetros de Entrada do Modelo

Os valores referentes à H, B e I_{DIESEL} se encontram no Anexo 1. Os valores de P foram estabelecidos de acordos com os preços praticados no mercado. A taxa livre de risco considerado se refere à taxa de juros dos títulos de dívida do governo do Brasil, mais especificamente a taxa Selic de 12% a.a. Descontado o índice de inflação de 4% a.a., têm-se a taxa livre de risco de 8% a.a.

Para calcular o $VPL_{\text{TRADICIONAL}}$ das alternativas, foi usada uma TMA (Taxa Mínima de Atratividade) estimada com base nas taxas praticadas por empresas do setor. Assim, inserindo os valores da **Tabela 5.2** na equação (38), reproduzida novamente aqui, resulta no $VP_{(\text{DIESEL})}$ e no $VP_{(\text{GNV/DIESEL})}$.

$$VP_j = \sum_{i=1}^n \left(\frac{FC_i}{(1+r)^i} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{H_j(1+\theta_j)^i + P_{ij}B_j}{(1+r)^i} \right) \quad (38)$$

Daí, o $VPL_{\text{TRADICIONAL(DIESEL)}} = I_{\text{DIESEL}} + VP_{\text{(DIESEL)}} = - \text{R\$ } 523.579,34$ e $VPL_{\text{TRADICIONAL(GNV/DIESEL)}} = I_{\text{GNV/DIESEL}} + VP_{\text{(GNV/DIESEL)}} = - \text{R\$ } 583.916,18$. Assim, observa-se que quando não há flexibilidade, é mais interessante à aquisição de um veículo movido a diesel, pois o $VPL_{\text{TRADICIONAL(DIESEL)}} > VPL_{\text{TRADICIONAL(GNV/DIESEL)}}$.

5.4 Tratamento das Incertezas

O modelo de FCD apresentado é impactado pelas incertezas que rondam o projeto de investimento. Portanto, é necessário conhecer estas incertezas e analisar suas características, além de entender como impactam o valor do projeto.

Esta seção trata do assunto, e também estabelece o valor da volatilidade que será utilizada na ROA mais adiante. A volatilidade usada no modelo de opções reais será referente aos preços dos combustíveis alternativos, ou seja, o diesel e o GNV.

5.4.1 Incerteza sobre os Custos de Manutenção

O desgaste por uso, as grandes variações tecnológicas e muitas vezes razões técnicas, exigem que os veículos tenham que ser substituídos após um período de operação. Estas substituições de veículos devem ser efetuadas com base em critérios técnicos, econômicos e financeiros.

Equipamentos sujeitos às grandes e rápidas mudanças tecnológicas, cujos exemplos clássicos são os aparelhos eletrônicos e computadores, são muitas vezes substituídos por outros tecnologicamente mais modernos. Já veículos que sofrem intenso desgaste, devem ser substituídos no momento em que os custos de manutenção se tornam muito elevados.

O ponto de renovação pode ser encontrado na intercessão da curva decrescente dos custos de capital com a curva crescente dos custos de manutenção e conservação. Como existe um decréscimo na quilometragem média anual, deve-se acrescentar a estes custos a parcela de custos de operação fixos afetados por este decréscimo (MARQUES, 2004).

De uma forma geral, os custos envolvidos na administração de veículos podem ser classificados em dois tipos básicos: diretos e indiretos. Os custos diretos ainda podem ser divididos em custos fixos, ou seja, aqueles que independem da realização de trabalho pelo veículo ou equipamento, e os custos variáveis, que estão vinculados à realização de trabalho pelo veículo.

Os custos diretos fixos de conservação e manutenção estão ligados aos custos de capital das máquinas e equipamentos de conservação, ferramentas e construção civil, e custos de manutenção de estoques de peças e componentes. A parcela de custos operacionais diretos fixos é determinada pelo custo com motoristas, ajudantes se houver, e todos os encargos sociais relevantes como também benefícios e outros custos ligados à mão de obra direta.

Como custos diretos variáveis de conservação e manutenção têm-se: custos de materiais e mão de obra de manutenção e conservação, despesas gerais e custos associados à lavagem e lubrificação. Os custos diretos variáveis de operação são relativos a combustíveis, lubrificantes e no caso de veículos, o custo com pneus, câmaras de ar, protetores e recapagens.

Os custos indiretos ou administrativos são necessários para manter o sistema de transporte da empresa. Estes custos podem ser entendidos como referentes ao pessoal de armazéns, escritórios e respectivos encargos sociais, impressos, publicidade, comunicações, impostos, taxas legais, viagens e despesas diversas, por exemplo.

Segundo Marques (2004), quanto mais freqüentemente o veículo para de operar e entra na oficina, mais freqüentemente deixa de produzir receita e permite que os custos de operação fixos sejam consumidos sem proveito. Com o passar dos anos e com o envelhecimento do equipamento as paradas são mais freqüentes e mais longas, resultando em um nível de produção mais baixo.

Um dado imprescindível para a boa apropriação dos custos esta relacionada com a quilometragem percorrida diariamente ou o tempo total gasto em operação. Muitas vezes, no serviço urbano, é mais importante o tempo gasto em operação do que a quilometragem total percorrida em um dia de serviço, que muitas vezes pode parecer irrelevante (MARQUES, 2004).

5.4.2 Incerteza nos Custos e Aprendizado

No caso em análise, há dois tipos de incerteza em relação aos custos. A primeira é a incerteza técnica, relacionada à dificuldade física de operar a frota com o combustível alternativo. Esta, somente pode ser resolvida se o projeto for realizado, ou seja, o veículo estiver operando com o GNV.

Por ainda ser uma tecnologia em relativo processo de desenvolvimento, os custos com manutenção e rendimento do combustível no motor GNV podem ser maiores ou menores do que foi planejado.

O segundo tipo de incerteza está relacionado com o custo do combustível de operação, e que é externo ao que a empresa faz. Este está relacionado à flutuação imprevisível do preço

de mercado dos combustíveis diesel e GNV, ou quando mudanças imprevisíveis na regulação governamental afetam os preços dos combustíveis. Preços e questões regulatórias mudam sem considerar se a empresa investiu ou não, e são mais incertos quanto maior o horizonte de planejamento.

Tanto a incerteza técnica quanto a incerteza em relação aos preços dos combustíveis aumentam o valor de uma oportunidade de investimento, pela mesma razão que a incerteza nos FC futuros para o projeto aumenta – o retorno líquido do investimento é uma função convexa do custo do investimento.

Entretanto, estes dois tipos de incerteza afetam a decisão de investimento de maneiras diferentes. A incerteza técnica torna o investimento mais atrativo. Por exemplo, um projeto pode ter um custo esperado que resulta em um VPL negativo, mas ainda assim pode ser econômico começar a investir. A razão disso é que o investimento revela informações sobre os custos, criando a possibilidade de que sejam reduzidos com novos desenvolvimentos.

Contrariamente, incertezas em relação aos custos dos insumos tornam o investimento menos atrativo de se investir agora. Por exemplo, um projeto com um $VPL_{TRADICIONAL}$ positivo pode se tornar inviável se o custo do insumo aumenta, tendo o investimento sido realizado ou não. Conseqüentemente, há valor em esperar por novas informações antes de comprometer recursos.

Assim, por apresentarem diferentes efeitos no investimento, tanto a incerteza técnica quanto a incerteza dos insumos devem ser incorporadas na análise.

5.4.3 Economias de Escala versus Flexibilidade

Quando o nível de preços é incerto, há uma compensação (ou *tradeoff*) entre economia de escala e a flexibilidade ganha através de investimentos freqüentes na renovação parcial da frota, enquanto as condições forem favoráveis (DIXIT & PINDYCK, 1994).

A renovação com veículos flexíveis incorre num custo maior para o frotista, mas esse investimento possui a opção de troca de insumo, e essa opção possui valor.

Embora o desembolso de capital do veículo diesel seja menor por causa da sua escala, e seu custo operacional seja menor no nível corrente de preços, após a conversão, a possibilidade de poder optar pelo combustível de operação (diesel ou GNV) dá mais flexibilidade ao frotista. A opção de trocar o combustível cria a oportunidade de operar a frota buscando minimizar os custos de operação. Na tecnologia sem flexibilidade não há oportunidade.

O indicador do mínimo custo é a relação de preços entre os combustíveis. Este indicador é representado pela regra de decisão ou preço de gatilho do combustível, a qual guia para o exercício ótimo da opção.

5.4.4 Incerteza sobre as Taxas de Juros

Segundo Dixit & Pindyck (1994), uma taxa de desconto incerta pode ter dois efeitos na decisão de investimento. Primeiro, é que a flutuação imprevisível na taxa de desconto pode aumentar o valor esperado dos FC futuros do investimento. Assim, com o $VPL_{EXPANDIDO}$ maior que o $VPL_{TRADICIONAL}$, o investimento torna-se mais atrativo, e isso aumenta o incentivo a investir.

Entretanto, a incerteza sobre o futuro da taxa de desconto pode guiar ainda para o adiamento da decisão de investir. A razão é que o segundo efeito da taxa de desconto incerta cria valor por se ter a opção de esperar e ver se a taxa aumenta ou diminui.

Sendo assim, a incerteza sobre a taxa de desconto futura aumenta o valor esperado do projeto. Mas essa incerteza afeta o valor do projeto de outra forma. Ou seja, a volatilidade da taxa de desconto aumenta o valor esperado do projeto, mas também cria o incentivo de esperar por novas informações.

Uma implicação importante é que, se o objetivo de uma política pública é estimular os investimentos, a estabilidade da taxa de desconto pode ser mais importante do que o nível da referida taxa.

5.4.5 Cálculo da Volatilidade

As abordagens mais amplamente usadas para calcular a volatilidade de um projeto, parâmetro de entrada importante em uma ROA, são as abordagens do retorno logarítmico dos FC futuros estimados para o projeto, e através da SMC.

Como estamos tratando de custos, ou seja, com FC negativos, não é possível utilizar a primeira abordagem. Isso porque não há logaritmo de um número negativo, e como abordado anteriormente, considera-se uma distribuição log-normal dos preços dos combustíveis. A distribuição log-normal é necessária, pois não valores de preços negativos.

Assim, optou-se pela SMC para estimar a volatilidade do projeto em análise. Foram calculados dois valores de volatilidade, um para cada FC. Ou seja, a volatilidade do projeto quando se está usando o combustível diesel e a volatilidade quando se está usando o GNV.

No caso do GNV, como já abordado, foi considerada a incerteza técnica, através da variação da taxa de crescimento dos custos de manutenção, e a incerteza quanto aos insumos,

através da variação do preço do combustível GNV (P_{GNV}). No caso do diesel, por considerar que é uma tecnologia dominada, apenas foi considerada a incerteza em relação ao preço do insumo diesel, ou seja, através da variação do preço do combustível diesel (P_{DIESEL}).

Como resultados da SMC, têm-se que a volatilidade do projeto, quando se está usando o combustível diesel é de 15% ($\sigma_{DIESEL} = 15\%$). Para a operação com GNV, a volatilidade estimada é de 35% ($\sigma_{GNV} = 35\%$).

5.5 Análise de Opções Reais

Aqui é apresentada a ROA do caso proposto. Inicialmente têm-se a visualização do valor da opção através de um modelo matemático contínuo. Na seqüência têm-se a solução através do modelo binomial, considerando um MBG. Isso é feito através da árvore de nós binomiais, que representa a variação dos preços dos combustíveis.

5.5.1 Visualização do Valor da Opção

Certamente, soluções matemáticas contínuas têm os cálculos computacionais muito mais fáceis se comparados com árvores de nós binomiais. Entretanto é mais difícil de explicar a exata natureza de uma equação de cálculo estocástico cheia de suposições matemáticas, do que seria explicar um modelo binomial que se ramifica para cima e para baixo (MUN, 2002).

Nós binomiais, em contraste, são fáceis de implementar e fáceis de explicar. Eles são também altamente flexíveis, mas requerem significativo poder computacional, e também vários passos para obter boas aproximações.

É importante notar, entretanto, que no limite, os resultados obtidos através do uso do modelo binomial tende a aproximar aqueles derivados de soluções contínuas, e conseqüentemente, é sempre recomendável que ambas as abordagens sejam usadas para verificar os resultados.

Como já foi abordado anteriormente, a estrutura matemática subjacente de ambas as abordagens é idêntica. Isto é, modelos de forma fechada são derivados através de cálculos diferenciais estocásticos para obter os resultados de um processo de simulação contínua. Em retrospecto, o modelo binomial aproxima este processo contínuo através da criação de uma simulação discreta. Conseqüentemente, quando o número de passos em uma árvore de nós binomiais se aproxima do infinito, tal que o tempo entre os passos em cada nó se aproxima de zero, a simulação discreta dos nós torna-se uma simulação contínua, então, os resultados são idênticos (MUN, 2002).

Segundo Khansa & Liginlal (2007), na maioria das modelagens acadêmicas, utilizam-se modelos de tempo contínuo que são complexos até mesmo para solução computacional, especialmente quando o objetivo final é avaliar opções compostas, tal como as opções de troca. No entanto, pode-se “discretizar” o modelo contínuo, replicando-o por um modelo de nós simples que são de fácil entendimento, requerem somente conhecimentos matemáticos básicos, e aproximam o modelo contínuo muito bem. Isso pode ser feito através da escolha de um grande número de passos e pode ser muito seguro e útil no auxílio à tomada de decisão gerencial.

5.5.2 Modelo Binomial

Para a aplicação prática do Modelo Binomial, considera-se a decisão referente a aquisição de um ônibus movido por combustíveis alternativos. O veículo pode operar com dois tipos de combustíveis, através de duas tecnologias diferentes; com a tecnologia de motor sem flexibilidade, o veículo opera com combustível diesel ou com combustível GNV sem a possibilidade de intercambialidade entre os insumos. Com a tecnologia de motor com flexibilidade, pode operar com combustível GNV ou com combustível diesel, permitindo a intercambialidade entre os combustíveis, através da conversão do motor diesel para utilização do GNV.

É importante ficar claro que a tecnologia sem flexibilidade (I_{DIESEL}) custa menos do que a tecnologia com flexibilidade ($I_{\text{GNV/DIESEL}}$). E que a flexibilidade só é conseguida com a conversão do veículo flexível, realizada após o desembolso do custo de troca ($C_{\text{DIESEL} \rightarrow \text{GNV}}$).

Novamente, foram considerados dois fluxos de caixa determinísticos, para um intervalo de tempo de cinco anos, com períodos anuais. O primeiro avalia os custos fixos e os custos variáveis de operação do ônibus, em função do preço do combustível, utilizando o combustível diesel. O segundo FC avalia os mesmos custos, também em função do preço do combustível, agora utilizando o combustível GNV.

A **Tabela 5.3** mostra a estimativa dos movimentos ascendentes (u) e descendentes (d) para os preços do combustível diesel (P_{DIESEL}) e do combustível GNV (P_{GNV}), e seus correspondentes fluxos de caixa (FC_{DIESEL} e FC_{GNV}) considerando os custos operacionais referentes às alternativas.

Árvore Binomial para os movimentos ascendentes (u) e descendentes (d) do preço do combustível DIESEL (R\$/litro)					
0	1	2	3	4	5
R\$ 2,00	R\$ 2,32	R\$ 2,70	R\$ 3,14	R\$ 3,64	R\$ 4,23
	R\$ 1,72	R\$ 2,00	R\$ 2,32	R\$ 2,70	R\$ 3,14
		R\$ 1,48	R\$ 1,72	R\$ 2,00	R\$ 2,32
			R\$ 1,28	R\$ 1,48	R\$ 1,72
				R\$ 1,10	R\$ 1,28
					R\$ 0,94
Árvore Binomial dos FC(i) futuros esperados usando o combustível DIESEL (R\$)					
0	1	2	3	4	5
-R\$ 91.910,00	-R\$ 103.215,55	-R\$ 116.172,30	-R\$ 131.038,54	-R\$ 148.113,93	-R\$ 167.746,15
	-R\$ 51.642,48	-R\$ 60.000,00	-R\$ 69.710,05	-R\$ 80.991,53	-R\$ 94.098,73
		-R\$ 44.449,09	-R\$ 51.642,48	-R\$ 60.000,00	-R\$ 69.710,05
			-R\$ 38.257,69	-R\$ 44.449,09	-R\$ 51.642,48
				-R\$ 32.928,70	-R\$ 38.257,69
					-R\$ 28.341,99
Árvore Binomial para os movimentos ascendentes (u) e descendentes (d) do preço do combustível GNV (R\$/metro cúbico)					
0	1	2	3	4	5
R\$ 1,70	R\$ 2,41	R\$ 3,42	R\$ 4,86	R\$ 6,89	R\$ 9,78
	R\$ 1,20	R\$ 1,70	R\$ 2,41	R\$ 3,42	R\$ 4,86
		R\$ 0,84	R\$ 1,20	R\$ 1,70	R\$ 2,41
			R\$ 0,59	R\$ 0,84	R\$ 1,20
				R\$ 0,42	R\$ 0,59
					R\$ 0,30
Árvore dos FC(i) futuros esperados usando o combustível GNV (R\$)					
0	1	2	3	4	5
-R\$ 92.739,60	-R\$ 120.053,11	-R\$ 158.004,28	-R\$ 210.994,42	-R\$ 285.265,30	-R\$ 389.670,18
	-R\$ 42.034,36	-R\$ 59.649,60	-R\$ 84.646,81	-R\$ 120.119,54	-R\$ 170.457,75
		-R\$ 29.621,11	-R\$ 42.034,36	-R\$ 59.649,60	-R\$ 84.646,81
			-R\$ 20.873,65	-R\$ 29.621,11	-R\$ 42.034,36
				-R\$ 14.709,41	-R\$ 20.873,65
					-R\$ 10.365,55

Tabela 5.3 – Árvore Binomial das Alternativas

No desenvolvimento do caso proposto, assume-se um intervalo de tempo correspondente a cinco anos, sendo que cada período corresponde a um ano. Para computar o valor ascendente dos preços dos combustíveis, multiplica-se o seu valor corrente pelo fator ascendente $u = \exp[\sigma\sqrt{\Delta t}]$. O mesmo raciocínio foi usado para computar o valor descendente, sendo esse multiplicado por $d = \exp[-\sigma\sqrt{\Delta t}]$. No cálculo dos movimentos ascendentes e descendentes para os preços dos combustíveis, foram utilizados valores correspondentes a volatilidade (σ_{DIESEL} e σ_{GNV}) de cada um dos ativos subjacentes, representados pelos preços dos combustíveis diesel (P_{DIESEL}) e GNV (P_{GNV}).

Como já mostrado anteriormente, no cálculo da volatilidade dos ativos subjacentes foi utilizada uma SMC com os valores dos fluxos de caixa das alternativas. Para tanto, foi definida uma curva de distribuição log-normal para a distribuição de probabilidade dos valores referentes ao preço do combustível simulado. A simulação forneceu para a

volatilidade do preço do diesel o valor $\sigma_{\text{DIESEL}} = 15\%$, e a volatilidade para o preço do GNV de $\sigma_{\text{GNV}} = 35\%$.

Considerando que a empresa já utiliza a tecnologia de motor movido a diesel, o $VPL_{\text{DIESEL}(i)}$ relacionado a cada nó de decisão é calculado usando uma taxa livre de risco (r_f) e observando uma probabilidade para o movimento ascendente (P_u) e para o movimento descendente (P_d). Para se obter o $VP_{\text{DIESEL}(i)}$ em cada nó para a tecnologia de motor DIESEL, inicia-se no período de tempo 5 e move-se para traz até o período de tempo 0.

Os fluxos de caixa do período de tempo 5 são os mesmos que foram calculados para a tecnologia de motor DIESEL através da variação do preço do combustível, ou seja, o $FC_{\text{DIESEL}(5)}$. Dessa forma, o $VP_{\text{DIESEL}(i)}$ na árvore, em cada nó antes do período 5, é a expectativa do $VP_{\text{DIESEL}(i+1)}$ em dois nós sucessores, descontado para traz por uma taxa ajustada ao risco mais o fluxo de caixa da tecnologia DIESEL ($FC_{\text{DIESEL}(i)}$) daquele período. Para a tecnologia DIESEL, a expressão do $VP_{\text{DIESEL}(i)}$ no período de tempo i , em termos dos $VP_{\text{DIESEL}(i+1)}$ e $FC_{\text{DIESEL}(i)}$ em períodos $(i+1)$ e (i) , respectivamente, é dado pela equação (41).

$$VP_{\text{DIESEL}(i)} = FC_{\text{DIESEL}(i)} + e^{-r_f} [VP_{\text{DIESEL}(i+1)}^{\text{up}} * P_{u(\text{DIESEL})} + VP_{\text{DIESEL}(i+1)}^{\text{down}} * P_{d(\text{DIESEL})}] \quad (41)$$

Agora, no caso da tecnologia de motor GNV/DIESEL, constrói-se a árvore de VP para a alternativa GNV ($VPL_{\text{GNV}(i)}$). Com um ativo livre de risco e a árvore de VP construída para a tecnologia diesel, constrói-se um portfólio replicado que duplica os fluxos de caixa da tecnologia GNV/DIESEL. Pela lei do preço único, o VP da alternativa GNV deve ser aquele do portfólio construído.

Analogamente à construção da árvore para a tecnologia diesel, inicia-se com o último estágio da árvore com o FC final da alternativa GNV ($FC_{\text{GNV}(5)}$), movendo-se para traz por um período de tempo para computar a expectativa neutra em relação ao risco descontada desse valor final, e adicionar no FC corrente. Para a tecnologia GNV/DIESEL, a expressão do $VP_{\text{GNV}(i)}$ no período i , em termos de $VP_{\text{GNV}(i+1)}$ e $FC_{\text{GNV}(i)}$ no período de tempo $i+1$ e i , respectivamente, é dado pela equação (42), onde $P_{\text{nr}}^{\text{up}}$ e $P_{\text{nr}}^{\text{down}}$ são as probabilidades neutras em relação ao risco dos movimentos ascendentes e descendentes, respectivamente, e r_f é a taxa livre de risco.

$$VP_{\text{GNV}(i)} = FC_{\text{GNV}(i)} + e^{-r_f} [VP_{\text{GNV}(i+1)}^{\text{up}} * P_{u(\text{GNV})} + VP_{\text{GNV}(i+1)}^{\text{down}} * P_{d(\text{GNV})}] \quad (42)$$

Subtraindo os investimentos iniciais de I_{DIESEL} e $I_{\text{GNV/DIESEL}}$ para as tecnologias DIESEL e GNV/DIESEL, respectivamente, obtém-se o VPL_{DIESEL} de - R\$ 660.538,29 para a tecnologia DIESEL e o VPL_{GNV} de - R\$ 678.844,24 para a tecnologia GNV, com uma

diferença de - R\$ 18.305,95. Este resultado determina que a tecnologia DIESEL é mais econômica quando as tecnologias são usadas independentemente e sem flexibilidades embutidas. Os valores de VP para a tecnologia DIESEL e GNV/DIESEL estão computados na **Tabela 5.4.**

Árvore Binomial do VP(i) da alternativa DIESEL sem flexibilidade (R\$)					
0	1	2	3	4	5
-R\$ 460.538,29	-R\$ 446.934,45	-R\$ 417.134,65	-R\$ 365.718,32	-R\$ 285.646,91	-R\$ 167.746,15
	-R\$ 259.788,96	-R\$ 241.097,91	-R\$ 209.767,31	-R\$ 162.229,56	-R\$ 94.098,73
		-R\$ 178.609,73	-R\$ 155.399,45	-R\$ 120.182,61	-R\$ 69.710,05
			-R\$ 115.122,74	-R\$ 89.033,47	-R\$ 51.642,48
				-R\$ 65.957,62	-R\$ 38.257,69
					-R\$ 28.341,99
Árvore Binomial do VP(i) da alternativa GNV sem flexibilidade (R\$)					
0	1	2	3	4	5
-R\$ 428.844,24	-R\$ 497.392,44	-R\$ 556.381,19	-R\$ 585.927,71	-R\$ 550.666,73	-R\$ 389.670,18
	-R\$ 211.455,06	-R\$ 239.689,90	-R\$ 254.714,11	-R\$ 240.604,68	-R\$ 170.457,75
		-R\$ 119.026,48	-R\$ 126.487,28	-R\$ 119.480,75	-R\$ 84.646,81
			-R\$ 62.811,73	-R\$ 59.332,38	-R\$ 42.034,36
				-R\$ 29.463,59	-R\$ 20.873,65
					-R\$ 10.365,55

Tabela 5.4 – Árvore do VPL das Alternativas

Na sequência, avalia-se a flexibilidade de troca entre o combustível diesel e o combustível GNV em uma alternativa que utiliza a tecnologia com flexibilidade. Através da tecnologia com flexibilidade, a empresa pode trocar os combustíveis de operação do veículo quando for economicamente viável.

Em cada nó da árvore de decisões, consideram-se duas decisões, que dependem de qual combustível a empresa esta operando, se com diesel ou com GNV. A avaliação destas decisões oferece um plano de execução ótimo. Inicia-se no fim do período de tempo 5 e decide se é mais econômico para a empresa permanecer na tecnologia corrente DIESEL ou trocar para a outra tecnologia (GNV/DIESEL). Assumindo que a empresa está usando correntemente o DIESEL, a expressão do $VP_{DIESEL(i)}$ no período de tempo i , em termos de $VP_{DIESEL(i+1)}$ e $FC_{DIESEL(i)}$ nos períodos $i+1$ e i , respectivamente, é dado por: $VP_{DIESEL(i)} = \text{Max} [FC_{DIESEL(i)} + e^{-rf} [VP_{DIESEL(i+1)}^{up} * P_{u(DIESEL)} + VP_{DIESEL(i+1)}^{down} * P_{d(DIESEL)}]; FC_{GNV(i)} + e^{-rf} [VP_{GNV(i+1)}^{up} * P_{u(GNV)} + VPL_{GNV(i+1)}^{down} * P_{d(GNV)}] - C_{DIESEL \rightarrow GNV}$.

Árvore Binomial do VPL(i) da alternativa DIESEL com flexibilidade (R\$)					
0	1	2	3	4	5
-R\$ 660.538,29	-R\$ 446.934,45	-R\$ 417.134,65	-R\$ 365.718,32	-R\$ 285.646,91	-R\$ 167.746,15
	-R\$ 221.455,06	-R\$ 241.097,91	-R\$ 209.767,31	-R\$ 162.229,56	-R\$ 94.098,73
		-R\$ 129.026,48	-R\$ 136.487,28	-R\$ 120.182,61	-R\$ 69.710,05
			-R\$ 72.811,73	-R\$ 69.332,38	-R\$ 51.642,48
				-R\$ 39.463,59	-R\$ 30.873,65
					-R\$ 20.365,55
Árvore Binomial de decisão da alternativa DIESEL com flexibilidade					
0	1	2	3	4	5
MANTER	MANTER	MANTER	MANTER	MANTER	MANTER
	TROCAR	MANTER	MANTER	MANTER	MANTER
		TROCAR	TROCAR	MANTER	MANTER
			TROCAR	TROCAR	MANTER
				TROCAR	TROCAR
					TROCAR

Árvore Binomial do VPL(i) da alternativa GNV com flexibilidade (R\$)					
0	1	2	3	4	5
-R\$ 660.538,29	-R\$ 446.934,45	-R\$ 417.134,65	-R\$ 365.718,32	-R\$ 285.646,91	-R\$ 167.746,15
	-R\$ 211.455,06	-R\$ 239.689,90	-R\$ 209.767,31	-R\$ 162.229,56	-R\$ 94.098,73
		-R\$ 119.026,48	-R\$ 126.487,28	-R\$ 119.480,75	-R\$ 69.710,05
			-R\$ 62.811,73	-R\$ 59.332,38	-R\$ 42.034,36
				-R\$ 29.463,59	-R\$ 20.873,65
					-R\$ 10.365,55
Árvore Binomial de decisão da alternativa GNV com flexibilidade					
0	1	2	3	4	5
TROCAR	TROCAR	TROCAR	TROCAR	TROCAR	TROCAR
	MANTER	MANTER	TROCAR	TROCAR	TROCAR
		MANTER	MANTER	MANTER	TROCAR
			MANTER	MANTER	MANTER
				MANTER	MANTER
					MANTER

Tabela 5.5 – Árvores de Flexibilidade e de Decisão da Alternativas

A equação acima expressa a escolha de permanecer na tecnologia corrente DIESEL ou trocar para a tecnologia GNV e pagar o requerido custo de troca ($C_{DIESEL \rightarrow GNV} = R\$ 30.000,00$). O resultado da árvore de decisão de VPL, mostrada na **Tabela 5.5**, sugere a seguinte estratégia:

- Se a empresa esta usando DIESEL, é ótimo trocar para GNV quando a razão P_{GNV}/P_{DIESEL} for menor do que 67%.
- Se, por outro lado, a empresa está usando GNV, é melhor trocar para o DIESEL quando a razão P_{GNV}/P_{DIESEL} for maior do que 81%. Isso ocorre devido ao custo de troca ($C_{GNV \rightarrow DIESEL}$).

O valor presente de investir na tecnologia flexível iniciando com as tecnologias DIESEL e GNV são de - R\$ 460.538,29 e de - R\$ 428.844,24, respectivamente. Subtraindo-se os investimentos iniciais para implantação da tecnologia flexível dos seus respectivos VP's, e subtraindo-se o VPL das tecnologias não flexíveis do correspondente VPL flexível, obtêm-se os resultados apresentados na **Tabela 5.6**.

O modelo de decisão recomenda investir na tecnologia flexível antes do que na atual tecnologia sem flexibilidade, no caso, assumida ser a tecnologia sem flexibilidade DIESEL. Somado a isso, verifica-se que embora a utilização da tecnologia de motor GNV ser mais econômica quando usada independentemente da tecnologia DIESEL, o modelo recomenda começar com a tecnologia DIESEL quando a tecnologia flexível é usada. Isso devido ao maior valor do investimento inicial requerido para a tecnologia com flexibilidade GNV/DIESEL.

$VPL_{DIESEL (no flex)}$	=	-R\$ 660.538,29
$VPL_{GNV (no flex)}$	=	-R\$ 678.844,24
$VPL_{DIESEL (flex)}$	=	-R\$ 704.844,24
$VPL_{GNV (flex)}$	=	-R\$ 678.844,24
Valor da Opção de Troca (iniciando com DIESEL)	=	R\$ 26.000,00

Tabela 5.6 – Sumário dos Resultados

Assumindo que a empresa inicia com DIESEL, o valor da flexibilidade de troca entre DIESEL e GNV é a diferença entre o $VPL_{GNV(flex)}$ de - R\$ 678.844,24 e o $VPL_{DIESEL(flex)}$ de - R\$ 704.844,24, que equivale a um ganho de R\$ 26.000,00. Este é o custo de oportunidade que a empresa carrega por não explorar a flexibilidade inerente ao projeto.

Portanto, o valor da flexibilidade por poder optar pelo combustível de operação do veículo é de R\$ 26.000,00. Este valor equivale a aproximadamente 10% do valor do veículo com tecnologia flexível, ou seja, que pode operar com combustíveis alternativos.

Estes resultados apontam para a estratégia que pode ser adotada pelos tomadores de decisão, considerando as condições do ambiente de negócios no momento da análise. Conforme as incertezas vão se resolvendo, são necessários ajustes no modelo para que o mesmo possa se adequar às condições atuais do mercado e representar de uma forma aproximada as reais características do problema. Entretanto, através de uma análise de sensibilidade é possível identificar intervalos ótimos, influenciados por fatores que têm um impacto relevante nos resultados do problema de tomada de decisão.

Verifica-se que a volatilidade e os custos de troca são os fatores mais importantes na determinação da opção de troca. Na sequência, apresenta-se a análise de sensibilidade da opção de troca em relação aos custos de troca e em relação a volatilidade dos preços dos combustíveis.

5.6 Sensibilidade das Opções

5.6.1 Custos de Conversão

Considerando que a análise previa mostrou que é mais lucrativo para a empresa iniciar com a tecnologia DIESEL em uma relativa baixa volatilidade de 15%, varia-se o custo de troca da tecnologia DIESEL para a tecnologia GNV ($C_{\text{DIESEL} \rightarrow \text{GNV}}$). A **Figura 5.1** mostra que, como esperado, quando a empresa inicia com a tecnologia DIESEL, o valor da flexibilidade é mais sensível para incrementos nos custos de troca.

Considerando-se que a avaliação é realizada quando a empresa inicia com DIESEL, espera-se que as variações nos custos de troca de DIESEL para GNV ($C_{\text{DIESEL} \rightarrow \text{GNV}}$) produzam efeito no valor da opção de troca. A análise baseada na **Figura 5.1** mostra que para um custo de troca de DIESEL para GNV ($C_{\text{DIESEL} \rightarrow \text{GNV}}$) de até R\$ 41.560,12, é melhor para a empresa iniciar com DIESEL. Por outro lado, para um custo de troca acima deste valor, a empresa deve iniciar com GNV. O valor de gatilho, pode ser obtido exatamente usando técnicas simples de programação dinâmica (função atingir meta do software Excel). Para os custos de troca de DIESEL para GNV acima de R\$ 41.560,12, os benefícios de implementar GNV não são suficientes. Isso acontece, pois acima desse valor a opção não tem valor.

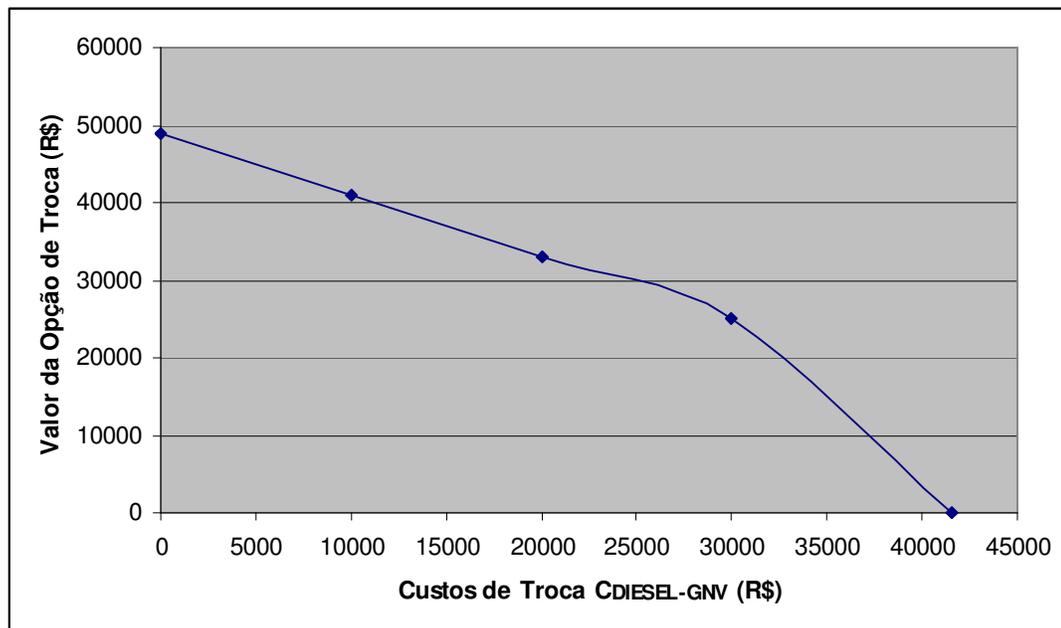


Figura 5.1 – Sensibilidade do Valor da Opção para os Custos de Troca

5.6.2 Volatilidade

Como foi dito anteriormente, outro fator de grande impacto no valor do projeto é a volatilidade. Isso se dá, pois a volatilidade carrega toda a incerteza presente na alternativa de

investimento analisada. Esta incerteza está refletida nos preços dos combustíveis diesel e GNV e na incerteza técnica em relação aos custos de manutenção quando utilizado o GNV.

Uma das suposições iniciais era de que a tecnologia GNV é mais econômica e polui menos. Conseqüentemente investiga-se como o valor da flexibilidade varia com a variação da volatilidade dos preços. Dado o resultado do modelo binomial apresentado anteriormente, considerando $\sigma_{DIESEL} = 15\%$ e $\sigma_{GNV} = 35\%$, tem-se o valor de R\$ 26.000,00 para a opção de troca de insumo. A partir deste cenário inicial, aumenta-se gradativamente a volatilidade dos preços. Os resultados desta sensibilidade são mostrados na **Figura 5.2**.

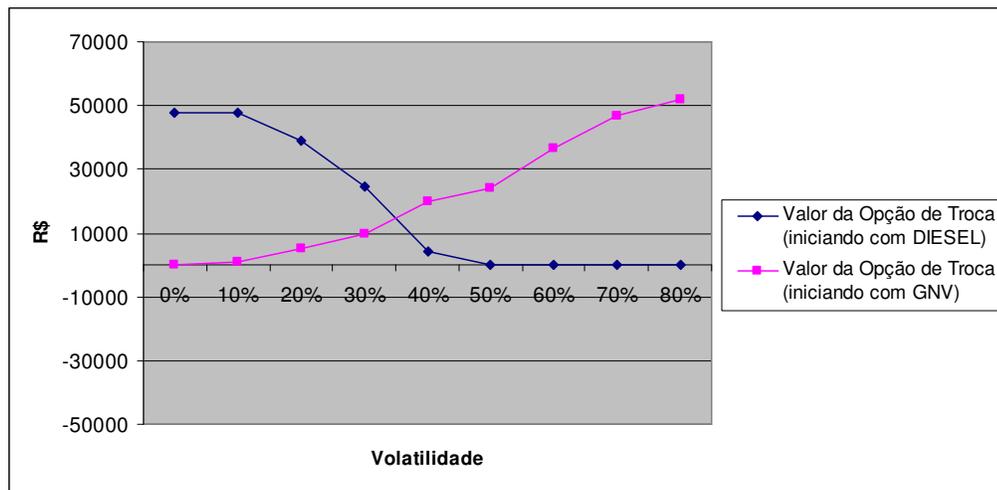


Figura 5.2 - Sensibilidade do Valor da Opção para a Volatilidade

A **Figura 5.2** mostra quão sensível é o valor da flexibilidade em relação às mudanças na volatilidade dos preços. Primeiro, dado que a empresa inicia com DIESEL, o valor da flexibilidade de troca diminui até um gatilho de 40% de volatilidade de preços, e a partir deste ponto, o valor da flexibilidade cai até zero. Para a tecnologia de motor GNV/DIESEL, quanto maior a volatilidade do preço do GNV maior é o valor da opção de poder trocar o insumo de operação do veículo. De fato, para uma volatilidade de 35% para o preço do GNV, a Figura 5.3 mostra que é melhor para a empresa iniciar com DIESEL. Mostra também que, como esperado, em alta volatilidade, em particular depois de 41% de volatilidade do preço do GNV, é melhor para a empresa iniciar com GNV.

5.7 Considerações Finais

Como pôde ser observado, a flexibilidade possui valor, e esse valor pode ser capturado através de métodos adequados, como a Análise de Opções Reais. Mas ainda assim, há a necessidade de confirmação dos resultados, buscando a máxima aproximação da realidade.

Um dos testes para verificar se os resultados calculados pela ROA aproximam da teoria básica de finanças é compará-los com a teoria de precificação de opções. Ou seja, $C \geq \max[S - X \times e^{-rT}, 0]$ e $C \leq S$. Se os resultados não estão nesse intervalo, potencialmente pode ser devido a hipóteses exorbitantes na criação dos FC previstos.

Entretanto, se os resultados caem nesse intervalo, não se pode estar certo de que estão corretos, somente razoavelmente seguros que a análise está correta, assumindo que todas as variáveis de entrada são também razoáveis.

O principal impulso de usar este intervalo de estiramento da opção é testar a extensão do estiramento (“*spread*”), isto é, quanto mais comprido o “*spread*”, maior a confiança que os resultados são razoáveis. Também, pode-se realizar uma análise de sensibilidade mudando as variáveis de entrada e hipóteses para ver se o “*spread*” muda, isto é, se alarga ou se desloca.

A análise crítica dos resultados é feita no próximo capítulo. O que se pretende é avaliar os resultados fornecidos pelo modelo de opções reais, mostrando que é importante avaliar melhor os projetos que utilizam o GN como fonte energética. Para que seja possível, dessa maneira, obter maiores retornos e, ao mesmo tempo, maior flexibilidade para lidar com as condições instáveis do mercado.

Capítulo 6

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

Conclui-se que há flexibilidade na avaliação da alternativa de investimento em ônibus movido a combustíveis alternativos, e essa flexibilidade possui valor. Através da avaliação da opção de troca de insumos, verifica-se que o valor da alternativa com flexibilidade, neste caso, supera o valor da alternativa sem flexibilidade.

Isto é, o valor do $VPL_{EXPANDIDO}$ ($VPL_{DIESEL(flex)}$ e $VPL_{GNV(flex)}$) supera o valor do $VPL_{TRADICIONAL}$ ($VPL_{DIESEL(no\ flex)}$ e $VPL_{GNV(no\ flex)}$) tanto para a alternativa iniciando com o combustível DIESEL como para a alternativa iniciando com o combustível GNV. Este resultado responde ao objetivo da pesquisa, ou seja, obter um valor para a flexibilidade embutida no problema de tomada de decisão de investimento analisado.

Para o caso analisado, é intuitivo que o preço do veículo com tecnologia de motor flexível seja maior que o caso onde não há essa possibilidade. Assim, o valor da flexibilidade conseguido com a aplicação da ROA é útil para saber com precisão quanto é esse valor, conhecendo também a sensibilidade das variáveis que mais impactam esse valor.

Todavia, para o tomador de decisão que busca diariamente a redução dos seus custos de operação para obter maior retorno no investimento, interessa principalmente saber qual o momento ótimo para a realização da conversão. Assim, o resultado mais importante obtido com a ROA é avaliar o momento ótimo da troca. Sendo que, o indicador que realiza essa função é a diferença de preços entre os combustíveis.

Por ainda ser uma tecnologia incipiente, não se pode garantir nem prever com absoluta certeza tudo o que pode ocorrer durante a operação do ônibus. Mesmo assim, o cenário atual se mostra relativamente favorável à utilização do GNV em ônibus.

Mais especificamente, devido a fatores ambientais, tecnológicos, de mercado e a respeito da eficiência da matriz energética nacional, a utilização do GNV em ônibus para transporte coletivo urbano pode trazer importantes benefícios para a sociedade.

Dessa forma, pode-se concluir que a aplicação correta dos métodos de avaliação de investimentos, que incorporam a incerteza do ambiente econômico, podem contribuir para a utilização eficiente dos recursos escassos de uma economia, principalmente uma economia emergente como a do Brasil.

É importante também, salientar a necessidade de aplicação da teoria a fim de contribuir para sua difusão entre os tomadores de decisão. Somado a isso está o fato de que para se conseguir o desenvolvimento sustentado do mercado de GN, é imprescindível a utilização das mais modernas técnicas de análise de decisão atualmente conhecidas.

Conclui-se com a aplicação da metodologia que o GN tem um grande potencial como combustível alternativo, principalmente quando em presença de tecnologias flexíveis, que oferecem a possibilidade de intercambialidade entre os combustíveis. Esse potencial pode ser observado ao se considerar a sua relação de preço com os outros combustíveis, os aspectos ambientais e principalmente os aspectos tecnológicos, onde se verifica os constantes investimentos em flexibilidade.

6.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

A aplicação da metodologia e os resultados apresentados são satisfatórios, uma vez que se partiu um modelo de solução discreto em relação ao tempo. Entretanto, não foram considerados os elementos correspondentes ao processo estocástico e a otimização dinâmica, necessários na modelagem dinâmica em tempo contínuo. Estes elementos, além de dar uma elegância maior à modelagem, são extremamente úteis para se atingir um grau suficiente de generalidade do problema. Com isso, pode-se replicar a pesquisa em condições diversas das que foram analisadas no modelo discreto.

Outro fator relevante ao que compete o desenvolvimento do modelo matemático é a possibilidade de comparação entre os dois métodos de solução. Com isso, pode-se avaliar a precisão dos resultados assim que os mesmos convergirem ou obtiverem resultados aproximados.

A primeira recomendação é realizar a otimização dinâmica sob incerteza estocástica. Com ela, é possível determinar a superfície de resposta para a equação do valor do investimento com flexibilidade.

Também, pode-se explorar o modelo para avaliação de outras aplicações para o GN, considerando uma análise de investimentos em gasodutos de distribuição de GN. Estes gasodutos, por hipótese, podem transportar tanto o GN quanto o hidrogênio, tecnologia possível num futuro próximo.

Por fim, para se avaliar as alternativas com maior precisão seria conveniente a utilização de um método que levasse em consideração a verdadeira volatilidade dos ativos. Isso é possível através da avaliação não só das incertezas relacionadas à Instabilidade de Preço dos Combustíveis, mas também as incertezas relacionadas à Inovação Tecnológica e ao

Meio Ambiente. Assim, a utilização dos modelos GARCH, pode contribuir tanto para a precisão das análises quanto para o avanço da teoria de opções reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGNV - Associação Brasileira do Gás Natural Veicular. *O Uso do Gás Natural em Veículos*. 2005. Disponível em <http://www.ambientebrasil.com.br>, acesso em 01/11/2006.

AHOUISSOUSSI, N. B. C. & WETZSTEIN, M. E. *A comparative cost analysis of biodiesel, compressed natural gas, methanol, and diesel for transit bus systems*. Resource and Energy Economics, nº 20, pp. 1 a 15, 1997.

ALEXANDER, C. *Volatility and Correlation: Measurement Models and Applications*. Risk Management and Analysis. Vol. 1. Chichester. John Wiley & Sons, 1999.

ALMEIDA, W. E. *Uma Análise Comparativa da Utilização dos Ônibus a Gás Natural e a Óleo Diesel*. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

ALVES, M. L. *Carro Flex Fuel: Uma Avaliação por Opções Reais*. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Administração da PUC – Rio, Rio de Janeiro –RJ, 94p., 2007.

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. *Anuário da Indústria Automobilística Brasileira*, disponível em: <http://www.anfavea.com.br>, acessado em 22/01/2009. São Paulo, 2005.

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bicomcombustíveis. *Boletim mensal do gás natural*. 2005. Disponível em <http://www.anp.gov.br>, acesso em 25/09/2006.

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bicomcombustíveis. *Boletim mensal do gás natural*. 2007. Disponível em <http://www.anp.gov.br>, acesso em 01/11/2008.

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bicomcombustíveis. *Boletim mensal do gás natural*. 2008. Disponível em <http://www.anp.gov.br>, acesso em 01/02/2009.

ANTP – Associação Nacional de Transportes Públicos. *Anuário Estatístico do Transporte Público Urbano – 1993*. São Paulo, 1994.

BALDASSARRI, L. T., BATTISTELLI, C. L., CONTI, L. *Evaluation of emission toxic of urban bus engines: Compressed natural gas and comparison with liquid fuels*. Science of the Total Environment, Nº 355, pp. 64-77, 2005

BARONE-ADESI, G. & R.E. WHALEY. *Efficient Analytic Approximation of American Option Value*. Journal of Finance, vol.42, p.301-320. June, 1987.

BERTRAND, J.W.M. & FRANSOO, J.C. *Operations Management research methodologies using quantitative modeling*. International Journal of Operations & Production Management, vol. 22, nº 2, 241-264. 2002.

BESSEMBINDER, H., COUGHENOUR, J. F., SEGUIN, P.J., SMOLLER, M.M. *Mean Reversion in Equilibrium Asset Prices: Evidence from the Futures Term Structure*. Journal of Finance, vol.50, no 1, pgs.361-375. March, 1995.

- BHATTACHARYA, S.** *Project Valuation with Mean-Reverting Cash-Flow Streams*. Journal of Finance, vol.33, no 5, pgs.1317-1331. December, 1978.
- BLACK, F.; SCHOLES, M.** *The Pricing of Options and Corporate Liabilities*. Journal of Political Economy, vol. 81, p.637-659, 1973.
- BODIE, A., KANE, A., MARCUS, J.** *Princípios da Administração Financeira*. Editora Bookman, Porto Alegre, 2000.
- BOLLERSLEV, T.** *Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity*. Journal of Econometrics. Vol. 31: 307-327. 1986.
- BOYLE, P.** *Options: A Monte Carlo Approach*. Journal of Financial Economics, nº 4, 323-338. 1977.
- BRANDÃO, L. E. & DYER, J. S.** *Valuing Real Options Projects with Correlated Uncertainties*. 2006.
- BRENNAN, M.J., SCHWARTZ, E.S.** *A New Approach to Evaluating Natural Resource Investments*. In CHEW, D. H. *The New Corporate Finance*. EUA: McGraw-Hill, pp. 98-107. 1993.
- CARR, P.** *The Valuation of Sequential Exchange Opportunities*. The Journal of Finance, Vol. XLIII, Nº5, pp.1235-1256. 1988.
- CASAROTTO FILHO, N. & KOPITKE, B. H.** *Análise de Investimentos*. São Paulo: Atlas, Ed. 8. 1998.
- CONCEIÇÃO, G. W.** *A viabilidade técnica, econômica e ambiental da inserção do gás natural veicular em frotas do transporte coletivo urbano de passageiros*. 2006. Dissertação de Mestrado do Programa de Planejamento Energético - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ. 268p. 2006.
- CONPET** – Programa Nacional da Racionalização do Uso dos derivados do petróleo e do gás natural. *Suprimento de Gás Natural*. 2005. Disponível em <http://www.ambientebrasil.com.br>, acesso em 01/11/2006.
- COPELAND, T e ANTIKAROV, V.** *Opções Reais: Um novo paradigma para reinventar a avaliação de investimentos*. Editora Campus, 368p. Rio de Janeiro, 2001.
- COX, J.C. & ROSS, S.A. & RUBINSTEIN, M.** *Option Pricing: A Simplified Approach*. Journal of Financial Economics, n. 7, pgs.229-263, 1979.
- CUTHBERTSON, K., NITZSCHE, D.** *Real Options, in Financial Engineering*. New York: Woley and Sons, capítulo 19 p.527-543. 2001.
- DAMODARAN, ASWATH.** *Investment Valuation: Tools and Techniques for Determining the Value of Any Asset*. Editora John Wiley & Sons, 2ª Edição, 2002.
- DE REYCK, B., DEGRAEVE, Z. & VANDENBORRE, R.** *Project options valuation with net present value and decision tree analysis*. European Journal of Operational Research, 184, 341–355. 2008.

- DIAS, M. A. G.** *Opções Reais Híbridas com Aplicações em Petróleo*. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Puc – Rio. Rio de Janeiro – RJ, Brasil. 509p. 2005.
- DIAS, M. A. G.** *Investimento sob incerteza em exploração e produção de petróleo*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Industrial da PUC - RJ, Rio de Janeiro, Brasil. 1996.
- DIXIT, A., PINDYCK, R.** *Investment under Uncertainty*. Princeton University Press, Princeton, 1994.
- EBERWEIN, B.** *Environmentally friendly bus operation in Germany/Berlin* – Public Service Bus Department – Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), 2004.
- ENERGIA & MERCADOS.** *Seduzindo a Frota de Pesados*. Abril de 2005. Disponível em <http://www.gasnet.com.br>, acesso em 01/11/2006.
- ENGLE, R. & PATTON, A.** *What Good is a Volatility Model?* Quantitative Finance. Vol. 1: 237-245. 2001.
- FIGUEIREDO NETO, L.F., MANFRINATO, J.W.S. e CREPALDI, A.F.** *Teoria das Opções Reais: De que está se falando?* 14 p, 2003. Disponível em <<http://www.simpep.feb.unesp.br/anais10/gestaoeconomica>> Acesso em: 15 jul. 2006.
- FINE, C.H. & FREUND, R.M.** *Optimal Investment in Product-Flexible Manufacturing Capacity*. Management Science, vol.36, no 4, pgs.449-466. April, 1990.
- FU, Q.** *On the Valuation of an Option to Exchange One Interest Rate for Another*. Journal of Banking & Finance, vol.20, pgs.645-653. 1996.
- FULTON, L.** *Sustainable transport: New insights from the IEA's worldwide transit study*. IEA – International Energy Agency, Paris, France, 2001.
- FULTON, L. & SCHIPPER, L.** *Bus systems for future – Achieving sustainable transport worldwide*. IEA – International Energy Agency, Paris, France, 2001.
- GIL, A. C.** *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas, 1991.
- GITMAN, L. J.** *Princípios de Administração Financeira*. Editora Pearson Education do Brasil, 745p., 2003.
- GONÇALVES, F. DE O. & MEDEIROS, P. Y.** *Opções Reais e Regulação: O Caso das Telecomunicações no Brasil*. Artigo de trabalho. In: II Conferência da SBE, Rio de Janeiro, maio, 2002, 18 p.
- GRAHAM, J.R.; HARVEY, C.R.** *The Theory and Practice of Corporate Finance: Evidence from the Field*. Journal of Financial Economics, vol. 60, p.187- 243, 2001.
- GWILLIAM, K.; KOJIMA, M. & JOHNSON, T.** *Reducing air pollution from urban transport*. The World Bank, Washington, D.C., 2004.
- HAHN, W. J.** *A Discrete-Time Approach for Valuing Real Options with Underlying Mean-*

Reverting Stochastic Processes. PHD Dissertation The University of Texas, Austin. May, 2005.

HAHN, W. J. & DYER, J. S. *Discrete Time Modeling of Mean-Reverting Stochastic Processes for Real Options Valuation*. European Journal of Operational Research, November, 2006.

HE, H. & PINDYCK, R. S. *Investments in Flexible Production Capacity*. Journal of Economic Dynamics and Control, no 16, pgs. 575-599. August, 1992.

HERTZ, D. B. *Risk Analysis in Capital Investments*. Harvard Business Review, 1964.

HIRSCHFELD, H. *Engenharia Econômica*. São Paulo, Editora Atlas. 440p., 1984.

HULL, J. C. *Options, Futures, and Other Derivatives Securities*. Prentice Hall, 2nd ed., Englewood Cliffs, NJ, 1993.

IEA – International Energy Agency. *Energy Statistics Manual*. Paris, 2007. Disponível em: <http://www.iea.org/Textbase/stats>, acessado em 22/01/2009.

IEA – International Energy Agency. *Energy Balances for World*. Paris, 1990. Disponível em: <http://www.iea.org/Textbase/stats>, acessado em 22/01/2009.

INGERSOLL, J. G. *Natural Gas Vehicles*. Lilburn, USA, The Fairmont Press, Inc., 1996.

KELLERHALS, B. P. *Asset Pricing – Modeling and Estimation*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2nd ed., 243 p. 2004.

KEMNA, A.G.Z. *Case studies on real options*. Financial Management. Vol. 22, n. 3, p. 258-270. Autumn, 1993.

KHANSA, L., LIGINLAL, D. *Valuing the flexibility of investing in security process innovations*. European Journal of Operational Research, accepted to publication at 2007.

KULATILAKA, N. & TRIGEORGIS, L. *The General Flexibility to Switch: Real Options Revisited*. International Journal of Finance, vol.6, no 2, pgs.778-798. Spring, 1994.

KULATILAKA, N. *The Value of Flexibility: The Case of a Dual-Fuel Industrial Steam Boiler*. Financial Management, pgs.271-280. Autumn, 1993.

KULATILAKA, N. *Valuing the Flexibility of Flexible Manufacturing Systems*. IEEE Transactions on Engineering Management, vol.35, no 4, pgs.250-257. Nov, 1988.

LUEHRMAN, T. *Investment Opportunities as Real Options: Getting Started on the Numbers*. Harvard Business Review, July-August, pp.51-67. 1998a.

LUIUS, D.I. *Real options in real estate development*. Journal of Property Investment & Finance, Vol. 19 No. 1, pp. 73-78. 2001.

MARGRABE, W. *The Value of an Option to Exchange One Asset for Another*. Journal of Finance, vol.33, no 1, pgs.177-186. March, 1978.

MARQUES, G. G. *Avaliação do Potencial de Redução de Poluentes Atmosféricos Locais a*

Partir da Renovação de Frota. Tese de Mestrado, Universidade Estadual do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, 2004.

MARTINS, M. P. S. *Expansão do Setor de Gás: monopólio na produção x preços livres.* Revista Brasileira de Energia. Publicação da Sociedade Brasileira de Planejamento Energético. Vol. 12, n. 2, p. 156. 2º semestre, 2006.

MERTON, R.C. *Theory of Rational Option Pricing.* Bell Journal of Economics and Management Science, vol.4, spring, p.141-183, 1973.

MIGUEL, P. A. C. *Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução.* Produção, v. 17, nº. 1, p. 216-229, 2007.

MINARDI, A. M. A. F. *Teoria de Opções Aplicada a Projetos de Investimento.* São Paulo: Ed. Atlas, 2004.

MITROFF, I.I., BETZ, F., PONDY, L.R. & SAGASTI, F. *On managing science in the systems age: two schemas for the study of science as a whole systems phenomenon.* Interfaces, vol. 4. nº 3, pp. 46-58. 1974.

MME – Ministério de Minas e Energia. *BNE – Balanço Energético Nacional.* Governo Federal, 2004.

MME – Ministério de Minas e Energia. CNE – Comissão Nacional de Energia. *Plano Nacional do Gás (PLANGÁS).* Governo Federal, Brasília, 1987.

MORAES, N. G. *Avaliação das Tendências da Demanda de Energia no Setor de Transportes no Brasil.* Dissertação de Mestrado do Programa de Planejamento Energético - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ. 166p. 2005.

MUN, J. *Real Options Analysis: Tools and Techniques for Valuing Strategic Investments and Decisions.* John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2002.

MYERS, S.C. *Determinants of Corporate Borrowing.* Journal of Financial Economics, p.147-175. November, 1977.

NELSON, D. *ARCH Models as Diffusion Approximations.* Journal of Econometrics. Vol. 45: 7-38. 1990.

NELSON, D. B. & RAMASWAMY, K. *Simple Binomial Processes as Diffusion Approximations in Financial Models.* The Review of Financial Studies, vol. 3, nº 3, pp. 393-430, 1990.

OLIVEIRA FILHO, A. D. *Substituição de diesel por gás natural em ônibus do transporte público urbano.* Dissertação de Mestrado do Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo. 144p. 2006.

OLIVEIRA FILHO, A. D. & FAGÁ, M. T. W. *Impactos da Substituição de Diesel por Gás Natural no Transporte Público Urbano.* Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Salvador – BA, Outubro, 2005.

PAMPLONA, E. O. & AVILA, P. L. *Avaliação econômica e de risco do uso de GNV (Gás*

Natural Veicular) em frotas de ônibus urbano. XXVI ENEGEP – Fortaleza-CE, Brasil. Outubro, 2006.

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A. *Petrobras propõe nova estrutura de preços de gás natural para transporte coletivo urbano.* Rio de Janeiro, 2004.

PINDYCK, R. S. *The Dynamics of Commodity Spot and Futures Markets: A Primer.* Energy Journal, vol.22(3), 2001, p.1-29

PINDYCK, R. S. *The Long-Run Evolution of Energy Prices.* Energy Journal, vol. 20(2), p. 1-27, 1999.

PINTO, C. B., BRANDÃO, L. e HAHN, W. J. *Modeling Switching Options Using Mean Reverting Commodity Price Models.* Artigo submetido ao Journal of Finance, 23p., 2007.

PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores. *Coleção Meio Ambiente Série Diretrizes – Gestão Ambiental.* Vol 1, nº 2, Brasília, 2004.

RIBEIRO, S. K. *Estudo das Vantagens Ambientais do Gás Natural Veicular: O Caso do Rio de Janeiro.* Centro Clima – Centro de Estudos Integrados sobre Meio Ambiente e Mudanças Climáticas, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2001.

ROSS, S., WESTERFIELD, R. W. & JAFFE, J. F. *Administração Financeira – Corporate Finance.* Editora Atlas, São Paulo, 2ª Edição, 2002.

SANTOS, A. H. M.; GUERRA, H. N.; NUNES, H. R. A. *Opções Reais como Instrumento para Regulação de Mercados de Energia Elétrica.* Artigo de trabalho, Ministério das Minas e Energia e ANEEL, 2001, 12 p.

SANTOS, E. M.; FAGÁ, M. T. W. & BERMUDO, A. *Uso do gás natural como combustível em veículos de transporte coletivo urbano – Estágio atual, perspectivas e dificuldades. Relatório final.* Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2003.

SANTOS, A. L. F. *Metodologia para Previsão e Decisão de Investimentos Tecnológicos em Gás Natural.* Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação da UFRJ, 155 p. 2005.

SANTOS, E. M. *Um estudo sobre a teoria das opções reais aplicada a análise de investimentos em projetos de P&D.* Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação da UNIFEI, 138p. 2001.

SANTOS, E. M., ZAMALLOA, G. C., VILLANUEVA, L. D., FAGÁ, M. T. W. *Gás Natural: estratégias para uma energia nova no Brasil.* Editora Annablume, Fapesp, Petrobras, São Paulo, 352 p., 2002.

SCHWARTZ, E. *The Stochastic Behavior of Commodity Prices: Implications for Valuation and Hedging.* Journal of Finance, vol. 52, pp. 923-973, 1997.

SCMGN – Superintendência de Comercialização e Movimentação de Gás Natural. *Gás Natural Veicular Mercado em Expansão.* Nota Técnica 023/2003-SCG. Rio de Janeiro, 01 de agosto de 2003. Disponível em <http://www.anp.gov.br>, acesso em 01/11/2006.

SILVA, E. L. & MENEZES, E. M. *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*. 4ª Edição rev. atual. 138p. Florianópolis: UFSC, 2005.

SODAL, S., KOEKEBAKKER, S. & AADLAND, R. *Market Switching Options for Shipping Carriers*. Real Options 8th Annual International Conference, Montreal, Canadá, 2004. Disponível em: www.realoptions.org, acesso em 16/11/2008.

STRAPASSON, A. B. *A energia térmica e o paradoxo da eficiência energética*. Dissertação de Mestrado em Energia do Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2004.

STUMPF, S. *Precificação de Opções Europeias de Ações em Dividendos e Volatilidade Estocástica*. 2001. 62f. Dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Três Rios, 2001.

SUBRAMANIAN, A., MURTHY, N. & SHIRKHANDI, M. *Real Switching Options and Equilibrium in Global Markets*. Real Options 6th Annual International Conference, Paphos, Cyprus, 2002. Disponível em: www.realoptions.org, acesso em 16/11/2008.

TEISBERG, E. *An Option Valuation Analysis of Investment Choices by a Regulated Firm*. Management Science, Vol.40; N°4; pp. 535-548. 1994.

TEISBERG, E. *Capital Investment Strategies Under Uncertain Regulation*. RAND Journal of Economics, Vol. 24, N°4, pp.591-604. 1993.

THOMAS, J. E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. Editora Interciência, 272 p., 2004.

TOBIN, J. *A General Equilibrium Approach to Monetary Theory*. Journal of Money Credit and Banking. Vol.1: 15-29. 1969.

TOURINHO, O.A.F. *The Valuation of Reserves of Natural Resources: An Option Pricing Approach*. University of California, Berkeley, PhD Dissertation, November, 1979.

TRIANI, A.J.; BORISON, A. *Real Options: State of the Practice*. Journal of Applied Corporate Finance, summer, p.8-24. 2001.

TRIGEORGIS, L. *Real options and interactions with financial flexibility*. Financial Management. Vol. 22, n. 3, p. 202-224. Autumn, 1993.

UPTON, D. *The Management of Manufacturing Flexibility*. California Management Review, Winter, pp.72-89. 1994.

WATT, G. M. *Natural gas vehicle transit bus fleets: The current international experience*. IANGV – International Association for Natural Gas Vehicles (Inc.). Gas Technology Services, Australia, 2001.

WELLINGTON, A. M. *The Economic Theory of the Location of Railways*. New York: John Wiley, Ed. 6. 980 p. 1887.

WHITESIDE, M.W.; DROWN, C.; LEVY, G. *General Solution for Option Analysis and Valuation Using a Branching Monte Carlo Method*. SPE paper no 71412. 2001 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 30 September–3 October, 2001, 10 p.

WILLE W. B. *Considerações Econológicas do Gás Natural Veicular.* Trabalho de Conclusão de Curso, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, junho de 2005.

ANEXO 1

PREMISSAS

Geral

ÔNIBUS URBANO

Frota	1 veículo
Turnos por dia	2
Tempo do turno	8 horas
Lotação completa de um veículo	46 pessoas
Velocidade média	40 km/hora
Percurso Médio Mensal (referenciar)	5.000 km
Durabilidade pneu	100.000 km
Quantidade pneu/veículo	6 unidades
Volume lubrificante	20 litros
Filtro por troca	0,5 unidade
Depreciação veículo	25% ao ano
Seguro do veículo	5% ao ano
IPVA (-2% para ônibus GNV)	8% ao ano
Imposto de renda	15% ao ano
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	15% ao ano
Concessão da Linha	7% ao ano
Impostos Proporcionalis	0% receita de vendas
Encargos dos Funcionários	280% ao mês
Financiamento (SAC em 5 anos com 1 de carência)	50% investimento fixo
Taxa financiamento	16% ao ano
Acréscimo sobre lucro tributável	10% acima 240.000
Contribuição Social (CSL)	9%

PREÇOS DOS INSUMOS COMUNS

	R\$
GNV	1,70 m ³
Diesel	R\$ 2,00 litro
Óleo lubrificante	8,50 litro
Pneu	500,00 unidade
Filtro de óleo	50,00 unidade
Manutenção periódica	5.000,00
Ferramentas	3.000,00
Peças de reserva	12.000,00
Compressor	6.000,00

DADOS DIFERENCIADOS POR COMBUSTÍVEL		
Combustível Diesel	Rendimento Diesel	2 km/litro
	Manutenções completas	60.000 km
	Troca de óleo a cada	10.000 km
Combustível GNV	Rendimento GNV	1,71 km/m ³
	Manutenções completas	65.000 km
	Troca de óleo a cada	12.000 km

PREÇOS DOS VEÍCULOS DIFERENCIADOS POR COMBUSTÍVEL		
Combustível Diesel	Preço veículo Diesel novo	R\$ 198.000,00 unidade
	Preço veículo Diesel residual	50.000,00 unidade
Combustível GNV	Preço veículo Diesel novo	200.000,00 unidade
	Acréscimo pela opção GNV	50.000,00 por unidade
	Preço residual veículo GNV	250.000,00 unidade
	Preço residual veículo GNV	0,00 unidade