

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

Marina Carvalho Brandão

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS QUE
INFLUENCIAM A OBTENÇÃO DO VALOR DA
FLEXIBILIDADE POR OPÇÕES REAIS NO
SETOR ELÉTRICO**

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

Orientador: Prof. Edson de Oliveira Pamplona, Dr.

Itajubá

2010

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Jacqueline Balducci - CRB_6/1698

B817a

Brandão, Marina Carvalho.

Análise dos Parâmetros que influenciam a Obtenção do Valor
da Flexibilidade por Opções Reais no Setor Elétrico. / Marina
Carvalho Brandão. – Itajubá, (MG) :{s.n.}, 2010

Orientador: Prof. Dr. Edson de Oliveira Pamplona.

Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Análise de decisão. 2. Flexibilidade. 3. Opções reais. 4. Setor
Elétrico. 5. Volatilidade. I. Pamplona, Edson de Oliveira, orient. II.
Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

*Aos meus pais: Fernando (in memoriam) e
Déborah, e ao meu noivo Bernardo.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Edson Pamplona, que foi minha fonte de inspiração neste período de grandes mudanças na minha vida. Agradeço pela orientação, apoio, confiança, amizade e acima de tudo pelo exemplo de profissionalismo.

A todos que participaram do P&D da Cemig por suas contribuições essenciais ao meu trabalho. Em especial: ao Prof. José Arnaldo, um exemplo de eficiência e dedicação, que muito me ajudou durante todo o trabalho; ao Prof. José Wanderley Marangon Lima, pelo aprendizado e pelas novas oportunidades; à Prof. Julia Noronha pelas grandes contribuições ao meu trabalho; e finalmente ao Prof. Alexandre Pinho que contribuiu para que este trabalho possa ser utilizado por pessoas além da academia, através de um software.

Aos professores do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão sempre solícitos e dedicados à disseminação do conhecimento, e que contribuíram em parte essencial da minha formação acadêmica.

À Capes pelo apoio financeiro.

Aos colegas do GEPE de Economia e Finanças, que me auxiliaram bastante no momento inicial de pesquisa, e também na construção deste trabalho.

Aos meus amigos sempre presentes, apesar da distância, ajudando nos momentos difíceis e de incerteza.

Ao meu noivo Bernardo, pelo amor, carinho, compreensão, e também pela contribuição para este trabalho. Agradeço todos os dias por ter uma pessoa tão iluminada ao meu lado, que só vem acrescentando no meu desenvolvimento pessoal.

Aos meus irmãos Fernando e Camila, e aos meus avós em especial D. M. Antônia, e a todos meus familiares.

Agradeço especialmente aos meus pais Fernando Brandão (in memorian) e Déborah Brandão, que são meu exemplo maior de vida, nunca medindo esforços para prover todas as oportunidades, me orientando sempre pelo caminho do bem. Obrigada por todo o amor e carinho.

A Deus que sempre iluminou a minha jornada. Obrigada por mais essa realização.

RESUMO

Este trabalho desenvolve uma aplicação da Teoria de Opções Reais em uma análise de investimento para expansão de uma distribuidora de energia elétrica, onde é obtido o valor da flexibilidade de se esperar o melhor momento para início do projeto. De acordo com diversos autores da área, o único parâmetro de entrada da análise por opções reais, diferente dos utilizados pelos métodos tradicionais de avaliação é a volatilidade. Sendo ela a variável mais complexa e de maior impacto no resultado final. Portanto, o objetivo desta pesquisa é o estudo do impacto da escolha do método de obtenção da volatilidade, e a definição da relevância dessa escolha no resultado final da avaliação de projetos pela ferramenta de opção reais. A motivação da pesquisa se deu através do estudo de trabalhos anteriores do setor, onde diversos valores e métodos de obtenção da volatilidade eram utilizados. Sendo esse estudo parte de um trabalho de pesquisa e desenvolvimento, que visou o desenvolvimento de um software de auxílio à decisão, que será utilizado pelo departamento de planejamento da CEMIG distribuição. A pesquisa foi desenvolvida de acordo com os preceitos da modelagem e simulação, apresentando de forma detalhada o método pelo qual foi calculado o valor das opções, e que foi utilizado como base do software. Por fim, como resultado da pesquisa foi definido um direcionamento para o cálculo da volatilidade e do método de obtenção da flexibilidade em um projeto de expansão na distribuição.

Palavras-chave: análise de decisão, flexibilidade, opções reais, volatilidade, setor elétrico;

ABSTRACT

This paper develops an application of Real Options Analysis in a case of expansion of an electricity distributor, where it is obtained the value of flexibility to wait for the best time for investment. According to several authors in this field, the only input parameter of the real options analysis, different from those used by traditional methods of evaluation is volatility. This is the most complex and representative variable which impacts on the final result. Therefore, the goal of this research is to study the impact of the method chosen for obtaining the volatility, and to define the relevance of this choice to the outcome of the project evaluation by the tool of real options. The purpose of the research took place through the study of previous papers in the electricity sector, where different values and methods of obtaining the volatility were used. Furthermore, this study is part of a research and development, which aimed at developing a type of software to assist the decision-making process, which will be used by the planning department of CEMIG distribution. The study was conducted in accordance with the principles of modeling and simulation, presenting in detail the method by which it calculated the value of options, and the software calculation base. Finally, as a result of the research, it was set a bias for the calculation of volatility and the method of achieving flexibility in a project to expand the distribution.

Key-words: decision analysis, flexibility, real options, volatility, electricity sector;

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Lucro x Preço ação na data de exercício.....	6
Figura 2.2 – Valor da ação e da opção numa árvore binomial de passo único.....	9
Figura 2.3 – Metodologia Mun (2002).....	23
Figura 2.4 – Metodologia Copeland e Antikarov (2001).....	24
Figura 3.1 - Diagrama das Atividades do Setor Elétrico Brasileiro.....	27
Figura 3.2 - Diagrama das instituições do Setor Elétrico Brasileiro.....	29
Figura 4.1 – Metodologia de Pesquisa.....	49
Figura 4.2 – Processo de Avaliação por Opções Reais para um Projeto de Distribuição.....	51
Figura 4.3 – Gráfico de distribuição de probabilidade na previsão WACC.....	57
Figura 4.4 – Árvore de eventos alternativa 3 – (CA).....	59
Figura 4.5 – Árvore de valores opção alternativa 3 – (CA).....	61
Figura 4.6 – Árvore de valores opção alternativa 3 – (CA).....	61
Figura A.1 – Árvore de eventos alternativa 1 – (CA).....	80
Figura A.2 – Árvore de eventos alternativa 2 – (CA).....	80
Figura A.3 – Árvore de eventos alternativa 3 – (CA).....	80
Figura A.4 – Árvore de eventos alternativa 6 – (CA).....	81
Figura A.5 – Árvore de eventos alternativa 1 – (HP).....	81
Figura A.6 – Árvore de eventos alternativa 2 – (HP).....	81
Figura A.7 – Árvore de eventos alternativa 3 – (HP).....	82
Figura A.8 – Árvore de eventos alternativa 6 – (HP).....	82
Figura A.9 – Árvore de valores opção alternativa 1 – (CA).....	83
Figura A.10 – Árvore de valores opção alternativa 2 – (CA).....	83
Figura A.11 – Árvore de valores opção alternativa 3 – (CA).....	83
Figura A.12 – Árvore de valores opção alternativa 6 – (CA).....	84
Figura A.13 – Árvore de valores opção alternativa 1 – (HP).....	84
Figura A.14 – Árvore de valores opção alternativa 2 – (HP).....	84
Figura A.15 – Árvore de valores opção alternativa 3 – (HP).....	85
Figura A.16 – Árvore de valores opção alternativa 6 – (HP).....	85
Figura A.17– Árvore de decisão alternativa 1 – (CA).....	86
Figura A.18 – Árvore de decisão alternativa 2 – (CA).....	86
Figura A.19 – Árvore de decisão alternativa 3 – (CA).....	86
Figura A.20 – Árvore de decisão alternativa 6 – (CA).....	87

Figura A.21 – Árvore de decisão alternativa 1 – (HP)	87
Figura A.22 – Árvore de decisão alternativa 2 – (HP)	87
Figura A.23 – Árvore de decisão alternativa 3 – (HP)	88
Figura A.24 – Árvore de decisão alternativa 6 – (HP)	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fatores que afetam valores de opções americanas	8
Tabela 3.1 – Volatilidade em trabalhos de geração	48
Tabela 3.2 – Volatilidade em trabalhos de distribuição e transmissão.....	48
Tabela 4.1 – Investimento por alternativa	53
Tabela 4.2 – Resultado obtido pelos métodos tradicionais	54
Tabela 4.3 – Classificação das alternativas	55
Tabela 4.4 – Crescimento da demanda na região	56
Tabela 4.5 – Custo Médio Ponderado de Capital ao longo do tempo	57
Tabela 4.6 – Volatilidade por alternativa	58
Tabela 4.7 – Entradas da árvore de eventos	59
Tabela 4.8 – Investimentos do plano expansão	60
Tabela 4.9 – Dados construção da árvore.....	60
Tabela 4.10 – Valor da flexibilidade	62
Tabela 4.11 – Valor presente líquido com flexibilidade	63
Tabela A.1 – Custo Médio Ponderado de Capital (WACC).....	79

SÍMBOLOS

S → preço atual da ação;

X → preço de exercício da opção;

T → tempo para vencimento da opção;

S_T → preço da ação no instante T ;

r → taxa de juros livre de risco;

c → prêmio pago pela opção de compra;

q → probabilidade objetiva;

p → probabilidade neutra ao risco;

σ → volatilidade da ação;

u → multiplicador de subida;

d → multiplicador de descida;

F → Valor do projeto com flexibilidade;

π → Inflação;

I → Impostos no Brasil;

r_m → Risco de mercado;

β → Beta médio alavancado;

r_B → Prêmio pelo risco país;

r_x → Prêmio de risco cambial;

r_c → Prêmio de risco de crédito;

r_p → Custo de capital próprio;

r_d → Custo de capital de terceiros;

r_{wacc} → Custo de capital.

GLOSSÁRIO E ABREVIATURAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

AT – Alta Tensão.

B&S – Modelo Black e Scholes.

CA – Copeland e Antikarov.

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica.

FCD – Fluxo de Caixa Descontado.

HP – Herath e Park.

MAD – Negação do Ativo Negociado, do inglês – *Marketed Asset Disclaimer*.

MME – Ministério de Minas e Energia.

MT – Média Tensão.

OR – Opções Reais.

RAP – Receita Anual Permitida.

ROA – Análise por opções reais, do inglês – *Real Options Analysis*.

SE – Subestação.

SEB – Setor Elétrico Brasileiro.

TOR – Teoria de Opções Reais.

WACC – Custo Médio Ponderado de Capital, do inglês – *Weight Average Cost of Capital*.

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	3
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2	<u>A BASE DE OPÇÕES REAIS E VOLATILIDADE</u>	5
2.1	INTRODUÇÃO	5
2.2	OPÇÕES FINANCEIRAS	5
2.3	MODELO DE AVALIAÇÃO DE OPÇÕES FINANCEIRAS	7
2.3.1	O MODELO BLACK & SCHOLES	7
2.3.2	O MODELO BINOMIAL	8
2.3.3	PRESSUPOSTOS DO MODELO BINOMIAL	9
I.	PROBABILIDADE NEUTRA AO RISCO	9
II.	MODELAGEM MATEMÁTICA DE PREVISÃO COM INCERTEZA	11
III.	ANÁLISE POR ÁRVORE DE DECISÃO	12
2.4	OPÇÕES REAIS	14
2.4.1	O MODELO BINOMIAL PARA APLICAÇÃO EM OPÇÕES REAIS	15
2.5	VOLATILIDADE EM OPÇÕES REAIS	17
2.5.1	ABORDAGEM DOS RETORNOS DOS FLUXOS DE CAIXA LOGARÍTMICOS	18
2.5.2	GARCH - <i>GENERALIZED AUTOREGRESSIVE CONDITIONAL HETEROSKEDASTICITY</i>	18
2.5.3	GESTÃO DE HIPÓTESES E SUPOSIÇÕES	19
2.5.4	MERCADO SUBSTITUTO USANDO ÍNDICES OU DADOS COMPARÁVEIS	19
2.5.5	ABORDAGEM CONSOLIDADA DA INCERTEZA	19
I.	MODELO UTILIZADO POR COPELAND E ANTIKAROV	19
II.	MODELO UTILIZADO POR HERATH E PARK	21
2.6	MÉTODOS DE ANÁLISE POR OPÇÕES REAIS	22
2.6.1	SEGUNDO MUN.	22
2.6.2	SEGUNDO COPELAND E ANTIKAROV	23
3	<u>ANÁLISE POR OPÇÕES REAIS NO SETOR ELÉTRICO</u>	25
3.1	SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO	25
3.1.1	AGENTES SETORIAIS	27

3.1.2	AGENTES INSTITUCIONAIS	28
3.2	APLICAÇÃO DA ANÁLISE POR OPÇÕES REAIS EM TRABALHOS ANTERIORES.....	30
3.2.1	GERAÇÃO	30
3.2.2	DISTRIBUIÇÃO E TRANSMISSÃO	39
4	<u>O VALOR DA FLEXIBILIDADE EM UM PROBLEMA REAL</u>	49
4.1	MÉTODO DE PESQUISA: MODELAGEM E SIMULAÇÃO.....	49
4.2	MÉTODO PROPOSTO PARA CÁLCULO DA FLEXIBILIDADE NO SETOR ELÉTRICO	50
4.3	CONCEPÇÃO DO PROBLEMA	52
4.4	MODELAGEM.....	54
4.4.1	ETAPA 1 – CÁLCULO PELOS MÉTODOS TRADICIONAIS	54
4.4.2	ETAPA 2 – ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE INCERTEZA.	55
4.4.3	ETAPA 3 – INCORPORANDO A FLEXIBILIDADE.	59
4.4.4	ETAPA 4 – TOMADA DE DECISÃO.	62
4.5	ANÁLISE DOS PARÂMETROS.....	63
5	<u>CONCLUSÕES</u>	66
5.1	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO.....	66
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	69
	ANEXO I – METODOLOGIA DE CÁLCULO DO CUSTO MÉDIO PONDERADO DE CAPITAL	72
	ANEXO II – ÁRVORES DE EVENTOS DAS ALTERNATIVAS POR MÉTODO.....	80
	ANEXO III – ÁRVORES DE VALORES DA OPÇÃO DAS ALTERNATIVAS POR MÉTODO	83
	ANEXO IV – ÁRVORES DE DECISÃO DAS ALTERNATIVAS POR MÉTODO.....	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Investimento é definido como o ato de incorrer custo imediato na expectativa de recompensas futuras (DIXIT; PINDYCK, 1994). No ambiente empresarial, investimentos são considerados como o primeiro passo nas atividades de geração de valor. Portanto, se torna importante a ciência que estuda os métodos e técnicas para decisão e planejamento dos investimentos. Decisões de investimento são tomadas em todos os instantes, a questão é se estas decisões são as que trarão maior retorno para os empreendedores.

Ainda segundo Dixit e Pindyck (1994) todo investimento possui três características: irreversibilidade, incerteza e *timing*. A irreversibilidade se caracteriza pela capacidade de reaver o montante de capital investido no momento do início do projeto. Muitos investimentos são completamente irreversíveis, ou seja, uma vez que se opta pelo início do projeto não haverá mais a opção de retornar o capital. Esse é o caso de investimentos em propaganda, ou em máquinas, onde o valor venal após o uso é insignificante. Portanto, quando o projeto é irreversível o tempo de espera para saber se o projeto trará retorno tem valor, este é um caso de opção de espera.

Outra questão acerca dos investimentos é a incerteza. Um projeto pode ter inúmeras incertezas como o preço futuro do ativo no mercado, ou os custos de produção que também podem variar de acordo com o preço de aquisição de matéria prima, ou ainda a incerteza do valor de mão de obra. Todos estes fatores, e outros mais podem ser decisivos no sucesso do projeto.

O *timing* é a terceira e última característica do investimento, mas que também está presente nas outras duas. Certos investimentos são do tipo “agora ou nunca”, porém a grande maioria não o é. Este é um fator que cabe a gerência decidir: qual é o melhor momento para se investir? Se todas as informações atuais são suficientes, ou se é o caso de esperar até que alguns pontos sejam definidos. Sempre há um momento ótimo para o início de projeto. Encontrar este ponto ótimo é um dos objetivos de qualquer tomador de decisão, e o cálculo de opções reais revela o valor de cada opção ao longo do tempo.

Em análise de investimentos, geralmente a decisão é tomada de acordo com os métodos tradicionais do Fluxo de Caixa Descontado (FCD). Porém estes investimentos possuem valores de opções intrínsecos, como o valor de espera por novas informações, que

geralmente são conhecidos pelos tomadores de decisão, mas que são dificilmente mensuráveis, pois se tratam de análises qualitativas e subjetivas. Por este motivo, os gerentes costumam chamar este custo de oportunidade de “valor estratégico” (BRANDÃO, 2002).

Esse “valor estratégico” tem grande importância na tomada de decisão, pois um projeto que é considerado inviável pelos métodos tradicionais, pode vir a ser um projeto com grande potencial de retorno, consideradas as suas flexibilidades gerenciais.

Ainda de acordo com Brandão (2002), quando existem significativas flexibilidades gerenciais como a de adiar, abandonar, expandir, suspender ou retomar um projeto com investimento irreversível em condições de incerteza, o método das opções reais pode elevar a valores substancialmente maiores que os determinados pelos métodos do fluxo de caixa descontado. A implicação disso é que os métodos tradicionais tendem a subestimar projetos que apresentem opções.

Desta forma a teoria de opções reais (TOR) acaba por ser uma ferramenta complementar aos métodos do FCD, não eliminando seu valor como métodos de valoração de projetos. Minardi (2000) complementa que, em projetos onde não haja incertezas, estes métodos tradicionais podem ser perfeitamente aplicados, estimando de forma correta tais projetos.

Dentro da teoria de opções reais os métodos para cálculo do valor da opção mais disseminados são o modelo Black & Scholes e o modelo da árvore binomial, os quais requerem cinco variáveis em sua definição: valor presente dos fluxos de caixa futuros, valor dos investimentos, taxa de desconto, tempo do investimento e a volatilidade do projeto. As quatro primeiras são também utilizados pelos métodos tradicionais, pode-se então afirmar que a chave para obtenção do valor da flexibilidade está associada à quinta variável, a volatilidade.

Volatilidade é a única variável adicionada às variáveis utilizadas pelos métodos tradicionais de avaliação para cálculo da flexibilidade por opções reais, porém é a variável que apresenta maior dificuldade em ser determinada, e a mais complexa no que tange aos parâmetros de entrada (ESCHENBACH *et. al*, 2007).

Neste contexto se torna necessário não só o estudo dos mecanismos do cálculo pelos modelos para obtenção da flexibilidade acima citados, mas como também a maneira que outros autores na área vêm utilizando-os para calcular o valor da flexibilidade de cada projeto especificamente.

Copeland e Tufano (2004) afirmam ainda que muitos artigos já foram escritos sobre a teoria de precificação de opções reais. Todavia as aplicações de Opções Reais (OR) em

problemas práticos são limitadas pela complexidade matemática da abordagem, pela suposição de teorias restritivas necessárias, e falta de apelo intuitivo. Essas são as colocações de grande parte dos autores da área. Neste contexto, o desenvolvimento deste trabalho se mostrou pertinente em sua aplicação da TOR em problema real de investimentos no setor elétrico. Foi então avaliado um problema já analisado pelas métricas de avaliação de investimentos, a fim de se verificar o impacto da aplicação de diferentes técnicas de obtenção da volatilidade.

1.2 Objetivos e justificativa do trabalho

A aplicação da análise de investimentos no Setor Elétrico Brasileiro (SEB) se justifica principalmente devido ao aporte de capital na maioria dos projetos, assim como a característica de irreversibilidade do investimento.

Outra característica observada no SEB é a alta volatilidade do preço da energia no mercado spot, por se tratar de uma matriz energética fortemente ligada à produção de energia hidrelétrica, o preço da energia é muito dependente da afluência aos reservatórios que contribui para o incremento da volatilidade. Para proteger contra esta volatilidade são feitos contratos de longo prazo, que asseguram certa previsibilidade nos preços em relação a cenários futuros. Portanto, a análise minuciosa da questão da volatilidade, onde são consideradas as variáveis de incerteza, é imprescindível para cada projeto do setor, pois pode variar de acordo essas características.

A questão da regulação no setor é um ponto diferenciado deste segmento, pois afeta diretamente as decisões de investimento, uma vez que o governo pode vir a influenciar nas regras estabelecidas, e em via de regra, lançar mão de sua capacidade para fazer com que o setor atenda a questões que sejam de interesse público da sociedade, tornando o ambiente diferente de um ambiente de livre mercado.

Por este motivo se torna particularmente interessante o estudo da avaliação de investimentos no SEB. Existe no setor uma série de restrições, incertezas em investimentos a serem realizados, em uma atividade que é essencial para a população.

Considerando estas premissas, o objetivo do trabalho é realizar um estudo sobre o método de cálculo da flexibilidade, a forma de obtenção dos parâmetros de incerteza e as aplicações da TOR no setor elétrico. Tendo como resultado um viés de cálculo para aplicação de opções reais em problemas do setor de distribuição, bem como a obtenção da volatilidade neste projeto específico, validando o método pela solução de um exemplo real.

Ademais este estudo é resultado de uma necessidade real da empresa Cemig Distribuição, por meio do qual veio a ser firmado um trabalho de pesquisa e desenvolvimento (P&D). O objetivo final desse P&D é a elaboração de um software que possa ser utilizado por todo o pessoal da área de planejamento, como mais um critério de auxílio à decisão, facilitando assim o uso da teoria de opções reais. Todos os cálculos utilizados no desenvolvimento do software podem ser vistos no capítulo 4 onde são apresentados o método proposto baseado na literatura, juntamente com a resolução de um projeto de investimento real.

1.3 Estrutura do trabalho

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica de Opções Financeiras e os modelos aplicados. Posteriormente é mostrada a teoria que fundamenta a aplicação do modelo binomial e árvores de decisão para opções reais. Neste mesmo capítulo é desenvolvida a questão da volatilidade, principal parâmetro de opções a ser analisado neste trabalho. E por fim, os métodos de cálculo por opções reais são apresentados nesta seção.

No capítulo três é apresentada a situação e estruturação atual do SEB, seguida de uma revisão das aplicações de opções reais para o setor, separados por geração e transmissão/distribuição.

No quarto capítulo é discutida a questão da metodologia do trabalho, e também o método utilizado como viés para problemas do setor. Em seguida é realizada a aplicação de tal método em um problema real do SEB, comparando analiticamente os resultados obtidos com o método apresentado, e as diferentes abordagens dos parâmetros que influenciam o resultado.

A conclusão pode ser vista no capítulo cinco, onde as principais contribuições do trabalho são apresentadas, juntamente com as sugestões para trabalhos futuros.

2 A BASE DE OPÇÕES REAIS E VOLATILIDADE

2.1 Introdução

Como mencionado anteriormente, as flexibilidades gerenciais são avaliadas de acordo com a TOR, uma ferramenta baseada em Opções Financeiras, que através das incertezas futuras quantifica o valor das melhores decisões de um projeto.

Dessa forma, torna-se importante este capítulo que aborda toda a teoria de opções financeiras e seus pressupostos, que validam posteriormente a formulação matemática das opções reais.

2.2 Opções Financeiras

Uma opção financeira de compra proporciona a seu titular o direito de comprar um ativo em determinada data por certo preço, já uma opção de venda dá a seu titular o direito de vender um ativo em certa data por determinado preço (HULL, 2006).

Segundo Ross, Westerfield e Jaffe (2002) opções financeiras são contratos estabelecidos, que visam à venda ou compra de um ativo objeto, em certa data ou período, por um preço denominado preço de exercício. Para que um agente lance uma opção de compra ou venda, e assim assuma obrigações com o comprador desse contrato, ele exige um pagamento que remunere o risco assumido, chamado de prêmio da opção.

Desta forma, opções financeiras são consideradas derivativos, pois os valores destes contratos derivam da expectativa de valor futuro de outros ativos.

Um fator importante neste ponto é a definição da notação dos parâmetros utilizados no desenvolvimento do estudo de opções financeiras. Será utilizada a notação utilizada por Hull (2006), conforme se segue.

S : preço atual da ação;

X : preço de exercício da opção;

T : tempo para vencimento da opção;

S_T : preço da ação no instante T ;

r : taxa de juros livre de risco;

c : prêmio pago pela opção de compra;

v : prêmio pago pela opção de venda;

σ : volatilidade da ação.

No mercado de opções existe uma relação de assimetria onde o comprador ou titular (detentor de uma posição comprada ou *long position*) de uma opção possui direitos, e o vendedor ou lançador (detentor de posição vendida ou *short position*) possui obrigações em relação a esse comprador.

Exemplificando essa relação de assimetria, considerando uma opção que tenha como prêmio \$5 e valor de exercício \$100, pode-se observar na figura 2.1(a) a relação lucro e valor da ação, na data de vencimento, para o comprador de uma opção de compra, verifica-se que essa reta é inversamente proporcional a reta no gráfico (c) onde está representada a mesma relação para o vendedor dessa opção de compra. De forma análoga, está representa a relação para o comprador de uma opção de venda na figura 2.1(b), e para o vendedor de uma opção de venda dessa mesma ação na figura 2.1(d).

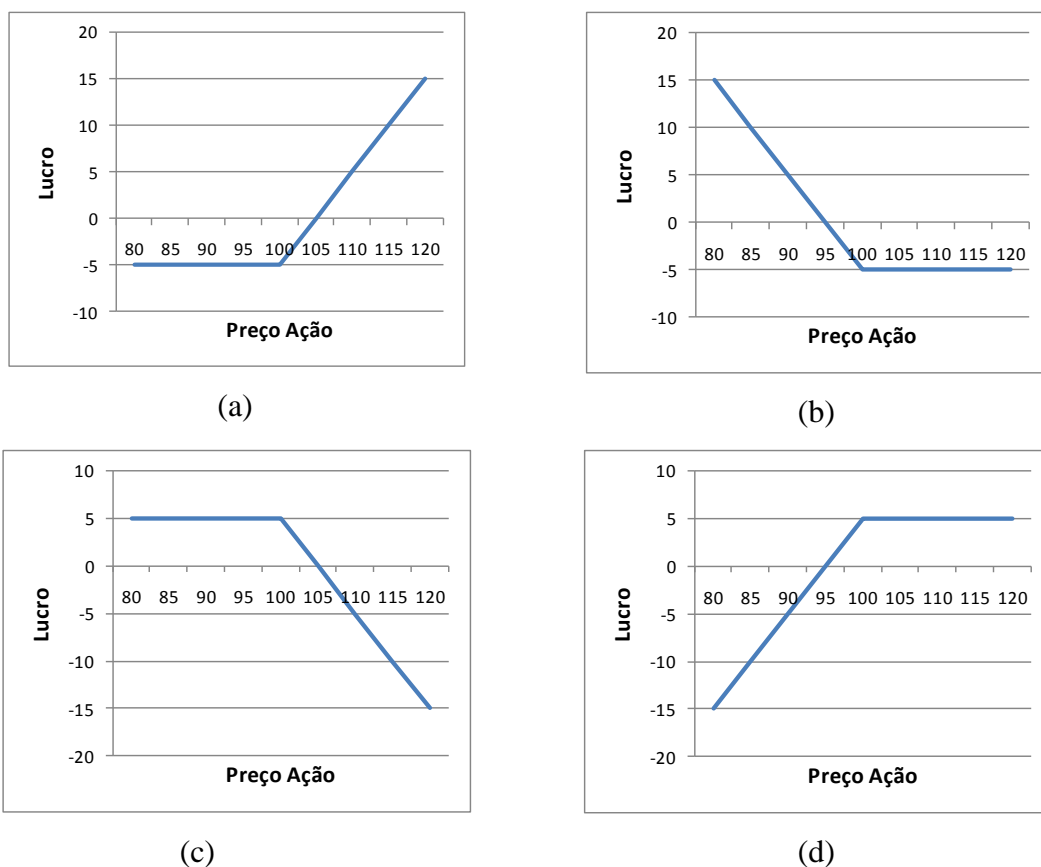


Figura 2.1 – Lucro x Preço ação na data de exercício

Essa relação elucidada o fato que, o titular da opção só irá exercer o contrato caso lhe for vantajoso, maximizando o seu resultado de acordo com a equação 2.1, ao contrário deixará a opção expirar. No caso de expiração da opção, a vantagem é do lançador da opção que irá embolsar o montante referente ao prêmio do contrato. Isso revela a característica de expectativas contrárias entre os agentes do contrato, enquanto uma parte acredita que o valor do ativo objeto deverá ser maior no futuro, a outra acredita do decréscimo deste.

$$\max (X - S_T; 0) \quad 2.1$$

Portanto se torna essencial o calculo do prêmio da opção de forma que não haja a possibilidade de arbitragem, considerando uma taxa livre de risco juntamente com a incerteza (volatilidade) futura em relação a esta ação. A partir dessas premissas foram desenvolvidos os modelos de precificação de ações como o Black & Scholes (B&S) e o Binomial.

2.3 Modelo de Avaliação de Opções Financeiras

Na literatura são encontrados dois principais modelos para obtenção do valor do prêmio de opções financeiras. Neste tópico é discutido sobre esses modelos, e também sobre as premissas consideradas para suas utilizações.

2.3.1 O modelo Black & Scholes

Em 1973, Black & Scholes estabeleceram as bases para a teoria das opções financeiras apresentando um modelo de precificação de opções no artigo *The Pricing of Options and Corporate Liabilities*. Neste artigo é aplicado o conceito de opções para a estrutura de capital de uma empresa, onde o débito é visto como uma opção, considerando uma carteira livre de risco. Este modelo assume que a distribuição das probabilidades de um ativo é lognormal, descrito pelo valor esperado (média) e pela volatilidade (desvio padrão da taxa de variação do ativo, por unidade de tempo). Todavia a fórmula não depende da média dessa distribuição, apenas da volatilidade e dos parâmetros sem incerteza. Tanto a fórmula da opção de compra, quanto a de venda podem ser vistas nas equações 2.2 e 2.3.

$$c = S \times N(d_1) - X \times e^{-rT} \times N(d_2) \quad 2.2$$

$$v = X \times e^{-rT} \times N(-d_2) - S \times N(-d_1) \quad 2.3$$

Sendo:

$N(d_n)$ = Função da distribuição normal acumulada padronizada

$$d_1 = \frac{\ln(S/X) + (r + \sigma^2/2) \times t}{\sigma \times \sqrt{t}} \quad 2.4$$

$$d_2 = \frac{\ln(S/X) + (r - \sigma^2/2) \times t}{\sigma \times \sqrt{t}} = d_1 - \sigma \times \sqrt{t} \quad 2.5$$

Porém esse modelo apresenta algumas restrições como, por exemplo, considerar que a opção calculada é uma opção europeia, ou seja, não pode ser exercida a qualquer momento antes do vencimento, ou que o ativo em questão não pode gerar dividendos. Não tardaram aprimoramentos e extensões do modelo Black & Scholes.

De acordo com Ross, Westerfield e Jaffe (2002) variações nos fatores considerados na equação do valor de opções influenciam o resultado, sendo que o efeito dessas variáveis ocorre acordo com a tabela 2.1.

	Opção de Compra	Opção de Venda
Valor do ativo-objeto (preço da ação)	+	-
Preço de exercício	-	+
Volatilidade da ação	+	+
Taxa de juros	+	-
Prazo até o exercício da opção	+	-

Tabela 2.1 – Fatores que afetam valores de opções americanas

Os sinais: positivo e negativo indicam o efeito das variáveis sobre o valor das opções. Por exemplo, quanto maior o valor do ativo, maior o valor da opção de compra, e menor o valor da opção de venda. Do mesmo modo um aumento na volatilidade da ação implica em uma variação positiva do valor da opção de compra e também da opção de venda.

2.3.2 O Modelo Binomial

O modelo Binomial desenvolvido por Cox, Ross e Rubinstein (1979), é um modelo de opções para o tempo discreto. A cada período o ativo só pode assumir um valor de duas alternativas de subida ou descida, com probabilidades q e $1-q$, respectivamente.

De forma a generalizar o caso, e desenvolver a metodologia para o modelo binomial inicialmente de passo único, assume-se uma ação, cujo preço é S , juntamente com uma opção

c desta mesma ação, que tenha um período T até a sua maturidade. Considerando tempo discreto e o período único da data atual até a expiração, sendo que na data de vencimento a ação possa assumir apenas dois valores, um com incremento S_u e outro com decréscimo S_d . Sabe-se então que, o valor da opção irá variar de acordo com o valor assumido pela ação na data de maturidade.

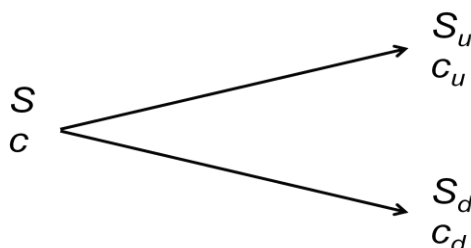


Figura 2.2 – Valor da ação e da opção numa árvore binomial de passo único

2.3.3 Pressupostos do Modelo Binomial

i. Probabilidade neutra ao risco

É importante introduzir nesse momento o conceito de portfólio replicado. Um portfólio replicado garante ao seu investidor um retorno garantido (PARK, 2007). Portanto é necessário para se formar um portfólio, em que o retorno no próximo período seja sabido, compor um mix de ativos que sejam diretamente ligados e opostos. Um exemplo clássico é a compra de uma ação, e a venda de opções de compra desta mesma ação.

A partir deste conceito, pode-se montar um portfólio livre de risco composto de 1 ação e Δ opções de compra da ação, na data 0. Sabe-se que na data 1 esse portfólio poderá assumir apenas dois valores, para variação positiva (*up*) do valor da ação no mercado será $u \times S - \Delta \times c_u$, e no caso de variação negativa (*down*) será $d \times S - \Delta \times c_d$, a probabilidade objetiva de ocorrência do valor de subida é q , e de forma análoga a probabilidade de ocorrer o valor de descida é $1 - q$. Sendo S o valor do ativo na data 0, u e d os multiplicadores do movimento de subida e descida da ação, c_u e c_d os valores da opção no caso de subida ou descida respectivamente.

Sabe-se que na data 0 o valor deste portfólio é $S - \Delta \times c$, então pode-se concluir a equação 2.6 de igualdade, baseada na premissa de que os retornos são previamente sabidos, não existe possibilidade de arbitragem, e a taxa aplicada é a taxa livre de risco.

$$S - \Delta c = \frac{uS - \Delta c_u}{R} = \frac{dS - \Delta c_d}{R} \quad 2.6$$

Sendo $R = r + 1$, e r a taxa livre de risco. Resolvendo essa igualdade têm-se as seguintes expressões:

$$\Delta = \frac{S(u - d)}{(c_u - c_d)} \quad 2.7$$

$$c = \frac{S(R - u) + \Delta c_u}{R\Delta} \quad 2.8$$

Substituindo a equação 2.7, na equação 2.8, pode-se chegar à equação 2.9, para o valor da opção na data 0.

$$c = \frac{c_u \left(\frac{R - d}{u - d} \right) + c_d \left(\frac{u - R}{u - d} \right)}{R} \quad 2.9$$

Onde:

$$p = \left(\frac{R - d}{u - d} \right) \quad 2.10$$

$$1 - p = \left(\frac{u - R}{u - d} \right) \quad 2.11$$

$$c = \frac{c_u p + c_d (1 - p)}{R} \quad 2.12$$

Nota-se que para se obter o valor da opção de compra de uma ação na data 0, é apenas necessário saber a taxa livre de risco, os incrementos de subida e descida, e os possíveis valores da opção de compra na data 1. Outro fator preponderante é a demonstração de que as probabilidades objetivas não interferem no valor encontrado para o preço da opção, sendo assim desnecessário ajustar a taxa de desconto ao risco para calcular o valor da opção (PARK, 2007).

Da mesma forma foi possível encontrar a probabilidade neutra risco que nessa demonstração é representada por p e $1 - p$, e que difere da probabilidade objetiva no sentido de que não é uma probabilidade verdadeira, é apenas uma probabilidade que reflete as reais chances de qualquer fluxo particular ocorrer. Copeland e Antikarov (2001) afirmam que a probabilidade neutra ao risco é simplesmente uma conveniência matemática destinada a ajustar os fluxos de caixa, para que estes possam ser descontados a uma taxa livre de risco, e que essas probabilidades são também conhecidas como probabilidades ajustadas ao risco ou probabilidade de *hedge*.

Se o tempo for considerado como uma variável contínua na equação, deve-se então assumir as equações 2.13 e 2.14, para cálculo dos valores da probabilidade neutra ao risco e da opção.

$$p = \left(\frac{e^{rt} - d}{u - d} \right) \quad 2.13$$

$$c = e^{-rt}(c_u p + c_d(1 - p)) \quad 2.14$$

ii. Modelagem Matemática de Previsão com Incerteza

No ato de análise de investimentos de projetos, é de suma importância a previsão dos possíveis cenários econômicos futuros e as necessidades de agentes econômicos nos próximos períodos, pois esses fatores influenciam diretamente as receitas, que irão remunerar as atividades empreendedoras dos investidores. Todavia o problema encontrado nesse âmbito é que esses fatores são exógenos à firma e envolvem um grau de incerteza e aleatoriedade.

Nesse contexto os processos estocásticos conseguem definir o comportamento de uma variável que contém aleatoriedade e imprevisibilidade. Segundo Dixit e Pindyck (1994) um processo estocástico é uma variável que se desenvolve ao longo do tempo de uma maneira parcialmente aleatória. O processo estocástico pode ainda ser discreto ou contínuo no que se refere à variável de tempo.

Alguns processos estocásticos satisfazem à propriedade de Markov, como é o caso do *Random Walk*. A propriedade de um processo de Markov é que somente o valor presente de uma variável é relevante para prever o futuro, alguns autores citam ainda que o processo de Markov está diretamente associado à forma fraca de eficiência de mercado, ou seja, todas as

informações relevantes sobre o passado da variável já estão presentes no valor atual. A principal característica desse processo é que ele simplifica a análise.

- Processo de Wiener – Movimento Browniano

De acordo com Dixit e Pindyck (1994), o processo de Wiener também conhecido como Movimento Browniano, é um processo estocástico de tempo contínuo que satisfaz a três importantes propriedades:

1º- É um processo de Markov, isso significa que a distribuição de probabilidade de todos os valores futuros, depende somente do valor atual da variável.

2º- Possui incrementos independentes, ou seja, a distribuição de probabilidade em qualquer intervalo de tempo é independente, qualquer que seja a distribuição de probabilidade de outros intervalos de tempo.

3º-Mudanças no processo sobre qualquer intervalo de tempo são normalmente distribuídas, com uma variância que aumenta com o intervalo de tempo.

Portanto uma variável representada através de um processo de Wiener, pode ser representada pelas equações 2.15 e 2.16.

$$\Delta z = \varepsilon_t \sqrt{\Delta t} \quad 2.15$$

$$dx = \alpha dt + \sigma dz \quad 2.16$$

Onde a equação 2.15 representa a variação da variável em um curto espaço de tempo, e a equação 2.16 representa a mais simples generalização do processo de Wiener.

iii. Análise por Árvore de Decisão

No método de análise por árvore de decisão (AAD), a flexibilidade pode ser visualizada através da modelagem em tempo discreto dos instantes onde são tomadas as decisões, que permitem a maximizar o valor do projeto de acordo com as informações disponíveis nos referidos instantes (BRANDÃO, 2002).

Segundo Ross, Westerfield e Jafee (2002) tal método é uma maneira gráfica de visualização dos prováveis eventos futuros decorridos das decisões, das incertezas, e dos eventos aleatórios que podem ocorrer ao longo do projeto. De forma que permite ao investidor um melhor entendimento dos riscos envolvidos, e do controle necessário em cada instante.

Guthrie (2009) propõe uma série de passos para a obtenção do valor de um projeto por opções reais. O primeiro deles é o entendimento de como as ações do decisor podem influenciar no desenvolvimento do projeto. É então nesse momento que as árvores de decisão são implementadas. Posteriormente são atribuídos valores a cada ação, o que origina a AAD. Mais adiante no capítulo 4 serão apresentados os passos para obtenção do valor de projetos através da teoria de opções reais.

De acordo com Avila (2009) graficamente nos ramos de uma árvore de decisão devem ser inseridas as probabilidades após os nós de incerteza (graficamente representados por um círculo), os valores de investimentos nos nós de decisão (representados por um quadrado), e os retornos do investimento no final dos ramos.

Já Brasil *et al.* (2007) apontam para apenas duas restrições da aplicação da AAD. A primeira, de que as flexibilidades são descontadas a uma taxa ajustada ao risco, enquanto a taxa utilizada deveria ser a isenta de risco, uma vez que no momento da decisão as incertezas já estariam resolvidas. A segunda é que essa análise não garante um valor maior ou igual a zero para as flexibilidades, enquanto a análise por opções reais sempre resultam em um valor para as flexibilidades embutidas.

Copeland e Antikarov (2001) concluem que o método de análise AAD considera a flexibilidade no processo de tomada de decisão, mas de maneira inadequada, supondo que a taxa de desconto é constante, o que não ocorre. Pois a incerteza muda a cada período à medida que o tempo se passa, devido à variação dos retornos em vários momentos da árvore de decisão.

De forma mais simplista Guthrie (2009) afirma que os fluxos de caixa futuros dependem das decisões dos gerentes no futuro, e que estas por sua vez dependem das informações disponíveis, de tal maneira que essa probabilidade resulta em um potencial risco. Se a AAD toma uma taxa de desconto ajustada ao risco errada, conseqüentemente não irá obter o real valor de mercado do projeto analisado.

Pode-se então inferir que esse método é bem empregado no momento de desenho da evolução do projeto ao longo do tempo e das conseqüências de cada iniciativa dentro do projeto como um todo. No entanto, se torna uma ferramenta fraca no âmbito de mensurar o real valor dos projetos e suas flexibilidades.

Todavia Noronha (2009) afirma que não é adequado avaliar que o uso da abordagem de AAD é inadequado para a avaliação de problemas de opções reais. Ela conclui que o uso de probabilidades neutras ao risco resolve o problema de desconto dos fluxos caixa futuros,

fazendo com que estes sejam trazidos para data zero pela taxa livre risco, e os riscos sejam incluídos nas probabilidades de cada estado da natureza.

2.4 Opções Reais

Opções Reais avaliam o futuro como um evento dinâmico. Sendo uma ferramenta que considera todos os acontecimentos e a flexibilidade gerencial perante as mudanças nos cenários, analisando a cada momento quais são as opções mais vantajosas. A principal diferença entre opções reais e opções financeiras é que, enquanto o ativo objeto das opções financeiras são os papéis e títulos negociados em bolsa, o objeto das opções são os ativos físicos das empresas como máquinas, projetos, patentes, etc. (MUN, 2002).

Neste contexto, opções reais surge como uma maneira inovadora de pensar na avaliação de ativos reais, pois se utiliza do modelo de fluxo de caixa descontado, complementando-o com o conjunto conceitual de opções financeiras (BRASIL *et al.*, 2007).

Brandão (2002) afirma que, ao realizar o investimento, a empresa perde a opção de adiar, e assim de esperar por novas informações que possam afetar os fluxos de caixa futuros, e por conseqüência a sua decisão. Então tomar uma decisão de investimento tem um custo de oportunidade, que deve ser considerado na decisão. Portanto se este valor é perdido, o investimento deve ser analisado de forma que o seu valor deve cobrir não só o valor inicialmente investido, mas como também o custo de oportunidade (opção de investir) que é perdido no momento da decisão de investimento.

Neste ponto, opções reais faz uso da teoria desenvolvida através dos modelos de opções financeiras, para desenvolver sua metodologia de cálculo para valor da flexibilidade em projetos reais.

Porém, segundo Copeland e Antikarov (2001) é praticamente impossível encontrar um ativo com preço de conhecimento público que seja perfeitamente correlacionado com projetos de ativos reais. Por esta razão é utilizada a hipótese de negação do ativo negociado (MAD – *Marketed Asset Disclaimer*), que consiste em utilizar o valor presente líquido tradicional como a melhor estimativa não tendenciosa do valor de mercado do projeto.

Esta suposição foi construída a partir da necessidade de se encontrar um valor aceitável para o ativo subjacente real. Os primeiros casos de avaliação de opções reais dependiam de uma analogia com os preços de *commodities* no mercado financeiro com suas volatilidades. Porém ficou claro em um exemplo clássico de mineração, que o valor de uma mina de ouro, não era perfeitamente correlacionado com o valor da *commodity* ouro no

mercado. Uma vez que os riscos e as características específicas de cada unidade de mineração não se refletiam no preço do ouro.

Dessa forma Copeland e Antikarov (2001) concluem que nada é melhor correlacionado com o projeto, do que seu próprio valor presente líquido (VPL). Na seqüência será abordado com mais aprofundamento a questão da utilização do VPL como melhor apontamento do valor do projeto, assim como a metodologia de cálculo da volatilidade em projetos.

Eschenbach *et al.* (2007) afirmam que opções reais já foram aplicadas em diversos exemplos, como teoria dos jogos e análise de decisão. Assim como também já foram incorporadas abordagens como *score cards*. Porém os detalhes matemáticos são um desafio principalmente no que tange à volatilidade.

2.4.1 O Modelo Binomial para aplicação em Opções Reais

Através do desenvolvimento da metodologia de probabilidade neutra ao risco e do modelo binomial de passo único, pode-se reescrever a equação binomial para projetos reais.

$$F = \frac{p \times F_u + (1 - p) \times F_d}{R} \quad 2.17$$

Onde,

$$F_u = \text{Max}(u \times V - I; 0) \quad 2.18$$

$$F_d = \text{Max}(d \times V - I; 0) \quad 2.19$$

$$p = \left(\frac{e^{rt} - d}{u - d} \right) \quad 2.20$$

Sendo,

F = Fluxo de caixa estendido, incluindo a opção de flexibilidade em cada período;

F_u = Valor do projeto se o valor bruto aumenta em valor;

F_d = Valor do projeto se o valor bruto diminui em valor;

V = Valor bruto do projeto;

p = Probabilidade neutra ao risco;

$R = 1 +$ Taxa livre de risco no período;

$u =$ Mudança percentual no valor bruto entre períodos, se o valor bruto aumenta;

$d =$ Mudança percentual no valor bruto entre períodos se o valor bruto diminui.

Porém o método binomial para precificação de ativos descrito na equação a considera apenas um período. É importante salientar que normalmente as empresas consideram os seus projetos em n períodos, por esse motivo Cox, Ross e Rubinstein (1979) mencionam a necessidade de uma fórmula binomial geral para se tratar de problemas de períodos muito grandes, como pode ser visto na equação 2.21.

Cox, Ross e Rubinstein (1979) recorrem à teoria de probabilidade para desenvolver esta abordagem binomial para apreçamento de opções reais, que emprega uma matemática mais simplificada para alcançar resultados isomórficos aos do cálculo do Itô, utilizado pelo modelo Black & Scholes (1973). Sendo o diferencial que a matemática discreta é de natureza algébrica e de entendimento mais fácil, do que as equações diferenciais estocásticas (COPELAND & ANTIKAROV, 2001).

$$C_0 = (S \times \Phi[n \geq a|T, p]) - (X \times R^{-T} \times \Phi[n \geq a|T, p']) \quad 2.21$$

Onde,

$$p = \left(\frac{R - d}{u - d} \right) \quad 2.22$$

$$p' = \left(\frac{u}{R} \right) \times p \quad 2.23$$

Onde,

$C_0 =$ Valor da opção de compra;

$a =$ Número mínimo de movimentos de subida que a ação deve ter nos próximos n períodos para a opção terminar *in the money*. (o menor número inteiro não negativo e maior que $\frac{\log(X/S \times d^n)}{\log(u/d)}$);

$p =$ Probabilidade neutra ao risco;

$n =$ Número n de períodos até o vencimento;

$S_0 =$ Preço atual do ativo;

X = Preço de exercício;

$R = 1 + r$ (Taxa livre de risco para um período);

$\emptyset[\dots]$ = Distribuição binomial complementar;

Sendo o primeiro termo da equação 2.21 entre parênteses o valor referente ao ativo subjacente, multiplicado pela probabilidade binomial complementar, que neste caso opera como um coeficiente de hedge. Já a segunda parcela da mesma equação representa o preço de exercício descontado para a data zero, também multiplicada pela probabilidade binomial quando a opção está *in the money*. Neste caso a notação matemática do p' é utilizada a fim de formar o portfólio livre de risco constituído de uma unidade do ativo subjacente e m opções de compra de ativo.

Dois fatores são importantes da fórmula binomial de precificação desenvolvida por Cox, Ross e Rubinstein (1979): u e d que são os multiplicadores dos movimentos de subida (*up*) e descida (*down*) do valor bruto no início do período. Estas fórmulas descritas nas equações 2.24 e 2.25, são baseados na volatilidade (σ) do valor do ativo objeto, e no número n de intervalos até a expiração no período tempo T .

$$u = e^{\sigma\sqrt{T/n}} \quad 2.24$$

$$d = e^{-\sigma\sqrt{T/n}} \quad 2.25$$

Estes movimentos ascendentes descendentes são multiplicativos geométricos. Considerando que o valor inicial do ativo subjacente é positivo, os retornos futuros na grade binomial variam entre zero e infinito, a medida que o numero de períodos aumenta. Sendo assim a distribuição de probabilidade se aproxima de uma distribuição logarítmica normal, quanto maior o número de períodos até o vencimento.

2.5 Volatilidade em Opções Reais

De acordo com Mun (2002), um dos parâmetros mais difíceis de entrada para a estimativa do valor de opções reais, é a volatilidade dos fluxos de caixa. Portanto, é importante citar sucintamente os principais métodos utilizados em estimativas da área, assim como a abordagem consolidada da incerteza, que também de acordo com Copeland e Antikarov (2001), é o método mais indicado para uso em opções reais.

2.5.1 Abordagem dos retornos dos fluxos de caixa logarítmicos

Este método é utilizado principalmente para calcular a volatilidade dos ativos líquidos, tais como ações de opções financeiras, e outros ativos negociados, como o preço do petróleo e da eletricidade. É principalmente utilizado por possuir facilidade computacional, transparência, e flexibilidade de modelagem. Além disso, não é necessária simulação para obter uma estimativa da volatilidade. No entanto, quando aplicado em um modelo de fluxo de caixa descontado com um número pequeno de períodos irá superestimar a volatilidade, e também não poderá ser utilizado quando ocorrerem fluxos de caixa negativos.

A forma de calculo é a transformação de uma série de fluxos de caixas futuros em retornos relativos, a partir dos quais é calculado o logaritmo natural, o desvio padrão desses logaritmos é a volatilidade do ativo gerador dos fluxos de caixa.

$$Volatilidade = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad 2.26$$

2.5.2 GARCH - *Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity*

Este modelo, assim como a abordagem dos retornos dos fluxos de caixa logarítmicos, é utilizado na estimativa de ativos líquidos e negociáveis. Tendo como principal vantagem a sua rigorosa análise estatística, sendo então possível encontrar a melhor curva de volatilidade, fornecendo diferentes estimativas ao longo do tempo. Todavia é necessária uma grande quantidade de dados, técnicas avançadas de modelagem econométrica e perícia, pois a análise dessa abordagem é altamente suscetível à manipulação do usuário.

$$y_t = x_t \gamma + \varepsilon_t \quad 2.27$$

$$\sigma_t^2 = \omega + \alpha \varepsilon_{t-1}^2 + \beta \sigma_{t-1}^2 \quad 2.28$$

A primeira equação descreve o comportamento da variável dependente (y_t), em função da variável exógena (x_t), somado a um termo de erro (ε_t).

A segunda equação descreve a variância (σ_t^2), que depende diretamente de uma média histórica (ω), do erro padrão médio medido no último período (ε_{t-1}^2), e também da variância do período predecessor (σ_{t-1}^2).

2.5.3 Gestão de hipóteses e suposições

Esta abordagem é utilizada tanto para opções financeiras, quanto para opções reais. É bastante aplicada por ser uma abordagem simplista, em que a forma de estimar, a gestão e interpretação da volatilidade são fáceis de serem entendidas pela gerência do projeto. A desvantagem é que a estimativa de volatilidade é muito pouco acurada, sendo apenas a melhor suposição subjetiva.

2.5.4 Mercado substituto usando índices ou dados comparáveis

Esta abordagem é utilizada principalmente para comparar ativos líquidos e não líquidos, enquanto se pode obter um mercado, setor ou indústria comparável, onde os dados específicos estão disponíveis. A vantagem é a facilidade de uso quando as informações estão disponíveis, porém se torna inaplicável quando há dificuldade em se encontrar empresas e resultados comparáveis, o que pode levar a uma manipulação subjetiva e grosseira, por intuitivamente incluir ou excluir certas empresas.

2.5.5 Abordagem Consolidada da Incerteza

Este método é utilizado principalmente quando se calcula a volatilidade dos ativos com fluxos de caixa. Uma típica aplicação é em opções reais. A sua principal vantagem é incluir a capacidade de acomodar certos fluxos de caixa negativos, e a aplicação de uma análise mais rigorosa do que a abordagem dos retornos dos fluxos de caixa logarítmicos, fornecendo uma estimativa conservadora e mais precisa da volatilidade dos ativos analisados. Neste método é necessário o uso de simulação para obter a volatilidade, e não é aplicável para os ativos líquidos altamente comercializados, como os preços das ações.

i. Modelo utilizado por Copeland e Antikarov

De acordo com Copeland e Antikarov (2001), o segundo passo para a obtenção do valor de um projeto por opções reais, é a montagem da árvore de eventos, onde o conjunto de incertezas é demonstrado, e sua combinação influencia a volatilidade do projeto. O objetivo principal da árvore de eventos é a modelagem da incerteza que influencia o valor do ativo objeto ao longo do tempo.

Como na maioria dos casos as incertezas dos projetos são múltiplas, elas podem ser combinadas em uma única incerteza, por meio da distribuição dos retornos do projeto, com a análise de Monte Carlo. Esse conceito é chamado de abordagem consolidada da incerteza.

Copeland e Antikarov (2001) afirmam através do teorema de Samuelson (1965), que a taxa de retorno de um projeto se comporta de maneira aleatória, apesar dos fluxos de caixa futuros apresentarem certo padrão. Isso ocorre porque toda informação sobre o comportamento dos fluxos de caixa futuros já está refletido no valor do ativo objeto no presente e, se as expectativas se confirmarem, os investidores irão auferir exatamente o retorno esperado. Mas se o fluxo de caixa sofrer alterações de acordo com eventos aleatórios (representados pela incerteza), o retorno também irá se comportar de forma aleatória. Resumindo, a volatilidade (σ) desempenha importante papel no cálculo por opções, pois traduz as incertezas dos projetos, de forma que é então possível montar uma árvore binomial baseada no movimento geométrico browniano através das equações 2.24 e 2.25.

Isso implica que, como dito anteriormente, as incertezas referentes aos projetos podem ser combinadas, de forma a gerar uma única incerteza que influenciará diretamente nos fluxos de caixa futuros, que é a incerteza consolidada. Então, a volatilidade necessária para desenvolver a árvore binomial é a volatilidade da taxa de retorno que, como mencionado antes através do teorema de Samuelson, advém dos eventos aleatórios que em conjunto influenciam os fluxos de caixa futuros. De forma que pode ser obtida através da relação como se segue.

$$VP_t = VP_0 e^{rt} \quad 2.29$$

$$\ln\left(\frac{VP_t}{VP_0}\right) = rt \quad 2.30$$

Para efeito de cálculo é considerado $t=1$. Então se têm a seguinte igualdade.

$$\ln\left(\frac{VP_1}{VP_0}\right) = r = X \quad 2.31$$

Onde VP_1 é o valor presente dos fluxos de caixa futuros no período 1, e VP_0 é o valor presente dos fluxos de caixa futuros na data 0, representado pela equação 2.32. Com a realização da simulação de Monte Carlo (SMC) é obtido o desvio padrão da variável r (taxa de retorno do primeiro período do projeto), ou seja, a variável X que é volatilidade do projeto.

$$VP_0 = \sum_{t=0}^T \frac{FC_t}{(1 + WACC)^t} \quad 2.32$$

Sendo FC_t o fluxo de caixa futuro na data t , e o custo médio ponderado de capital ($WACC$ – *Weight Average Cost of Capital*) a taxa de retorno exigida para remuneração do capital. Tem-se a seguinte fórmula:

$$X = \ln \left(\frac{\frac{FC_1}{(1+D)^0} + \frac{FC_2}{(1+D)^1} + \frac{FC_3}{(1+D)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+D)^{n-1}}}{\frac{FC_0}{(1+D)^0} + \frac{FC_1}{(1+D)^1} + \frac{FC_2}{(1+D)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+D)^n}} \right) \quad 2.119$$

Nesta equação $D = WACC$ representa a taxa de desconto utilizada, como constante ao longo do tempo. Mun (2002) afirma que a utilização de simulação de Monte Carlo tanto para o divisor quanto o para o dividendo da equação, bem como para a taxa de desconto, irá produzir valores bem diferentes para X . Porém há críticas para essa abordagem, uma vez que a chave para obter o valor em opções reais é a variabilidade no valor presente dos fluxos de caixa futuros, e não a taxa de desconto utilizada na análise. Portanto, a forma ideal citada pelo autor para se encontrar a volatilidade nessa abordagem, é manter o divisor como um valor estático, e simular o dividendo de acordo com os parâmetros de entrada, enquanto a taxa de desconto é mantida constante. Esta abordagem reduz os riscos de medição de fluxos de caixa auto correlacionados e negativos.

ii. Modelo utilizado por Herath e Park

A sistemática utilizada por Herath e Park (2002) é similar à utilizada por Copeland e Antikarov (2001), porém diverge na aplicação da simulação de Monte Carlo. Tanto os autores Copeland e Antikarov quanto Mun (2002) pregam como dito anteriormente, que a SMC deve ser aplicada apenas ao numerador, mantendo o denominador como um valor estático do valor presente líquido do projeto. Já Herath e Park defendem a simulação em ambos os fatores da equação 2.31, o que gera um aumento significativo da volatilidade, uma vez que os eventos aleatórios são inseridos em ambas as partes da equação. Na seção 4 serão aplicadas as duas metodologias, a fim de verificar qual obtém valor mais acurado da flexibilidade de projetos do setor elétrico.

2.6 Métodos de Análise por Opções Reais

Muito se sabe sobre as vantagens de aplicação da ferramenta baseada em TOR, porém para análise correta do valor da flexibilidade, é necessário o desenvolvimento de uma série de passos a fim de obter os valores de entrada para a resolução por esta metodologia. Portanto nesta seção são apresentados os passos para cálculo do valor por opções reais, de acordo com os principais autores sobre o tema, assim como será apresentado um processo de avaliação, baseado nessas metodologias e adaptado à realidade do problema em estudo.

2.6.1 Segundo Mun

De acordo com Mun (2002) o processo de avaliação pode ser dividido em oito etapas, descritas abaixo, e que podem ser observadas na figura 2.3. Essa metodologia foi criada pelo autor através de sua experiência de campo, e implementações bem sucedidas em problemas específicos de indústrias. Por este motivo cabe ressaltar que a avaliação de OR, não necessariamente segue um padrão pré-definido, podendo ser adaptável a cada problema estudado.

- Triagem do gerenciamento qualitativo – Consiste na seleção dos projetos com viabilidade para estudo, pelos tomadores de decisão, de acordo com as estratégias da empresa. É o momento onde os vários riscos são identificados.
- Séries temporais, previsão e regressão – É realizada a previsão a partir de séries temporais, ou regressão multivariada de dados históricos. Todavia outros métodos de previsão podem ser usados como suposições subjetivas, taxas de crescimento, opiniões de especialistas, etc.
- Análise do valor presente do projeto base – É calculado o valor presente líquido, que serve como base para qualquer análise inicial do projeto.
- Simulação de Monte Carlo – Como a análise do VPL traz apenas o valor determinístico do projeto, nessa etapa é aplicada a SMC, onde é realizada a análise de sensibilidade para predição das principais variáveis que influenciam o projeto, assim como a correlação entre essas variáveis.
- Elaboração do problema de OR – De acordo com a estratégia previamente definida pela empresa, levando em consideração todos os outros fatores identificados ao longo do processo, nesta fase são definidas as opções do problema, por exemplo, a opção de expansão, retração, troca, entre outras.

- Modelagem e análise de OR – Através do uso de SMC, o VPL estocástico apresentará uma distribuição de valores. Através dessa distribuição as decisões serão tomadas, gerando o resultado por OR.
- Otimização de portfólio e recursos – Este é uma fase opcional do projeto, onde inúmeros projetos analisados por OR são comparados, pois estes dividem recursos (investimentos) que devem ser otimizados.
- Relatório e atualização da análise – A última etapa consiste na divulgação dos resultados de forma clara e concisa, para que os tomadores de decisão possam entender e executar suas decisões baseadas nesta análise.

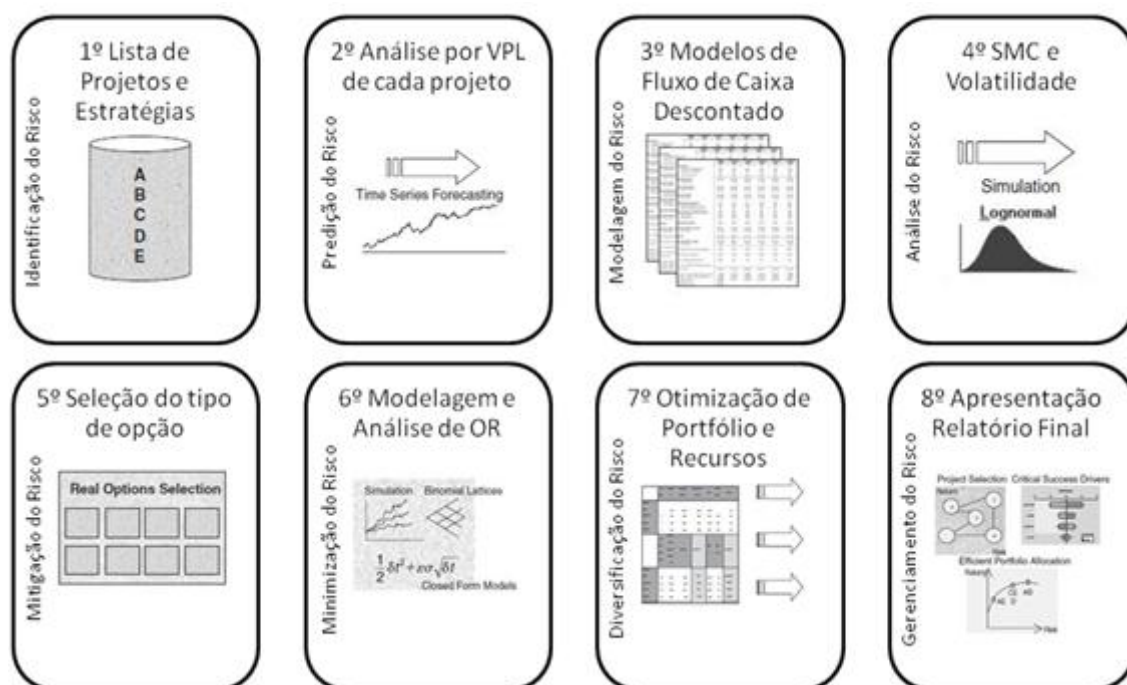


Figura 2.3 – Metodologia Mun (2002)

2.6.2 Segundo Copeland e Antikarov

Copeland e Antikarov (2001) avaliam que o processo de valoração de um projeto por opções reais consiste em quatro etapas.

- Cálculo do projeto base, valor presente sem flexibilidade aplicando o modelo de avaliação dos fluxos de caixa descontados (DCF).
- Modelagem da Incerteza por meio de árvores de eventos.
- Identificar e incorporar flexibilidade gerencial, criando uma árvore de decisões.
- Realizar a análise de opções reais.

O primeiro passo constitui na fase mais simples do processo, e consiste em lançar mão de métodos tradicionais de avaliação de investimento já difundidos no ambiente de avaliação de negócios. As técnicas mais amplamente usadas são a do Valor Presente Líquido, bem como da Taxa Interna de Retorno.

Na segunda etapa são abordadas as incertezas causais do projeto como demanda, preço, entre outros. Estas podem, ou não, ser auto correlacionadas ao longo do tempo. Estas relações podem ser facilmente modeladas nesta fase, com o uso da simulação de Monte Carlo. É também obtida nesta fase a volatilidade total do projeto, também através da SMC. Como resultado, obtém-se a árvore de eventos do ativo avaliado.

Como consequência, na terceira etapa é possível incluir os nós de decisão na árvore de evento e também a inserção da flexibilidade. Portanto é nesta fase que a flexibilidade é identificada e incorporada ao projeto, com a finalidade de responder a novas informações.

Na última etapa é aplicado o método do portfólio replicado ou probabilidade neutra ao risco, que permite através da avaliação retrospectiva, valorar a opção.

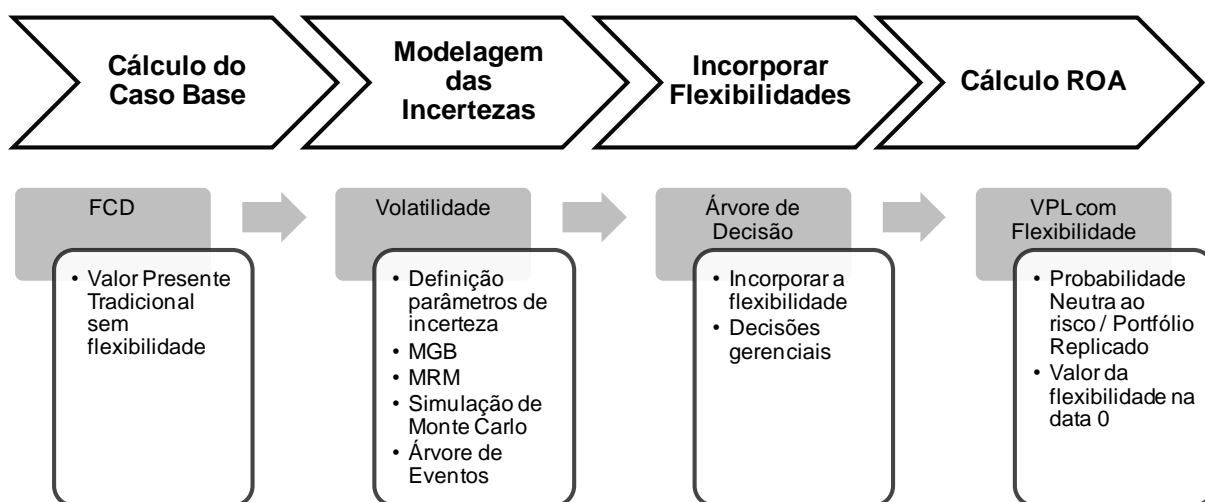


Figura 2.4 – Metodologia Copeland e Antikarov (2001)

3 Análise por Opções Reais no Setor Elétrico

3.1 Setor Elétrico Brasileiro

O setor elétrico brasileiro ao longo dos últimos anos vem apresentando significativas mudanças quanto à sua forma e organização. Primeiramente um monopólio governamental e, após anos sofrendo com a ingerência do Estado, que buscava através do serviço de fornecimento de energia sanar questões políticas e inflacionárias, veio a ser gradualmente privatizado. A privatização se deu devido à necessidade de alocação eficiente de recursos nas empresas, até então altamente deficitárias e, também, à urgência de investimentos para atendimento de uma demanda crescente.

Em vista desta necessidade, desde os anos 90 o governo vem criando a base para gerar um novo modelo institucional, onde sejam regulamentadas empresas do setor, que passam então a contar com o capital privado. Neste movimento para habilitar o novo mercado, algumas atividades antes exercidas pelo Ministério de Minas e Energia – MME, foram delegadas a outras agências com fins de melhor fiscalização e operação do setor.

Em 1996, através da lei 9.427/96, é criada a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, uma autarquia subordinada ao MME com atribuições de regular, fiscalizar e mediar atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. Posteriormente, em 1998, houve uma consolidação do processo de mudança com a Lei 9.648/98, quando houve a efetiva desverticalização da Eletrobrás, até então principal empresa que atuava no setor. Outra mudança significativa no setor, trazida por tal lei, foi a criação do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, cuja atividade é gerir a operação do sistema de potência brasileiro, e do Mercado Atacadista de Energia Elétrica – MAE, onde todos os contratos de energia devem ser registrados, atuando como um contador destes contratos.

Apesar das mudanças que vinham sendo preparadas para o novo modelo, em meados de 2001, as previsões de insuficiência de investimento para atender à crescente demanda, se confirmaram e houve o racionamento de energia (CCEE, 2009).

As Leis 10.847/04 e 10.848/04 foram responsáveis por delinear todas estas mudanças, com a criação de um órgão específico para planejamento de longo prazo do setor: a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, e a mudança do MAE para a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE. Sendo a última lei 10.848/04, a mais extensa e que redefine algumas questões anteriormente reguladas.

Segundo Galhardo (2006), o Novo Modelo do Setor Elétrico foi cerceado em 5 pilares básicos:

- Segurança no suprimento de energia, obrigando as distribuidoras e os consumidores livres a comprovarem a contratação de 100% da carga ou mercado via contratos, com lastro físico de geração. Garantindo a segurança de suprimento e criando um marco regulatório estável.
- Modicidade tarifária: deve ser alcançada com o procedimento de compra e venda de energia em leilões, com a adoção da menor tarifa.
- Livre Acesso, permitindo um tratamento isonômico aos agentes e a separação das atividades.
- Estabilidade Regulatória.
- Universalização de atendimento.

Para tanto foi tomado um conjunto de medidas que visa constituir uma reserva de segurança, com a mudança de metodologia para o cálculo da energia assegurada e despacho otimizado da matriz energética. A obrigatoriedade da contratação de energia para 100% da demanda é outra exigência do novo modelo, bem como a antecipação de 5 e 3 anos da contratação dessa energia. Outra regra estabelecida é que as previsões desta demanda podem conter um erro máximo de 3% para mais e 2% para menos, caso a demanda não se realize nessa faixa a empresa contratante será penalizada.

A modicidade tarifária contribui para o atendimento das demandas sociais e de desenvolvimento econômico. Para alcançar a modicidade foi ampliada a competição no setor de geração por meio de licitações pela menor tarifa. Assegurando assim que não sejam incorporados custos estranhos à prestação do serviço. Como medidas que atuam no sentido da modicidade tarifária, foram criados dois ambientes de contratação, estabelecida a contratação de energia conjunta por todos os distribuidores na forma de *pool* e a contratação de longo prazo, que visa diminuir os riscos e melhorar as condições de investimentos.

Outro fato importante é a criação do Ambiente Contratação Regulada – ACR, onde o *pool* de distribuidoras contrata energia de longo prazo, por meio de leilões pelo critério da menor tarifa, e do Ambiente de Contratação Livre – ACL, onde os grandes consumidores e comercializadores podem negociar livremente seus contratos com os geradores na CCEE, trazendo assim uma característica de livre mercado para os grandes consumidores.

3.1.1 Agentes Setoriais

Uma das principais características desse novo setor é a desverticalização das empresas que anteriormente agregavam diversas atividades principais. Atividades como geração (G), transmissão (T), distribuição (D) e comercialização de energia (C). Após a reforma, sabe-se que o modelo brasileiro constitui uma organização para as empresas de acordo com a Figura 3.1, e sua atual regulamentação pelo governo.



Figura 3.1 - Diagrama das Atividades do Setor Elétrico Brasileiro

Foi concluído que, devido às restrições técnicas e econômicas, que as atividades de transmissão e distribuição seriam tratadas como monopólio natural, devido à questão da não remuneração do capital, quando se trabalha com ociosidade técnica nas linhas, pois não é economicamente viável ter concorrentes nesses setores, uma vez que o custo se torna extremamente elevado e quem deve arcar com este é o consumidor final. Por tal motivo, foi determinado uma nova metodologia de rateio dos custos e livre acesso às redes, de forma a melhor remunerar essas atividades.

Por outro lado a geração de energia foi inserida no livre mercado, do ponto de vista do consumidor, pois quanto maior o número de fornecedores, produzindo energia cada vez mais eficientemente, maior será a redução do custo desta, bem como o comércio de energia, que liberalizado pode trazer ganhos com redução das tarifas de energia.

Desta forma, os agentes setoriais podem ser classificados da seguinte forma segundo CCEE (2009):

- Agentes Geradores - São autorizados ou concessionários de geração de energia elétrica, que operam plantas de geração e prestam serviços ancilares.

- Agentes de Transmissão - Agentes detentores de concessão para transmissão de energia elétrica, com instalações na rede básica.
- Agentes de Distribuição - Operam um sistema de distribuição na sua área de concessão, participando do Sistema Interligado e sendo usuários da Rede Básica. Contratam serviços de transmissão de energia e serviços ancilares do Operador Nacional do Sistema Elétrico.
- Consumidores Livres - Consumidores que têm a opção de escolher seu fornecedor de energia elétrica, conforme definido em resolução da ANEEL.
- Agentes Importadores - São agentes titulares de autorização para implantação de sistemas de transmissão associados à importação de energia elétrica.
- Agentes Exportadores- São agentes titulares de autorização para implantação de sistemas de transmissão associados à exportação de energia elétrica.
- Agente Comercializador da Energia de Itaipu - Itaipu é uma entidade binacional, pertencente ao Brasil e ao Paraguai. O relacionamento entre os dois países segue tratados internacionais específicos. A energia de Itaipu recebida pelo Brasil representa cerca de 30% do mercado de energia da região sul/sudeste/centro-oeste. A comercialização dessa energia no Brasil é coordenada pela Eletrobrás.

3.1.2 Agentes Institucionais

De acordo com o Novo Modelo do Setor Elétrico o organograma das instituições do setor pode ser visualizado de acordo com a figura 3.2.

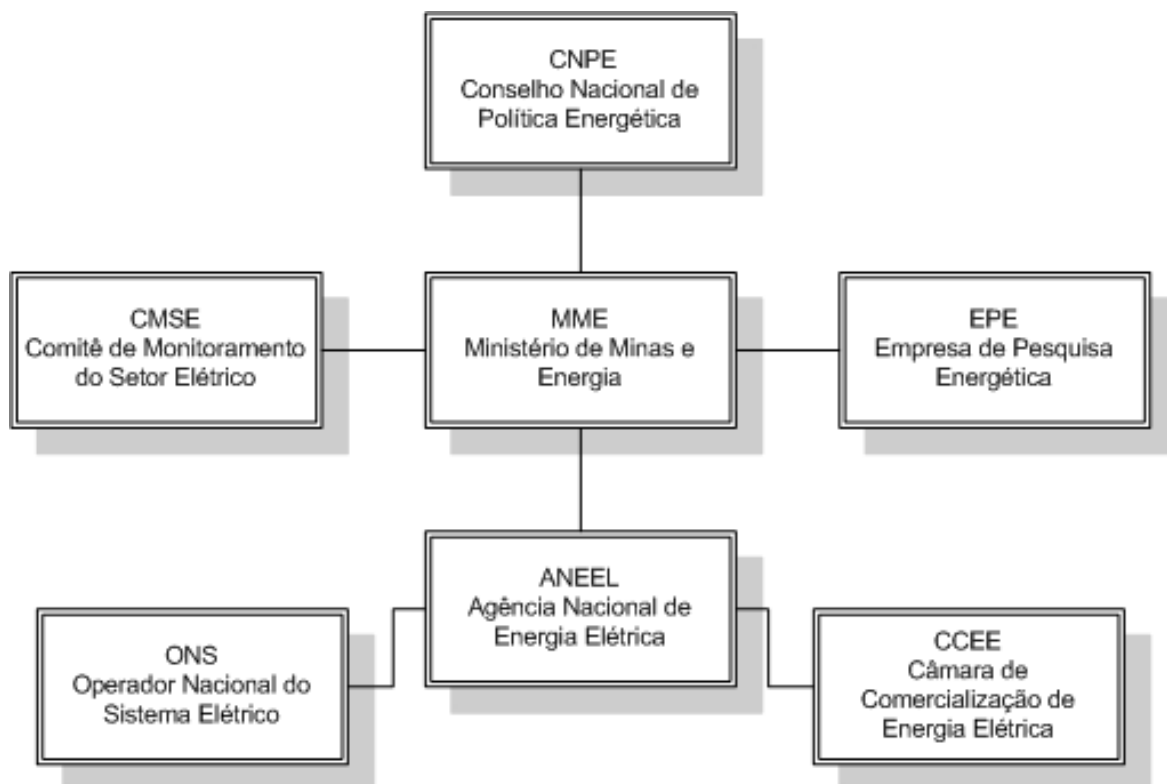


Figura 3.2 - Diagrama das instituições do Setor Elétrico Brasileiro

Fonte: CCEE (2009)

De acordo com o diagrama acima ilustrado o SEB conta com a participação de órgãos que no desenvolvimento de suas atividades cuidam para que os objetivos do novo marco regulatório sejam atendidos.

- CNPE - Conselho Nacional de Política Energética - Órgão de assessoramento do Presidente da República para formulação de políticas nacionais e diretrizes de energia, visando, dentre outros, o aproveitamento natural dos recursos energéticos do país. Sua função é rever periodicamente a matriz energética e estabelecer diretrizes para programas específicos. É órgão multi-ministerial presidido pelo Ministro de Estado de Minas e Energia.
- MME - Ministério de Minas e Energia - Encarregado de formulação, do planejamento e implementação de ações do Governo Federal no âmbito da política energética nacional.
- CMSE - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico - Constituído no âmbito do MME e sob sua coordenação direta, com a função precípua de acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletro energético em todo o território.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética - Tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético.

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica - Autarquia sobre regime especial, vinculada ao MME, com finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do Governo Federal.
- CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - Pessoa jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, sob regulação e fiscalização da ANEEL, com finalidade de viabilizar a comercialização de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional - SIN. Administra os contratos de compra e venda de energia elétrica, sua contabilização e liquidação.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico - Pessoa jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, sob regulação e fiscalização da ANEEL, tem por objetivo executar as atividades de coordenação e controle da operação de geração e transmissão, no âmbito do Sistema Integrado Nacional.

3.2 Aplicação da Análise por Opções Reais em Trabalhos Anteriores

Com o fim de embasar o trabalho de desenvolvimento de uma metodologia de opções reais no setor elétrico, é pertinente apresentar os trabalhos mais relevantes, que vieram a aplicar a teoria de opções reais em projetos deste setor. Ao longo desta seção, os trabalhos serão apresentados de forma sucinta separados quanto ao objeto de aplicação: geração ou distribuição/transmissão. Essa distinção é feita por se considerar que as áreas dentro do setor são completamente diferentes, no que se refere ao tipo de empresa e regulamentos de cada mercado. Enquanto as empresas de geração se enquadram em um mercado desregulado de livre concorrência, sendo o foco a geração de energia, as empresas de transmissão e distribuição se encontram inseridas em um monopólio natural e, por isto, com regulação de econômica, sendo a principal função destas o transporte à grosso e no varejo respectivamente.

Através de cada trabalho estudado irá se apresentar a área específica da empresa onde o modelo foi aplicado, o cenário em que o problema está inserido, o modelo para resolução utilizado e os resultados obtidos.

3.2.1 Geração

- Castro (2000) – Avalia contratos de venda de energia elétrica em uma unidade geradora termoelétrica, instalada no subsistema sudeste. Justifica seu estudo pela tendência de crescimento de usinas termoelétricas na matriz energética brasileira, assim como a

incidência de altos riscos e retornos do investimento. Outra característica do projeto é flexibilidade operacional, sendo a planta despachada somente quando o preço spot da energia é viável. Parâmetros avaliados: Valor do investimento, Custo de Operação da Termoelétrica, Preço Spot da Energia, Nível de Contratação, Preço do Contrato, Taxa de Desconto. Para analisar a flexibilidade da térmica, inicialmente é avaliada a opção de operação desta, que pode ser deduzida através das equações 3.1 e 3.2.

$$G_c P_c + (G_t - G_c) P_{spot} - G_t CO \text{ se } P_{spot} > CO \quad 3.1$$

$$G_c P_c + G_c P_{spot} \text{ se } P_{spot} \leq CO \quad 3.2$$

Onde G_c é a geração contratada, P_c o preço contratado, G_t a geração total, P_{spot} o preço spot da energia elétrica e CO o custo variável operacional.

É utilizado o modelo binomial para cálculo do valor das opções de despacho da usina, obtendo-se o valor do projeto ao longo da sua vida útil, sendo a principal incerteza o preço spot da energia. Para se definir a flexibilidade gerencial nas plantas flexíveis foi calculado o valor em plantas flexíveis:

$$G_c P_c + (G_t - G_c) P_{spot} - G_t CO \text{ se } P_{spot} > CO \quad 3.3$$

$$G_c P_c + G_c P_{spot} \text{ se } P_{spot} \leq CO \quad 3.4$$

$$\pi_t = (P_c - P_{spot}) \times G_c + \max(P_{spot} - CO, 0) \times G_t \quad 3.5$$

Sendo a flexibilidade dada pela equação 3.6.

$$V_t = \pi_t + \frac{1}{1 + \rho} E(V_{t+1}) \quad 3.6$$

Onde a fórmula é aplicada de forma backward trazendo o valor esperado para a data 0 (V_0). De forma análoga é calculado o valor de uma planta inflexível:

$$\Pi = (P_c - CO) \times G_c \quad 3.7$$

$$VI = \sum_{t=0}^T \frac{1}{1 + \rho} \Pi \quad 3.8$$

Pode-se concluir então que o valor da flexibilidade de uma planta térmica com a opção de funcionamento é:

$$\text{Valor flexibilidade} = V_0 - VI \quad 3.9$$

Neste trabalho o cálculo da volatilidade não é apresentado. Porém uma curva com os valores esperados do projeto é apresentada, de acordo com desvio padrão estipulado no problema. Como resultado final da dissertação foi encontrado que quanto maior o nível de contratação de longo prazo desta usina menor o risco, porém os retornos também são menores. Encontrou-se um ponto de inflexão com risco mínimo, onde o nível de contratação é 90%, a partir desse ponto o risco passa a crescer gradativamente.

- Marreco & Carpio (2006) – O principal objetivo desse artigo é valorar a flexibilidade trazida pelas térmicas ao Sistema Integrado Nacional (SIN). Foi levantado o problema enfrentado pelo governo brasileiro em busca de dar subsídios justos aos investidores de usinas térmicas, uma vez que o Operador do Sistema Nacional (ONS) busca despachar as unidades geradoras de energia mais baratas e nesse âmbito as usinas hidrelétricas, que correspondem a 85% da capacidade instalada nacional, são preferencialmente despachadas tendo como restrição a quantidade de água em seus reservatórios. Mas em vista do novo modelo institucional, a presença das térmicas se torna essencial no que tange a diversificação de portfólio, e diminuição dos riscos do não suprimento da demanda. Nesse trabalho foi desenvolvido um modelo por árvore binomial onde é analisado nó a nó, a carga despachada pelas hidrelétricas, considerando o comportamento da afluência como um processo estocástico, tendo como principal objetivo o atendimento da previsão de demanda, minimizando os custos operacionais. É importante ressaltar que nessa análise a decisão tomada em cada nó irá impactar diretamente os resultados esperados para o próximo período, portanto foi desenvolvido um algoritmo que considera as decisões anteriores, para isso foi dado o período de análise T , e no período $T-1$ é considerada a seguinte equação:

$$F(T - 1, m) = \min[C^A(\varphi_{T-1}), C^B(\varphi_{T-1})] \quad 3.10$$

Onde m é o modo de custos de operação (A ou B), φ_{T-1} é a afluência natural de energia e C corresponde ao custo de cada modo. Pode-se então concluir que no período $T - 2$ a equação de custos pode ser representada da seguinte forma:

$$F(T - 2, m) = \min\{[C^A(\varphi_{T-2}), C^B(\varphi_{T-2})] + \frac{1}{(1 + r)} E_{T-2} F[T - 1, i]\} \quad 3.11$$

Sendo o termo adicionado referente à expectativa de custos do período posterior $T - 1$. Nos momentos em que os despachos de hidrelétricas não conseguem atender a demanda, as térmicas são despachadas como uma opção. A diferença entre os valores da árvore binomial com opção de operação de térmicas, e a árvore sem opção de operação de térmicas são trazidos para o presente por probabilidade neutra ao risco, e esse valor final é apresentado pelos autores como o valor da flexibilidade que deve ser pago aos investidores de térmicas. Os autores deixam claro que o método escolhido para cálculo de OR é o modelo binomial, mas no que tange a volatilidade, a única informação fornecida é que os incrementos do valor do ativo objeto, u e d foram obtidos das séries históricas da afluência natural de energia dos últimos cinco anos. O projeto base para aplicação dessa metodologia é um subsistema do sudeste, como resultado é calculado o valor anual da flexibilidade quando se opera com usinas térmicas (\$4.52 bilhões de dólares), o que gera uma flexibilidade por mega watt de US\$497/MW por ano.

- Zhou *et al.* (2007) – Estudo teórico, em que são abordadas técnicas como reversão à média, opções reais, simulação, otimização e *Value at Risk* e *Conditional Value at Risk*. São apresentadas 6 etapas para obtenção do valor de um ativo de geração de energia elétrica:
 - 1° Obter através do processo estocástico a curva da evolução e flutuação de preços, para assim obter a média histórica;
 - 2° Calcular o preço com incerteza, com simulação e reversão à média estocástica, de acordo com a equação 3.12;

$$\begin{aligned}
 S(t) = & \exp \{[\ln[S(t-1)] \exp[\kappa\Delta t]] \\
 & + \left[\frac{1}{\kappa} [(\ln g)' + \kappa \ln g] - \frac{(\alpha - r)}{\kappa} \right] [1 - \exp[-\kappa\Delta t]] \Big] \\
 & - \left[(1 - \exp(-2\kappa\Delta t)) \frac{\sigma^2}{4\kappa} \right] + \sigma \sqrt{\frac{1 - \exp(-\kappa\Delta t)}{2\kappa}} N(0,1) \Big\}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

3º Otimizar o fluxo de potência, e as restrições técnicas para estimar a geração de potência ativa, de acordo com a formulação que se segue;

$$\text{Max } S(t)P_{gi} - (a_0 + a_1P_{gi} + a_2P_{gi}^2)P^F \tag{3.13}$$

$$\text{S.A. } \underline{P_{gi}} \leq P_{gi} \leq \overline{P_{gi}} \tag{3.14}$$

$$\underline{Q_{gi}} \leq Q_{gi} \leq \overline{Q_{gi}} \tag{3.15}$$

$$\underline{V_i} \leq V_i \leq \overline{V_i} \tag{3.16}$$

$$P_i(V, \theta) - P_{gi} + P_{Di} = 0 \tag{3.17}$$

$$Q_i(V, \theta) - Q_{gi} + Q_{Di} = 0 \tag{3.18}$$

$$|S_{ij}^f(\theta, V)| \leq S_{ij}^{max} \tag{3.19}$$

$$|S_{ij}^t(\theta, V)| \leq S_{ij}^{max} \tag{3.20}$$

Onde P^F é o preço do combustível, (a_0, a_1, a_2) são coeficientes de eficiência da geração, P_{gi} é a capacidade/unidade gerada no instante i , Q_{gi} é a geração de potencia reativa, V_i é a tensão, S_{ij} é o fluxo de potência aparente.

4º Estimar os retornos por opções reais. Para obter o valor do ativo de geração ao longo do período T (vida útil) é considerada a equação 3.21, onde somente os impactos dos custos variáveis, como o custo de combustíveis, estão embutidos;

$$V_T = \int_{t=0}^T e^{-rt} V(t) dt \quad 3.21$$

A fim de inserir a depreciação dos equipamentos foi adicionado o fator $Cost_T^I$, que considera a depreciação a cada período.

$$V_T^S = V_T - Cost_T^I \quad 3.22$$

5° Utilizar simulação de Monte Carlo calculando assim a distribuição de probabilidades do ativo e do lucro;

6° Avaliar o risco do investimento em expansão de geração usando VaR e $CVaR$.

$$VaR = -CFD_V^{-1}(1 - x\%) \quad 3.23$$

$$CVaR = E\{Loss_V | Loss_V > VaR\} \quad 3.24$$

Sendo, CFD a função da distribuição inversa cumulativa para o lucro V (considerando a porção negativa) e $x\%$ o nível de confiança adotado na análise.

Os autores aplicaram todos os passos em um problema teórico, onde foram compilados dados do *IEEE 30 system*, e os dados históricos do mercado de eletricidade da Califórnia, EUA. Resultados: a) Processo de reversão à média para o preço da eletricidade: Assume-se que o preço da eletricidade está diretamente ligado ao nível de carga, então para o exemplo foram considerados: volatilidade do preço da eletricidade $\sigma=0,1$; coeficiente de reversão a média $k=0,5$; risco livre do mercado $r=0,15$; taxa de desconto anual ajustada $a=0,12$. b) Avaliação dos ativos de geração: através do processo de avaliação por opções reais e simulação de Monte Carlo, foi constatado que o resultado da otimização com restrições é bem menor que o resultado da otimização sem restrições, o que é facilmente compreendido e mostra como as restrições técnicas influenciam o resultado final. Porém a curva de distribuição do retorno e risco do investimento com restrições técnicas é bastante similar ao mesmo investimento sem restrições. c) Análise de risco: Por fim como esperado o $CVaR$ capturou mais riscos que o VaR , e também foi confirmado que quanto menor o nível de confiança menor são os riscos calculados.

- Teoh & Sheblè (2007) – Descrevem como é o processo de cálculo das opções de decisões em um projeto simplificado de geração de energia. Este é um artigo de forte fundamentação teórica, onde são abordadas as técnicas de árvores de decisão, árvores binomiais e *Value at Risk*. Na aplicação do cálculo em um problema teórico os autores descrevem o passo a passo da montagem das árvores binomiais:

1º Passo – Análise dos dados históricos para capturar o nível de risco do projeto. Para tal é utilizada a fórmula de volatilidade (pela abordagem dos retornos dos fluxos de caixa logarítmicos) a seguir;

$$Volatilidade(\sigma) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad 3.25$$

Quando n é o número de retornos, x o valor do retorno do fluxo de caixa e \bar{x} a média dos retornos.

2º Passo – Construir as árvores do ativo. É necessário no modelo por opções reais, a construção de três árvores binomiais: A primeira apresenta a incerteza principal do projeto, o preço do gás natural ao longo do período, calculada pelas possíveis oscilações período a período, com incrementos de subida (*up*) e descida (*down*);

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad 3.26$$

$$d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad 3.27$$

A segunda é a árvore que elucida em cada nó o lucro ou a perda operacional, e por último é utilizada uma árvore calculada por probabilidade neutra ao risco (equação 3.29) de forma backward (equação 3.28) para mostrar em cada ponto qual é a melhor decisão/opção.

$$S = \frac{p \times Su + (1 - p) \times Sd}{e^{rf \times \Delta t}} \quad 3.28$$

$$p = \frac{e^{rf \times \Delta t} - d}{u - d} \quad 3.29$$

Como resultado foi definido, em vários níveis de confiança de risco, quais são os nós da árvore final de decisões, que se encontram em uma zona de retorno abaixo do esperado.

- De-yi *et al.* (2008) – Neste artigo é discutida a perspectiva da lógica fuzzy em opções reais. Para tanto foi resolvido didaticamente um problema de geração, onde os valores presentes do fluxo de caixa são representados por um número fuzzy trapezoidal. O artigo desenvolve a fórmula de Black & Scholes, de acordo com a expectativa de fluxo de caixa como um número fuzzy, essa resolução pode ser observada abaixo.

$$\begin{aligned} FROV &= SN(d_1) - Xe^{-rt} N(d_2) \\ &= [bN(d_1) - Xe^{-rt} N(d_2), cN(d_1) - Xe^{-rt} N(d_2), (b - a)N(d_1), \\ &\quad (d - c)N(d_1)] \end{aligned} \quad 3.30$$

$$d_1 = \frac{[\ln\left(\frac{E(S)}{X}\right) + (r + 0,5 \times \delta^2)T]}{\delta\sqrt{T}} \quad 3.31$$

$$d_2 = d_1 - \delta\sqrt{T} \quad 3.32$$

Neste exemplo o cálculo da volatilidade não é apresentado. Como resultado os autores comparam o resultado obtido por essa metodologia proposta e os métodos tradicionais de avaliação. Quando o projeto é avaliado pelos métodos tradicionais o resultado é negativo (NPV=\$-523,3 milhões), mas quando é avaliado por Opções Reais Fuzzy o resultado é extremamente positivo (NPV=7.037,5 milhões), porém a melhor opção calculada no momento é a opção de espera para investir, até o momento que se tenha mais informações do futuro.

- Aronne, Brasil & Aronne (2008) – Utilizam teoria de opções reais para calcular a flexibilidade de plantas de geração de energia térmica, considerando as incertezas advindas das questões políticas do gás Boliviano. As opções nesse caso são a troca de insumos: de gás natural para óleo, associada à incerteza do valor dos insumos ao longo do tempo, e a opção de parada temporária da operação da usina. Os autores afirmam que os modelos brasileiros de opções reais não levam em conta a incerteza dos insumos e sim a

do o preço spot da energia. Neste artigo é citado o Movimento Geométrico Browniano, bem como o modelo quadrinomial para evolução dos preços. O modelo quadrinomial pode ser entendido de acordo com a formulação que se segue:

$$P_{uu} = \frac{(u_1 u_2 + u_2 g_1 + u_1 g_2 + \rho_{12} \sigma_1 \sigma_2 \Delta t)}{4u_1 u_2} \quad 3.33$$

$$P_{ud} = \frac{(u_1 u_2 + u_2 g_1 + d_1 g_2 + \rho_{12} \sigma_1 \sigma_2 \Delta t)}{4u_1 u_2} \quad 3.34$$

$$P_{du} = \frac{(u_1 u_2 + d_2 g_1 + u_1 g_2 + \rho_{12} \sigma_1 \sigma_2 \Delta t)}{4u_1 u_2} \quad 3.35$$

$$P_{dd} = \frac{(u_1 u_2 + d_2 g_1 + d_1 g_2 + \rho_{12} \sigma_1 \sigma_2 \Delta t)}{4u_1 u_2} \quad 3.36$$

Onde:

$$u_1 = \sigma_1 \sqrt{\Delta t} \quad (\text{movimento de subida do gás natural}) \quad 3.37$$

$$d_1 = -u_1 \quad (\text{movimento de descida do gás natural}) \quad 3.38$$

$$u_2 = \sigma_2 \sqrt{\Delta t} \quad (\text{movimento de subida do óleo}) \quad 3.39$$

$$d_2 = -u_2 \quad (\text{movimento de descida do óleo}) \quad 3.40$$

Sendo g_1 e g_2 taxa neutra ao risco de crescimento esperado e ρ_{12} a correlação entre as variações de preço do gás natural e do óleo.

Sendo assim as equações que descrevem o valor do fluxo de caixa das duas opções podem ser vistas abaixo.

$$CF_g = \text{Max} [(A \times P_e \times \Delta t - B_g \times P_g \times \Delta t - A \times C_{O\&M} \times 2,15 \times \Delta t); 0] \quad 3.41$$

$$CF_o = \text{Max} [(A \times P_e \times \Delta t - B_o \times P_o \times \Delta t - A \times C_{O\&M} \times 2,15 \times \Delta t); 0] \quad 3.42$$

A volatilidade tanto para o modo de operação com gás, quanto para com óleo é apresentada, no entanto a forma de cálculo não é mencionada. Ao final do estudo concluiu-se que a opção de troca de insumos não tem valor, e que a opção de parada temporária tem valor. É desenvolvido então um estudo com opções compostas: opção de troca combinada com a opção de parada, nesse caso a flexibilidade terá um valor ainda maior que o caso de opção única de parada nas operações.

3.2.2 Distribuição e Transmissão

- Miranda Filho (2005) – Dissertação baseada em problemas reais em sistemas de distribuição. Avalia pelo método tradicional três projetos de expansão da rede de distribuição, que foram efetuados seis anos antes ao estudo, comparando dados calculados na época com dados obtidos na realidade. Como resultado foi constatado que um caso superou as expectativas tendo se tornado altamente lucrativo, um segundo caso apresentou VPL nulo, e o terceiro ficou muito abaixo das expectativas, constatando assim a necessidade uma nova ferramenta que possa capturar melhor as incertezas do projeto, o que no caso específico de distribuição é a demanda local. O autor cita as opções mais frequentes existentes em projetos de distribuição: opção de diferimento (opção de compra americana encontrada na maioria dos projetos em que existe a possibilidade de adiar o início do projeto), opção de abandono de um projeto por um preço fixo (mesmo que esse preço decline com o tempo, é formalmente uma opção de venda americana), opção de contração (reduzir a dimensão de um projeto, mediante a venda de uma fração do mesmo a um preço fixo, também é uma opção de venda americana), e opção de expansão de um projeto (pagando-se mais para aumentá-lo é uma opção de compra americana).

Nesse trabalho o autor faz um estudo da abordagem das incertezas, e chega a citar as principais abordagens que podem ser obtidas para opções reais: abordagem do retorno logarítmico do fluxo de caixa, abordagem do valor presente logarítmico, e por fim a abordagem consolidada da incerteza, a qual é utilizada no trabalho.

Nesse exemplo específico o autor considerou que a incerteza principal do projeto é o crescimento de demanda, o qual foi calculado por ano em 3,7%, dessa forma o crescimento nos próximos anos pode ser dado por:

$$D_t = D_{t-1} e^{0,037} \quad 3.43$$

Através da simulação de Monte Carlo é calculada a demanda no ultimo ano que deverá se apresentar em intervalo de confiança de 95%.

$$D_{2012} = [D_{2003}e^{9 \times 0,037 - 2\sigma\sqrt{9}}; D_{2003}e^{9 \times 0,037 + 2\sigma\sqrt{9}}] \quad 3.44$$

Com volatilidade dada:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n r_i - \ln\left(\frac{D_T^{inferior}}{D_0}\right)}{2\sqrt{T}} \quad 3.45$$

Portanto os limites inferior e superior da demanda, podem ser observados nas equações 3.46 e 3.47.

$$Lim_u(D_t) = D_0 e^{\sum r_i + 2\sigma\sqrt{t-1}} \quad 3.46$$

$$Lim_d(D_t) = D_0 e^{\sum r_i - 2\sigma\sqrt{t-1}} \quad 3.47$$

A partir do processo de análise por opções reais, foi calculada a opção de diferimento de um investimento em expansão da distribuição, levando em consideração a volatilidade do mercado de demanda máxima. O método utilizado foi o binomial seguindo os passos da árvore de eventos, simulação e árvore de decisão. O resultado obtido foi o exercício da opção de adiamento até o ultimo período, quando a demanda se torna relevante e o investimento será rentável.

- Ramanathan & Varadan (2006) – Exploram problemas com investimento em transmissão em um ambiente desregulado através de opções reais. Neste artigo são discutidos todos os passos para a análise por opções em um problema de transmissão. Os autores explicam a necessidade de se seguir 3 passos para criar a árvore binomial, o primeiro é definir o valor do ativo e sua evolução ao longo dos períodos, o segundo é determinar o valor das opções nos nós terminais, e o terceiro é o cálculo do valor em cada nó intermediário através do movimento *backward*. É utilizado o movimento geométrico browniano para obter os

coeficientes de subida e descida, e o incremento de subida e descida do ativo ao longo dos estágios pode ser visto na equação 3.48.

$$u = e^{\sigma\sqrt{t}} = \frac{1}{d} \quad 3.48$$

Sendo σ a volatilidade do MGB. Na seqüência é apresentada a fórmula neutra ao risco. É ainda usada a simulação de Monte Carlo para auxiliar a obtenção do valor do projeto. Nesse artigo não é apresentada a resolução de um problema real, foi feita apenas a explanação da teoria, porém útil para verificação da metodologia utilizada para a área.

- Marangon *et al.* (2006) – Aplicam Teoria de Opções Reais para definir qual o melhor momento para se investir em uma subestação de distribuição, expandindo assim sua capacidade. Neste trabalho alguns tópicos pertinentes ao setor elétrico brasileiro são discutidos: ambiente regulatório, fator X, período pré-revisão tarifária, período pós-revisão tarifaria, etc. Foi utilizada a simulação de Monte Carlo para obtenção da volatilidade, bem como o movimento aritmético browniano $d\ln V = vdt + \sigma dz$ onde $dz = \varepsilon\sqrt{dt}$ (Processo de Wiener padrão). Aplicou-se também a abordagem consolidada da incerteza definida por Copeland & Antikarov, onde todas as incertezas consideradas sobre o valor do ativo são consideradas em uma única incerteza: a variação percentual do projeto ao longo do tempo.

E finalmente o desvio padrão da variação percentual do retorno do projeto é obtido através da simulação de Monte Carlo. Quanto à árvore de eventos, esta foi montada de acordo com os incrementos de subida (u) e descida (d).

Já a árvore de decisão é montada de acordo com a equação de maximização 3.49 aplicada nó a nó, do último estágio até o primeiro, definindo o que tem mais valor: a diferença entre o valor presente do projeto (V) e o preço do exercício da opção (X), ou zero.

$$V_{OR} = \text{Max}[V - X; 0] \quad 3.49$$

O portfólio replicado também pode ser utilizado para explicar o valor do projeto.

$$\begin{cases} mV_u + B(1 + r_f) = C_u \\ mV_d + B(1 + r_f) = C_d \end{cases} \quad 3.50$$

$$m = \frac{C_u - C_d}{V_u - V_d} \quad 3.51$$

$$B = \frac{V_d - mV_d}{(1 + r_f)} \quad 3.52$$

Sendo C_u e C_d o valor do exercício da opção nos movimentos de subida e descida, e V_u e V_d os valor do ativo objetivo na situação de preços ascendentes e descendentes, respectivamente. Com m o número de unidades do ativo replicante, e B unidades do título da dívida sem risco.

Como resultado conclui-se que: um investimento em distribuição em que há redução de perdas é viável, e que deve se investir no primeiro momento nesse projeto, no entanto quando não há redução das perdas não se deve investir. O valor do VPL expandido com redução das perdas pode ser visto na equação 3.53.

$$VPL_{exp} = VPL_T + VPL_{OR} \quad 3.53$$

$$VPL_{exp} = 174,1 + 126,1 \text{ (mil R\$)}$$

- Pinto *et al.* (2007) – Aplicam técnicas de otimização, associadas ao gerenciamento de risco e opções reais na distribuidora Eletropaulo, especificamente em contratos de compra de energia. Através do objetivo principal: a redução de custos associados às decisões (presentes e flexibilidade das futuras), os autores formulam restrições considerando a regulação vigente no mercado brasileiro. A formulação para otimização pode ser vista abaixo.

$$\text{Min } C_A A + E_s (c_{def} Def_{s,t} + c_{exc} Exc_{s,t} + c_{aj} Aj_{s,t}) \quad 3.54$$

$$S. A. \sum A_i + rd_{s,t} Def_{s,t} - Exc_{s,t} - re_{s,t} Exc_{s,t} - Red_{s,t} + Aj_{s,t} = Load_{s,t} \quad 3.55$$

$$Exc_{s,t} \leq 0,03 \times Load_{s,t} \quad 3.56$$

$$Red_{s,t} = 0,04 \times A_0 \quad 3.57$$

$$\underline{A_i} \leq A_i \leq \overline{A_i} \quad 3.58$$

$$\underline{A_{j,s,t}} \leq A_{j,s,t} \leq \overline{A_{j,s,t}} \quad 3.59$$

$$\sum p_s rd_{s,t} \leq \overline{\varepsilon def_t} \quad 3.60$$

$$\sum p_s re_{s,t} \leq \overline{\varepsilon exc_t} \quad 3.61$$

A principal incerteza considerada é o crescimento da demanda por carga ($Load_{s,t}$), o que gera quatro cenários possíveis no horizonte de 2006 a 2015. Por outro lado o risco considerado é o de déficit de energia ($rd_{s,t}$), o que no caso brasileiro resulta em penalidades, que também devem ser consideradas no custo final. Neste estudo o risco foi considerado através do controle de Boolean, ou seja, fato de o risco (déficit de energia) poder ou não ocorrer, assumindo então os seguintes valores na fórmula: (0;1). Nesse artigo a questão da volatilidade não foi abordada. Ao final de toda a metodologia descrita foi desenvolvida um algoritmo de otimização, que incorpora opções reais e gerenciamento de risco. Como resultado foi possível determinar qual é o melhor portfólio que deve ser contratado no início do período, e quais são as alternativas dados os cenários futuros.

- Salazar, Liu & Chu (2007) – Nos EUA as empresas do setor transmissão elétrica consideram para o cálculo da taxa de receita anual (AR) o ponto de pico diário de carga, e os investimentos nas linhas. Nesse artigo os autores demonstram através de uma formulação para o ponto de carga máxima, que um mecanismo de realocação dos custos pode incentivar o investimento nesse setor. A receita anual é descrita pela equação 3.62.

$$AR = \frac{R_1(t)}{DDV(t)} \times 365 \quad 3.62$$

Onde $R_1(t)$ é a receita diária e $DDV(t)$ é o ponto de pico diário. Como os pontos de picos são variáveis estocásticas, isso confere à receita diária, bem como a receita anual a característica de serem também variáveis estocásticas. Nesse artigo é apresentada uma nova perspectiva de opção de investimento, são consideradas as receitas a partir do momento ótimo (Ti), quando as receitas superam o custo (maximizando o resultado), até o

final do projeto (TF), trazendo estas até o presente. Esse seria o valor esperado E do projeto, a uma taxa ρ .

$$E = \left[\left(\int_{Ti}^{TF} R e^{-\rho t} dt \right) e^{-\rho Ti} \right] \quad 3.63$$

Todavia resta definir qual é o momento ótimo (Ti) para se investir, uma vez que este momento está associado a uma receita ótima (R') para o projeto, sendo que a receita também está diretamente ligada ao custo de investimento, e à previsão de aumento de carga. É então proposto um método determinístico através do ponto de carga máximo diário.

$$VP = \sum_{n=1}^{T_c} \left(\frac{RR}{H} \right) \left(\frac{F(1+x)^{n-1}}{24} \right) \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{n-1} \quad 3.64$$

Sendo para o valor presente (VP): RR a receita requerida anual baseada no capital investido, H o mais recente ponto de pico de carga na linha, F a carga anual prevista, x o percentual de crescimento de carga e ρ a taxa de desconto, para o período de reposição dos custos T_c .

Na seqüência é aplicado um modelo por opções reais que dá através do movimento geométrico browniano, o comportamento da receita R ao longo do tempo contínuo.

$$\frac{dR(t)}{R(t)} = \mu dt + \sigma dz \quad 3.65$$

$$dz = \varepsilon \sqrt{dt} \text{ sendo } \varepsilon \sim N(0,1) \text{ (Incremento de Wiener)} \quad 3.66$$

Sendo μ o retorno esperado anual das receitas, e σ a volatilidade anualizada da receita, aqui a volatilidade é apresentada na forma de valor, não sendo informado o método de sua obtenção. No entanto $R(t)$ é uma variável randômica no período t , cuja distribuição e dada como:

$$\ln R(t) \sim N \left(\ln R_0 + \left(\mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) t, \sigma \sqrt{t} \right) \quad 3.67$$

Com R_0 representado o valor inicial das receitas, e $\ln R(t)$ o log natural das receitas. Dessa forma, o movimento geométrico browniano fornece de uma maneira aproximada o valor presente das receitas futuras do momento $t=0$ até o infinito.

$$PV(T_0) = E = \left[\int_{T_0}^{\infty} R(\tau) e^{-\rho\tau} d\tau \right] = \frac{R_0}{\rho - \mu} \quad 3.68$$

Tem-se assim o modelo para o valor presente das receitas até o infinito. Nesse contexto é apresentado o valor da oportunidade de investimento $F(R)$ que é função das receitas futuras capturando as incertezas.

$$F(R) = \max_T E[(R_T - K)e^{-\rho T}] \quad 3.69$$

Sendo, K o investimento de capital, R_T o valor presente das receitas e T o momento em que a opção é exercida. O objetivo principal do trabalho é encontrar a receita ótima R' , onde o investimento é igual ao valor esperado das receitas futuras, ou seja $F(R') + K = R' / (\rho - \mu)$. Para resolver essa questão é usada a teoria opções associada à programação dinâmica, como resultado é estabelecida a seguinte formulação matemática:

$$F(R) = AR'^{\beta} \quad 3.70$$

Onde,

$$\beta = \frac{1}{2} - \frac{(\rho - \delta)}{\sigma^2} + \left(\left(\frac{(\rho - \delta)}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2\rho}{\sigma^2} \right)^{\frac{1}{2}} > 1 \quad 3.71$$

$$\delta = \rho - \mu \quad 3.72$$

$$R' = (\rho - \mu) \left(\frac{\beta}{\beta - 1} \right) K \quad 3.73$$

$$A = \frac{1}{(\rho - \mu)\beta(R')^{\beta-1}} \quad 3.74$$

Após o desenvolvimento desta formulação matemática, foi aplicado em um estudo a metodologia proposta. O projeto consiste na transmissão de um ponto de geração até o ponto consumidor, o investimento necessário é de \$150M e a receita anual é \$24M, o ultimo maior pico de demanda diária é 4100MW e o período de vida do projeto 40 anos.

$$AR = \frac{24 \times 10^6}{4100 \times 365} = 16,037 \left[\frac{\$}{MW \times dia} \right] \quad 3.75$$

Ainda foram considerados os retornos das receitas $\mu = 0,1095$, a volatilidade anualizada $\sigma = 0,1043$, tendo o MGB com a taxa de desconto $\rho = 0,13$. Foram calculadas as receitas e tempo de espera, e conclui-se que o tempo de espera para início do projeto é muito longo, o que desestimula o investimento no projeto. O caso foi então recalculado com a premissa que haverá um incentivo inicial no aporte de capital de \$150M, foram calculadas três hipóteses: incentivo de 8%, 10% e 12%. Pode-se perceber que a existência de um incentivo inicial, contribui diretamente para diminuir o tempo de esperar. Foi plotada uma curva de probabilidade dos lucros e concluiu-se que neste caso quanto maior o valor do incentivo inicial, maior é a probabilidade de sucesso do projeto.

- Vasquez & Olsina (2007) – Aplicam opções reais no planejamento de expansão de linhas de transmissão. Inicialmente é levantada a questão: a geração distribuída, que leva maior flexibilidade ao projeto pode superar a economia de escala trazida pela transmissão? O artigo analisa a operação de uma mina que necessita de uma linha de transmissão, são consideradas três possibilidades inicialmente: transmissão em 220 kV circuito simples, 220 kV circuito duplo e 500 kV circuito simples. A incerteza é a respeito do sucesso ou não do empreendimento, no caso positivo a demanda por carga irá aumentar para 120 MW, com probabilidade de ocorrência $p=0,5$, no caso negativo a demanda continuará constante em 60 MW $p=0,5$. Através da formulação por otimização estocástica constatou-se que a opção de transmissão em 220 kV circuito simples satisfaz tanto as restrições técnicas quanto as econômicas. Em um segundo passo, é analisada a

possibilidade de construção de uma geração distribuída em duas fases, quando se espera para ver o resultado e assim investir, pode-se a partir daí valorar a flexibilidade dessa segunda opção. Calculando-se as possibilidades da mesma forma por otimização estocástica, foi possível comprovar que a opção de geração distribuída, mesmo não apresentando uma economia de escala tem maior valor que o investimento em transmissão. A formulação da otimização, que inclui os estágios da opção pode ser observada na equação 3.76.

$$\text{Min } \{E[C_{Ti}(T)]\} \quad 3.76$$

$$\min_T \left\{ \begin{aligned} & C_{ITL}^{Sx} + \sum_{j=1}^5 \left(\frac{C_{A,j}}{(1,12)^j} + \frac{C_{O\&M,j}}{(1,12)^j} + \frac{C_{E(ENS),j}}{(1,12)^j} \right) \Bigg|_{D_1}^T \\ & + (1-p) \times \sum_{j=6}^{10} \left(\frac{C_{A,j}}{(1,12)^j} + \frac{C_{O\&M,j}}{(1,12)^j} + \frac{C_{E(ENS),j}}{(1,12)^j} \right) \Bigg|_{D_2}^T \\ & + p \times \sum_{j=6}^{10} \left(\frac{C_{A,j}}{(1,12)^j} + \frac{C_{O\&M,j}}{(1,12)^j} + \frac{C_{E(ENS),j}}{(1,12)^j} \right) \Bigg|_{D_2}^T \end{aligned} \right\} \quad 3.77$$

$$\text{S.A. } S_{G,j} - D_{i,j} - S_{L,j} - S_{NS,j} = 0 \text{ (Balanço de potencia)} \quad 3.78$$

$$0,9 \leq V_3 \leq 1,1 \text{ (limites de tensão)} \quad 3.79$$

$$F_{12} \leq T \text{ (Restrição de capacidade de transmissão)} \quad 3.80$$

Onde $E[C_T]$ é o valor presente dos custos esperados; C_{ITL}^{Sx} investimento para a estratégia x ; $C_{A,j}$ custo de aquisição de energia no mercado spot no ano j ; $C_{O\&M,j}$ custos de operação e manutenção das linhas de transmissão e subestações no ano j (esses valores são estimados entre 2% a 3% do custo de investimento); $C_{E[ENS],j}$ custo da energia não suprida no ano j ; $S_{G,j}$ energia do mercado spot; $D_{i,j}$ demanda de potência no estágio i ; $S_{L,j}$ perdas de potencia e $S_{NS,j}$ potência não suprida no ano j . Novamente, não foi demonstrado o cálculo para o valor da volatilidade apresentado.

A partir do estudo de trabalhos anteriores foi possível de montar as tabelas 3.1 e 3.2 que elucidam o método utilizado para obtenção da volatilidade, e o valor desta obtido por autores da área.

Geração	Método Utilizado	Valor Volatilidade
Castro (2000)	NC	-
Marreco e Carpio (2006)	NC	-
Zhou <i>et al.</i> (2007)	Gestão de hipóteses	10%
Teoh e Sheblè (2007)	Retorno do FC logarítmicos	-
De-yi <i>et al.</i> (2008)	NC	8,5%
Aronne, Brasil & Aronne (2008)	NC	$\sigma_G=19,88\%$ $\sigma_O=23,66\%$

Tabela 3.1 – Volatilidade em trabalhos de geração

Distribuição/Transmissão	Método Utilizado	Valor Volatilidade
Miranda Filho (2005)	Ab. Consolidada da Incerteza	6,49%
Ramanathan e Varadan (2006)	NC	-
Marangon <i>et al.</i> (2006)	Ab. Consolidada da Incerteza	4,22%
Pinto <i>et al.</i> (2007)	NC	-
Salazar, Liu e Chu (2007)	NC	10,43%
Vasquez e Olsina (2007)	NC	-

Tabela 3.2 – Volatilidade em trabalhos de distribuição e transmissão

4 O VALOR DA FLEXIBILIDADE EM UM PROBLEMA REAL

4.1 Método de Pesquisa: Modelagem e Simulação

Tendo em vista a explanação anterior sobre a TOR, este trabalho claramente se refere a uma pesquisa que busca modelos de relações causais entre variáveis de controle, onde as variáveis de desempenho são desenvolvidas, analisadas e testadas, conclui-se então que o método de pesquisa é estritamente quantitativo.

De acordo com Will, Bertrand e Fransoo (2002) esta pesquisa se encaixa na classificação de pesquisa quantitativa axiomática normativa, pois é basicamente dirigida por modelos idealizados teóricos, que produzem conhecimento sobre o comportamento de outras variáveis do modelo, onde os resultados são determinados por métodos e técnicas matemáticas, estatísticas, computacionais e de otimização. E no que diz respeito ao desenvolvimento de políticas estratégicas e ações para melhorar os resultados, considera-se normativo.

Mitroff *et al.*(1974) define que existem inúmeras formas de se realizar uma pesquisa quantitativa, variando-se de acordo os objetivos do pesquisador. Todas as etapas da pesquisa quantitativa de modelagem e simulação podem ser vistas na figura 4.1. O lado direito da figura 4.1, relata a parte matemática do modelo, enquanto na parte esquerda, são visualizados os fundamentos teóricos, práticos e estratégicos da pesquisa.

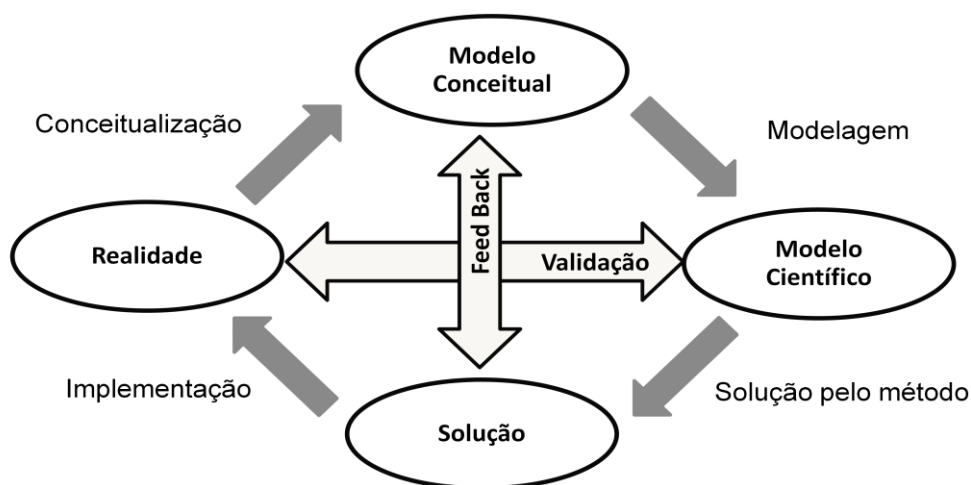


Figura 4.1 – Metodologia de Pesquisa

Fonte: Mitroff *et al.* (1974)

Ainda segundo Mitroff *et al.* (1974), conceitualização é basicamente uma atividade filosófica, enquanto modelagem e solução pelo modelo, são atividades essencialmente científicas e a implementação é uma atividade gerencial.

O modelo conceitual inicia em termos gerais a definição do problema particular a ser resolvido. São especificadas as variáveis de campo que serão usadas para definir a natureza do problema e o nível no qual as variáveis serão tratadas.

A adaptação dessa metodologia pode ser observada em Mun (2002), no qual define que a pesquisa quantitativa pode ser realizada da seguinte maneira: a etapa seguinte à conceitualização é a definição de quais projetos serão analisados, de acordo com a missão da empresa, visão, objetivos, ou estratégia empresarial global.

Nos projetos escolhidos serão colhidos os dados de custos, investimentos, receitas, risco, etc. para então realizar a análise por fluxo de caixa descontado e Simulação de Monte Carlo para análise das incertezas. Neste ponto as opções de cada projeto já estarão bem claras e um desenho de opções decisórias já pode ser elaborado.

A partir desse desenho será elaborada a modelagem das opções calculando a volatilidade e a flexibilidade, e por fim o valor total das opções. Tendo em vista esses resultados e as limitações empresarias, pode-se realizar uma otimização do portfólio de projetos, apontando assim a resolução dos problemas no relatório de resultados.

Através da apresentação dos resultados, novas decisões podem ser feitas, e novas soluções devem ser calculadas, e o ciclo de modelagem vai continuar a ser completado através dos períodos.

4.2 Método Proposto para Cálculo da Flexibilidade no Setor Elétrico

De acordo com o descrito nos tópicos acima, deve-se seguir uma metodologia para resolução de um problema de modelagem e simulação, porém a forma de resolução deste problema não necessariamente deve ser a mesma para cada exemplo, uma vez que adaptações são passíveis de acordo com cada caso.

Desta forma, foi elaborado um método adaptado, com o processo de avaliação por opções reais para um projeto no setor elétrico. As etapas desse modelo podem ser vistas na figura 4.2.

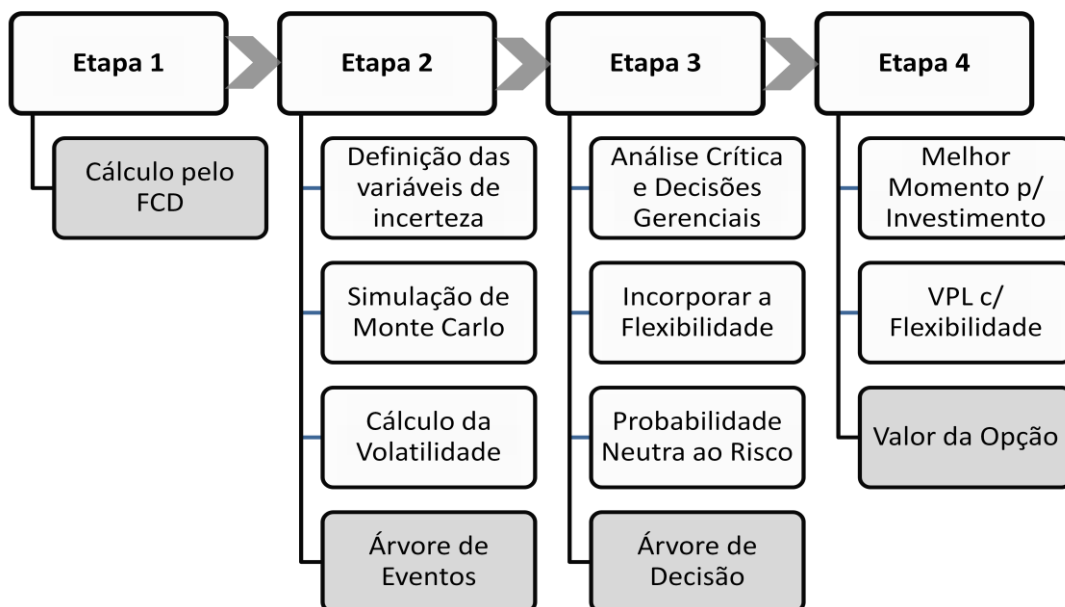


Figura 4.2 – Processo de Avaliação por Opções Reais para um Projeto de Distribuição

Na etapa 1 são aplicadas as métricas tradicionais de avaliação de investimentos e critérios como o VPL, TIR, PayBack e custo benefício são analisados. Como resultado, obtém-se o valor do projeto calculado pelas metodologias do fluxo de caixa descontado.

Já na etapa 2 são definidas as variáveis de incerteza do projeto, que podem ser definidas através de uma análise de sensibilidade realizada em uma simulação de Monte Carlo, ou através do conhecimento de especialistas. Nessa fase os dados históricos são trabalhados a fim de produzir uma previsão de cenários futuros. A partir desses parâmetros pode-se realizar novamente uma SMC com fim de obter o valor da volatilidade, que nesse exemplo irá considerar a abordagem consolidada da incerteza. Por fim, com o valor da volatilidade do projeto, pode-se construir uma árvore de eventos, na qual todos os possíveis valores para os próximos períodos são elucidados. Sendo esta árvore de eventos o produto da etapa 2.

Durante a etapa 3, a árvore de eventos será utilizada para incorporação da flexibilidade, uma vez ciente dos possíveis valores que seu projeto irá desenvolver ao longo dos períodos, o decisor poderá lançar mão de estratégias e realizar o processo de tomada de decisão de forma eficiente. Pela análise crítica das possíveis decisões ótimas futuras, valores associados a estas são incorporados à árvore do projeto. Aplicando-se probabilidade neutra ao risco esses valores são trazidos à data zero, sendo neste momento calculado o valor das opções no projeto. Como resultado desta etapa é gerada uma árvore de decisão com as

iniciativas que maximizam o valor do projeto de acordo com a realização dos cenários futuros.

Finalmente na etapa 4 o melhor momento para se investir é reportado no projeto, bem como a avaliação do projeto com flexibilidade, onde a principal saída é o valor das opções do projeto. O objetivo nesta etapa é a tomada de decisão, e o uso da metodologia aplicada como justificativa para elaboração do plano de ações do projeto junto à alta administração.

4.3 Concepção do Problema

A análise proposta por opções reais é aplicação em um projeto de expansão de capacidade de atendimento de uma subestação (SE) de uma distribuidora de energia, levando-se em consideração as incertezas presentes no projeto inicial de execução.

A empresa já possui a concessão em certa área de suprimento de energia, e previsões apontam o crescimento de consumidores locais. Nesse cenário a rede de distribuição de Alta Tensão (AT) não suportaria o crescimento da demanda previsto na região. Torna-se então necessária uma solução de planejamento como a construção de uma nova SE e linhas de distribuição AT ou ampliação das transformações das SE e recapitação das linhas existentes na região e construção de redes de distribuição em Média Tensão (MT). Em contrapartida, deve-se analisar a opção de postergar o investimento, até o momento em que o exercício da opção seja mais vantajoso.

O projeto tem um período de vida de 30 anos, tempo no qual a empresa irá remunerar seu investimento à medida que o deprecia, e também receber uma parcela do ganho perdas advindo da realização das novas estruturas. Durante os primeiros anos outra parcela das entradas do investimento é referente à receita adicional pela venda de energia para a nova demanda agregada.

Foram levantados todos os custos necessários para implementação das alternativas propostas, bem como os ganhos advindos com a diminuição das perdas no sistema elétrico. No estudo de planejamento foram avaliadas seis alternativas de atendimento, por se tratar de um projeto de grande porte, de forma a proporcionar ao gestor um maior número de possibilidades para tomada de decisões gerenciais. A programação de investimentos de curto, médio e longo prazo para cada alternativa pode ser analisada na tabela 4.1. O planejamento foi elaborado de acordo com a regulação referente ao atendimento de demanda, prevendo as penalidades, caso a demanda dos consumidores não seja atendida.

Ano	Curto Prazo			Médio Prazo			Longo Prazo			
	Ano 2	Ano 3		Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	
Problema a ser solucionado	Tensão e carregamento dos alimentadores que atendem a região das cidades de IG e SJB	...		Sobrecarga dos transformadores das SE que atendem a região da Cidade de BM						Sobrecarga nos transformadores de SE e atendimento à região de ES
Alternativa 1	Implantação SE IG2 1 x 15 MVA *				Implantação SE BM5 3 x 25 MVA *			Ampliação SE ML 2º Trafo 15 MVA * Ampliação da SE BM3 3º Trafo 25 MVA *		
Alternativa 2	Implantação SE IG2 2 x 15 MVA *					Implantação SE BM5 3 x 25 MVA *		Ampliação SE ML 2º Trafo 15 MVA * Ampliação da SE BM3 3º Trafo 25 MVA *		
Alternativa 3	Implantação SE IG2 1 X 25 MVA *					Implantação SE BM5 3 x 25 MVA *		Ampliação SE ML 2º Trafo 15 MVA * Ampliação da SE BM3 3º Trafo 25 MVA *		
Alternativa 4	Ampliação SE UTE IG 2º Trafo 25 MVA *	Alimentadores das SE da região de IG			Implantação SE BM5 3 x 25 MVA *			Ampliação da SE BM3 3º Trafo 25 MVA *		
Alternativa 5	Ampliação SE ML 2º Trafo 15 MVA *	Alimentadores das SE da região de IG		Implantação SE BM5 3 x 25 MVA *					Ampliação da SE BM3 3º Trafo 25 MVA *	
Alternativa 6	Implantação SE IG2 1 x 15 MVA *				Ampliação da IG2 2º Trafo 15 MVA *		Implantação SE BM5 3 x 25 MVA *	Ampliação SE ML 2º Trafo 15 MVA * Ampliação da SE BM3 3º Trafo 25 MVA *		

* e obras de MT associadas

Tabela 4.1 - Investimento por alternativas

As alternativas 4 e 5 foram eliminadas da análise, por não satisfazerem quesitos de confiabilidade do sistema elétrico. Já as demais alternativas foram minuciosamente analisadas quanto às restrições técnicas, sendo que estas atendem às restrições.

4.4 Modelagem

Conforme proposto no processo de avaliação por opções reais descrito na seção 4.2, foram aplicados os passos para um problema real de expansão da região em questão. Ressalta-se que consumidores locais vinham apresentando taxas de crescimento da demanda acima da média histórica da empresa, necessitando assim de investimentos em obras de reforços no sistema elétrico.

Os passos do processo de avaliação por opções reais são apresentados nos itens a seguir.

4.4.1 Etapa 1 – Cálculo pelos métodos tradicionais

Considerando os dados do projeto, foram montadas planilhas de crescimento de mercado, benefícios e custos de todas alternativas, resultando na avaliação de investimento apresentada na tabela 4.2. Verifica-se que todas as alternativas são viáveis apresentando um VPL positivo, e uma TIR bem acima da taxa mínima de atratividade exigida pela empresa em seus investimentos.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 6
Total do Inv. em Trans. + Subtransmissão*	17.333,55	19.665,23	17.590,92	19.299,73
Total do Inv. em Alimentadores Primários + Redes Subterrâneas*	1.960,69	2.217,67	2.217,68	2.906,88
Total do Inv. em Redes Primárias e Secundárias*	16.049,31	16.049,31	16.049,31	16.049,31
Total do Investimento**	35.343,55	37.932,21	35.857,91	38.255,92
Valor Presente Líquido (VPL)* descontado a 14,00%	3.200,53	3.363,43	3.854,21	2.522,31
Taxa Interna de Retorno (TIR)	39,86%	39,14%	45,73%	40,08%
Taxa Interna de Retorno Modificada (MTIR) (Reinv. a taxa 14,00%)	17,35%	17,38%	17,72%	17,27%
Relação Benefício/Custo	1,05	1,05	1,06	1,04

*(Valores em R\$1.000,00)

**Somatório simples

Tabela 4.2 – Resultado obtido pelos métodos tradicionais

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 6
Investimento	1º	3º	2º	4º
VPL	3º	2º	1º	4º
TIR	3º	4º	1º	2º
Benefício/Custo	2º	2º	1º	4º

Tabela 4.3 – Classificação das alternativas

Na tabela 4.3 as alternativas são classificadas de acordo com os quesitos de desempenho em relação à métrica tradicional de avaliação de desempenho econômico. Neste momento os tomadores de decisão optaram por executar a alternativa 3, pois ao reportar os estudos relacionados ao projeto à diretoria, as informações foram imediatamente aceitas, uma vez que é prática comum adotar essa metodologia de decisão na empresa.

No entanto resta saber qual é o resultado da flexibilidade obtida para o projeto de acordo com cada alternativa.

4.4.2 Etapa 2 – Análise das variáveis de incerteza.

As principais fontes de incerteza consideradas no projeto, de acordo com o conhecimento de especialistas, foram as variáveis: demanda, preço final da tarifa de venda de energia da distribuidora e a Taxa de remuneração de investimentos regulatória (Custo médio ponderado de capital –WACC, calculado pela ANEEL).

As incertezas múltiplas, como já mencionado na seção 2.4.5, podem ser combinadas resultando em uma única incerteza. Portanto, nesta etapa foram modeladas as incertezas de duas maneiras: de acordo com a metodologia Copeland e Antikarov (CA), onde os parâmetros variáveis simulados por Monte Carlo influenciam apenas no VP_1 , e também de acordo com Herath e Park (HP), onde os parâmetros variáveis são simulados tanto no VP_0 como no VP_1 .

Porém antes de combinar as incertezas, cada parâmetro foi avaliado separadamente, de forma a ser modelado de acordo com seu comportamento histórico e projeções futuras, conforme se segue.

- Demanda – Para definição da previsão de demanda foram utilizados dados históricos da empresa, juntamente com estudos de previsão para a região por especialistas de planejamento da empresa. Para inserção dos possíveis cenários futuros de demanda, com

base nas informações utilizadas, verificou-se a média de crescimento de acordo com a tabela 4.4, e um desvio padrão de 0,32% a.a. para todos os períodos, foi utilizada a distribuição normal, após realização de testes de normalidade com os dados obtidos.

	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
Crescimento Médio Anual	4,8%	3,9%	3,9%	4,2%	3,9%	4,4%	3,9%	3,9%

Tabela 4.4 – Crescimento da demanda na região

As taxas de crescimento da demanda após o nono período não são significativos, pois a capacidade demandada seria superior a carga do sistema, que será gerada por estes novos investimentos aqui estudados. Portanto caso haja aumento posterior a esse ano, serão necessários novos investimento para atendimento da demanda.

- Preço final da tarifa de venda de energia da distribuidora – A tarifa de energia das distribuidoras é definida pelo governo através da RAP (Receita anual permitida), que se baseia na base de remuneração dos ativos da empresa, nos custos de operação e manutenção, levando em conta ainda a eficiência das empresas do setor.

Inicialmente a tarifa de energia em estudos da área era considerada como um parâmetro fixo ao longo dos períodos. De forma análoga ao estudo da variável demanda, foram considerados dados históricos e estudos de especialistas de planejamento, onde se verificou uma tendência estacionária da variável preço. Portanto, optou-se por modelar a variável através de uma distribuição normal com $\mu = R\$182,39$ e $\sigma = R\$14,40$.

- Taxa de remuneração de investimentos regulatória – O custo médio ponderado de capital é a taxa de retorno definida pela ANEEL de forma a remunerar o capital investido por empresas de distribuição, levando em consideração a composição da estrutura de capital, e os custos associados tanto ao capital próprio quanto ao de terceiros (Vide ANEXO I). Sendo estabelecido em cada ciclo de revisões, havendo uma tendência de manter o maior tempo possível inalterada para evitar questionamentos das distribuidoras que concluem o processo de revisão em momentos diferentes.

Esta taxa é diferente do WACC calculado pela empresa, pois este considera o custo de capital próprio e de terceiros da empresa em questão. Já a taxa de remuneração definida pela ANEEL, utilizada uma metodologia (apresentada no ANEXO I) que visa à obtenção da métrica que melhor se adegue às empresas do mercado.

Durante a pesquisa foi realizada um estudo de previsão utilizando os programas ForecastPRO® e Crystal Ball®, considerando os dados históricos e a metodologia utilizados pela ANEEL durante o último ciclo de revisão. Como resultado a previsão para o Taxa de remuneração da ANEEL na próxima revisão é de 9,15% a.a., com um desvio padrão de 0,01%, o que é relativamente pequeno.

WACC ANEEL(a.a.)	
1º Ciclo 2003/2006	11,26%
2º Ciclo 2007/2010	9,98%
3º Ciclo 2011/2014	9,15%(*)

(*) Previsão

Tabela 4.5 – Taxa de remuneração de investimento (WACC ANEEL) ao longo do tempo

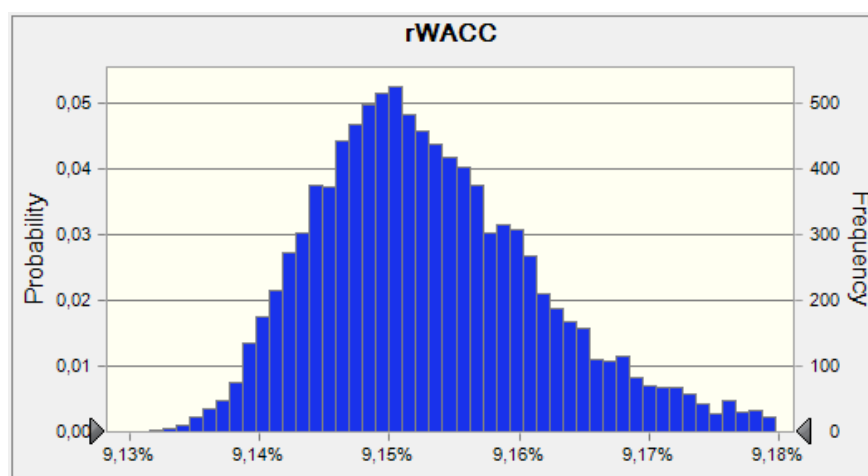


Figura 4.3 – Gráfico de distribuição de probabilidade na previsão WACC ANEEL

A principal conclusão do estudo é que a inclusão da Taxa de remuneração da ANEEL como fonte de incerteza para o trabalho não é significativa, fato também considerado por Miranda (2005) em sua dissertação, conforme cita o autor: “Desta forma, o WACC da ANEEL possui pouca volatilidade e está mais relacionado não a um risco de mercado, mas a um risco regulatório. Portanto, a incerteza relacionada a esta taxa pode ser desprezada”.

Portanto através da análise das principais variáveis exógenas do projeto, foram selecionadas duas fontes principais de incerteza: demanda e preço, e a combinação dessas variáveis irá gerar a volatilidade do projeto.

No entanto, antes da inserção da incerteza destas variáveis no projeto, foi realizado um teste de correlação entre estas, passo essencial para uma efetiva modelagem das incertezas no projeto. Como esperado verificou-se que as variáveis são independentes e inelásticas, características atribuídas à sua essencialidade como insumo básico para todos os consumidores tanto industriais e comerciais, quanto residenciais. Esse resultado também foi obtido Schmidt & Lima (2002), onde foram apurados valores que indicam a tendência à baixa elasticidade preço-demanda da energia elétrica no curto prazo.

Através das planilhas de fluxo de caixa descontado do projeto, foi possível realizar a simulação de Monte Carlo através do programa Crystal Ball®, considerando a abordagem consolidada da incerteza. Os resultados obtidos para a volatilidade pelos métodos Copeland e Antikarov (CA) e Herath e Park (HP) durante esta etapa podem ser vistos na tabela 4.6.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 6
Método CA	8,61%	7,73%	7,5%	7,98%
Método HP	12,22%	10,97%	10,64%	11,33%

Tabela 4.6 – Volatilidade por alternativa

Nota-se que as volatilidades variam de acordo com as alternativas e métodos. Essa questão será discutida mais adiante na seção 4.5.

Após a definição da volatilidade para cada alternativa de acordo com os métodos selecionados, o próximo passo para obtenção do valor da flexibilidade é a criação da árvore de eventos para cada alternativa.

Na construção da árvore de eventos são necessários as seguintes variáveis: Valor presente (VP) do ativo objeto, e os incrementos de subida e descida, obtidos através da volatilidade nas equações 2.24 e 2.25. O valor presente do ativo é o valor do projeto para empresa subtraído do preço de exercício, ou seja, os investimentos necessários para a efetivação do projeto. Neste caso o VP do ativo objeto são os benefícios provenientes da implementação do projeto menos: os custos adicionais, de operação e manutenção, e impostos e taxas.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 6
VP Ativo Objeto*	R\$ 29.691,38	R\$ 31.738,18	R\$ 30.409,40	R\$ 30.969,20
up CA	1,09	1,08	1,08	1,08
down CA	0,92	0,93	0,93	0,93
up HP	1,13	1,12	1,11	1,12
down HP	0,88	0,90	0,90	0,74

*(Valores em R\$1.000,00)

Tabela 4.7 – Entradas da árvore de eventos

A partir destas informações, foram elaboradas as árvores de eventos para cada alternativa de acordo com cada método. Essas árvores para todas as alternativas podem ser observadas no ANEXO II, a árvore de evento para a alternativa 3 pelo método de CA é vista na figura 4.4.

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
30.409	32.778	35.331	38.082	41.048	44.245	47.691	51.406	55.410	59.725
	28.212	30.409	32.778	35.331	38.082	41.048	44.245	47.691	51.406
		26.174	28.212	30.409	32.778	35.331	38.082	41.048	44.245
			24.282	26.174	28.212	30.409	32.778	35.331	38.082
				22.528	24.282	26.174	28.212	30.409	32.778
					20.900	22.528	24.282	26.174	28.212
						19.390	20.900	22.528	24.282
							17.989	19.390	20.900
								16.689	17.989
									15.483

Figura 4.4 – Árvore de eventos alternativa 3 – (CA)

4.4.3 Etapa 3 – Incorporando a flexibilidade.

A árvore de eventos fornece ao tomador de decisão a idéia de quais são as possibilidades futuras para o projeto em análise. Portanto nesta etapa é possível definir quais são as decisões ótimas a fim de maximizar o retorno do investimento, tendo em vista os valores observados em cada ramificação da árvore de eventos.

Conforme mencionado anteriormente, o investimento será realizado em três fases: curto, médio e longo prazo. Sendo que cada fase é diretamente ligada à anterior, ou seja, investir no curto prazo dá o direito de investir no médio prazo, e por consequência o investimento no médio prazo, dá o direito de investimento no longo prazo. Conclui-se a partir

daí, que o investimento no longo prazo só poderá ser executado, caso os outros dois investimentos anteriores sejam executados até o limite de expiração da opção.

O investimento de curto prazo pode ser realizado no ano 1 até o ano 2, da mesma forma o investimento de médio prazo pode ser realizado no ano 4 até o ano 5, e finalmente o investimento de longo prazo pode ser efetuado do ano 7 até o ano 9.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 6
1º Investimento Curto Prazo*	R\$ 4.936,34	R\$ 7.268,02	R\$ 5.193,71	R\$ 5.625,54
2º Investimento Médio Prazo*	R\$ 17.320,60	R\$ 13.776,65	R\$ 13.776,65	R\$ 15.742,83
3º Investimento Longo Prazo*	R\$ 13.086,62	R\$ 16.887,55	R\$ 16.887,55	R\$ 16.887,55

*(Valores em R\$1.000,00)

Tabela 4.8 – Investimentos do plano expansão

Estágios da Árvore =	9
Expiração (anos) =	9
Taxa Livre de Risco =	6%

Tabela 4.9 – Dados construção da árvore

A partir dessas restrições de investimentos, da árvore de eventos e dos dados apresentados na tabela 4.9, é aplicada a equação 4.1 de maximização do valor em cada ramo da árvore, com os valores do preço de exercício nos respectivos anos. Esse passo representa a tomada de decisão dos planejadores, que dessa maneira eliminam as situações de insucesso do projeto.

$$V_0 = \text{Max}(S_T - X; 0) \quad 4.1$$

Eliminando as possibilidades do valor do projeto ser negativo, o decisor exerce o poder de tomada de decisão que já possui empiricamente, mas que até então não era mensurado. A operação de maximização do valor ramo a ramo é realizada de maneira *backward*, ou seja, de trás para frente. Isso ocorre porque a árvore de evento elucida todos os valores que o projeto pode assumir até o último período.

Durante cada fase de investimento (curto, médio e longo prazo) o algoritmo para construção da árvore de valor da opção de espera maximiza o valor do projeto. Essa operação

é realizada de forma comparativa, ano a ano. Por exemplo, no investimento de longo prazo é realizada a maximização no último período, os valores desse ramo são trazidos para os anos anteriores por probabilidade neutra ao risco, e comparados com os valores obtidos caso os investimentos tivessem sido realizados nos respectivos anos. Dessa forma, define-se em qual ano o investimento deve ser implementado trazendo maior retorno.

O resultado da operação desse algoritmo são as árvores de valores da opção (Vide ANEXO III). Como exemplo a figura 4.5 onde é apresentado o valor por ramo da alternativa 3 pelo método de CA.

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
5.520	6.371	7.339	13.916	15.432	17.092	33.512	36.376	39.478	42.838
	2.012	2.421	8.612	9.714	10.929	26.869	29.216	31.760	34.518
		0	4.082	4.793	5.625	21.152	23.053	25.117	27.358
			731	880	1.059	16.230	17.748	19.399	21.195
				0	0	11.994	13.182	14.478	15.890
					0	8.349	9.253	10.242	11.325
						5.213	5.870	6.596	7.395
							2.977	3.458	4.012
								915	1.101
									0

Figura 4.5 – Árvore de valores opção alternativa 3 – (CA)

Porém estas são pouco significativas para os decisores, em termos gráficos, no entanto podem ser traduzidas através das árvores de decisão que são apresentadas no ANEXO IV, e na figura 4.6 da alternativa 3 pelo método de CA.

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
		Não Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
			Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
				Não Investe	Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
					Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
						Espera	Espera	Espera	Investe
							Espera	Espera	Investe
								Espera	Investe
									Não Investe

Figura 4.6 – Árvore de decisão alternativa 3 – (CA)

Neste instante algumas considerações são importantes:

- Verifica-se que no último período a sinalização é para investimento na maioria das posições do ativo, esse fato se dá pela característica *backward* do cálculo. Como a primeira análise é feita a partir do último período, e o valor do ativo é bem maior que o

investimento na última fase, quase todas as posições são favoráveis nesse período. Observa-se que no ano 5, data limite do investimento de médio prazo, existem mais posições que sinalizam o abandono do projeto, sendo que caso esse cenário ocorra, não haverá opção futura para investimento, uma vez que somente exercendo as duas primeiras opções o tomador de decisão terá a opção de longo prazo.

- Outra característica destas árvores de decisão são os investimentos ótimos, sempre realizados no ano de expiração, o que confirma de forma quantitativa uma decisão que geralmente é efetuada pelos gerentes: a opção de “esperar para ver”.
- A principal diferença demonstrada na árvore de decisão entre o método CA e HP é o indicativo de investimento no último período, que no caso de uma volatilidade maior apresenta maior chance de ter valor negativo.
- Na árvore onde os valores são sinalizados como zero, são os momentos em que o resultado será negativo.

4.4.4 Etapa 4 – Tomada de decisão.

Após os cálculos é possível obter um valor para a flexibilidade das alternativas, que de acordo Minardi (2000) o valor presente líquido (VPL) pode agregar a flexibilidade calculada por opções reais gerando o VPL expandido da equação 4.2.

$$VPL_{\text{Expandido}} = VPL_{\text{Tradicional}} + \text{Flexibilidade Gerencial} \quad 4.2$$

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 6
Valor Flexibilidade CA*	R\$ 1.507,66	R\$ 1.660,89	R\$ 1.666,10	R\$ 1.757,39
Valor Flexibilidade HP*	R\$ 1.904,72	R\$ 1.899,97	R\$ 1.845,45	R\$ 2.129,12
Diferença (%)	8,43%	4,76%	3,25%	8,69%

*(Valores em R\$1.000,00)

Tabela 4.10 – Valor da flexibilidade

Verifica-se através da tabela 4.10 que a alternativa 3, que já se apresentou como mais vantajosa em outros quesitos dos métodos tradicionais, apresenta novamente uma vantagem em relação as outras alternativas, por apresentar o segundo maior valor de flexibilidade método de CA. No entanto, pode-se verificar que o valor da flexibilidade para o método HP é menor para a mesma alternativa.

Todavia uma característica que pode ser notada na tabela 4.10, é a proximidade dos valores da flexibilidade das alternativas em cada método. Sendo que, os valores do método HP são maiores que os do método CA.

A tabela 4.11 apresenta o resultado do valor presente líquido com o valor da flexibilidade obtida pela teoria de opções reais, o maior interesse na obtenção desse valor ocorre quando há uma lista de projetos que deve ser aprovada baseando-se numa restrição orçamentária. Na formação do portfólio de projetos a empresa deverá considerar não só os métodos tradicionais de avaliação de desempenho, mas também o critério de flexibilidade que cada oportunidade trará à empresa, o valor estratégico do projeto.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 6
VPL sem Flexibilidade	R\$ 3.200,53	R\$ 3.363,43	R\$ 3.854,21	R\$ 2.522,31
VPL com Flexibilidade CA	R\$ 4.708,19	R\$ 5.024,33	R\$ 5.520,31	R\$ 4.279,69
VPL com Flexibilidade HP	R\$ 5.105,26	R\$ 5.263,40	R\$ 5.699,66	R\$ 4.651,43

*(Valores em R\$1.000,00)

Tabela 4.11 – Valor presente líquido com flexibilidade

Da tabela 4.11 pode-se concluir que a alternativa 6 mesmo apresentado maior valor de flexibilidade, é uma escolha pior que a alternativa 3. Isso se deve ao fato do VPL(3) ser maior que o VPL(6), portanto uma flexibilidade maior não supera os benefícios desta alternativa 3.

4.5 Análise dos Parâmetros

Como já citado anteriormente, a volatilidade é a única variável adicionada às variáveis utilizadas pelos métodos tradicionais de avaliação para cálculo da flexibilidade por opções reais, porém é a variável que apresenta maior dificuldade em ser determinada, e a mais complexa no que tange os parâmetros de entrada (ESCHENBACH *et. al*, 2007).

Primeiramente, Ross, Westerfield e Jaffe (2002) afirmam que há uma diferença fundamental entre aplicar a variabilidade numa opção envolvendo um ativo objeto e aplicar no próprio ativo objeto. Se os investidores tiverem aversão ao risco, um aumento de variabilidade do ativo objeto reduzirá seu valor de mercado. Entretanto, no caso das opções financeiras, o detentor da opção recebe resultados positivos em razão do aumento da volatilidade e da cauda positiva da distribuição de probabilidades.

Portanto, existe uma diferença básica em se considerar a volatilidade para opções reais e opções financeiras. De acordo com a tabela 2.1 quanto maior a volatilidade, maior o valor

da opção de compra ou de venda. Mas o mesmo não ocorre quando se trata de um ativo real, que deve possuir uma pequena margem de erro no planejamento. Pois variações negativas serão refletidas no fluxo de caixa operacional dos ativos fixos.

Outra consideração importante é o fato de a maior parte dos trabalhos na seção 3.2 não apresentarem a forma de obtenção da volatilidade.

De acordo com a tabela 4.6, a abordagem consolidada da incerteza pelo método HP apresenta valores significativamente superiores para volatilidade do que a mesma abordagem para o método de CA. Outra observação importante é que apesar das alternativas de investimento resultarem em um aumento de carga, suprimindo a mesma região de forma bastante similar, percebe-se que as alternativas apresentam volatilidades, ou seja, incertezas diferentes.

Pode-se então afirmar que, de acordo com as características e incertezas presentes no setor, as alternativas que apresentem menor volatilidade são mais vantajosas. Uma vez que a contratação de energia e o suprimento de carga são fatores rigorosamente regulados pela ANEEL, e a contratação de energia ou o planejamento da capacidade de carga instalada superdimensionados oneram os custos, através de multas e penalidades.

A escolha por utilizar a abordagem consolidada da incerteza se justifica principalmente por sua utilização na literatura, que pode ser vista na seção 3.2. Além de outros trabalhos também na área como Brandão, Dyer e Hahn (2005); e Miller e Park (2002) que realizam uma completa explanação sobre o tema, citando sua demonstração anterior de tal teoria.

Segundo Godinho (2006) tanto a método CA, quanto o método HP que também é utilizada por Cobb e Charnes (2004), estão errados, pois superestimam a volatilidade. De acordo com o autor a idéia de CA em calcular a volatilidade em relação ao primeiro período não é válida uma vez que a volatilidade muda com o tempo e com o valor do projeto. Para resolver o problema de variação de volatilidade em relação ao tempo, podem ser calculadas volatilidades para cada período do projeto, mas se a volatilidade se alterar ao longo dos períodos em conjunto com o valor do projeto se tornaria inviável essa concepção. Outra questão é considerar essa equação em projetos onde os fluxos de caixa são negativos, ou o valor presente inicial é negativo.

Outra colocação de Godinho (2006) é que o método HP superestima ainda mais o valor da volatilidade, simulando o VPL na data zero, uma vez que esse valor deveria ser o valor esperado do projeto. Para resolução do problema de cálculo da volatilidade o autor sugere passos de simulação, onde são considerados valores esperados para o valor do projeto,

e não valores acontecidos. De acordo com esta metodologia, é efetuada uma simulação do primeiro ano com os dados obtidos até o momento, em seguida são realizadas simulações dos anos subseqüentes, considerando o resultado da primeira simulação como dados de entrada e assim por diante.

Da mesma forma, Smith (2005) critica o uso da abordagem consolidada da incerteza pelo método de CA utilizada por Brandão, Dyer e Hahn (2005) por assim superestimar a volatilidade. Em contrapartida Brandão, Dyer e Hahn (2005) afirmam posteriormente que, podem utilizar arbitrariamente o desvio padrão do retorno do projeto no período 1, para especificar os parâmetros de volatilidade no processo estocástico apropriadamente, se os valores seguem um movimento geométrico browniano com volatilidade constante. Porém refazem os seus cálculos de acordo com as especificações de Smith (2005), onde são considerados os valores esperados condicionais, encontrando assim uma melhor estimativa da volatilidade.

Portanto o que se vê aqui através de trabalhos anteriores, é que ainda há duvidas sobre qual o melhor abordagem para estimação da volatilidade. A nova proposta apresentada por Gondinho (2006), semelhante a também citada por Smith (2005) e calculada por Brandão, Dyer e Hahn (2005) apresenta-se bastante viável para aplicação, porém ainda não muito difundida entre os autores mais recentes, que continuam a utilizar a abordagem consolidada da incerteza.

Por este motivo, após a utilização e verificação do resultado dos dois métodos, foi escolhida a abordagem consolidada da incerteza pelo método de Copeland e Antikarov por superestimar menos a volatilidade em relação ao método de Herath e Park.

5 CONCLUSÕES

5.1 Principais contribuições deste trabalho

A base para elaboração deste trabalho foi a aplicação da TOR em um problema do setor elétrico, através de um projeto de pesquisa e desenvolvimento firmado entre a UNIFEI e a empresa de distribuição da CEMIG.

No decorrer do desenvolvimento deste estudo, foram abordados os temas pertinentes à sua construção, como a fundamentação da pesquisa através da teoria de opções reais e financeiras, os pressupostos básicos para aplicação do modelo de árvore binomial, histórico de aplicação da TOR em problemas do setor, entre outros. Todavia os assuntos que se mostraram como contribuição principal do estudo foram a questão da obtenção da volatilidade e o método de cálculo de opções mais apropriado para o projeto em questão.

Primeiramente, quanto ao método de cálculo de opções reais, foram analisados os autores mais citados da área e suas metodologias, os passos necessários e as abordagens utilizadas. Através de testes, baseando-se nas premissas da pesquisa de modelagem e simulação, foi possível apresentar um esquema simplificado de quatro passos para obtenção do valor da opção, através do modelo de árvore binomial. Apesar do tema ser bastante diversificado e debatido por diversos autores, o sentimento para muitos estudiosos é que existem diversos métodos de pesquisa, portanto o desenvolvimento e apresentação de um esquema específico para o problema, baseado em casos bem sucedidos, se tornou essencial para a validação do resultado.

Uma das contribuições mais importantes desse trabalho é a aplicação e verificação das abordagens mais utilizadas no cálculo da volatilidade. Sendo este aspecto primordial para realização do cálculo, e tão pouco desenvolvido até agora. Em uma perspectiva todos os autores concordam: a chave para obtenção da flexibilidade está na eficaz modelagem das incertezas nos cenários futuros. Porém a forma como é feita essa modelagem ainda gera muita discussão, e grande parte dos autores ainda não exploraram esse campo, utilizando assim a abordagem consolidada da incerteza, que é amplamente difundida.

Nesse âmbito, a principal conclusão é que: até o momento a abordagem consolidada da incerteza utilizada por Copeland e Antikarov é o método mais usado para definição da volatilidade, por não superestimar as incertezas assim como Herath e Park. No entanto, restam

espaços a serem preenchidos nos métodos de cálculo que busquem diminuir as análises tendenciosas das incertezas.

Por último, o trabalho fornece as bases para o desenvolvimento de um aplicativo que tornasse mais amigável a interface dos usuários do sistema de planejamento da empresa em questão, que não são familiarizados com as técnicas matemáticas em que se baseiam a TOR.

O produto desta pesquisa é um software que funciona como ferramenta complementar de auxílio à decisão, onde podem ser analisados tanto os critérios de desempenho das métricas tradicionais, como o valor das opções reais e a árvore de decisão por opções.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

O objetivo da pesquisa foi atingido, porém conforme a sistemática da pesquisa e simulação, novos ciclos podem ser desenvolvidos a fim de refinar o resultado encontrado. Assim, são feitas as sugestões para trabalhos posteriores, baseados nas limitações encontradas na presente pesquisa.

Sugestões:

- Uma das limitações do trabalho foi a utilização da volatilidade calculada através da abordagem consolidada da incerteza. Apesar desta ser amplamente utilizada por diversos autores da área, estudos recentes vêm demonstrando que existem novas técnicas que podem vir a capturar as incertezas dos projetos com maior acuracidade.
- Outra limitação do trabalho foi considerar apenas os principais fatores de incerteza para o projeto estudado, a demanda e o preço. Posteriormente seria interessante o desmembramento da incerteza regulatória, que impõe multas por investimentos realizados nos anos próximos à revisão, por assim se aproveitar dos benefícios advindos da revisão das tarifas em datas mais próximas do investimento, ao invés de visar às reais necessidades dos consumidores. Uma sugestão seria o exemplo pesquisado por Gonçalves (2008), que utilizou árvore de opções como auxílio à decisão de prioridade de investimentos em um portfólio de investimentos, considerando a rentabilidade, mas também os contratos pré-estabelecidos com os clientes.
- A necessidade do problema era verificar o valor da flexibilidade em se esperar para investir. No entanto é sabido que, no exercício de suas atividades, as empresas têm de lidar constantemente com diversas outras possibilidades nos investimentos de seus ativos, como abandonar, contrair, parar suas operações, entre outros. Por esse motivo, tendo em vista o software para análise de investimentos, que teve como base este trabalho, deve-se

analisar e modelar outros tipos de projetos que possuam diferentes opções, para que assim os usuários do programa possam lidar com uma lista maior de alternativas para realização de suas análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. <http://www.aneel.gov.br/> - Acessado em 26/05/2009.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Nota Técnica nº68/2007-SRE/ANEEL.

ARONNE, A. V.; BRASIL, H. G.; ARONNE, I. D. Valuation of investments in flexible power plants: A case study in the brazilian power market. Real Options Conference, Brazil. 13p. 2008.

AVILA, P. L. O Valor da Flexibilidade na Utilização do Gás Natural Veicular como Combustível Alternativo em Ônibus. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 130p. 2009.

BERTRAND, J.W.M.; FRANSOO, J.C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. International Journal of Operations & Production Management, v.22, n.2, p.241-264, 2002.

BLACK, F.; SCHOLES, M. The Pricing of Options and Corporate Liabilities. Journal of Political Economy, n. 81, p. 637-659, 1973.

BRANDÃO, L. E. Uma aplicação da teoria das opções reais em tempo discreto para valoração de uma concessão rodoviária. 2002. Tese (Doutorado) - Engenharia Industrial pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC/RJ, Rio de Janeiro, 2002.

BRANDÃO, L. E.; DYER, J. S.; HAHN, W. J. Using binomial decision trees to solve real-option valuation problems. Decision Analysis, v.2 n.2, pp. 69-88, June 2005.

BRANDÃO, L. E.; DYER, J. S.; HAHN, W. J. Response to Comments on Brandão et al. (2005). Decision Analysis, v.2 n.2, pp. 103-109, June 2005.

BRASIL, H; MARRECO, J. F.; MARTINS, V. I. O.; GONÇALVES, D. S.; RIBEIRO, E. Opções Reais – Conceitos aplicações a empresas e negócios. Editora Saraiva, 2007.

CASTRO, A. L. Avaliação de investimento de capital em projetos de geração termoeletrica no setor elétrico brasileiro usando teoria de opções reais. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial – PUC-RIO. Rio de Janeiro – Brasil. 113p. 2000.

CCEE, Câmara Comercializadoras de Energia Elétrica www.ccee.gov.br – Acessado em 26/03/2009.

COBB, B. R.; CHARNES, J. M. Real options volatility estimation with correlated inputs. The Engineering Economist v. 49 119-137, 2004.

COPELAND, T. E., ANTIKAROV, V. Opções Reais: Um Novo Paradigma para Reinventar a Avaliação de Investimentos. Rio de Janeiro: Campus, 2001.

COPELAND, T. E.; TUFANO, P. A Real-World way to manage real options. Harvard Business Review, march 2004.

COX, J.C., ROSS, S. A., RUBINSTEIN, M. *Journal of Financial Economics*. Vol. 7, issue 3, pages 229-263, 1979.

DE-YI, G.; JUN, D.; LIN, X.; MING, Z. Fuzzy real options method for generation investment evaluation under uncertainties. *Computer Science and Software Engineering*, 2008 International Conference on Volume 1, 12-14 4p. Dec. 2008.

DIXIT, A. K.; PINDYCK, R. S. *Investment under Uncertainty*. New Jersey, Princeton: University Press, 1994.

ESCHENBACH, T.; LEWIS, N.; HENRIE, M.; BAKER, E.; HARTMAN, J. C. Real Options and real engineering projects. *Engineering Management Journal*, v.19 n.4, p.11-19, December 2007.

GALHARDO, M. R. Contribuição ao estudo tarifário em distribuidoras de energia elétrica no Brasil: aspectos de risco. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 108p., 2006.

GODINHO, P. M. C. Monte Carlo estimation of project volatility for real options analysis. GEMF - Faculdade de Economia, Universidade de Coimbra. 2006.

GONÇALVES, C. Gestão de investimentos em projetos de construção civil considerando opções reais. Itajubá: UNIFEI, 100p. 2008.

GUTHRIE, G. *Real Options in theory and practice*. Oxford University Press, 1st edition, 2009.

HERATH, H. S. B.; PARK, C. S. Multi-stage capital investment opportunities as compound real options. *The Engineering Economist* v. 47 n.1, 2002.

HULL, J. C. *Options, Futures and Other Derivatives*. 6ª edição. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2006.

MARANGON LIMA, J. W.; CAMINHA NORONHA, J. C.; SANTOS, P. E. S.; DOMINGOS SÉ, F. E.; MARANGON, L. M.; MIRANDA FILHO, J. Análise de Investimentos em Distribuição considerando o Ambiente Regulatório e utilizando a Teoria de Opções Reais. XVII SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Belo Horizonte, 14p. 2006.

MARRECO, J. M.; CARPIO, L. G. T. Flexibility valuation in the Brazilian power system: A real options approach. *Energy Policy* n. 34 3749-3756. 8p. 2006.

MILLER, L. T.; PARK, C. S. Decision making under uncertainty – Real options to the rescue? *The Engineering Economist* v. 47 n.2, 2002.

MINARDI, A. M. A. F. Teoria de Opções Reais Aplicada a Projetos de Investimentos, *RAE Revista de Administração de Empresas /EAESP/FGV*, São Paulo, v. 40, n. 2, Abr./Jun., p.74-79, 2000.

MIRANDA FILHO, J. Investimento em distribuição utilizando opções reais. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá - Unifei. Itajubá – Brasil. 160p. 2005.

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, p.46-58, May 1974.

MUN, J. *Real Options Analysis*. Ed. Wiley Finance. 416p., 2002.

NORONHA, Juliana Caminha. Opções reais aplicadas à gestão do processo de desenvolvimento de produto em uma indústria de autopeças. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2009.

PARK, C.S. *Contemporary Engineering Economics*, 4th edition, Hardcover, Prentice Hall, 2007.

PINTO, L.; DIAS, B.; SZCZUPAK, J.; MAIA, R.; TSUNECHIRO, L. A novel risk management model based on the real options concept. *Power Tech*, 2007, 6p. IEEE Lausanne 1-5, July 2007.

RAMANATHAN, B.; VARADAN, S. Analysis of transmission investments using real options. *Power Systems Conference and Exposition*, 2006. PSCE '06. 8p. IEEE PES Oct. 29, 2006.

ROSS, S., WESTERFIELD, R. W. & JAFFE, J. F. *Administração Financeira – Corporate Finance*. Editora Atlas, São Paulo, 2ª Edição, 2002.

SALAZAR, H.; LIU, C. C.; CHU, R. F. Decision analysis of merchant transmission investment by perpetual options theory. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, NO. 3, 8p. August 2007.

SAMUELSON, P., “Proof that properly anticipated prices fluctuate randomly,” *Industrial Management Review*, Vol. 6, pp. 41–49. 1965.

SCHMIDT, C. A. J.; LIMA, M. A. *Estimações e Previsões da Demanda por Energia Elétrica no Brasil*. Trabalho nº16, Secretária de Apoio Econômico – Ministério da Fazenda, 2002.

SMITH, J. E.; Alternative approaches for solving real-options problems. *Decision Analysis*, v.2 n.2, pp. 89-102, June 2005.

TEOH, C.C.; SHEBLÈ, G.B. Lattice method of real option analysis - solving the curse of dimensionality and strategic planning. *Power Tech*, 2007, 6p. IEEE Lausanne 1-5 July 2007.

VASQUEZ, P.; OLSINA, F. Valuing flexibility of DG investments in transmission expansion planning. *Power Tech*, 2007, 6p. IEEE Lausanne 1-5 July 2007.

WILL, J., BERTRAND, M., FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*. Vol. 22, No. 2, p.241–264, 2002.

ZHOU, H.; HOU, Y.; WU, Y.; SUN, Y.; LIU, K.; SU, J. Real Option evaluation of generation asset in spot market considering operation constraints. *Power Engineering Society General Meeting*, 2007. 6p. IEEE 24-28 June 2007.

ANEXO I – Metodologia de Cálculo do Custo Médio Ponderado de Capital

A definição do custo médio ponderado de capital é essencial no ambiente regulado, em que se encontra o setor elétrico. Qualquer alteração na taxa de desconto dos projetos afetará o portfólio de projetos em fase de implantação, assim como os existentes, pois essa é a taxa que define a remuneração do capital investido definido como base de remuneração.

Desta forma é pertinente tecer uma descrição detalhada sobre a metodologia utilizada na definição do WACC, pela agência reguladora do setor elétrico, e assim fazer a melhor previsão das próximas atualizações desta taxa.

O primeiro passo para determinação desta é a definição da estrutura ótima de capital. De acordo com as proposições de Modigliani-Miller (MM), a composição ideal de capital próprio e de terceiros é alcançada de forma a maximizar o benefício fiscal advindo do uso de capital de terceiros, porém até certo limite em que os custos de falência e endividamento não impliquem em um aumento do custo de capital próprio, devido ao aumento de riscos gerados aos acionistas.

De acordo com a Nota Técnica nº68/2007-SRE/ANEEL foi feito um estudo da composição de capital, e dos principais atributos das empresas classificadas em três grupos. O grupo 1 caracteriza por empresas de países emergentes Argentina e Chile, que estão sujeitos à regulação *price cap*. No grupo 2 estão agrupadas empresas da Austrália e Grã-Bretanha, países com alto grau de desenvolvimento que possuem o regime de *price cap* no setor de distribuição. E finalmente no grupo 3 estão agrupadas empresas brasileiras.

Após a formação destes três grupos foi analisada a taxa de valores em relação ao capital de terceiros de cada grupo. A partir da interseção dessas três faixas com meio desvio padrão para mais e para menos da média de cada grupo, foi possível determinar qual seria a faixa ideal para o setor brasileiro, bem como a meta pontual para composição de capital de terceiros de 56,95%.

A modelo tradicional que descreve a formula de cálculo do WACC é expresso de acordo com a equação A.1.

$$r_{WACC} = \frac{P}{P + D} \times r_P + \frac{D}{P + D} \times r_D \times (1 - I) \quad A.1$$

Onde $P/(P + D)$ representa a composição de capital próprio no montante do passivo, e $D/(P + D)$ representa a participação de capital de terceiros, multiplicados respectivamente

pelos seus custos de capital. O benefício proporcionado pelo abatimento dos juros nos impostos é deduzido pela parcela $(1 - I)$, onde I é alíquota de impostos aplicada no país.

No Brasil os impostos que incidem sobre o lucro líquido das empresas são: o Imposto de Renda de Pessoa Jurídica (IRPJ) e a Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL). A partir das deduções realizadas pela ANEEL que constam na Nota Técnica nº68/2007-SRE/ANEEL, a alíquota referente à parcela de impostos da equação 1, corresponde a 34%.

A.1 Custo de Capital Próprio

O custo de capital próprio é a taxa de retorno exigida por um investidor, para que este invista seu capital em empresas, de acordo com a atividade desenvolvida, e conseqüentemente uma taxa que seja equivalente aos seus riscos.

Dentre os diversos métodos para estimação do custo de capital próprio, foi escolhido pela ANEEL o *Capital Asset Pricing Model* (CAPM). Neste modelo assume-se que o prêmio pelo risco é proporcional ao coeficiente beta, o qual indica a variação do retorno de uma ação de uma determinada empresa em relação ao mercado. O que significa que a medida beta é uma medida de risco em uma carteira ampla.

Desta forma a fórmula para obtenção do custo de capital pelo CAPM é vista na equação A.2.

$$\bar{R}_i = R_f + \beta_i(\bar{R}_M - R_f) \quad \text{A.2}$$

Sendo a taxa de retorno esperado a somatória da taxa livre de risco (R_f) mais o prêmio pelo risco do mercado acionário $\beta_i(\bar{R}_M - R_f)$.

Por se tratar de uma indústria regulada no Brasil, devem ser adicionados prêmios pelo risco associados às especificidades do mercado local. Portanto para se obter o custo de capital próprio para empreendimentos de transmissão e distribuição de energia, deve-se utilizar a equação A.3.

$$r_{CAPM} = r_f + \beta \times (r_m - r_f) + r_B + r_X + r_R \quad \text{A.3}$$

Além dos fatores que constam na fórmula tradicional: a taxa livre de risco e o prêmio pelo risco de mercado, foram incluídos prêmios relativos ao risco Brasil (r_B), ao risco cambial (r_X) e ao risco regulatório (r_R).

Todavia em projetos do setor elétrico o risco regulatório pode ser incorporado no cálculo do beta, uma vez que esse coeficiente reflete essa característica de mercado onde a empresa se encontra. Por fim a equação 4, representa o método de cálculo do CAPM para o setor elétrico, segundo a definição da ANEEL.

$$r_{CAPM(P)} = r_f + \beta \times (r_m - r_f) + r_B + r_X \quad A.4$$

Onde:

r_f : taxa de retorno do ativo livre de risco

$\beta \times (r_m - r_f)$: beta do setor regulado multiplicando o prêmio de risco do mercado de referência

r_B : prêmio de risco Brasil

r_X : prêmio de risco cambial

A.2 Custo de Capital de Terceiros

Da mesma forma que o custo de capital próprio reflete a taxa de retorno que os investidores exigem para assumir riscos em se investir em empresas, o custo de capital de terceiros reflete o retorno que os credores da dívida exigem para fazer seus empréstimos.

Dentre as metodologias existentes para cálculo deste custo, a ANEEL optou de forma análoga pelo método CAPM da dívida, que é similar à metodologia utilizada anteriormente para cálculo do custo de capital próprio. A expressão desta metodologia corresponde à equação A.5.

$$r_d = r_f + r_c + r_B + r_X \quad A.5$$

Onde:

r_f : taxa de retorno do ativo livre de risco

r_c : prêmio de risco de crédito

r_B : prêmio de risco Brasil

r_X : prêmio de risco cambial

A.3 Metodologia de cálculo dos prêmios para o custo de capital

Neste tópico serão descritas as metodologias utilizadas para obtenção de cada parcela dos prêmios pelos riscos. Os prêmios utilizados tanto para o cálculo do custo de capital próprio, quanto para o de custo de capital de terceiros são obtidos da mesma forma.

A.3.1 Taxa Livre de Risco

Para efeito de definição da taxa livre de risco foi apurado o rendimento do bônus do tesouro norte americano com vencimento em 10 anos. Durante o período de janeiro de 1995 a junho de 2006. A taxa média de juros anual encontrada foi de 5,32%.

A.3.2 Prêmio de Risco do Mercado

Na determinação do prêmio pelo risco de mercado foi realizada a média aritmética de todas as diferenças anuais entre o indicador S&P 500, e a taxa livre de risco nos EUA (rendimento do bônus do tesouro norte americano) a partir do ano de 1928 até 2006. A taxa média anual encontrada foi 6,09%.

A.3.3 Risco do negócio, financeiro e regulatório

Os betas das empresas exprimem o risco do negócio e também o risco financeiro. Para a determinação do beta que exprima estes riscos, foi realizada uma análise do beta de empresas do mercado de referência, que no caso é os EUA. Porém os betas encontrados são alavancados de acordo com a composição de capital existente, então deve ser efetuada a desalavancagem do beta conforme a equação A.6.

$$\beta_i^{Desalavancado} = \beta_i^{Alavancado} \times \left(\frac{P_i}{P_i + D_i \times (1 - I)} \right) \quad A.6$$

O próximo passo é efetuar a média ponderada desses betas de acordo com a participação de ativos de cada empresa respectivamente, na composição total de ativos da amostra. E assim fazer a realavancagem do beta de acordo com a estrutura de capital brasileira, bem como a alíquota de impostos vigente.

$$\beta^{Alavancado} = \left(\frac{P + D \times (1 - I)}{P} \right) \times \beta^{Desalavancado} \quad A.7$$

Portanto, após a realavancagem do beta do mercado de referência foi possível encontrar os riscos de negócio juntamente com o risco financeiro.

$$Risco_{Negócio} + Risco_{Financeiro} = \beta^{Alavancado} \times (r_m - r_f) \quad A.8$$

Foram escolhidas 20 empresas que atuam no mercado de transmissão e distribuição dos EUA, e a média dos betas desalavancados foi igual a 0,27.

Na modelagem do custo de capital em ambientes regulados, é pertinente analisar as três categorias existentes de nível de regulação:

- Regimes de alto poder de incentivo: *price cap*;
- Regimes com médio poder de incentivo;
- Regimes com baixo poder de incentivo: *rate of return*.

Como o setor elétrico pode ser classificado como um regime de alto poder de incentivo, e o mercado de referência não se encontra com o mesmo nível de regime, é necessário o ajuste do beta, de forma que este corresponda também ao risco regulatório do setor.

Assim a variação entre os betas em diferentes regimes regulatórios são compreendidos pela equação 9.

$$\Delta\beta = (\beta_{PC} - \beta_{RR})^{Desalavancado} \quad A.9$$

Sendo β_{PC} corresponde à média do coeficiente beta regime de *price cap*, e β_{RR} à média do coeficiente beta em regime de *rate of return*.

Portanto o beta final encontrado que melhor representa os riscos do negócio, financeiro e regulatório é compreendido na fórmula A.10.

$$\beta = \beta_{RR}^{Alavancado} + \Delta\beta \quad A.10$$

Onde:

$\beta_{RR}^{Alavancado}$: beta do mercado de referência (regime de *rate of return*) alavancado pela estrutura de capital brasileira.

$\Delta\beta$: ajuste para o risco de regime regulatório.

Foi encontrado um beta alavancado resultante em 0,772.

A.3.4 Prêmio de Risco do País

Este é um prêmio pago para transações efetuadas em países em que haja um risco quanto ao cumprimento do reembolso prometido pelo devedor soberano. Em outras palavras é o risco de crédito para investimentos realizados em países emergentes, considerando que o risco “zero” seja encontrado em prêmios para investimento nos EUA.

O prêmio sobre o risco Brasil é computado como o spread sobre a taxa livre de risco nos EUA, portanto o prêmio de risco Brasil é dada por:

$$r_B = r_s - r_c^B \quad \text{A.11}$$

Onde:

r_s : prêmio pelo risco soberano.

r_c^B : prêmio de risco de crédito Brasil.

Na determinação do prêmio pelo risco soberano foi utilizado o índice EMBI – *Emerging Markets Bond Index*, calculado pelo Banco JP Morgan. No caso do Brasil o índice é o EMBI+BR, foi analisado o período de abril de 1994 a junho de 2006, cujo valor médio foi de 7,87%.

Já no cálculo do prêmio pelo risco de crédito do Brasil, foram analisados os ratings soberanos fornecidos pelas agências: Moody's, Fitch e Standard & Poor's. Foi considerado o rating fornecido pela Moody's, que na época era Ba2. A partir desse rating, foram analisados os históricos de títulos classificados com a mesma nota, também durante o período de abril 1994 a junho de 2006. A média dos spreads dessas empresas foi de 2,96%.

Aplicando-se a equação 11, obtêm-se o prêmio de risco Brasil igual a 4,91%.

A.3.5 Prêmio pelo Risco Cambial

Com a adoção do cambio flutuante a partir de 1999, tornou-se necessária no Brasil a avaliação dos riscos incorridos por investidores estrangeiros no momento que suas transações financeiras envolvam trocas de moeda, onde o câmbio não reflita uma situação de equilíbrio. Nesse contexto a equação A.12 reflete a definição de paridade coberta da taxa de juros acrescida do risco país.

$$i = i^* + (f - s) + r_B \quad \text{A.12}$$

Onde a taxa de juros doméstica é igual à taxa de juros externa mais a diferença entre o valor futuro do dólar menos o valor do dólar hoje (*forward premium*) mais o prêmio pelo risco Brasil.

$$(f - s) = E(s_T - s_t) + r_X \quad \text{A.13}$$

Sendo o *forward premium* é o valor esperado da diferença entre a taxa de câmbio do dólar no futuro e a taxa de hoje, mais um prêmio pelo risco cambial a ser analisado.

A medição do risco cambial é feita através do filtro de Kalman. Quando o prêmio de risco cambial é definido como a diferença entre o spread do câmbio no mercado futuro e a expectativa de desvalorização cambial.

Após análise realizada com dados mensais do mercado futuro cambial da BMF de julho de 1999 a junho de 2006, o prêmio de risco cambial calculado foi de 1,78%.

A.3.6 Prêmio pelo Risco de Crédito

Representa o spread sobre a taxa livre de risco que as empresas com mesma classificação de risco, que as empresas atuantes no setor de distribuição e transmissão, pagam para fazer seus empréstimos. Foram levantadas todas as empresas brasileiras que atuam em transmissão e distribuição, e que possuam classificação de risco na agencia Moody's.

De acordo com a média de classificação destas empresas optou-se por considerar a classificação média como Ba2. Dessa forma foram analisados os papéis de empresas com a mesma classificação de risco durante o período de abril de 1994 a junho de 2006, determinou-se então uma taxa de 2,96% para o prêmio de risco de crédito.

A.3.7 Inflação

Calculados todos os parâmetros de risco, pode-se então determinar o WACC nominal para o setor. No entanto como as tarifas são reajustadas por um índice de inflação, deve-se também considerar a deflação do WACC que pode ser vista na equação 14.

$$r_{real} = \frac{1 + r_{nominal}}{1 + \pi} \quad \text{A.14}$$

Nesta equação o índice que representa a inflação é π , que segundo a ANEEL foi calculado segundo a taxa média de inflação anual nos EUA, durante um período de janeiro de 1999 a junho de 2006, e que resultou em uma inflação média de 2,6%.

Conclusão

A partir da definição dessa metodologia foi possível concluir o cálculo do Custo Médio Ponderado de Capital. Cabe ressaltar ainda que devido ao benefício fornecido pela RGR (Reserva Geral de Conversão), a estrutura de capital foi reajustada chegando à composição de capital de terceiros de 57,16%.

Os valores resumidos podem ser encontrados na tabela A.1.

Estrutura de Capital		
Capital próprio	(P/V)	42,84%
Capital de terceiros	(D/V)	57,16%
Outros Dados		
Inflação	π	2,60%
Impostos no Brasil	I	34%
Parâmetros de Risco		
Taxa livre de risco	r_f	5,32%
Prêmio de risco de mercado	$r_m - r_f$	6,09%
Beta médio alavancado	β	0,772
Risco do negócio, financeiro e regulatório	$\beta(r_m - r_f)$	4,70%
Prêmio de risco país	r_B	4,91%
Prêmio de risco cambial	r_X	1,78%
Prêmio de risco de crédito	r_C	2,96%
Custo de Capital Próprio		
Custo de Capital Próprio Nominal	r_P	16,71%
Custo de Capital Próprio Real	r_P	13,75%
Custo de Capital de Terceiros		
Custo da dívida nominal	r_D	14,97%
Custo de dívida real	r_D	12,06%
Custo de Capital		
WACC nominal depois de impostos	r_{WACC}	12,81%
WACC real depois de impostos	r_{WACC}	9,98%

Tabela A.1 – Custo Médio Ponderado de Capital (WACC)

ANEXO II – Árvores de Eventos das Alternativas por Método

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
29.691	32.361	35.271	38.442	41.899	45.666	49.772	54.247	59.125	64.441
	27.242	29.691	32.361	35.271	38.442	41.899	45.666	49.772	54.247
		24.995	27.242	29.691	32.361	35.271	38.442	41.899	45.666
			22.933	24.995	27.242	29.691	32.361	35.271	38.442
				21.041	22.933	24.995	27.242	29.691	32.361
					19.305	21.041	22.933	24.995	27.242
						17.712	19.305	21.041	22.933
							16.251	17.712	19.305
								14.910	16.251
									13.680

Figura A.1 – Árvore de eventos alternativa 1 – (CA)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
31.738	34.289	37.045	40.022	43.238	46.713	50.467	54.523	58.905	63.639
	29.377	31.738	34.289	37.045	40.022	43.238	46.713	50.467	54.523
		27.192	29.377	31.738	34.289	37.045	40.022	43.238	46.713
			25.169	27.192	29.377	31.738	34.289	37.045	40.022
				23.297	25.169	27.192	29.377	31.738	34.289
					21.564	23.297	25.169	27.192	29.377
						19.960	21.564	23.297	25.169
							18.475	19.960	21.564
								17.101	18.475
									15.829

Figura A.2 – Árvore de eventos alternativa 2 – (CA)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
30.409	32.778	35.331	38.082	41.048	44.245	47.691	51.406	55.410	59.725
	28.212	30.409	32.778	35.331	38.082	41.048	44.245	47.691	51.406
		26.174	28.212	30.409	32.778	35.331	38.082	41.048	44.245
			24.282	26.174	28.212	30.409	32.778	35.331	38.082
				22.528	24.282	26.174	28.212	30.409	32.778
					20.900	22.528	24.282	26.174	28.212
						19.390	20.900	22.528	24.282
							17.989	19.390	20.900
								16.689	17.989
									15.483

Figura A.3 – Árvore de eventos alternativa 3 – (CA)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
30.969	33.542	36.328	39.346	42.614	46.154	49.989	54.141	58.639	63.510
	28.594	30.969	33.542	36.328	39.346	42.614	46.154	49.989	54.141
		26.401	28.594	30.969	33.542	36.328	39.346	42.614	46.154
			24.376	26.401	28.594	30.969	33.542	36.328	39.346
				22.506	24.376	26.401	28.594	30.969	33.542
					20.780	22.506	24.376	26.401	28.594
						19.186	20.780	22.506	24.376
							17.715	19.186	20.780
								16.356	17.715
									15.101

Figura A.4 – Árvore de eventos alternativa 6 – (CA)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
29.691	33.551	37.912	42.839	48.408	54.700	61.809	69.843	78.922	89.180
	26.276	29.691	33.551	37.912	42.839	48.408	54.700	61.809	69.843
		23.254	26.276	29.691	33.551	37.912	42.839	48.408	54.700
			20.579	23.254	26.276	29.691	33.551	37.912	42.839
				18.212	20.579	23.254	26.276	29.691	33.551
					16.117	18.212	20.579	23.254	26.276
						14.263	16.117	18.212	20.579
							12.622	14.263	16.117
								11.170	12.622
									9.885

Figura A.5 – Árvore de eventos alternativa 1 – (HP)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
31.738	35.418	39.524	44.107	49.221	54.928	61.296	68.403	76.334	85.185
	28.441	31.738	35.418	39.524	44.107	49.221	54.928	61.296	68.403
		25.486	28.441	31.738	35.418	39.524	44.107	49.221	54.928
			22.838	25.486	28.441	31.738	35.418	39.524	44.107
				20.465	22.838	25.486	28.441	31.738	35.418
					18.339	20.465	22.838	25.486	28.441
						16.433	18.339	20.465	22.838
							14.726	16.433	18.339
								13.196	14.726
									11.825

Figura A.6 – Árvore de eventos alternativa 2 – (HP)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
30.409	33.823	37.621	41.844	46.542	51.767	57.579	64.043	71.233	79.230
	27.340	30.409	33.823	37.621	41.844	46.542	51.767	57.579	64.043
		24.580	27.340	30.409	33.823	37.621	41.844	46.542	51.767
			22.099	24.580	27.340	30.409	33.823	37.621	41.844
				19.869	22.099	24.580	27.340	30.409	33.823
					17.863	19.869	22.099	24.580	27.340
						16.060	17.863	19.869	22.099
							14.439	16.060	17.863
								12.982	14.439
									11.672

Figura A.7 – Árvore de eventos alternativa 3 – (HP)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
30.969	34.685	38.846	43.506	48.725	54.570	61.117	68.449	76.661	85.858
	27.652	30.969	34.685	38.846	43.506	48.725	54.570	61.117	68.449
		24.690	27.652	30.969	34.685	38.846	43.506	48.725	54.570
			22.045	24.690	27.652	30.969	34.685	38.846	43.506
				19.684	22.045	24.690	27.652	30.969	34.685
					17.575	19.684	22.045	24.690	27.652
						15.693	17.575	19.684	22.045
							14.012	15.693	17.575
								12.511	14.012
									11.171

Figura A.8 – Árvore de eventos alternativa 6 – (HP)

ANEXO III – Árvores de Valores da Opção das Alternativas por Método

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
4.708	5.783	7.090	13.801	15.780	17.980	38.784	42.600	46.779	51.355
	1.215	1.558	7.732	9.152	10.756	30.911	34.019	37.426	41.161
		0	2.842	3.645	4.675	24.283	26.795	29.553	32.580
			0	0	0	18.704	20.714	22.925	25.356
				0	0	14.007	15.595	17.346	19.274
					0	10.053	11.285	12.649	14.155
						6.724	7.658	8.695	9.846
							4.604	5.366	6.218
								2.565	3.164
									594

Figura A.9 – Árvore de valores opção alternativa 1 – (CA)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
5.024	5.925	6.978	15.855	17.622	19.560	36.288	39.493	42.973	46.751
	1.373	1.676	10.123	11.428	12.868	29.059	31.683	34.535	37.635
		0	5.242	6.122	7.136	22.865	24.992	27.306	29.825
			1.493	1.822	2.224	17.559	19.259	21.113	23.134
				0	0	13.013	14.347	15.807	17.401
					0	9.118	10.139	11.260	12.490
						5.783	6.534	7.365	8.282
							3.462	4.028	4.676
								1.301	1.587
									0

Figura A.10 – Árvore de valores opção alternativa 2 – (CA)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
5.520	6.371	7.339	13.916	15.432	17.092	33.512	36.376	39.478	42.838
	2.012	2.421	8.612	9.714	10.929	26.869	29.216	31.760	34.518
		0	4.082	4.793	5.625	21.152	23.053	25.117	27.358
			731	880	1.059	16.230	17.748	19.399	21.195
				0	0	11.994	13.182	14.478	15.890
					0	8.349	9.253	10.242	11.325
						5.213	5.870	6.596	7.395
							2.977	3.458	4.012
								915	1.101
									0

Figura A.11 – Árvore de valores opção alternativa 3 – (CA)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
4.280	5.175	6.255	13.430	15.143	17.035	35.809	39.111	42.707	46.622
	751	930	7.635	8.857	10.227	28.435	31.125	34.057	37.254
		0	2.881	3.570	4.422	22.149	24.316	26.683	29.267
			0	0	0	16.790	18.512	20.397	22.458
				0	0	12.222	13.564	15.038	16.654
					0	8.327	9.346	10.469	11.706
						5.012	5.750	6.575	7.488
							2.718	3.255	3.892
								668	827
									0

Figura A.12 – Árvore de valores opção alternativa 6 – (CA)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
5.105	7.075	9.757	18.199	22.288	27.013	50.822	58.196	66.576	76.093
	1.250	1.855	9.012	11.792	15.153	37.420	43.053	49.464	56.757
		0	2.664	3.952	5.864	26.924	31.192	36.062	41.613
			0	0	0	18.704	21.904	25.566	29.753
				0	0	12.266	14.629	17.346	20.464
					0	7.233	8.932	10.908	13.189
						3.406	4.503	5.866	7.492
							1.376	2.042	3.030
								0	0
									0

Figura A.13 – Árvore de valores opção alternativa 1 – (HP)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
5.263	7.068	9.458	19.941	23.605	27.775	47.117	53.373	60.403	68.297
	1.218	1.732	11.252	13.908	16.954	35.042	39.898	45.365	51.516
		0	4.523	6.122	8.265	25.345	29.077	33.289	38.040
			637	906	1.288	17.559	20.388	23.593	27.220
				0	0	11.307	13.411	15.807	18.530
					0	6.316	7.808	9.554	11.553
						2.587	3.434	4.533	5.950
							718	1.021	1.451
								0	0
									0

Figura A.14 – Árvore de valores opção alternativa 2 – (HP)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
5.700	7.430	9.629	17.678	20.926	24.614	43.400	49.013	55.301	62.342
	1.766	2.480	9.657	12.004	14.691	32.363	36.737	41.647	47.155
		0	3.444	4.793	6.670	23.441	26.814	30.610	34.879
			95	133	187	16.230	18.793	21.689	24.957
				0	0	10.401	12.310	14.478	16.936
					0	5.720	7.070	8.649	10.452
						2.225	2.964	3.937	5.212
							495	695	976
								0	0
									0

Figura A.15 – Árvore de valores opção alternativa 3 – (HP)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
4.651	6.402	8.794	17.590	21.254	25.451	46.938	53.419	60.729	68.970
	829	1.194	8.859	11.374	14.386	34.546	39.541	45.186	51.562
		0	2.682	3.864	5.565	24.666	28.476	32.793	37.683
			0	0	0	16.790	19.655	22.914	26.618
				0	0	10.511	12.622	15.038	17.797
					0	5.549	7.015	8.758	10.764
						1.974	2.724	3.752	5.158
							331	477	688
								0	0
									0

Figura A.16 – Árvore de valores opção alternativa 6 – (HP)

ANEXO IV – Árvores de Decisão das Alternativas por Método

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
		Não Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
			Não Investe	Não Investe	Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
				Não Investe	Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
					Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
						Espera	Espera	Espera	Investe
							Espera	Espera	Investe
								Espera	Investe
									Investe

Figura A.17 – Árvore de decisão alternativa 1 – (CA)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
		Não Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
			Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
				Não Investe	Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
					Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
						Espera	Espera	Espera	Investe
							Espera	Espera	Investe
								Espera	Investe
									Não Investe

Figura A.18 – Árvore de decisão alternativa 2 – (CA)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
		Não Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
			Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
				Não Investe	Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
					Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
						Espera	Espera	Espera	Investe
							Espera	Espera	Investe
								Espera	Investe
									Não Investe

Figura A.19 – Árvore de decisão alternativa 3 – (CA)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
		Não Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
			Não Investe	Não Investe	Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
				Não Investe	Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
					Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
						Espera	Espera	Espera	Investe
							Espera	Espera	Investe
								Espera	Investe
									Não Investe

Figura A.20 – Árvore de decisão alternativa 6 – (CA)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
		Não Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
			Não Investe	Não Investe	Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
				Não Investe	Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
					Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
						Espera	Espera	Espera	Investe
							Espera	Espera	Investe
								Não Investe	Não Investe
									Não Investe

Figura A.21 – Árvore de decisão alternativa 1 – (HP)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
		Não Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
			Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
				Não Investe	Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
					Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
						Espera	Espera	Espera	Investe
							Espera	Espera	Investe
								Não Investe	Não Investe
									Não Investe

Figura A.22 – Árvore de decisão alternativa 2 – (HP)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
		Não Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
			Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
				Não Investe	Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
					Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
						Espera	Espera	Espera	Investe
							Espera	Espera	Investe
								Espera	Investe
								Não Investe	Não Investe
									Não Investe

Figura A.23 – Árvore de decisão alternativa 3 – (HP)

Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
	Espera	Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
		Não Investe	Espera	Espera	Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
			Não Investe	Não Investe	Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
				Não Investe	Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
					Não Investe	Espera	Espera	Espera	Investe
						Espera	Espera	Espera	Investe
							Espera	Espera	Investe
								Espera	Investe
								Não Investe	Não Investe
									Não Investe

Figura A.24 – Árvore de decisão alternativa 6 – (HP)