

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ECONOMIA
MESTRADO EM ECONOMIA APLICADA

GLÁUCIA FERNANDES

**AVALIAÇÃO DE PROJETOS DE P&D: UMA ABORDAGEM PELA TEORIA DAS
OPÇÕES REAIS**

JUIZ DE FORA

2013

GLÁUCIA FERNANDES

**AVALIAÇÃO DE PROJETOS DE P&D: UMA ABORDAGEM PELA TEORIA DAS
OPÇÕES REAIS**

Dissertação referente ao programa de Pós-Graduação em economia aplicada da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito para obtenção do grau de Mestre.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Fernanda Finotti Cordeiro Perobelli

Supervisor: Prof. Dr. Eduardo Gonçalves

JUIZ DE FORA

2013

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo sugerir uma adaptação do modelo de Silva & Santiago (2009) para projetos com *market share* garantido, aplicando a modelagem para analisar a viabilidade de um projeto de P&D incubado pelo CRITT da UFJF. Além disso, algumas críticas foram apontadas em relação ao modelo dos autores, tais como a inflexibilidade de alguns parâmetros e à insensibilidade dos custos em relação ao tempo e a performance do produto/tecnologia, quando grande parte dos custos das empresas são fixos. A fim de contornar esses problemas alguns testes de sensibilidades foram realizados garantido maior confiabilidade dos resultados: (i) análises da probabilidade de sucesso; (ii) análise dos parâmetros de forma e escala, e; (iii) análise do desvio padrão do tempo. Com respeito ao projeto estudado (o HBDO), este se mostrou mais promissor diante do tratamento múltiplo da incerteza, apresentando um valor superior ao valor calculado pela análise tradicional. Com relação às análises de sensibilidades sobre o projeto, observou-se que os parâmetros sensibilizados impactaram significativamente o valor do projeto, indicando que uma análise cautelosa deve ser feita em relação aos mesmos. Além disso, uma análise do valor do projeto com o tempo seguindo uma distribuição uniforme também foi realizada, apresentando valores menores que os estimados anteriormente com a distribuição triangular, mas seguindo as mesmas conclusões anteriores sobre a importância de se considerar as incertezas na análise de valoração. Por fim, conclui-se que a análise de valoração de projetos de P&D ainda é um desafio e, por isso, o desenvolvimento e/ou aprimoramento de modelos que capturem as incertezas e flexibilidades gerenciais que os gestores enfrentam justifica a escolha dessa unidade de estudo.

Palavras-chave: Opção real, avaliação de projetos, projeto de P&D, programação dinâmica.

ABSTRACT

This work suggests an adaptation of Silva & Santiago (2009) model for treat projects with guaranteed market share and we intend to apply it to analyze a R&D project, which is incubated by CRITT at UFJF. Moreover, some critics were made about authors' model, such as the inflexibility of some parameters and the insensitivity of costs on time and product/technology performance, when most costs of the companies are fixed. To ride out these problems some sensitivity tests were performed to guarantee higher reliability of the results: (i) analysis of the success probability; (ii) analysis of the parameters of shape and scale; (iii) analysis of the standard deviation of time. With respect to the project that we studied (the HBDO), it was more promising over multiple uncertainties, presenting a value higher than that calculated by traditional analysis. With respect to sensitivity analysis performed, it was observed that the sensitized parameters had a significantly impact on the project value, which indicate that a careful analysis should be done for those. Furthermore, an analysis of the project value with the time following a uniform distribution was performed too and it showed lower values than those estimated previously with triangular distribution. It also showed the same previous conclusions about the importance of considering the uncertainties in the valuation analysis. Finally, we concluded that the analysis of the valuation of R&D projects is still a challenge and, therefore, the development and/or improvement of models that capture the uncertainty and managerial flexibility faced by the managers, justifies the choice of this study.

Keywords: Real option, project evaluation, project R&D, dynamic programming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - O processo de <i>Stage-Gates</i>	23
Figura 2-2 - O processo de tomada de decisão	24
Figura 4-1- Evolução do preço do ativo em um período	39
Figura 4-2 – Modelo Binomial CRR	42
Figura 5-1 - Representação esquemática.	55
Figura 5-2 – variação de $v(t)$ em função do parâmetro de forma (k), $a = 28$	63
Figura 5-3 – variação de $v(t)$ em função do parâmetro de escala (a), $k = 2$	64
Figura 5-4 – Variação de $V(t)$ em função do parâmetro de forma (k), $a = 28$	64
Figura 5-5 – Variação de $V(t)$ em função do parâmetro de forma (a), $k = 2$	65
Figura 5-6 - Variação dos VPLs dependendo do parâmetro de forma (k), $a = 10$	66
Figura 5-7 - Variação dos VPLs dependendo do parâmetro de escala (a), $k = 2$	66
Figura 6-1 - Exemplo de rede de comunicação PLC.....	68
Figura 6-2- Árvore de incerteza técnica	71
Figura 6-3 – Probabilidades de transição – exemplo.....	72
Figura 6-4 - Quantidade de medidores instalados por ano no grau avançado	73
Figura 6-5 – Volume de vendas.....	74
Figura 6-6 – Função <i>Payoff</i> – Tempo Determinístico	75
Figura 6-7 - Distribuição do tempo	76
Figura 6-8 - Função <i>Payoff</i> – Tempo Estocástico projeto	79
Figura 6-9 – Distribuição de VPLs.....	80
Figura 6-10 – Valor Esperado do Projeto x Probabilidade.....	82
Figura 6-11 - Flexibilidade x Probabilidade.....	83
Figura 6-12 - VPLA x Flexibilidade x Variação	86
Figura 6-13 - Distribuição do tempo	87
Figura 6-14 - Distribuição de VPLs	88
Figura 6-15 - VPLA x Flexibilidade x Variação	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 5-1 - Parâmetros utilizados durante o projeto.....	65
Tabela 6-1– Parâmetros da fase do projeto de desenvolvimento	70
Tabela 6-2 – Duração, custos fixos e variáveis de cada etapa.....	77
Tabela 6-3 - Resultados dos cenários de aumento do parâmetro de escala.....	84
Tabela 6-4 - Resultados dos cenários de aumento do parâmetro de forma	84
Tabela 6-5 - Resultados por cenário (distribuição triangular).....	86
Tabela 6-6 - Resultados por cenário (distribuição uniforme).....	88

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivos	10
1.2	Justificativa	11
1.3	Estrutura do Trabalho	12
2	DESENVOLVIMENTO E GESTÃO DO PROCESSO DE INOVAÇÃO	13
2.1	A Importância Econômica da Gestão da Inovação	13
2.2	Firma Inovadora, P&D e Retornos de Mercado	17
2.3	O Processo de P&D	20
2.3.1	Abordagens para o P&D e o Processo de <i>Stage-Gate</i>	22
3	O PROCESSO DE ANÁLISE DE PROJETOS DE INVESTIMENTO.....	25
3.1	Análise Tradicional.....	26
3.2	Análise de Incerteza.....	30
3.2.1	Simulação de Monte Carlo	31
3.2.2	Árvores de Decisão – Decision Tree Analysis (DTA)	33
3.3	Críticas às Técnicas Convencionais.....	34
4	TEORIA DE OPÇÕES REAIS	35
4.1	Métodos de Avaliação de Opções.....	36
4.1.1	Modelo de Black & Scholes para Precificação de Opções Financeiras	36
4.1.2	Modelo Binomial para Precificação de Opções	38
4.2	Opções Reais.....	42
4.3	Processos Estocásticos	48
4.4	Técnica de Otimização sob Incerteza – Programação Dinâmica.....	50
5	MODELOS DE AVALIAÇÃO DE PROJETOS DE P&D	52
5.1	Evolução dos Modelos de Avaliação de P&D com Incertezas Técnicas	53
5.2	Gerenciamento de Projetos de P&D com Tempo Estocástico.....	58
5.3	Uma Contribuição ao Modelo de Silva e Santiago (2009)	62
6	PESQUISA-PROJETO	67
6.1	Descrição do Projeto	67
6.2	O projeto de P&D	69
6.3	Resultados da avaliação	78
6.3.1	Análise de sensibilidade: probabilidade	81
6.3.2	Análise de sensibilidade: parâmetros de forma e escala.....	83

6.3.3	Análise de sensibilidade: aumento da incerteza do tempo	85
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

A partir da revolução tecnológica gerou-se uma necessidade de redimensionamento da competitividade e do processo de obtenção/manutenção de vantagem competitiva pelas empresas. Tal necessidade passou a se caracterizar não só pela melhoria e/ou implementação de variáveis como qualidade, custos, preço, mas, principalmente, pelo desenvolvimento de inovações tecnológicas.

O ambiente econômico no qual as firmas estão operando atualmente, marcado pelo acirramento da competição, faz desses investimentos (projetos de pesquisa e desenvolvimento - P&D, em particular) um dos fatores mais importantes de vantagem competitiva, afirmam Amran e Kulatilaka (1999). A capacidade de uma empresa em desenvolver produtos inovadores é importante, principalmente, pelo fato desses produtos apresentarem grandes oportunidades para as empresas em termos de crescimento e expansão em novas áreas.

Todavia, o desenvolvimento de produtos inovadores está associado a elevados riscos e desafios de gestão em função (i) da importância desses projetos para o desenvolvimento econômico e financeiro das empresas e pelos (ii) riscos e incertezas que envolvem o desenvolvimento desses produtos, no que diz respeito à tecnologia, à concorrência, aos clientes, à economia e a outros fatores ambientais, tendo em vista que os resultados somente serão conhecidos quando o produto se materializar (LIAO, 2001; OZER, 2003). Também, devido aos (iii) altos custos com P&D e às (iv) elevadas taxas de insucesso (CARBONELL, ESCUDERO e ALEMAN, 2004).

Em virtude desses riscos, as empresas encontram dificuldades em quantificar a priori a relação entre pesquisa tecnológica e retorno de mercado (KASH e RYCOFT, 2000). É difícil dimensionar o impacto que esta tecnologia em estágio de amadurecimento causará nos futuros produtos ou serviços. Existe, na verdade, uma série de armadilhas na valoração de tecnologias que um gestor pode encontrar (BOER, 1998).

Santos e Santiago (2008) explicam que a valorização de tecnologias está relacionada a uma primeira análise a ser feita em relação ao projeto com a finalidade básica de levantar o seu potencial de comercialização. Assim, o objetivo da valoração é fornecer, diante de todas as incertezas que caracterizam o processo de inovação tecnológica, um valor esperado que, de certa forma, capte os riscos e incertezas

inerentes a este processo. Dessa forma, a escolha do método a ser utilizado para a valoração do projeto é fundamental na hora de se fazer essa avaliação.

Como os projetos de inovações tecnológicas possuem características particulares, conclui-se que uma valoração pelos métodos tradicionais simples, como o Valor Presente Líquido (VPL) do Fluxo de Caixa Descontado (FCD), subestima o valor desses projetos. Assim, a adoção da Teoria de Opções Reais (TOR) apresenta-se como um método mais robusto para a análise econômica de risco e flexibilidade gerencial ao longo do projeto, avaliando-o de forma dinâmica (DIXIT e PYNDICK, 1994; AMRAN e KULATILAKA, 1999).

Dentre os modelos de valoração de projeto de desenvolvimento de produto por opções reais, o presente trabalho destaca o modelo de Silva e Santiago (2009). Este modelo apresenta uma modelagem mais abrangente do tratamento das incertezas técnicas e de mercado, quando comparado com outros modelos que também fazem uso de opção real para avaliar projetos de P&D. Todavia, este modelo também apresenta algumas dificuldades que precisam ser superadas para ser útil para valorar um número maior de projetos de P&D sem que os gestores precisem dominar vários modelos, cada um para um para valorar um tipo de projeto.

Nesse sentido, este trabalho propõe uma adaptação do modelo Silva e Santiago (2009) para projetos de P&D que possuem *market share* garantido e que, portanto, não iniciam suas vendas com um volume nulo de vendas, como proposto pelo modelo dos autores. Além disso, algumas críticas são apontadas em relação à insensibilidade de alguns parâmetros da função *payoff* e à inflexibilidade dos custos em relação à performance tecnológica e a duração das fases, quando projetos possuem custos variáveis pouco expressivos. Por fim, este trabalho utiliza o modelo adaptado de Silva e Santiago (2009) para analisar a viabilidade de um projeto de P&D (o HBDO, nome fictício) de uma *start-up* incubada pelo CRITT da UFJF. A fim de contornar os problemas levantados e dar maior confiabilidade aos resultados, alguns testes de sensibilidades são realizados, como variações dos parâmetros de forma e escala e do desvio padrão do tempo.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é contribuir para uma melhor compreensão do modelo de Silva e Santiago (2009) levantando alguns pontos críticos do modelo e sugerindo

algumas melhorias para a aplicação do mesmo em projetos com características particulares, como o caso de projetos com *market share* garantido.

Em particular, para atingir o objetivo geral proposto, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- discutir sobre os aspectos da inovação tecnológica (em particular, projetos de P&D) das empresas, suas abordagens e tópicos a serem levados em consideração;
- estudar os principais modelos de valoração de projetos;
- revisar os procedimentos utilizados para avaliação por opções reais (OR);
- identificar os pontos fracos do modelo de Silva e Santiago (2009) e sugerir melhorias;
- identificar e valorar as OR em um projeto de P&D;
- analisar os resultados obtidos com a TOR e comparar com os resultados obtidos via análise tradicional de VPL.

1.2 Justificativa

No cenário atual, as empresas buscam se proteger investindo em projetos de inovações tecnológicas, em particular em projetos de P&D. Dessa forma, o desenvolvimento de métodos mais assertivos de valoração desses projetos tem se tornado uma questão estratégica para organizações.

A falha dos métodos tradicionais de valorações desses projetos criam uma fundamentação fraca para o desenvolvimento corporativo, acarretando em interações múltiplas e significativo retrabalho. As técnicas tradicionais, como o VPL do FCD, fundamentam-se em dados disponíveis no momento da análise, sendo limitadas quanto à captação precisa da dinamicidade futura (COPELAND e ANTIKAROV, 2001).

Para Dixit e Pindyck (1994), as análises de risco e de viabilidade econômico-financeira por métodos tradicionais não incorporam três fatores básicos que determinam a natureza dos investimentos: a incerteza, o timing e a irreversibilidade. Assim, o uso de métodos mais sofisticados, como a TOR, capazes de lidar com incertezas e flexibilidades gerenciais, torna-se uma alternativa atraente para as empresas.

O método da TOR é indicado para projetos com grande nível de incerteza (tais como os projetos de P&D), uma vez que considera as flexibilidades gerenciais que

tendem a alterar o comportamento do projeto à medida que as incertezas são reveladas. Além disso, esta ferramenta auxilia a tomada de decisão sobre o timing correto da tomada de decisão (exercício da opção), o que as análises tradicionais não permitem (DIXIT e PYNDICK, 1994; TRIGEORGIS, 1996).

Neste contexto, a motivação para a realização deste trabalho está no fato de que enquanto existe uma crescente necessidade de gerir de maneira eficiente os recursos alocados a projetos de P&D, os gestores permanecem, em grande maioria, utilizando os métodos tradicionais de valoração, seja por desconhecimento do método ou pela sofisticação dos cálculos. Assim, a relevância deste trabalho está em superar esse desafio e esclarecer o método, desenvolvido por Silva e Santiago (2009) e agora com algumas contribuições, para os gestores, de forma que estes façam análises mais assertivas e estratégicas dos seus projetos de P&D.

O levantamento bibliográfico realizado ressalta que, diversos agentes envolvidos no processo de desenvolvimento de novas tecnologias depositam na valoração a solução para viabilizar a sua comercialização e, por isso, o esclarecimento de um método mais adequado às características dos projetos de P&D é de extrema importância.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em sete seções. Na seção 1, na qual se encontra esta introdução, são apresentadas as motivações para o desenvolvimento deste estudo, bem como definidos o objetivo geral e os objetivos específicos. A seção 2 discute o desenvolvimento e gestão do processo de P&D. A seção 3 descreve brevemente a metodologia tradicional de análise de investimentos, conceitos relacionados às métricas utilizadas para análise de incertezas do valor presente de um projeto. A base teórica das OR é apresentada na seção 4. Nesta seção, é apresentada também a analogia entre as OR e opções financeiras, bem como metodologias de cálculo desta última. Na seção 5, é desenvolvida a metodologia de avaliação de OR proposta neste trabalho. Os resultados obtidos de uma análise de investimento em um caso real são mostrados e comentados na seção 6. Finalmente, na seção 7 são destacadas as conclusões obtidas no desenvolvimento do trabalho.

2 DESENVOLVIMENTO E GESTÃO DO PROCESSO DE INOVAÇÃO

A inovação tem sido tema central nas discussões sobre competitividade das firmas. Tanto na esfera empresarial quanto na acadêmica, estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de entender diferentes aspectos da inovação. A grande maioria das pesquisas envolvendo esse tema aborda o assunto a partir da mensuração dos resultados econômicos obtidos pelas firmas, seus investimentos financeiros diretos em P&D e outros indicadores numericamente quantificáveis que geram uma “medida” da inovação.

Mas, é importante observar que a inovação não é resultado apenas de investimentos financeiros. Para que ela exista, faz-se necessária a existência de capacidade inovadora, a qual está presente em todas as etapas do processo de inovação e que, muitas vezes, não pode ser traduzida em números. A capacidade inovadora parece depender de um conjunto complexo de fatores, que vão além da capacitação estritamente tecnológica. Um grande número de pesquisas desenvolvidas centra o problema da inovação na construção de competências adequadas pelas firmas, dentre elas as competências organizacionais (no âmbito interno das firmas) e as relacionais (no âmbito das relações entre firmas).

A inovação aparece como um resultado, sendo as competências a força motriz que possibilita todo o processo. A questão das competências organizacionais deriva da abordagem de estratégia empresarial baseada em recursos, chamada *resource-based view of the firm*, onde a estratégia das firmas é traçada considerando seus atributos internos (PENROSE, 1959; WERNERFELT, 1984; HAMEL e PRAHALAD, 1995).

2.1 A Importância Econômica da Gestão da Inovação

O conceito de inovação evoluiu significativamente durante os últimos anos, afirmam Sherif e Khalil (2008). Enquanto nos anos 1950s, inovação era considerada um desenvolvimento discreto resultante de estudos de pesquisadores isolados, a inovação, contemporaneamente, é concebida como um processo de solução de problemas (DOSI, 1982), um processo interativo envolvendo relações entre firmas e diferentes atores (KLINE e ROSENBERG, 1986), um processo de aprendizado diversificado (COHEN e LEVINTHAL, 1990), um processo envolvendo a troca de conhecimento codificado e tácito (PATEL e PAVIT, 1997) e um processo interativo de aprendizado e troca onde a

interação entre os atores gera um sistema de inovação ou grupos (*clusters*) de inovação (EDQUIST, 2005).

De acordo com Sherif e Khalil (2008), inovação e geração de conhecimento têm sido analisadas a partir de uma abordagem sistêmica. Essa abordagem reconhece que inovação e geração de conhecimento ocorrem como um resultado de uma variedade de atividades, muitas delas fora do processo de pesquisa formal. Conhecimento é, portanto, gerado não somente em universidades e centros de pesquisas, mas também em uma grande variedade de locais dentro da economia, podendo ser derivado do produto (*learning-by-doing*) ou do consumo (*learning-by-using*).

Inovação é, por sua vez, um fator determinante da competitividade. Primeiro, inovação é um importante sustentador do crescimento da produtividade (MASKELL e MALMBERG, 1999), mesmo quando não se gera, mas apenas se adota. Também, a inovação é responsável pela geração de novos negócios, o que é fundamental para desenvolver mercados e setores.

Para entender a evolução histórica do tema inovação, entretanto, é conveniente resgatar a essência das teorias neoclássica e evolucionista (para maiores detalhes ver ROMER, 1994). A escola neoclássica está alinhada com a perspectiva de racionalidade ilimitada para o comportamento humano e a expectativa de equilíbrio das relações econômicas. De acordo com essa escola, a inovação seria uma consequência natural de um processo mecânico, homogêneo e linear no exercício da atividade produtiva, ou seja, intrínseco ao sistema produtivo da firma, cuja resultante é a depreciação do custo médio de produção.

Já a escola evolucionista é marcada pela flexibilização da expectativa de racionalidade e pela desconsideração da objetividade maximizadora de resultados. Esta escola foca no caráter dinâmico, cumulativo e não linear do processo de mudança e caracteriza-se pelo reconhecimento de uma competição dinâmica entre agentes produtivos. Assim, se o pensamento clássico está interessado na inovação da firma, a teoria evolucionista preocupa-se em investigar as realidades das empresas e entender suas capacidades de aprendizado e inovação, suas estratégias e atividades de adaptação, integração e reconfiguração de habilidades e recursos (NELSON e WINTER, 1977; KLINE e ROSENBERG, 1986; DOSI, 1988; BELL e PAVITT, 1995; TEECE, PISANO e SHUEN, 1997).

Neste esforço de apresentar um panorama histórico do tema inovação, é relevante citar a contribuição do economista Joseph Schumpeter, que, pela primeira vez,

colocou a inovação como principal fonte de dinamismo do sistema capitalista. Schumpeter (1942) mostrou a relação entre inovação tecnológica e ciclos longos de crescimento econômico, advindos do aumento de investimentos em inovações mais significativas. Para esse autor, o capitalismo desenvolve-se em razão de estimular o surgimento de empreendedores, isto é, de capitalistas ou inventores criativos, responsáveis pelos impulsos de prosperidade do sistema. Ainda, segundo Schumpeter (1942), toda inovação implica em uma "destruição criadora", isto é, o novo não nasce do velho, mas sim ao seu lado, superando-o. Dessa forma, as inovações caracterizam-se pela introdução de novas e mais eficientes combinações produtivas ou mudanças nas funções de produção, que constituem o impulso fundamental que aciona e mantém em movimento a máquina capitalista.

De acordo com Dosi (1988), embora os economistas que estudam o crescimento econômico concordem que, no longo prazo, a ampliação da produtividade está associada à introdução e difusão de inovações técnicas e organizacionais, apenas Marx (1848) e Schumpeter (1942) têm a inovação no núcleo de suas teorias. Isso ocorre pois ambos os autores argumentam que a continuidade do processo de inovação é vital para o amadurecimento das economias capitalistas. A diferença crucial na visão desses autores está na formação e obtenção do lucro.

Os economistas que seguem o pensamento de Schumpeter (1942) tentam estruturar, com modelos matemáticos e econométricos, sua concepção a respeito da importância da inovação e da tecnologia para o crescimento econômico. Na grande maioria, rejeitam e criticam o modelo de crescimento simplista de Solow (1956), que tem a inovação tecnológica como um fator residual. De acordo com o modelo neoclássico de crescimento econômico de Solow (1956), o crescimento está associado ao progresso tecnológico, sendo este uma variável exógena ao modelo (ROMER, 1994).

Numa tentativa de suprimir essa falha, observa Romer (1994), os novos teóricos do crescimento definem a inovação tecnológica e seus efeitos como um processo endógeno e procuram explicar a sustentação do crescimento por meio de fatores externos e retornos ligados à tecnologia e investimentos em P&D, a partir de modelos de concorrência. Dessa forma, tais modelos complementam a teoria neoclássica ao trazer o crescimento econômico para dentro do modelo. Por esta razão, os modelos da nova teoria também são chamados de modelos de crescimento endógeno.

Além do panorama histórico da temática inovação, é necessário discutir a gestão do processo de inovação, e, para tal, três fases básicas são exploradas: (a) fase de

conceito, na qual ideias novas são encontradas; (b) fase de desenvolvimento, na qual ideias são transformadas em projetos e (c) fase de negócios/comercialização, na qual projetos são transformados em novos negócios. Cada fase do processo de inovação exige tarefas distintas de gerenciamento e administração.

Na fase do conceito, a principal tarefa dos gerentes é a criação de um clima favorável à inovação, pelo uso da abordagem cultural. Na fase do desenvolvimento, a tarefa principal é a criação e definição de mecanismos corretos para habilitar a criação e o desenvolvimento de projetos. Na fase de negócio/comercialização, sugere-se seguir a abordagem clássica: planejar, agir e controlar. O processo completo da inovação exige o bom gerenciamento de todas as etapas (VAN DER MEER, 2007).

O modo como as empresas gerenciam o processo de inovação e seus paradoxos leva a duas abordagens do processo de inovação: a abordagem fechada de inovação e a abordagem aberta de inovação (CHESBROUGH, 2003; VAN DER MEER, 2007). Na abordagem fechada de inovação, o controle sobre este processo é essencial. Essa formalização muitas vezes faz uso do Funil da Inovação, ou modelo de *stage-gate* (COOPER, 2006; TIDD, BESSANT e PAVITT, 2003). Esse sistema pode ser exemplificado por um funil de fases dentro do processo de inovação, entre as quais há portões que tentam filtrar potenciais projetos “perdedores”. Segundo Cooper (2006), os principais critérios para a inovação próspera utilizados nos *stage-gates* são: novidade, viabilidade e efetividade. O funil tem como entrada as ideias; estas se transformam em projetos e alguns desses projetos transformam-se em negócios.

O sucesso está estreitamente definido como um novo produto, tecnologia ou mercado para a empresa. Essa abordagem fechada de inovação está essencialmente centrada nas capacidades internas da organização, e somente o P&D interno pode mobilizar as etapas do funil de inovação (VAN DER MEER, 2007).

Já a abordagem aberta de inovação se baseia na utilização de caminhos internos ou externos para avançar no desenvolvimento de novas tecnologias a partir de iniciativas colaborativas ou de simples troca, tais como relacionamentos com empresas, universidades, institutos de pesquisa, clientes e fornecedores. As principais convicções da inovação aberta são: é necessário trabalhar com pessoas inteligentes dentro e fora da empresa; P&D externo pode criar significativo valor e P&D interno é necessário para captar e efetivamente incorporar à empresa esse valor; não é obrigatoriamente necessário desenvolver internamente pesquisa para lucrar com ela; construir um bom modelo de negócio pode ser melhor do que ser a primeira empresa a colocar uma

inovação no mercado e, por fim, o ganho advém do uso dos projetos de inovação e é recomendável compartilhar e comprar ideias para alavancar o modelo empresarial (CHESBROUGH, 2003; VAN DER MEER, 2007).

2.2 Firma Inovadora, P&D e Retornos de Mercado

Conforme afirmam De Negri e Salerno (2005), a inovação é uma estratégia que possibilita às empresas auferirem maiores ganhos. Dessa forma, para a empresa é essencial o investimento em P&D. No Manual de Oslo (OCDE, 2005), a P&D é definida como uma categoria à parte que inclui tanto atividades importantes para as inovações de produto e de processo, como de marketing e organizacionais, juntamente com a pesquisa básica.

A relação entre investimentos em P&D e performance da firma tem sido tema de interesse dos pesquisadores pelos menos desde Griliches (1981). Os investimentos em P&D são cada vez maiores e estão presentes nas decisões estratégicas da maioria das organizações (PARISI *et al.*, 2006).

Em geral, trabalhos empíricos têm encontrado uma relação positiva entre P&D e desempenho das empresas (ver, por exemplo, CREPON *et al.*, 1998; PARISI *et al.*, 2006). Todavia, os estudos e também os resultados diferem em vários aspectos.

Alguns dos estudos, por exemplo, medem o lado do produto das atividades de inovação com patentes (ver HALL *et al.*, 1986). Outros mensuram o desempenho da variável P&D pelo volume de negócios (HALL e MAIRESSE, 1995; KAFOUROS, 2005), receita proveniente de inovação (CREPON *et al.*, 1998), rentabilidade (FRYXELL 1990; JEFFERSON *et al.*, 2006), valor de mercado (JAFFE, 1986; BAE e KIM, 2003; HALL e ORIANI, 2006) ou várias combinações dessas medidas ou medidas relacionadas.

Apesar de algumas divergências nos estudos, os benefícios trazidos pelo P&D são inquestionáveis devido ao impacto que causam no desempenho das organizações. Segundo Van Der Meer (2007), com respeito aos aspectos intangíveis, emergem os ganhos de propriedade intelectual, que significam capital humano (competências humanas e conhecimento das pessoas), capital relacional (marca e relacionamento com clientes) e capital estrutural (cultura da organização, patentes e bases de informação). No entanto, há ainda o efeito propagação que uma inovação oriunda do P&D pode ter

por toda a cadeia produtiva, aumentando a geração de empregos, arrecadação de impostos, atração de investimentos, dentre outros.

Dessa forma, as organizações se esforçam para compreender o que constitui uma firma inovadora, tendo em vista a crescente importância dada à inovação como fonte de vantagem competitiva sustentável. Conforme afirmam De Negri e Salerno (2005), a inovação é uma estratégia que possibilita às empresas auferirem maiores ganhos, particularmente se ocorrer diferenciação de produto que possibilite a obtenção de preço prêmio pela empresa.

No que diz respeito à caracterização das firmas segundo a intensidade tecnológica do setor industrial a que pertencem, a taxonomia de Pavitt (1984, 1990) tem sido uma abordagem influente como forma de entender as diferenças setoriais em relação à inovação. Para Pavitt (1984), as similaridades nos processos produtivos das firmas resultam em trajetórias tecnológicas também similares entre os setores, permitindo o agrupamento das indústrias em três categorias: (1) setores dominados por fornecedores; (2) setores de produção intensiva, que se subdividem em setores intensivos em economia de escala e fornecedores especializados, e (3) setores baseados na ciência.

A categoria de setores dominados por fornecedores agrupa a maior parte dos setores tradicionais, como as indústrias têxteis, madeireiras, gráficas, dentre outras. As firmas enquadradas nessa categoria são predominantemente pequenas, onde os departamentos de P&D detêm pouca projeção. As formas de aprimoramento tecnológico são, em geral, passivas e incorporadas via aquisição de maquinários, equipamentos e insumos. Prevaecem os processos de aprendizado informais, voltados, sobretudo, para a assimilação de tecnologias desenvolvidas externamente. As inovações de processo se sobressaem mais que as de produto, característica que reflete bem a maturidade dos bens produzidos nesses setores¹. A trajetória tecnológica dominante visa à redução dos custos de produção e é, via de regra, estabelecida verticalmente, ou seja, originada em outros setores. Por último, as condições de apropriabilidade são pequenas, compensadas pela criação das marcas registradas, diferenciação no desenho, estratégias de publicidade e formação de *know-how* (CAMPOS e RUIZ, 2009).

¹ Restrições impostas pelo tipo de dados analisados fizeram com que, na metodologia adotada por Pavitt (1984), as inovações de processo fossem classificadas como aquelas em que o setor produtivo da inovação é também o usuário desta. Já as inovações de produto são aquelas em que o setor usuário se distingue do setor que produziu a inovação.

Os setores de produção intensiva são profundamente ligados à produção em massa, de larga escala ou desenvolvida por meio de linhas de montagem, explica Campos e Ruiz (2009). Essa característica explica o tamanho superior das empresas inseridas nessa categoria em comparação com as demais indústrias. As linhas de montagem condicionam uma forte divisão de trabalho, enquanto a sensibilidade à automação facilita a substituição de trabalho por capital.

Nos setores intensivos em economias de escala, primeira subdivisão dessa categoria, destacam-se as indústrias fabricantes de bens de consumo duráveis, como, por exemplo, a automotiva e siderúrgica. A intensidade dos esforços inovadores é considerável, tendo em vista que grande parte dos insumos tecnológicos é gerada internamente. O processo de produção é contínuo, tornando imprescindível a atuação dos departamentos de engenharia de produção, responsáveis, nesse contexto, pelos ganhos de produtividade. Os resultados inovadores ocorrem tanto em processos como em produtos. Os primeiros são protegidos, majoritariamente, por meio de segredo industrial ou *know-how*, enquanto os últimos são eventualmente patenteados.

Os setores de fornecedores especializados, outra subcategoria dos setores de produção intensiva, realçam a importância das interações usuário-produtor por agruparem indústrias produtoras de peças, componentes e acessórios, onde a complementariedade tecnológica é evidente. Os representantes mais notórios desse segmento são as indústrias mecânicas, de maquinaria e instrumentos, sendo, em geral, firmas de pequeno e médio porte, especializadas no fornecimento de insumos para grandes empresas. A inovação é utilizada por setores diferentes daqueles onde elas foram elaboradas. Ainda que os departamentos de P&D figurem entre as condutas desenvolvidas por essas firmas com a finalidade de inovar, a principal forma de aprendizado redonda das interações usuário-produtor num processo de aprendizado contínuo, onde acúmulo de conhecimento tácito ocupa papel especial.

Por último, segundo Campos e Ruiz (2009), os setores baseados na ciência se apresentam como os mais sensíveis aos progressos no conhecimento científico e detentores das maiores oportunidades tecnológicas. Dentre os principais representantes dessa categoria, estão as indústrias química, farmacêutica e de microeletrônica. Os departamentos de P&D constituem a principal forma de aprendizado nesse padrão, embora não se possa afirmar que o aprendizado das firmas seja exclusivamente interno, tendo em vista que a interação com instituições de pesquisa em ciência básica (universidades) também é representativa.

Em 1990, Pavitt propõe uma revisão da taxonomia anterior para o caso britânico, que inclui a categoria de setores intensivos em informação. Essa inclusão é explicada pela constatação de que tecnologias computacionais são capazes de criar oportunidades tecnológicas com indiscutível potencial inovador.

A taxonomia proposta por Pavitt (1984, 1990), ao apresentar uma visão de trajetória da inovação tecnológica e, em essência, diferente da visão econômica tradicional, sofreu diferentes críticas (ARCHIBUGI, 2001). Primeiramente, a classificação somente relacionaria firmas inovadoras, excluindo as demais. Em segundo lugar, a unidade de análise do autor é a firma inovadora, mas o resultado de sua análise é o agrupamento em setores industriais. Por fim, é difícil classificar organizações com vários produtos e tecnologias em cada uma das categorias propostas. Contudo, a despeito das críticas, o trabalho de Pavitt (1984, 1990) é o de maior contribuição no estudo de mudanças tecnológicas e está longe de ficar ultrapassado.

2.3 O Processo de P&D

Segundo Jung (2004), P&D é a junção da pesquisa e do desenvolvimento, considerando-se que a pesquisa é utilizada como ferramenta para a descoberta de novos conhecimentos, enquanto que desenvolvimento refere-se à aplicação dos novos conhecimentos para se obter resultados práticos. Em suma, a relevância de se discutir o processo de P&D pode ser explicada pelos fatores abaixo²:

- aumento da competitividade internacional e globalização;
- aumento de distintos segmentos e nichos de mercados em resposta às demandas mais sofisticadas e customizadas dos consumidores;
- truncamento do ciclo de vida de produtos e aceleração no lançamento de novos produtos e processos devido às rápidas mudanças nas necessidades do mercado;
- redução do tempo de permanência das tecnologias no mercado em função da conexão global das competências científicas e de engenharia;
- crescimento da oferta e da demanda por diferentes tecnologias;

² Para maiores detalhes ver, por exemplo, HAGEDOORN & CLOODT, 2003; BREMSER & BARSKY, 2004 e SANTIAGO & BIFANO, 2005.

- acentuação nas exigências governamentais e sociais acerca de meio ambiente, segurança e saúde;
- elevação da pressão nos setores de P&D para que sejam responsáveis pela sobrevivência dos negócios das organizações.

Para Govindarajan e Trimble (2006) a pesquisa pode ser classificada em dois tipos de atividades: pesquisa básica e pesquisa aplicada. Já o desenvolvimento pode ser ordenado em quatro tipos de atividade: desenvolvimento de novo produto; adaptação e extensão do produto; engenharia de apoio ao produto, e; engenharia de processo (KHURANA, 2006).

Lev (2001) classifica os investimentos em P&D como “Ativos de Inovação”, em que a inovação está relacionada às atividades de P&D e pode ser ligada ao desenvolvimento de novas ciências e tecnologias, ou aplicada, correlacionada ao desenvolvimento de produtos e processos. De acordo com o autor, a inovação ocorre quando novos processos, produtos e serviços chegam ao mercado, por meio de empresas, baseados na geração de conhecimento e esforços em P&D, com impactos positivos do ponto de vista econômico e social.

Nessa concepção, a inovação tecnológica é essencial para a manutenção da competitividade, uma vez que traz à luz produtos ou tecnologias novas. Todavia, as empresas investem em P&D não só para inovar em produtos e processos, mas também para desenvolver e manter sua capacidade de assimilar e explorar informações disponíveis externamente (COHEN e LEVINTHAL, 1989). Isso ocorre pois os transbordamentos de conhecimento advindos de fontes externas podem ter impacto significativo nos processos de inovação, mudança técnica e desenvolvimento econômico.

O P&D realizado por um agente econômico (firma, universidade ou outra instituição) pode gerar externalidades³ positivas para outros agentes, uma vez que o resultado do investimento beneficia não apenas a empresa, mas a sociedade como um todo. Griliches (1981) define transbordamento como sendo de dois tipos: os de renda (*rent spillover*) e os de conhecimento (*knowledge spillover*). Enquanto o primeiro

³ Uma externalidade ocorre quando a decisão de um agente econômico traz custos ou benefícios a outros além do próprio agente. Externalidades são causas de imperfeição de funcionamento do mercado, pois o equilíbrio de mercado determinará um nível de produção diferente do que seria ideal para a sociedade. Em casos de imperfeição de mercado pode ser útil a interferência do governo, para corrigir o nível de produção do bem que provoca a externalidade (PINDYCK e RUBINFELD, 1998).

estaria relacionado às transações econômicas, o segundo estaria ligado ao conhecimento criado em alguns setores que pode ser utilizado em outros.

Para a empresa é essencial o investimento em P&D, uma vez que aquelas firmas que não inovam continuamente podem ser superadas por outras que conseguem inovar em produtos e processos substancialmente novos. Além disso, esses investimentos podem conferir uma importante vantagem competitiva às empresas, protegendo-as das ameaças de atuais ou novos concorrentes e possibilitando a manutenção e expansão no mercado de atuação.

Sob essa perspectiva, Rozenfeld *et al.* (2006) afirmam que o modo como a empresa desenvolve produtos é que determina o desempenho do produto no mercado e a velocidade, eficiência e qualidade do processo de desenvolvimento. Em suma, isto significa que o processo depende diretamente da gestão, a qual inclui estratégias, organização e gerenciamento. A gestão em questão pode ser medida por indicadores que reflitam a qualidade do produto desenvolvido, os custos, a produtividade, o tempo total de desenvolvimento e que quantifiquem a sua contribuição para a competitividade, rentabilidade, crescimento, fortalecimento e participação de mercado da empresa.

2.3.1 Abordagens para o P&D e o Processo de *Stage-Gate*

Nos anos 1960s, a NASA desenvolveu o PPP (*Phased Project Planning*), mais conhecido atualmente como *Phased Review Process* (PRP). O PRP quebrou o desenvolvimento dos projetos em fases discretas, uma vez que, ao final de cada fase, havia uma revisão e a condição para iniciar a nova fase era o atendimento de certos pré-requisitos. Assim, o PRP foi caracterizado como uma metodologia de medição e controle, elaborada para assegurar que o projeto estava correndo conforme planejado e que todos os seus pontos importantes estavam sendo atendidos.

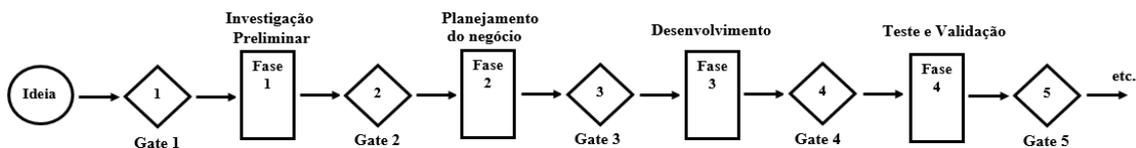
O processo PRP consiste, atualmente, em uma revisão gerencial após a execução de uma fase do projeto, em que é avaliado o atendimento de requisitos, a possibilidade de continuação do projeto e os riscos envolvidos (CROW, 1998, *apud* VALERI *et al.*, 2000). Essas decisões são baseadas em critérios de passagem bem definidos, considerando estratégia, marketing, engenharia, manufatura e assim por diante (COOPER e KLEINSCHMIDT, 1991; COOPER, 2006).

Dessa forma, o processo de desenvolvimento de produtos (PDP) pode ser representado como um grande funil. Em sua entrada, existem inúmeras ideias a serem

investigadas, fruto de oportunidades identificadas e geradas pela companhia (sugestão de clientes, fornecedores, etc.). Dadas as limitações de recursos, apenas algumas são selecionadas para o desenvolvimento. Ao final, somente as melhores ideias resultam em lançamentos no mercado. A utilização de um funil remete as empresas à noção de que nem todas as ideias podem chegar às etapas avançadas de desenvolvimento, devendo haver priorização das mais promissoras (WHEELWRIGHT, 2010).

A estrutura tradicional do PDP (Figura 2.1), nesse sentido, é composta por estágios, com diversas atividades e pontos de decisão, momentos de avaliação nos quais questões críticas devem ser respondidas e a viabilidade de continuação dos projetos avaliada. Dessa forma, o projeto move-se de uma fase para outra assim que todas as atividades da fase anterior forem completadas (VALERI, 2000).

Figura 2-1 - O processo de *Stage-Gates*



Fonte: Adaptado de Cooper *et al.* (1994).

O *stage-gate* é um processo sequencial, segmentado em estágios. Cada estágio compreende algumas atividades que devem ser completadas antes de iniciar a próxima etapa. Entre os estágios há os pontos de decisão, chamados de *gates* (DIB, 2008). Os *gates* apresentam um formato comum, com três elementos importantes: os *deliverables*, os critérios de passagem e os resultados do *gate* (COOPER e KLEINSCHMIDT, 1991 e COOPER, 1990, *apud* VALERI *et al.*, 2000).

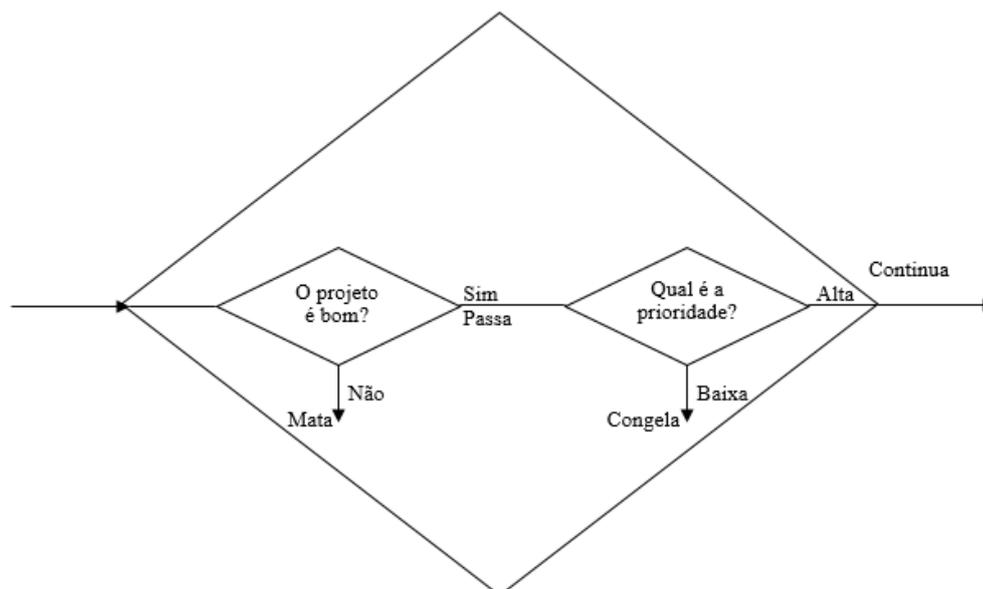
Os *deliverables* são resultados das atividades do processo de desenvolvimento de produtos que o gerente do projeto deverá apresentar ou fornecer antes de “entrar” em um *gate*. São os objetivos do líder e do time de projeto, definidos previamente para cada *gate*. Os critérios de passagem são utilizados para a tomada de decisão, geralmente com uma lista definida e com diferentes critérios para cada *gate*. Estes critérios podem ser classificados em obrigatórios e em desejáveis, sendo que os obrigatórios são relevantes para a tomada de decisão. Por fim, os resultados de um *gate* incluem a decisão e um plano de ação. A decisão pode ser continuar o projeto, cancelar ou redirecionar as

atividades. O plano de ação deve conter o redirecionamento das atividades, se for o caso, ou então um plano de projeto para a próxima fase, com a lista de critérios do próximo *gate*.

A tomada de decisão nos *gates* é feita por times multifuncionais e multidisciplinares compostos por membros de diversas áreas (*design*, engenharia, manufatura, compras/*procurement*, marketing etc.) responsáveis pelo projeto desde o início até o lançamento (ANDERSON e NARUS, 2004). Isto inclui:

- revisão da qualidade das informações de entrada;
- avaliação da qualidade do projeto de um ponto de vista econômico, resultando em uma decisão de continuar, abandonar, cancelar ou redirecionar o projeto;
- aprovação do plano de ação para a próxima fase e alocação dos recursos necessários.

Para Cooper (1990), *apud* Valeri *et al.* (2000), a decisão deve ocorrer em duas partes (ver Figura 2.2):



Fonte: Cooper (1990), *apud* Valeri *et al.* (2000).

A primeira decisão verifica se o projeto é bom ou não, considerando que o projeto seria único na empresa, com a avaliação dos *deliverables* através de critérios definidos. As decisões possíveis são “passar” ou “abandonar” o projeto. A segunda decisão deve considerar o portfólio de produtos com o objetivo de priorização de recursos e alinhamento estratégico. Se a prioridade do projeto é alta em relação ao portfólio, o projeto continua; caso contrário, não.

Dentro dessa sistemática, os pontos de decisão propostos devem responder questões essenciais para a continuidade do projeto de desenvolvimento, tais como (ROZENFELD *et al.*, 2006):

- as atividades propostas para a fase foram cumpridas?
- os resultados estão dentro do previsto?
- quais mudanças ocorreram no mercado em termos de necessidade dos clientes, concorrência e condições econômicas?
- dentro da perspectiva macro e microambiental, o projeto continua sendo viável?

Conforme Ettlíe e Elsenbach (2007), os processos de *stage-gates* para o gerenciamento de novos produtos promovem a aceleração do processo, a melhoria na qualidade, agregam maior disciplina e melhor desempenho. Ainda, as revisões gerenciais possibilitam à alta direção obter maior visibilidade e participação no PDP. Assim, a gerência tem a oportunidade de tomar decisões e controlar sem a necessidade do conhecimento de todos os detalhes do projeto (SILVA e ALLIPRANDINI, 2001).

3 O PROCESSO DE ANÁLISE DE PROJETOS DE INVESTIMENTO

De acordo com Damodaran (1994), existem diversas abordagens disponíveis para se mensurar o valor de um ativo qualquer. A primeira contempla os modelos de FCD e relaciona o preço de um ativo ao valor presente de seus fluxos de caixa futuros esperados. A segunda se refere aos modelos de avaliação relativa, os quais estimam o valor de um ativo com base na precificação de ativos comparáveis, ou seja, de características semelhantes. Por fim, a última abordagem se baseia nos modelos de precificação de opções e visa mensurar o valor de ativos de forma análoga ao processo

de avaliação das tradicionais opções do mercado financeiro. O presente trabalho direcionou esforços à primeira e terceira abordagens.

3.1 Análise Tradicional

O objetivo dos gestores de empresas é criar valor para os acionistas. A criação de valor, por sua vez, é efetivada mediante investimentos em ativos reais. Esses ativos podem ser tangíveis, como a propriedade, plantas e equipamentos, ou intangíveis, como ativos de conhecimento, redes de clientes, marcas e reputação.

Entre os diversos métodos existentes para valorar projetos de investimento, o mais tradicional é conhecido por VPL, baseado no FCD, afirmam Dixit e Pindyck (1994), Trigeorgis (1996) e Copeland e Antikarov (2001). Este método baseia-se somente nos fluxos de caixa gerados pelo ativo sob avaliação, ao contrário de outros parâmetros de medição, como a regra do período de *payback* e a taxa interna de retorno (TIR).

O método do *payback* (prazo de retorno de um projeto) define o número de períodos necessários para a recuperação do investimento inicial. Este método tem como principais pontos fracos: não considerar o valor do dinheiro no tempo; não considerar todos os fluxos de caixa gerados pelo projeto; não ser uma medida de rentabilidade do investimento (LAPPONI, 2007), e exigir um limite arbitrário de tempo para a tomada de decisão (ROSS, WESTERFIELD e JORDAN, 1998). Uma evolução desse método é o *payback* descontado, o qual considera o espaço de tempo entre o início do projeto e o momento em que os fluxos de caixa trazidos a valor presente tornam-se positivos (MONTEIRO, 2003).

Já a TIR é uma taxa de rentabilidade. Por definição, ela é a taxa de desconto que iguala o valor presente dos fluxos de caixa futuros ao investimento inicial. No entanto, uma análise de projetos apoiada tão somente na TIR pode levar a resultados não satisfatórios (COPELAND e WESTON, 1992). De acordo com Kassai *et al.* (2000), o método original de cálculo da TIR apresenta algumas falhas que podem induzir a erros de interpretação na decisão de investimento. Essas falhas estão relacionadas a pelo menos duas questões, a saber: 1) o método de cálculo da TIR leva a funções polinomiais e, portanto, as equações podem apresentar mais de uma (ou nenhuma) solução; 2) o método da TIR tem como premissa que todos os valores de um fluxo de caixa, quer sejam positivos ou negativos, caminham no tempo à própria taxa interna de retorno. Isso

não corresponde à realidade, em que as taxas de financiamento e de reinvestimento serão determinadas pelo mercado, em função do risco de cada investimento.

Diante desse quadro, a abordagem tradicional do VPL mostra-se mais indicada para análise de projetos. Um dos principais fatores de sustentação do VPL é o princípio da separação entre o gestor da empresa e os detentores de capital (COPELAND e ANTIKAROV, 2001). Os gestores devem procurar projetos que maximizem o VPL da empresa e que, ao mesmo tempo, maximizem o valor para o acionista. A fórmula para a obtenção do VPL considera:

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{E(\tilde{C}(t))}{(1+k)^t}$$

I : significa o investimento requerido no projeto;

$E(\tilde{C}(t))$: representa o valor esperado de cada um dos Fluxos de Caixa - FC do projeto;

k : representa a taxa de desconto ou custo exigido pelos capitais que financiam o projeto;

n : é o prazo de vida do projeto;

t : é o instante específico associado a um FC do projeto.

A lógica subjacente a esta metodologia é bastante direta. Segundo Brigham e Ehrhardt (2008), um VPL igual a zero significa que os fluxos de caixa do projeto são suficientes para recuperar o capital investido e proporcionar a taxa de retorno requerida sobre este capital. Portanto, um VPL positivo implica na agregação de valor para o investidor. Nesse sentido, o projeto deve ser aceito sempre que produzir um VPL maior ou igual a zero.

Em linhas gerais, em mercados completos⁴, o valor de um projeto pode ser determinado pelo método do FCD. Neste caso, o preço de qualquer ativo é definido com base nos fluxos de caixa futuros trazidos a valor presente por uma taxa de desconto que reflita o risco associado a esses fluxos (ver COPELAND e WESTON, 1992; DIXIT e

⁴ De acordo com Dixit e Pindyck (1994), em mercados completos existe no mercado um número suficiente de ativos linearmente independentes capaz de possibilitar a estruturação de um portfólio replicante.

PINDYCK, 1994; TRIGEORGIS, 1996; DAMODARAN, 1994; COPELAND e ANTIKAROV, 2001).

Conforme Copeland *et al.* (2000) e Brealey e Myers (1999), para estimar a taxa de desconto deve-se considerar que o custo de capital do projeto está relacionado ao risco a que seus fluxos de caixa estão sujeitos e que tal custo deve guardar relação com a remuneração exigida tanto por credores quanto pelos acionistas da firma que realizará o investimento. Desta forma, o custo médio ponderado de capital (*Weighted Average Cost of Capital* – WACC) deve ser a taxa de desconto a ser utilizada para descontar os fluxos de caixa futuros do projeto a valor presente.

Para Copeland *et al.* (2000), o cálculo do custo de capital deve ser consistente com o modelo de avaliação a ser utilizado (WACC para projetos avaliados pelos fluxos de caixa livres da empresa ou *free cash flow to the firm* – FCFF e *Capital Asset Pricing Model* – CAPM para projetos avaliados pelos fluxos de caixa do acionista) e deve refletir a participação de cada uma das fontes de capital no valor do projeto. Para os acionistas, o custo de capital normalmente estimado pelo modelo CAPM está sujeito a críticas quanto às premissas de eficiência de mercado, normalidade dos retornos e função utilidade quadrática dos decisores empregadas em sua derivação.

O WACC considera a ponderação entre o custo do capital próprio (estimado pelo CAPM) e o custo do capital de terceiros emprestado à empresa, abatido do benefício fiscal decorrente do pagamento dos juros da dívida (COPELAND e WESTON, 1992; COPELAND e ANTIKAROV, 2001). Assim:

$$WACC = k_s \left[\frac{E}{D+E} \right] + k_d \left[\frac{D}{D+E} \right] (1 - IR)$$

k_s : custo do capital próprio (medido pelo CAPM);

k_d : custo do capital de terceiros, líquido do benefício fiscal de imposto de renda;

D : valor de mercado do capital obtido com terceiros;

E : valor de mercado do capital próprio.

Para calcular o custo de capital próprio, k_s , utiliza-se o modelo CAPM (Sharpe, 1964):

$$k_s = r_f + \beta [E(R_m) - r_f]$$

r_f : representa o retorno de um ativo livre de risco;

$E(R_m)$: refere-se ao retorno esperado da carteira de mercado;

$E(R_m) - r_f$: indica o prêmio de risco da carteira de mercado;

$\beta = \frac{Cov(R_i, R_m)}{Var(R_m)}$: representa o risco sistêmico do ativo, que corresponde ao risco

do capital próprio, mensurado com base na covariância entre as taxas de retorno do ativo e do mercado, dividida pela variância do retorno de mercado.

É interessante observar, afirma Brandão (2002), que o ajuste ao risco pode também ser feito no numerador, substituindo-se o Fluxo de Caixa Esperado pelo seu Equivalente Certo (EC) e descontando-se este fluxo à taxa livre de risco. Essa abordagem pode ser sumarizada pela seguinte equação⁵:

$$VP = \frac{EC(\tilde{C})}{(1+r)}$$

$$EC(\tilde{C}) = E(\tilde{C}) - \lambda \cdot cov(\tilde{C}, \tilde{R}_m)$$

$$\lambda = \frac{E(\tilde{R}_m) - R_f}{VAR(\tilde{R}_m)}$$

$EC(\tilde{C})_t$: representa o Equivalente Certo no período t.

Assim, o valor presente, neste caso, seria determinado descontando-se o EC pela taxa livre de risco. No caso de um investidor avesso a risco, o Valor Esperado do Fluxo de Caixa $\{E(\tilde{C})\}$ é substituído pelo Valor Esperado da Utilidade do Fluxo de Caixa $\{EU(\tilde{C})\}$, onde a função utilidade $U(\cdot)$ reflete a aversão a risco do investidor.

Por fim, o ajuste ao risco também pode ser feito nas probabilidades de mercado atribuídas aos diversos estados da natureza. Este método é descrito por Brandão (2002) como uma aplicação do princípio da não arbitragem, em que os preços dos ativos devem

⁵ Seja $VP = \frac{E(\tilde{C})}{1+k_j}$, $\tilde{k} = \frac{\tilde{C}}{VP} - 1$ e $\beta_j = \frac{cov(\tilde{k}, \tilde{R}_m)}{var(\tilde{R}_m)} = \frac{1}{VP} \frac{cov(\tilde{C}, \tilde{R}_m)}{var(\tilde{R}_m)}$. Do CAPM, tem-se que $VP = \sum_{t=1}^n \frac{E(\tilde{C}(t))}{(1+R_f + \beta[E(R_m) - R_f])^t}$, logo, substituindo β nesta equação, obtém-se $VP = \frac{E(\tilde{C})}{1+R_f + \left[\frac{1}{VP} \frac{cov(\tilde{C}, \tilde{R}_m)}{var(\tilde{R}_m)}\right][E(\tilde{R}_m) - R_f]}$. Rearranjando, $VP = \frac{E(\tilde{C}) - \lambda \cdot cov(\tilde{C}, \tilde{R}_m)}{(1+R_f)}$, onde $\lambda = \frac{E(\tilde{R}_m) - R_f}{VAR(\tilde{R}_m)}$. Assim, $VP = \frac{EC(\tilde{C})}{(1+R_f)}$ ou $VP = \frac{EC(\tilde{C})}{(1+r)}$, com $R_f = r$.

ser consistentes de forma que seja impossível auferir lucros sem correr risco. Assim, sempre haverá uma distribuição neutra a risco onde o retorno esperado de qualquer ativo é descontado à taxa livre de risco.

3.2 Análise de Incerteza

De acordo com Dixit e Pindyck (1994), a incerteza representa um papel determinante nas oportunidades de investimento, de maneira que, contrariamente aos métodos tradicionais de análise de investimento, o seu aumento pode beneficiar o valor do projeto via aumento do valor das opções a ela relacionadas. Conforme Trigeorgis (1996), mais incerteza pode representar oportunidades em mercados altamente incertos ou voláteis se houver excepcional potencial de ganho *upside* e limitado risco de perda (*downside*) resultantes da flexibilidade gerencial de proceder ou não com o projeto em cada situação.

Destaca-se que, para alguns tipos de projetos, é importante a distinção entre dois diferentes tipos de incerteza: a incerteza técnica e a incerteza econômica. A incerteza técnica ou interna não está correlacionada aos movimentos gerais da economia, sendo por isto considerada “endógena” ao processo decisório. Pode-se citar como exemplos desse tipo de incerteza aquelas presentes em projetos de P&D empreendidos pelo setor farmacêutico e os volumes de óleo e gás presentes em uma jazida. O adiamento do investimento não altera este tipo de incerteza, mas a realização parcial do projeto pode fazê-lo, à medida que se obtêm novas informações sobre a questão e que modelos mais acurados são desenvolvidos.

Já a incerteza econômica possui uma relação direta com movimentos ascendentes e descendentes da economia, sujeitos a acontecimentos aleatórios, como recessão e crescimento, alteração da taxa de câmbio, perda de safra por razões climáticas e outros fatores. Note que este tipo de incerteza é exógeno ao processo decisório, uma vez que não está no escopo do projeto, mas o influencia.

Como cada fator introduzido na avaliação de uma decisão específica está sujeito a alguma incerteza, o executivo necessita de um retrato dos efeitos que as incertezas que cercam cada fator relevante exercem sobre os retornos do investimento a ser analisado. Dentre os métodos de avaliação dessas incertezas estão:

- **análise de cenário:** esta metodologia amplia os horizontes do FCD obrigando o analista a pensar em diversos futuros possíveis;
- **análise de sensibilidade:** essa análise dá uma indicação da importância de cada uma das variáveis do projeto para a determinação do VPL e quanto o VPL se altera em resposta a uma mudança no valor de cada variável, *ceteris paribus*;
- **modelos de simulação:** tratam-se de modelos computadorizados de avaliação de projetos que incorporam o risco, realizam cálculos com base em probabilidades de ocorrência de cada cenário e correlações entre as variáveis, registrando um grande número de resultados/cenários possíveis com o objetivo de determinar estatísticas sobre variáveis de interesse;
- **árvores de decisão:** são representações gráficas das relações entre várias alternativas de decisão e seus possíveis resultados. Permitem o exame dos efeitos das diversas alternativas de uma decisão. Neste método, as decisões e incertezas de um projeto são apresentadas cronologicamente e todos os cenários possíveis são ponderados, sendo escolhida a decisão que apresentar o maior valor esperado médio para seu conjunto de cenários possíveis (incluindo os de perda).

Por sua maior complexidade e relevância na tomada de decisão, os métodos de Simulação de Monte Carlo e Árvores de Decisão serão detalhados a seguir.

3.2.1 Simulação de Monte Carlo

Uma das técnicas de análise de risco mais utilizada é a simulação estocástica. O método de simulação estocástica tem várias denominações, entre elas simulação aleatória, simulação de Monte Carlo e método de Monte Carlo. O mérito da criação deste método é do matemático polonês Stanislaw Ulam, muito conhecido por ser um dos criadores da bomba de hidrogênio, em 1951. O método foi criado como uma tentativa de se calcular as probabilidades de sucesso em jogos de azar, na época muitos populares no cassino Monte Carlo, em Mônaco.

Segundo Wittwer (2004), a Simulação de Monte Carlo é um método de análise da propagação de incertezas, onde o objetivo é determinar de que forma variações aleatórias, falta de informações e erros afetam a sensibilidade, desempenho e

confiabilidade do sistema objeto da modelagem. Essa análise avalia, de forma iterativa, um modelo determinístico utilizando números aleatórios como dados de entrada, sendo estes gerados através de funções distribuição de probabilidade (como, entre outras, normal, log-normal, exponencial) que melhor se ajustem ao modelo proposto. Utilizando números aleatórios, o modelo deixa de ser determinístico e passa a ser estocástico.

A Simulação de Monte Carlo é um método numérico para encontrar a distribuição de uma variável de interesse que dependa de alguma componente aleatória. O conceito básico do método é a simulação, por repetidas vezes, do processo estocástico das variáveis aleatórias do problema, simulando a maioria das situações possíveis e obtendo os respectivos resultados.

O primeiro estudo publicado aplicando a simulação de Monte Carlo à avaliação de investimentos de capital foi o trabalho de Hertz (1964) na *Harvard Business Review*. No trabalho, a simulação de Monte Carlo permitiu simular as principais fontes de incerteza que afetavam o retorno do investimento, considerando as correlações entre as variáveis aleatórias, possibilitando a determinação do risco sobre o retorno do investimento e aumentando a eficácia da avaliação da alternativa de investimento.

Como o FCD, na sua versão determinística, produz apenas uma estimativa de resultado correspondente a um único ponto, existe frequentemente pouca confiança em sua precisão, dado que eventos futuros capazes de afetar o fluxo de caixa previsto são fortemente incertos. Assim, a simulação de Monte Carlo pode ser empregada para melhor estimar o valor presente de um determinado projeto.

Outra vantagem da simulação de Monte Carlo é que ela consegue retornar os valores esperados utilizando qualquer processo estocástico para a incerteza no projeto. Também é possível incorporar mais de um fator de incerteza de forma correlacionada e simultaneamente.

Por outro lado, observa Gentle (1998), sua maior desvantagem é o consumo de tempo para realizar as iterações, sendo, em geral, necessário utilizar algum *software* específico⁶ para este fim.

⁶ Exemplos desses softwares são o @RISK (da empresa Palisade) e o Crystal Ball 2000 (da Decisioneering).

3.2.2 Árvores de Decisão – Decision Tree Analysis (DTA)

Esse método de avaliação é bastante utilizado no sentido de incorporar os diversos cenários de incertezas relacionadas a um determinado ativo, assim como alguma flexibilidade associada. Nesse sentido, são mapeadas várias alternativas de tomada de decisão, ponderadas em função de sua probabilidade de ocorrência. Ou seja, esse método demonstra graficamente a sequência de possíveis resultados, onde todas as possibilidades (e decisões passíveis de serem tomadas a partir delas) são apresentadas.

Em comparação ao VPL estático, em que as decisões se limitam à decisão inicial de investir ou não (aceitar ou rejeitar o projeto), a análise por árvores se preocupa com a estratégia operacional e a interdependência entre a primeira e todas as outras decisões subsequentes. Esta característica garante às árvores de decisão um poder de avaliação de investimentos sequenciais (MONTEIRO, 2003).

Segundo Monteiro (2003), esse método segue uma estrutura básica na qual:

- a gerência deve tomar decisões entre os diversos cursos de ações;
- cada decisão depende de eventos futuros incertos que podem ser descritos através de uma distribuição de probabilidades;
- a gerência escolhe, entre os diversos caminhos disponíveis, aqueles que maximizem seu VPL, de acordo com sua aversão ao risco.

No entanto, Copeland e Antikarov (2001) afirmam que a árvore de decisão proverá respostas erradas, uma vez que pressupõe uma taxa de desconto constante ao longo de toda a árvore. Conseqüentemente, o desvio padrão dos fluxos de caixa do projeto com flexibilidade não é o mesmo que o do projeto sem flexibilidade, e a taxa de desconto ajustada ao risco determinada inicialmente para o projeto sem opções não será a mesma para o projeto com opções.

Esse argumento tem levado alguns autores a concluir erroneamente que é inapropriado avaliar problemas de OR pela abordagem da análise por árvore de decisão. Na realidade, com o uso de probabilidades neutras ao risco, os problemas de OR podem ser resolvidos com a ferramenta da análise por árvore de decisão. Nessa abordagem, os fluxos de caixa do projeto podem ser descontados a uma taxa de retorno livre de risco, desde que se ajuste adequadamente o risco nas probabilidades de cada estado da natureza.

3.3 Críticas às Técnicas Convencionais

Os profissionais responsáveis pela elaboração do planejamento estratégico das empresas estão entre os principais críticos da teoria financeira tradicional, especialmente das técnicas de FCD. O argumento principal desses profissionais é o de que a excessiva preocupação com a análise financeira privilegia os investimentos de curto prazo. Os investimentos de longo prazo, cujos VPLs são penalizados pela incerteza e pela demora no recebimento de fluxos de caixa futuros, acabam sendo sacrificados.

Existem fatores estratégicos fundamentais para a manutenção ou aumento da competitividade de uma empresa embutidos em projetos de longo prazo, sem os quais a lucratividade futura desta fica comprometida. Tais fatores podem não ser convenientemente traduzidos em incremento dos fluxos de caixa futuros e, portanto, não captados nas análises de investimento tradicionais. Assim sendo, projetos para os quais se calcula um VPL baixo, ou mesmo negativo, podem ser adotados por razões estratégicas, enquanto projetos com VPL aparentemente alto podem ser ignorados, por não atenderem aos objetivos estratégicos da empresa.

Com respeito a algumas restrições da metodologia tradicional, Dixit e Pindyck (1994) e Magalhães (2006) discutem algumas limitações que tornam o FCD impreciso em algumas situações. Os primeiros autores questionam, por exemplo, a premissa de reversibilidade associada ao critério de decisão com base no VPL, pois se assume implicitamente que o investimento pode ser, a qualquer momento, recuperado, o que não é verdade para alguns tipos de projetos (como P&D). Já o segundo autor critica a definição da taxa de desconto para o FCD e o risco correto, que supõem estimativas atuais, não necessariamente constantes no longo prazo. Na consideração de uma única taxa de desconto, o FCD apresenta rigidez e simplificação que podem se traduzir em erro de avaliação.

Também pode-se afirmar que o método do FCD pressupõe que os investimentos se constituem como uma decisão de “agora ou nunca”, não reconhecendo as flexibilidades de gerenciamento que os administradores possuem. Copeland e Antikarov (2001) concordam com tal argumento, reconhecendo que o VPL subestima o valor de projetos por não capturar possíveis flexibilidades à disposição dos tomadores de decisão. A consequência é uma análise simplificada e pouco realista que tende a levar a decisões não ótimas.

Embora os métodos de avaliação mais tradicionais sejam quantitativos, para Damodaran (1994) existe uma boa parcela de subjetividade no processo de avaliação. Dessa forma, a aplicação dos métodos tradicionais está sujeita a limitações e restrições, que, se não forem levadas em consideração, podem subestimar o valor potencial do empreendimento e conduzir a decisões que não maximizam o valor para a empresa. Partindo de procedimentos teoricamente corretos, as empresas podem sacrificar sua saúde a longo prazo, privilegiando retorno a curto prazo, ao fazerem escolhas de investimentos que, ao longo do tempo, se transformam em crescimento desapontador, perda de *market share*, perda de liderança tecnológica e assim por diante. Tais erros poderiam ser evitados por uma melhor compreensão e uso correto da TOR, por exemplo.

Trigeorgis e Mason (1987) mostram que a aplicação da TOR à análise de projetos pode ser feita, de maneira prática e objetiva, numa série de situações em que a flexibilidade gerencial está presente. A aplicação da TOR gera o que os autores denominam de VPL expandido, equivalente à soma do VPL tradicional, ou estático, a um prêmio de opção proporcionado pelas oportunidades de flexibilidade existentes. Os autores concluem que o cálculo convencional de VPL pode subestimar projetos ao ignorar o prêmio de opção, que eventualmente compõe o seu valor total, e que a magnitude desta subavaliação pode ser quantificada pela utilização da TOR.

4 TEORIA DE OPÇÕES REAIS

A Teoria de Opções Reais (TOR) surgiu da analogia entre a opção financeira e os investimentos em ativos reais (AMRAM e KULATILAKA, 1999), nos quais o investidor tem o direito, mas não a obrigação, de realizar o investimento em certa data. Essa analogia entre investimentos reais e opções financeiras, bem como o termo “opções reais”, foram inicialmente propostos por Myers (1977).

De forma sucinta, uma opção financeira é um derivativo⁷, ou seja, é função do valor de um título (ativo básico). A opção dá ao investidor o direito de comprar (opção de compra) ou de vender (opção de venda) o ativo por um valor pré-determinado (preço

⁷ Derivativos recebem esta denominação porque seu preço de compra e venda deriva do preço de outro ativo, denominado ativo objeto.

de exercício), em uma data futura específica (opção europeia) ou em qualquer momento até essa data futura específica (opção americana)⁸.

Já uma opção real representa a flexibilidade que um gerente tem para tomar decisões a respeito de ativos reais. Na medida em que novas informações vão surgindo e as incertezas sobre o fluxo de caixa vão se revelando, os administradores podem tomar decisões que venham a influenciar positivamente o valor final de um projeto (DIXIT e PINDYCK, 1994).

A analogia entre as opções financeiras e ativos reais pode ser vista da seguinte forma: o preço de exercício da opção é o montante de dinheiro necessário para a realização do projeto (investimento inicial ou subsequentes); o valor de mercado do ativo subjacente é o valor do projeto; o tempo em que a opção se expira é o tempo até o qual o projeto pode ser adiado sem que a oportunidade seja perdida; a volatilidade do valor do ativo objeto é a volatilidade do valor do projeto (LUEHRMAN, 1998).

Todavia, existem algumas diferenças que dificultam a equiparação das OR às opções financeiras. Mais especificamente, enquanto as primeiras podem (i) facilmente ter valor abaixo de zero; (ii) ter um tempo de expiração bem maior e (iii) formar um conjunto de opções, as opções financeiras, por outro lado, (i) nunca chegam a ter valores negativos; (ii) geralmente têm tempo de duração curto e (iii) não formam um conjunto de opções (COPELAND e ANTIKAROV, 2001).

4.1 Métodos de Avaliação de Opções

4.1.1 Modelo de Black & Scholes para Precificação de Opções Financeiras

No início da década de 1970, Fischer Black e Myron Scholes, em Black e Scholes (1973), obtiveram grandes avanços na precificação de opções, sendo os primeiros a formular um modelo para precificação de derivativos. Tal esforço resultou no modelo Black & Scholes ou B&S, provavelmente o modelo mais conhecido de precificação de opções.

As várias tentativas anteriores haviam falhado porque a precificação do ativo derivado ficava dependendo de um ou mais parâmetros arbitrários que tentavam traduzir as preferências do investidor em relação ao risco. De acordo com Martin (2003), ao

⁸ Para mais detalhes, ver Hull (2003).

perceber tal deficiência, Black e Scholes (1973) reconheceram, ao incorporarem o argumento de Merton (1973), que, em equilíbrio, o retorno de uma carteira sem risco (*riskless hedge portfolio*) deveria corresponder à taxa livre de risco, para impedir a existência de oportunidades de arbitragem.

A proposta de Black e Scholes (1973) era determinar o preço de uma opção de compra somente em função do preço do ativo e de outras variáveis conhecidas. Para isso, são estabelecidas condições ideais de mercado, partindo das seguintes premissas simplificadoras (para mais detalhes ver DIXIT e PINDYCK, 1994; TRIGEORGIS, 1996; COPELAND e ANTIKAROV, 2001):

- a opção é europeia;
- o ativo subjacente não paga dividendos;
- a negociação com o ativo objeto é contínua (não dá saltos) e o ativo é divisível;
- a taxa de juros no prazo de vencimento é conhecida antes.

Com a aplicação de tais premissas, Black e Scholes (1973) deduziram as equações abaixo para o preço dessas opções, no instante zero:

$$c = S_0 N(d_1) - X e^{-rT} N(d_2)$$

$$p = X e^{-rT} N(-d_2) - S_0 N(-d_1)$$

$$d_1 = \frac{\ln(S_0/X) + (r + \sigma^2/2)T}{\sigma\sqrt{T}}$$

$$d_2 = \frac{\ln(S_0/X) + (r - \sigma^2/2)T}{\sigma\sqrt{T}} = d_1 - \sigma\sqrt{T}$$

c : preço da opção de compra europeia;

p : preço da opção de venda europeia;

$N(d_1)$: função de distribuição normal acumulada para d_1 ;

$N(d_2)$: função de distribuição normal acumulada para d_2 ;

S_0 : preço do ativo objeto no instante zero;

X : preço de exercício;

r : taxa livre de risco;

σ : volatilidade do preço da ação;

T : prazo para o vencimento da opção.

A fórmula original exige que a volatilidade da ação seja aquela observada entre a data zero e o vencimento da opção. Devido à dificuldade de se prever tal variância, em geral é utilizada a variância histórica dos retornos diários do ativo objeto multiplicada por 252 (números de dias úteis no ano). Outros modelos (GARCH, EWMA) e estimativas subjetivas podem também ser utilizados.

Apesar do modelo de Black e Scholes (1973) ter sido desenvolvido para precificar opções financeiras, ele pode ser utilizado para valorar OR europeias simples. Contudo, o modelo não é válido para a avaliação de projetos cujas opções sejam do tipo americana e não é muito eficiente para precificar opções compostas (múltiplas opções). Também, se alguma das premissas acima não puder ser sustentada, o melhor é trabalhar com o Modelo Binomial.

4.1.2 Modelo Binomial para Precificação de Opções

Outro método bastante utilizado para avaliação de ativos complexos é o Método Binomial ou Modelo Binomial. Este modelo é considerado o mais intuitivo de todos os métodos numéricos, além de ser muito simples e flexível, sendo aplicado tanto para opções europeias como para americanas, que pagam ou não dividendos, e também para as opções exóticas⁹.

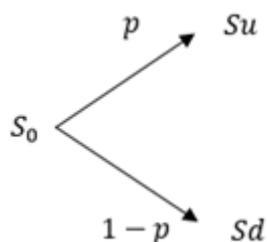
O modelo é também conhecido como modelo de 2 Estados, dado que o preço do ativo-objeto em cada instante só pode assumir dois valores no instante seguinte. Esta situação não é realista, dado que o número de cenários possíveis para o preço do ativo é ilimitado. Porém, se for considerado um período de tempo extremamente curto (próximo milésimo de segundo, por exemplo), ela pode se tornar próxima da realidade.

A cada intervalo de tempo, o preço do ativo objeto é multiplicado por uma variável aleatória que pode assumir dois valores, u ou d . Esta variável aleatória é a taxa de variação do preço do ativo objeto, que pode ser ascendente, u , ou descendente, d , refletindo as condições favorável e desfavorável do mercado. A cada intervalo, o preço

⁹ Opções que oferecem um perfil de pagamento diferente das usuais opções de compra ou venda são chamadas opções exóticas. Existem vários tipos de opções exóticas, cada uma com o seu perfil específico de pagamento, desde as mais simples (binárias) até as que são constituídas por um *payoff* complexo e estruturado.

do ativo objeto partirá de seu valor inicial, S , para um dos dois novos valores, S_u ou S_d (Figura 4-1- Evolução do preço do ativo em um período). Como, em geral, $u > 1 > d$, a mudança de S para S_u corresponde a um movimento ascendente, com probabilidade de ocorrência p , e a mudança de S para S_d corresponde a um movimento descendente, com probabilidade $(1 - p)$.

Figura 4-1- Evolução do preço do ativo em um período



Fonte: Elaboração própria.

O modelo assume que adquirir uma opção de compra é equivalente a comprar o ativo tomando dinheiro emprestado (compra alavancada) – *call* sintética. Assume-se ainda que o número de ativos comprados com o empréstimo é chamado de delta da opção (Δ), ou seja, o número de ativos que replica o comportamento da *call*.

Para achar o portfólio replicante da *call* (*call* sintética), é preciso estabelecer o Δ da opção (número de ativos a serem comprados) e quanto de dinheiro tomar emprestado para tal (B). Suponha que o ativo comprado pague dividendos a uma taxa contínua (*payoff* contínuo, δ), que serão reinvestidos na compra de mais ativos. Após um tempo h , o investidor na ação terá:

$$S_{t+h} = S_0 \cdot e^{\delta h} \quad (1)$$

Portanto, os movimentos no preço do ativo refletirão os movimentos no preço ex-dividendos. Se o ativo subir no próximo período, assumirá o valor:

$$S_u = uS_0 \quad (2)$$

$$u = S_u/S_0 \quad (3)$$

Do contrário, se o ativo cair no próximo período, assumirá valor:

$$S_d = dS_0 \quad (4)$$

$$d = S_d/S_0 \quad (5)$$

Todas as vezes que o ativo subir, a *call* valerá C_u e quando cair, valerá C_d . A extensão do período de análise será h (em anos) e a taxa de juros do período será e^{rh} , onde r é a taxa efetiva de juros anual. A opção vale no vencimento o mesmo que o portfólio formado pelos Δ ativos e o valor tomado emprestado (B), assim:

$$C_h = \Delta S_h + B e^{rh} \quad (6)$$

Se o ativo subir, a opção valerá:

$$C_u = \Delta \cdot uS_0 \cdot e^{\delta h} + B e^{rh} \quad (7)$$

Já se o ativo cair, a opção valerá:

$$C_d = \Delta \cdot dS_0 \cdot e^{\delta h} + B e^{rh} \quad (8)$$

Fazendo (7) menos (8) e colocando Δ em evidência, obtém-se:

$$\Delta = e^{-rh} \left[\frac{C_u - C_d}{S_0 \cdot (u - d)} \right] \quad (9)$$

Substituindo (9) em (7) ou (8), tem-se:

$$B = e^{-rh} \left[\frac{uC_d - dC_u}{u - d} \right] \quad (10)$$

Conhecidos Δ e B , é fácil achar o valor da *call*, c :

$$c = \Delta S_0 + B \quad (11)$$

Caso não queria achar Δ e B antes, faz-se:

$$c = e^{-rh} \left[C_u \cdot \left(\frac{e^{(r-\delta)h-d}}{u-d} \right) + C_d \cdot \left(\frac{u-e^{(r-\delta)h}}{u-d} \right) \right] \quad (12)$$

Observe que os multiplicadores de C_u e C_d se assemelham a probabilidades. Ou seja, o valor da opção de compra hoje (c) é uma espécie de média do valor da opção caso a opção suba (C_u) e caso a opção caia (C_d), ponderados pelas probabilidades da opção subir ou cair. Assim,

$$c = e^{-rh} [C_u \cdot p + C_d \cdot (1 - p)] \quad (13)$$

$$p = \frac{e^{(r-\delta)h-d}}{u-d} \quad (14)$$

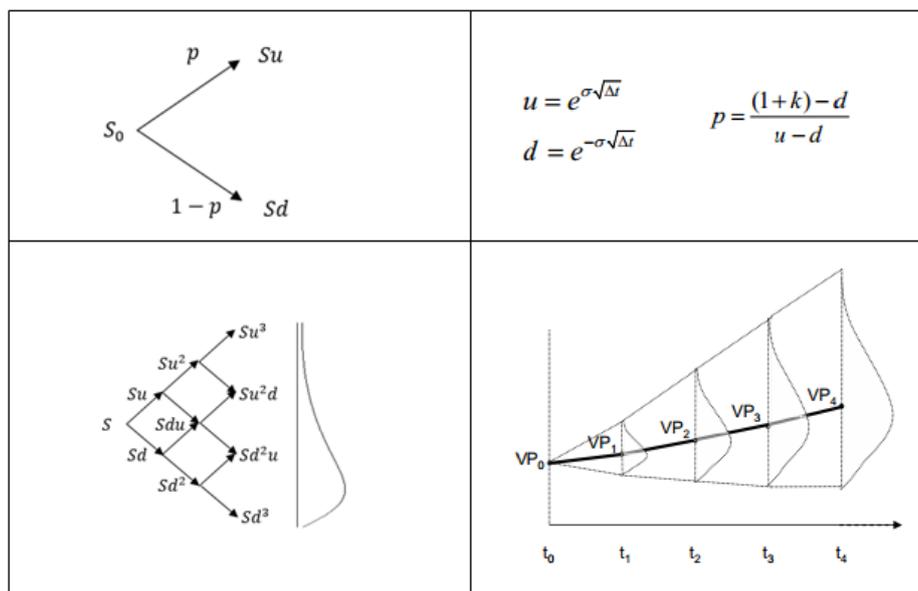
$$(1 - p) = \frac{u-e^{(r-\delta)h}}{u-d} \quad (15)$$

De forma similar, em 1979, Cox, Ross e Rubinstein (CRR) mostraram que a distribuição de probabilidade log-normal contínua pode ser modelada através de uma árvore binomial discreta. Em síntese, assume-se que o valor do projeto (S) segue um Movimento Geométrico Browniano (MGB¹⁰) e que, a cada período Δt , tem-se o valor Su , com probabilidade p , ou Sd , com probabilidade $(1 - p)$, onde σ é a volatilidade do projeto, $u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}}$, $d = 1/u$ e $p = \frac{1+k-d}{u-d}$, então (Figura 4-2):

Observe que as fórmulas desenvolvidas no modelo binomial partem do pressuposto de que não há possibilidades de arbitragem, ou seja, que o derivativo caminha na árvore binomial ao longo de sua existência. Assim, de acordo com Brandão (2002), os preços dos ativos devem ser consistentes de forma que seja impossível auferir lucro sem correr risco. Conseqüente, sempre haverá uma distribuição neutra a risco onde o retorno esperado de qualquer ativo é descontado à taxa livre de risco.

¹⁰ O MGB possui dois componentes: um crescimento proporcional com taxa α (taxa de retorno esperada) e um crescimento aleatório proporcional com distribuição normal e desvio padrão σ (volatilidade do valor do ativo). Sua fórmula é dada pela equação $dX = \alpha X dt + \sigma X dz$ ou $\frac{dX}{X} = \alpha dt + \sigma dz$. O MGB possui três características fundamentais para modelagem: permite crescimento exponencial; retornos são normalmente distribuídos e o valor de X não pode se tornar negativo. A restrição que existe ao uso do MGB é que este processo pode divergir, levando $X(t)$ para o infinito e, assim, alguns modelos que seguem este processo estocástico podem não ser muito realistas.

Figura 4-2 – Modelo Binomial CRR



Fonte: Elaboração Própria.

Note ainda que, ao assumir $d = 1/u$, o modelo CRR garante que a árvore binomial torna-se recombinante. Uma árvore binomial é recombinante quando, em qualquer dois intervalos de tempo consecutivos, um movimento de subida seguido por um movimento de descida é exatamente o mesmo que um movimento de descida seguido por um movimento de subida. Esta propriedade diminui drasticamente o número de nós em cada período. Em suma, uma árvore recombinante possui $i + 1$ nós no i – ésimo período (o número de nós em cada intervalo de tempo cresce linearmente) e uma árvore não recombinante possui 2^i nós no i – ésimo período (o número de nós em cada intervalo de tempo cresce exponencialmente).

4.2 Opções Reais

O conceito de uma opção real (OR) foi desenvolvido a partir da ideia de Myers (1977) de que uma empresa, ao executar uma oportunidade de investimento, estaria executando uma opção de compra sobre ativos reais. Neste sentido, as OR são investimentos em derivativos reais que conferem à empresa o direito, mas não a

obrigação, de adotar certas ações no futuro (MYERS, 1977; TRIGEORGIS, 1996; AMRAM e KULATILAKA, 1999).

A primeira aplicação da teoria de opções a ativos reais foi realizada pelo brasileiro Tourinho (1979), na avaliação de uma reserva natural. O estudo considerava haver custos de manutenção das reservas de recursos naturais e que os custos de extraí-los aumentavam com o tempo. Pouco tempo depois, Titman (1985) empregou a TOR para estimar preços de áreas urbanas desocupadas, avaliando a opção de adiamento de sua ocupação.

O objetivo desses autores ao utilizar a TOR na avaliação de projetos era superar o fato de que a análise tradicional de investimentos aplicada como ferramenta de tomada de decisões financeiras não leva em conta que, durante a implementação de um projeto, oportunidades ou externalidades podem ocorrer e influenciar positiva ou negativamente os fluxos de caixa previstos.

Desde o trabalho de Tourinho (1979), encontram-se diversos trabalhos que aplicam OR a diferentes tipos de ativos. No Brasil, a TOR tem sido aplicada em vários setores, dentre os quais podem ser citados: o de exploração e produção de petróleo (DIAS e ROCHA, 1999; DIAS, 2004), o de mineração (VIDAL, 2008), o de combustíveis (BASTIAN-PINTO *et al.*, 2009) e o de energia elétrica (BATISTA, 2007; CAPORAL e BRANDÃO, 2008). Destacam-se ainda os trabalhos de Brandão (2002) e Blank e Tarquin (2008), que aplicam a TOR a concessões rodoviárias.

De forma geral, a abordagem da TOR é uma extensão da teoria das opções financeiras, aplicada à avaliação corporativa que compreende diversas incertezas, permitindo múltiplas opções associadas a um ativo real. Segundo Hull (2003), os principais elementos de uma OR, tal como nas opções financeiras, são:

- **preço do ativo objeto:** corresponde ao valor presente de uma oportunidade de investimento;
- **preço de exercício:** é o montante a ser investido, quando se trata de uma opção de compra, ou o montante a ser recebido, no caso da opção de venda;
- **tempo até o vencimento:** período de tempo em que a decisão de investir (ou de vender) pode ser postergada antes que a oportunidade expire;
- **volatilidade:** medida de variabilidade dos fluxos de caixa da oportunidade de investimento;

- **taxa livre de risco:** rendimento de uma aplicação financeira isenta de riscos de mesmo prazo que a OR;
- **dividendos:** valor perdido durante o período em que a oportunidade de investimento foi postergada.

Todavia, para Trigeorgis (1996), analogias entre OR e opções financeiras não são perfeitas. Algumas diferenças podem ser observadas, como o fato de que as opções de compra são um direito exclusivo de seu detentor, o que não necessariamente ocorre com as opções de investimento, que, em algumas situações, são partilhadas com os concorrentes.

Também, diferentemente das opções financeiras, a modelagem por OR é mais complexa, uma vez que é modelado o comportamento de um ativo real e indivisível, que possui baixa liquidez devido à sua especificidade, altos custos de transação e assimetria de informação, além de tempo de expiração longo. Outras diferenças entre as opções financeiras e reais podem ser vistas abaixo:

- em opções financeiras, o ativo subjacente é um valor mobiliário negociado no mercado, cuja estimativa de parâmetros de entrada é mais fácil, enquanto que, em OR, o ativo subjacente é algo tangível, como, por exemplo, uma unidade de negócio ou uma empresa;
- a volatilidade das opções financeiras é calculada com base no comportamento histórico dos títulos no mercado financeiro. Já a volatilidade das OR é calculada com base na hipótese do Marketed Asset Disclaimer¹¹;
- as opções financeiras são constituídas geralmente a partir de apostas secundárias, ou seja, não são emitidas pelas empresas detentoras das ações, mas por agentes independentes; entretanto, as OR são controladas pela administração com o objetivo de maximizá-las a partir da flexibilidade gerencial;
- tanto a incerteza do ativo subjacente das opções financeiras quanto a incerteza do ativo subjacente das OR são exógenas. Todavia, a

¹¹ A marcação a mercado do ativo (*Marketed Asset Disclaimer* - MAD), consiste em utilizar o VPL tradicional como melhor estimativa não tendenciosa do valor de mercado do projeto. Primeiro determina-se o VPL do projeto sem opções, em seguida estima-se o processo estocástico das variáveis e, por fim, calcula-se a volatilidade agregada através da simulação de Monte Carlo. Esta volatilidade será utilizada para o cálculo no VPL com opção.

administração, nesse último caso, possui a flexibilidade de tomar decisões ao longo da vida da opção. Também, algumas incertezas na OR tem origens endógenas devido às incertezas técnicas existentes em alguns projetos, como os de P&D.

Note ainda que as opções financeiras estão associadas a ativos divisíveis, o que não ocorre com as OR. Também, as primeiras são transacionadas em um mercado completo, onde os riscos são correlacionados com outras variáveis, ou seja, são passíveis de proteção, ao passo que, nas OR, existem riscos privados para os quais não há qualquer ativo correlacionado. Além disso, as OR não são transacionadas no mercado.

Não obstante, de acordo com Mun (2006), o método de OR incorpora um modelo de aprendizagem, levando os gerentes a tomar melhores decisões estratégicas à medida que o nível de incerteza é resolvido com o tempo. Isso é diferente das análises por FCD em que as decisões de investimento são estáticas e as decisões estratégicas são avaliadas inicialmente sem o recurso de serem alteradas ao longo do tempo. Segundo os autores, as OR devem ser visualizadas como um mapa estratégico de tomada de decisões capazes de orientar gestores em ambientes desconhecidos, sinalizando o melhor caminho a seguir e apoiando decisões, utilizando mais informações.

Adicionalmente, a TOR é percebida como um dos poucos, se não o único, método de avaliação de ativos que reconhece a interação entre três fatores que caracterizam a natureza dos investimentos: a irreversibilidade, a incerteza e o *timing* (DIXIT e PINDYCK, 1994). Esses três itens formam a base da teoria do investimento sob incerteza e são explicados na sequência.

Primeiramente, os investimentos são, em geral, irreversíveis. A irreversibilidade pode ser parcial ou total, ou seja, depois de feito o investimento, caso haja arrependimento da decisão, não é possível recuperar todo ou a maior parte do capital investido. Desta forma, a maioria do custo de investimento é um custo afundado (*sunk cost*). Logo, a irreversibilidade faz com que a espera tenha valor. Deve-se valorizar a espera antes de se tomar uma ação irreversível. Somente quando a probabilidade de insucesso é significativamente baixa é que o investimento irreversível deve ser feito.

Em segundo lugar, a incerteza sobre o futuro é uma característica importante na tomada de decisão de investir. Os valores do projeto e da opção de investir e a própria decisão de investir são afetados pela incerteza associada a variáveis relevantes, tais como o preço do produto, o custo dos insumos, a taxa de juros, a taxa de câmbio, a

oferta de crédito e a regulação. Basicamente, existem dois tipos de incerteza: a econômica e a técnica.

A incerteza econômica é correlacionada aos movimentos que são sujeitos a acontecimentos exógenos, tais como recessão ou aquecimento da economia, guerras, perdas de safra por razões climáticas, safra recorde, descoberta de novas tecnologias, etc. Esse tipo de incerteza valoriza uma opção de espera, pois se aprende esperando e não investindo imediatamente (DIAS, 1996).

Já a incerteza técnica está presente, por exemplo, em projetos que utilizam novas tecnologias, como equipamentos que são fabricados pela primeira vez, sendo que a incerteza está presente não só no custo de aquisição, como também no custo de instalação e manutenção (DIAS, 1996). Uma característica fundamental da incerteza técnica é que a realização de investimentos reduz esse tipo de incerteza. Assim, a incerteza técnica é endógena ao processo de decisão, ao contrário da incerteza econômica.

Por último, o *timing* do investimento está relacionado à possibilidade de adiamento, pois, em geral, não é obrigatório investir imediatamente. Pode-se tomar a decisão de investir imediatamente ou aguardar por novas informações e/ou melhores condições. Raramente um investimento é do tipo “agora ou nunca” (DIXIT e PINDYCK, 1994); quase sempre é possível esperar e observar o mercado, pois, na maioria dos casos, o adiamento dos projetos é factível. Deve-se sempre comparar o custo de adiar com os benefícios de se esperar uma informação nova para subsidiar a decisão de investir.

Nesse ponto é relevante ressaltar que as OR podem ser classificadas pelo tipo de flexibilidade que oferecem, de acordo com a taxonomia abaixo (para maiores detalhes ver TRIGEORGIS, 1996; COPELAND e ANTIKAROV, 2001):

- **opção de adiamento:** é a opção de adiar a realização de um investimento, buscando o melhor momento e tendo em vista que novas informações possam apresentar cenários mais favoráveis ou minimizar as incertezas de um projeto.

Copeland, Koller e Murrin (2000) exemplificam a opção de adiamento com a situação do investidor que adquiriu os direitos de exploração de uma reserva de petróleo e decide adiar sua prospecção e extração porque o preço atual da commodity é insuficiente para cobrir os custos envolvidos. No entanto, se o

preço do petróleo vier a subir, este investidor irá exercer sua opção de explorar a jazida. Esta situação se assemelha a uma *call* americana, onde o prêmio pago pelo investidor é o valor pago pela concessão de exploração.

- **opção de expansão:** trata da oportunidade de ampliar ou desenvolver um projeto a partir de um investimento realizado. O exercício da opção (representado pelo desenvolvimento do projeto) pode se dar a qualquer momento. Esta opção se equipara a uma *call* americana.

Damodaran (1994) levanta a hipótese de que esta opção pode estar embutida no valor de algumas companhias, o que faria com que elas fossem negociadas com ágio sobre o valor do FCD. Esta é a situação de pequenas empresas de crescimento acelerado em mercados de grande expansão. Em caso de sucesso, estas empresas poderiam expandir-se muito mais. Desta forma, estas empresas devem ser avaliadas considerando-se simultaneamente o VPL dos fluxos de caixa e o valor das opções reais embutidas.

- **opção de contrair:** diz respeito à possibilidade de reduzir a escala de um projeto mediante os novos fatos ou expectativas que possam ser desfavoráveis ao escopo original. O ambiente que envolve as opções de contração é bem semelhante ao das opções de abandono. Porém, nas contrações de investimento, o titular da opção não aliena o ativo, apenas reduz o orçamento de capital inicialmente formulado. Essas opções são tratadas como uma *put*.
- **opção de abandono:** é a opção de abandonar ou vender um projeto. Esta decisão é tomada à luz da comparação entre o valor de liquidação dos ativos e o valor presente dos fluxos de caixa (DIXIT e PINDYCK, 1994). A opção de abandono se assemelha a uma *put* americana (pois a decisão de abandonar pode ocorrer a qualquer tempo).
- **opção composta:** são opções que compreendem fases sucessivas do projeto, as quais exigem investimentos em cada uma das fases antes da próxima ocorrer. Projetos com opções compostas são caracterizados por possuírem múltiplas opções e pela regra de exercício ser baseada na maximização de valor.

A título de exemplo, considere a fabricação de um bem durável qualquer: o investidor deverá decidir sobre o investimento na linha de produção para,

posteriormente, em função da demanda por aquele bem, decidir pelo aumento da produção ou pela sua manutenção ou ainda pelo abandono do negócio.

- **opções arco-íris (*rainbow options*):** são opções sobre um projeto sujeitas a mais de uma fonte de incerteza, tais como: a demanda, os custos, as ações da concorrência, etc. A conjunção de múltiplas incertezas com múltiplas decisões sequenciais resulta nas opções arco-íris compostas. A exploração e produção, P&D, o desenvolvimento de novos produtos são exemplos de opções compostas, do tipo arco-íris (COPELAND e ANTIKAROV, 2001). Para Copeland e Antikarov (2001) estas talvez sejam as opções mais realistas, uma vez que procuram incorporar todas as incertezas de um projeto e permitem tratar as decisões que serão tomadas ao longo do seu desenvolvimento caso as incertezas venham a requerê-las. Por esta razão, estas opções são conhecidas também como opções de aprendizado, pois o decisor aprenderá a reagir de acordo com os eventos futuros (COPELAND, WESTON e SHASTRI, 2005).

É possível, ainda, combinar alguns tipos de opções. Por exemplo, pode-se diferir o início de um projeto, iniciá-lo em momento que maximize o VPL, interrompê-lo temporariamente, caso o cenário assim determine, para retomá-lo posteriormente.

4.3 Processos Estocásticos

Na TOR, se considera a natureza estocástica da evolução dos preços, devido à incerteza econômica, através de diferentes modelos estocásticos. De acordo com Lima (2004), a modelagem da evolução das variáveis do problema é de suma importância para uma alocação eficiente de recursos no processo decisório associado a alternativas de investimentos.

Uma variável segue um processo estocástico quando pelo menos parte do seu valor se altera ao longo do tempo de maneira incerta. De maneira formal, um processo estocástico é definido por uma lei de probabilidade para a evolução de uma variável x durante um tempo t (DIXIT e PINDYCK, 1994). Assim, um processo estocástico pode ser representado por $X = \{X(t), t \in T\}$, onde $X(t)$ é a variável aleatória x no instante t .

Os processos estocásticos podem ser classificados, basicamente, em função do seu comportamento estacionário (média e variância da variável aleatória se mantêm

constantes no tempo) ou não estacionário (valor esperado da variável aleatória tende ao infinito e a variância é proporcional ao tempo). Com relação à ocorrência da variável objeto, pode-se classificar os processos como de estado discreto (variável discreta) ou de estado contínuo (variável contínua). Quanto à ocorrência da variável tempo, podem ser classificados como de tempo discreto (variável tempo é discreta) ou de tempo contínuo (variável tempo é contínua).

Na prática, a maioria dos problemas é modelada utilizando-se processos estocásticos de tempo contínuo, com variável contínua. No modelo de Black e Scholes (1973), por exemplo, o preço do ativo oscila seguindo um processo estocástico de tempo contínuo. Alterações de preço ocorrem a qualquer tempo e a variável é contínua, podendo assumir qualquer valor dentro de um intervalo.

O processo estocástico mais comum para simular o comportamento das variáveis financeiras é o de Markov¹². Se uma variável x_t for modelada por esse processo, a distribuição de probabilidade de x_{t+1} depende apenas de x_t , e não do que ocorreu antes do momento t . O valor atual da variável é o suficiente para a estimativa do seu valor futuro. A vantagem desse processo é que ele simplifica a análise dos processos estocásticos.

Assume-se que preços de ativos em geral, como ações e *commodities*, seguem um processo de Markov, uma vez que as informações públicas são rapidamente absorvidas no valor atual dos ativos. Em finanças, isso é conhecido como eficiência informacional fraca de mercado. Dentro dessa premissa, assume-se que o preço atual de uma ação reflete todas as informações históricas, bem como as expectativas a respeito do preço futuro desta ação.

Entre os processos estocásticos, o mais básico é aquele onde o tempo e o estado são discretos. Esse processo é conhecido como caminho aleatório (*Random Walk - RW*). O RW é um processo de Markov em tempo discreto com incrementos independentes na forma da equação $S_{t+1} = S_t + \varepsilon_t$, onde S_{t+1} é o valor da variável no tempo $t + 1$, S_t é o valor da variável no tempo t e ε_t é uma variável aleatória com probabilidade $P(\varepsilon_t = 1) = P(\varepsilon_t = -1) = 0,5$.

O RW pode incluir um termo de crescimento de longo prazo, ou *drift*. Sem esse termo de *drift*, a melhor estimativa do valor da variável S_{t+1} é o seu valor atual, uma

¹² De acordo com Hull (2003), o processo de Markov é um tipo particular de processo estocástico no qual apenas o valor atual da variável é importante para estimar o futuro.

vez que o termo de erro é normalmente distribuído com média zero. Já com o *drift*, ou crescimento, os valores futuros da variável tendem a crescer.

É importante ressaltar que o processo RW é consistente com a forma fraca de eficiência de mercado. Assim, se o preço for modelado por um processo RW, as estimativas de preços futuros não serão afetadas pelo comportamento passado dos mesmos. Hull (2003) afirma que, se a forma fraca da eficiência de mercado não fosse verdadeira, analistas técnicos poderiam obter retornos acima da média utilizando unicamente a interpretação de gráficos de preços históricos.

4.4 Técnica de Otimização sob Incerteza – Programação Dinâmica

De maneira geral, destacam-se duas principais técnicas matemáticas de modelagem de decisões de investimento em regime de incerteza: Análise de Ativos Contingenciais (*Contingent Claims Analysis - CCA*) e técnicas de Programação Dinâmica (PD).

Ambos estão intimamente relacionados e levam a resultados idênticos em várias situações, mas partem de pressupostos diferentes quanto ao mercado financeiro e às taxas de desconto que as firmas usam para descontar seus fluxos de caixa. Na análise de ativos contingenciais, usa-se a taxa livre de risco obtida junto ao mercado de capitais; na programação dinâmica, a taxa de desconto exigida pelo ativo é a taxa de retorno ajustada ao risco. Nessa sessão será discutido o processo de programação dinâmica, método utilizado na presente dissertação.

A análise por PD é uma ferramenta matemática alternativa de avaliação muito importante no tratamento de incertezas (SANTOS FILHO, 2003). O uso deste método é proposto quando o mercado é incompleto e tem-se, portanto, problemas na determinação da taxa de desconto apropriada para o projeto, uma vez que não é possível, neste caso, utilizar a avaliação neutra a risco.

A solução ocorre por meio da aplicação da Equação de Bellman¹³, que estabelece que o valor de um investimento é a soma do valor auferido em um pequeno intervalo de tempo, acrescido do valor esperado de todos os fluxos de caixa futuros,

¹³ De acordo com Silva (2009), a consequência direta do *Princípio da Otimalidade de Bellman* é o fato de que a solução de um problema de PD pode ser encontrada resolvendo de forma recursiva os subproblemas para os estágios futuros e utilizando o resultado como entrada para a solução do estado corrente.

descontados a uma taxa de risco e considerando-se que todas as decisões futuras são ótimas (DIXIT e PINDYCK, 1994).

O método da PD adota uma taxa de desconto exógena ρ e o problema de valoração é dividido em duas partes: a decisão imediata e uma função de valoração que engloba as consequências de todas as decisões subsequentes. Uma vez modelado desta forma, a solução do problema é obtida a partir da otimização estática do último período e voltando-se deste ponto final até o instante inicial, considerando-se que sempre serão tomadas decisões ótimas em cada período a partir das informações existentes naquele instante (DIXIT e PINDYCK, 1994). Dessa forma, a Equação Geral de Bellman pode ser escrita como:

$$F_t(x_t) = \max_{u_t} \left\{ C_t(x_t, u_t) + \frac{1}{1+\rho} E_t[F_{t+1}(x_{t+1})] \right\}$$

Onde u_t é a variável de controle utilizada para maximizar o valor do projeto e $C_t(x_t, u_t)$ é o fluxo de lucros no instante t . Quando o intervalo de tempo Δt tende a zero e o tempo é contínuo, a equação de Bellman se torna:

$$\rho F(x, t) = \max_u \left\{ C(x, u, t) + \frac{1}{dt} E(dF) \right\}$$

No caso do problema de parada ótima¹⁴, a equação se reduz a:

$$F(x, t) = \max \left\{ \Omega(x, t), C(x, t)dt + \frac{1}{1+\rho dt} E[F(x + dx, t + dt)|x] \right\}$$

Em que $\Omega(x, t)$ é o benefício obtido exercendo-se a opção de abandono (payoff terminal). Na região de continuação, por definição, o segundo termo do lado direito da equação é o maior dos dois e, portanto, o payoff terminal será ignorado e a expressão simplificada para:

$$F(x, y) = C(x, t)dt + \frac{1}{1+\rho dt} E[F(x + dx, t + dt)|x]$$

¹⁴ No problema da parada ótima, o gestor da empresa deve decidir se para o projeto ou se continua.

Expandindo pelo Lema de Itô, após alguma álgebra tem-se:

$$\frac{1}{2}b^2(x,t)F_{xx}(x,t) + a(x,t)F_x(x,t) + F_t(x,t) - \rho F(x,t) + C(x,t) = 0 \quad (4.16)$$

A PD é uma ferramenta que possui grande flexibilidade de modelagem, característica que a torna extremamente poderosa em termos de aplicação. Contudo, o uso da técnica, em muitos casos, exige um elevado grau de especialização do modelador, devido ao fato de não existir uma formulação padrão para problemas de PD, fazendo com que todas as relações e equações devam ser desenvolvidas para se ajustar a cada caso (HILLIER e LIEBERMAN, 2005).

5 MODELOS DE AVALIAÇÃO DE PROJETOS DE P&D

Os projetos de P&D associados a lançamentos de novos produtos geram grandes desafios às empresas no que se refere à análise financeira. Essa classe de projeto possui como característica intrínseca a oportunidade de investimento futuro e, por isso, os métodos do FCD para a tomada de decisão de investimentos em projetos de P&D não captam corretamente o valor da opção, afirmam Pennings e Lint (1997). Segundo os autores, uma vez que as incertezas de mercado e tecnológicas mudam as expectativas com relação à viabilidade de muitos novos produtos, o valor do projeto é frequentemente ajustado durante os estágios de P&D. A captação dos ajustes das expectativas representa uma opção valorosa que pode diferir significativamente do VPL estático para projetos de P&D.

De acordo com Faulkner (1996), Stewart Myers (1984) foi o primeiro a sugerir que a TOR fosse aplicada a projetos de P&D. Neste caso, os investimentos são análogos às opções de compra. Ou seja, um investimento em P&D proporciona à empresa o direito de decidir, numa data futura, se deve ou não exercer os demais investimentos programados. Sendo que, ao fim de cada fase, a incerteza intrínseca a essa fase estará solucionada e os resultados poderão ser avaliados, de forma que, se forem promissores, a opção será exercida e investimentos adicionais avaliados. Do contrário, a empresa deixará que a opção expire e as perdas serão limitadas.

Modelos baseados em OR consideram adequadamente o valor da flexibilidade gerencial em projetos de investimento com alto grau de incerteza. Em Santos (2001), por exemplo, tem-se uma aplicação da TOR à análise de investimento em um projeto real de P&D, que são representantes por excelência dessa categoria de investimento. O estudo considera o desenvolvimento de um sistema para controle de acesso à internet dos assinantes de uma rede de TV a cabo. Os resultados obtidos comprovam valores superiores para o projeto quando consideradas as OR.

O uso de opções em projetos de desenvolvimento é devido ao fato da TOR ser um método mais flexível, que permite a avaliação do investimento em estágios sucessivos e considera o risco de insucesso durante as várias fases do projeto, especialmente na de pesquisa (NICHOLS, 1994; SCHWARTZ e MOON, 2000). Paxon (2003) organiza uma relevante coletânea de artigos abordando o problema dos desafios que envolvem os projetos de P&D. Abordagens mais analíticas podem ser vistas nos trabalhos de Santos e Pamplona (2005).

5.1 Evolução dos Modelos de Avaliação de P&D com Incertezas Técnicas

Entende-se que a incerteza técnica é um tanto quanto idiossincrática, requerendo, por isso, um tratamento mais específico, como sugerem Huchzermeier e Loch (2001). Ao adaptar o modelo de Smith e Nau (1995), de valoração de OR de investimento para o caso do gerenciamento de projetos de desenvolvimento de produtos/tecnologia, os autores apresentaram um modelo dinâmico capaz de valorar projetos de pesquisas sujeitos a diversas fontes de incerteza, incluindo as tecnológicas. A proposta era avaliar a flexibilidade gerencial em projetos de P&D para produtos. Enfatizando o fato de existirem, até então, poucas evidências práticas de avaliação de projetos de P&D, o artigo acena com resultados diferenciados, em que o aumento de outras incertezas, que não a relacionada ao *payoff* de mercado, pode reduzir o valor da opção. Tal situação decorreria de incertezas operacionais enfrentadas pelos gerentes dos programas de P&D.

O trabalho de Huchzermeier e Loch (2001) possui três importantes contribuições. Primeiramente, identificou as principais fontes de incerteza (abaixo relacionadas) em um projeto de desenvolvimento de tecnologia e descreveu um modelo adequado para este tipo de projeto. A segunda contribuição foi criar um modelo que representasse o gerenciamento de projeto de desenvolvimento de tecnologia

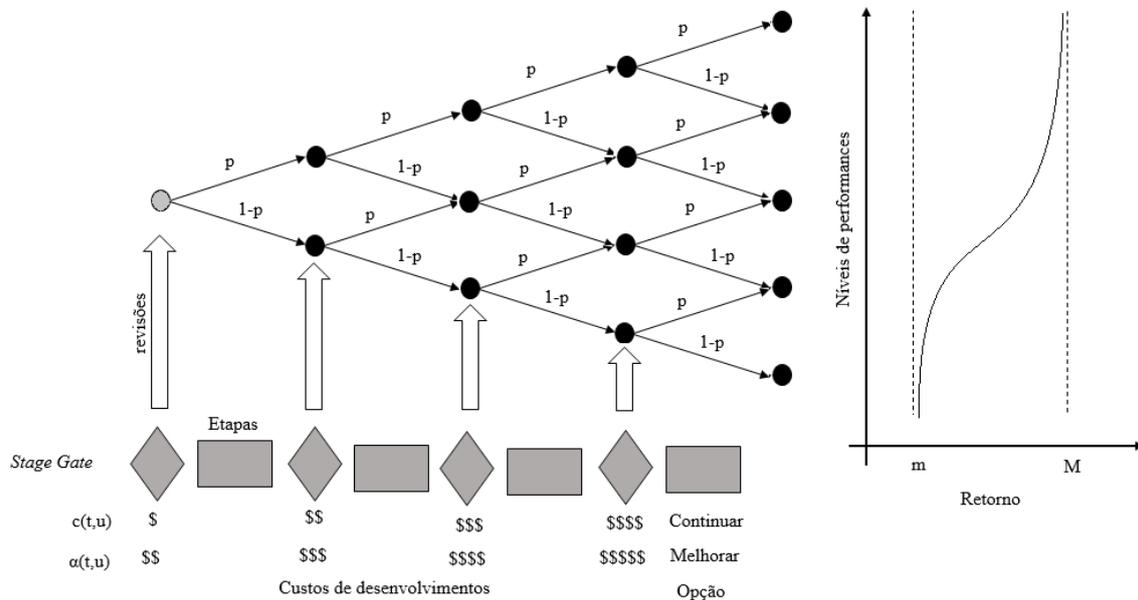
considerando, inclusive, a opção de interferir no percurso de desenvolvimento com o objetivo de alcançar melhores desempenhos. Por fim, numa outra contribuição, os autores estenderam a classificação das opções (apresentadas geralmente como de espera, abandono, expansão, contração e troca), propondo a opção de melhoria. Esta opção deriva seu valor da possibilidade de melhorar o desempenho do produto, com um custo adicional, no decorrer do projeto.

Cinco tipos de incertezas foram percebidas pelos autores: o desempenho da tecnologia (performance) ou a qualidade do desenvolvimento tecnológico; o custo de desenvolvimento; o tempo de desenvolvimento; o nível de exigência do mercado e o quanto ele pagará por cada nível de desempenho tecnológico alcançado (*payoff* de mercado).

Considerando essas contingências, o valor (V) do projeto pode ser escrito como $V = f(\text{desempenho, custo, tempo, requerimento de mercado, } \textit{payoff} \text{ de mercado})$. Com a abordagem da OR, os autores procuraram ligar estes tipos de incertezas ao valor da flexibilidade gerencial do projeto.

O exemplo estudado por Huchzermeier e Loch (2001) se baseia num projeto de P&D de um novo produto realizado em estágios. A Figura 5-1 ilustra uma árvore com todas as possíveis performances alcançáveis ao longo do processo de desenvolvimento. Um ponto de revisão do projeto (*gate*) é posicionado antes de cada fase onde a ação gerencial é escolhida para a sequência do projeto. O modelo assume a incerteza tecnológica como sendo a distribuição de probabilidade da performance do estágio seguinte, que na figura é representado pelos ramos da árvore.

Figura 5-1 - Representação esquemática.



Fonte: Adaptado de Huchzermeier e Loch (2001).

Ao final de todas as etapas, o valor do projeto é dado pelo mercado com base na performance alcançada no decorrer do processo de desenvolvimento do produto. A escolha da ação gerencial em cada um dos pontos de revisão implica em diferentes custos e diferentes valores esperados para a performance do estágio seguinte.

Dessa forma, por meio de um modelo de múltiplos estágios resolvido com as técnicas da programação dinâmica, Huchzermeier e Loch (2001) mostram que, se a incerteza é resolvida ou se os custos e receitas são contratados depois de todas as decisões serem tomadas, mais variabilidade não tem valor, podendo reduzir o valor do projeto. A variabilidade também pode reduzir a probabilidade da flexibilidade vir a ser exercida, o que também reduz o valor.

Outro resultado encontrado é que, quando o atraso esperado é maior do que o necessário para eliminar a atratividade do projeto (devido à redução do retorno), o valor da flexibilidade diminui, uma vez que as decisões subsequentes não se diferenciam da primeira, isto é, da opção de abandonar. Os autores concluem alertando os gerentes sobre a importância de se manter a flexibilidade do projeto como forma de adicionar valor ao mesmo.

Santiago e Vakili (2005), a partir do modelo de Huchzermeier e Loch (2001), propõe uma evolução ao modelo inicial. Usando três fontes de incertezas (retorno do mercado, desempenho alcançado, exigências do mercado) e o mesmo modelo de Huchzermeier e Loch (2001), com algumas correções de falhas no tratamento matemático, os autores aprofundam a reflexão sobre as questões e as posições contidas no artigo anterior, chegando a conclusões que, de acordo com as próprias palavras de Santiago e Vakili (2005), às vezes foram contrárias e, às vezes, diferentes das encontradas no primeiro trabalho. Alguns exemplos são:

- enquanto, no modelo de Huchzermeier e Loch (2001), o valor da flexibilidade diminui quando a variabilidade do desempenho do produto aumenta, no modelo de Santiago e Vakili (2005) o aumento da variabilidade do desempenho do produto pode levar a valores maiores ou menores para o projeto e para a flexibilidade.
- Huchzermeier e Loch (2001) concluíram que um aumento em σ (desvio padrão da variável “exigência de mercado”) diminui o valor do projeto e o valor da flexibilidade. Já Santiago e Vakili (2005) concluíram não ser possível prever o impacto de um aumento de σ no valor do projeto ou no valor da flexibilidade.
- para Huchzermeier e Loch (2001), de uma forma geral, se a variabilidade do *payoff* de mercado aumenta, o valor da flexibilidade aumenta. Já para Santiago e Vakili (2005) não é possível fazer essa afirmação, uma vez que os autores testaram vários casos com conclusões diferentes.

De uma forma geral, Santiago e Vakili (2005) mostraram que não é possível prever o impacto do valor da incerteza no valor do projeto e nem no valor da opção. Apenas para casos extremos, onde a função de retorno do projeto¹⁵ é estritamente côncava ou estritamente convexa, é possível determinar um comportamento específico. Quando a função de retorno é estritamente côncava, o aumento da incerteza leva a uma

¹⁵ O retorno do projeto será dado pela função $\Pi(x)$, onde x representa o estado de desempenho do produto. $\Pi(x)$ simula o valor esperado de uma série de lucros gerados pelo produto ou tecnologia durante o seu ciclo de vida. O valor da função dependerá do estado alcançado pelo projeto após a última etapa de desenvolvimento. Caso o produto desenvolvido exceda os requerimentos do consumidor (D), o pagamento de mercado (*payoff*) vai alcançar um valor M . Se o produto não alcançar estes requisitos, recebe um *payoff* de valor m . A modelagem de D é feita segundo uma distribuição de probabilidade, com média μ e desvio padrão σ .

diminuição do valor do projeto, já no caso de um projeto com retorno convexo, o aumento da variabilidade do *payoff* eleva também o valor do projeto.

Outra contribuição do trabalho foi mostrar que, para uma função de retorno monotonicamente crescente, é possível determinar uma região de estados para os quais a opção ótima é abandonar o projeto, mas o mesmo não ocorre para as outras duas opções de controle modeladas (continuar e melhorar).

Ressalta-se, contudo, que as análises conduzidas por Santiago e Vakili (2005) consideram aleatórias apenas três das cinco fontes de incertezas indicadas por Huchzermeier e Loch (2001): o retorno de mercado, o desempenho do produto e o requerimento do mercado. O custo e o tempo para completar o projeto de P&D do produto foram considerados variáveis determinísticas.

Em Santiago e Bifano (2005), encontra-se uma aplicação do modelo de Santiago e Vakili (2005) onde é realizada a avaliação de um projeto de pesquisa que visa ao lançamento de um novo produto: um oftalmoscópio. Os autores apresentam um modelo que alia questões técnicas, de mercado e de custo, aplicado a um projeto de pesquisa que, no caso particular, não tem informações suficientes para a tomada de decisão quando comparado a outros projetos desenvolvidos previamente.

Este tipo de projeto é muito comum em empresas que trabalham com alta tecnologia e traz à tona questões não triviais. Entre elas, podem ser destacadas as dificuldades atreladas a produtos inovadores, como o problema de avaliação do *payoff* do mercado, dos atributos necessários para que este produto entre no mercado e, de uma maneira mais geral, de uma medida confiável sobre o limite máximo de investimento extra em desenvolvimento considerando os benefícios esperados, já que estes não são de fácil mensuração.

Para lidar com isso, Santiago e Bifano (2005) propõem a junção de aspectos qualitativos e quantitativos coletados em um conjunto de entrevistas com as ferramentas matemáticas e financeiras, que permitem obter resultados utilizando os dados das entrevistas. Estas entrevistas são de fundamental importância, pois permitem um conhecimento maior da indústria, do ambiente de inovação e das necessidades e expectativas dos usuários do produto pesquisado. Através delas é possível definir as variáveis e especificações técnicas críticas, a faixa de preços e o mercado potencial.

Ainda, uma característica interessante do modelo é a introdução de um erro arbitrário, que destaca o fato de que não é possível capturar todos os resultados do

desenvolvimento. Também, com o intuito de verificar a interação entre variáveis, é proposto um modelo multidimensional ao invés de considerar variáveis escalares.

Por fim, Silva e Santiago (2009) acoplam ao modelo de Santiago e Vakili (2005) a duração estocástica das fases de desenvolvimento com gerenciamento ativo, considerando a incerteza no tempo e aplicando este novo modelo ao projeto avaliado anteriormente em Santiago e Bifano (2005). Diferentemente da forma como Huchzermeier e Loch (2001) o fizeram, Silva e Santiago (2009) propõem uma interessante abordagem alternativa ao considerar o tempo de forma estocástica no modelo decisório calculado por programação dinâmica.

5.2 Gerenciamento de Projetos de P&D com Tempo Estocástico

O modelo que servirá como base para a construção do presente trabalho foi sugerido inicialmente por Huchzermeier e Loch (2001) e aprimorado em 2009 por Silva e Santiago. Por esse motivo, uma descrição resumida do modelo de Silva e Santiago (2009) será apresentada nessa seção.

A modelagem em questão refere-se ao gerenciamento de um projeto de desenvolvimento de tecnologia caracterizado por decisões sequenciais e um retorno final que depende do nível de desenvolvimento e do momento de comercialização do produto ou tecnologia (representando o final de um desenvolvimento bem sucedido).

O problema consiste em um processo de decisão sequencial no qual a incerteza desempenha um papel fundamental. O retorno deste projeto é obtido em um estágio futuro finito, porém incerto. A cada momento de decisão, os gestores devem escolher a melhor ação de forma a balancear o custo e o ganho futuro esperado.

A cada ponto da sequência finita de decisões (revisão) que ocorrem antes de cada fase do desenvolvimento e que são definidas antes do início da execução do projeto, está associado um estado representado pela performance alcançada e pelo instante de tempo em que a decisão está sendo tomada. Estes parâmetros são estocásticos e independentes.

Especificamente, em cada estágio j ($j = 0, \dots, N$), de revisão o projeto será caracterizado por um estado de desenvolvimento que será representado por $Y_j = (x_j, \tau_j)^t$, onde x_j é o nível de desenvolvimento que se espera alcançar após a realização das j primeiras etapas do projeto e τ_j é o instante de tempo da revisão.

Sem perda de generalização, os autores assumem que $\tau_0 = 0$ e que x_j são variáveis aleatórias independentes entre si e independentes também do instante da revisão (τ_j), para toda revisão j . Em um projeto de desenvolvimento de tecnologia esta suposição é plausível uma vez que o desempenho de uma fase de desenvolvimento está relacionado ao escopo de cada etapa e às decisões tomadas durante o projeto do produto e não à duração da fase. Apesar de o tempo estar relacionado à resolução de incertezas, a duração esperada de cada etapa é suficientemente pequena para se assumir que não há aprendizado que possa ser utilizado na própria etapa e nas etapas seguintes.

Com base na informação do estágio presente, a equipe de decisão deverá escolher uma dentre as possíveis ações gerenciais descritas abaixo:

- **continuar:** significa seguir o projeto como previsto inicialmente;
- **abandonar:** a ação gerencial corresponde à interrupção do projeto, neste caso não haverá incidência de novos custos nem ganhos;
- **melhorar:** esta opção representa a aplicação de um aporte adicional de capital na etapa seguinte do desenvolvimento com o objetivo de alcançar melhores níveis de performance ao final da mesma;
- **acelerar:** de maneira semelhante à ação de melhorar esta ação é caracterizada por um aporte adicional de capital para alcançar um estado melhor de desenvolvimento. Melhor neste caso significa com um tempo total menor do que o esperado. O objetivo desta opção é reduzir o tempo esperado de desenvolvimento da etapa e ou a incerteza presente.

Após a tomada de decisão, o projeto entra em uma próxima etapa de desenvolvimento que o levará a um novo estado de revisão. A opção de controle influenciará a definição do estado do projeto na revisão seguinte. Por exemplo, ao optar por melhorar o projeto, a equipe espera alcançar estados que, em média, possuam melhor desempenho. No entanto, a política de controle não irá determinar exatamente o estado do projeto devido às incertezas tanto no nível de desenvolvimento quanto na duração da fase. Sendo assim, o estado seguinte será função do estado atual, do controle aplicado e das incertezas do desenvolvimento (ξ_j).

$$Y_{j+1} = \varphi(Y_j, u_j, \xi_j) \quad (5.1)$$

É importante ressaltar que, uma vez que o estado seguinte depende apenas do estado corrente, que é representado por parâmetros aleatórios independentes, o processo de decisão pode ser modelado como um processo de decisão de Markov. Observe que, apesar de o tempo ser estocástico, os pontos de decisão são independentes do mesmo. Este fato permite modelar o problema como um processo Markoviano. Também, a transição de estados será aditiva em relação ao estado atual e a fração adicionada dependerá do controle aplicado.

$$Y_{j+1} = \begin{cases} \text{parar,} & \text{se } u_j = \text{abandonar} \\ Y_j + \begin{pmatrix} \omega_j \\ t_j \end{pmatrix}, & \text{se } u_j = \text{continuar} \\ Y_j + \begin{pmatrix} \omega_j + I_j \\ t_j \end{pmatrix}, & \text{se } u_j = \text{melhorar} \\ Y_j + \begin{pmatrix} \omega_j \\ t_j - A_j \end{pmatrix}, & \text{se } u_j = \text{acelerar} \end{cases} \quad (5.2)$$

Na equação acima, as incertezas do desenvolvimento são representadas por $\xi_j = (\omega_j, t_k)^t$, onde ω_j é uma variável aleatória que representa o desenvolvimento da incerteza e t_k é uma variável aleatória que representa a duração da fase seguinte $k = j + 1$. I_j é uma constante que representa o aumento no desempenho esperado devido ao controle “melhorar”. A constante A_j representa uma redução no valor esperado da duração da fase. É necessário atenção ao fato de que a duração da fase deve ser positiva e que o valor de A_j deve ser escolhido de tal forma que isso seja assegurado. É fácil perceber que em todo ponto de revisão j o instante de tempo do mesmo será dado pela relação $\tau_j = \sum_{k=1}^{j-1} (t_k)$, onde t_k ($k = 1, \dots, N$), são variáveis aleatórias independentes que representam a duração da fase k .

O retorno do projeto será dado pela função $\Pi(y_N) = \Pi(x_N, \tau_N)$, que representa o valor esperado de uma série de lucros gerados pelo produto ou tecnologia durante o seu ciclo de vida; o valor da função dependerá do estado alcançado pelo projeto após a última etapa de desenvolvimento. Isto é, o retorno depende do momento do lançamento e da performance alcançada. Para um dado $\tau_N = T$ suponha que a função payoff $\Pi(x_N, T)$ seja crescente em x_N e, fixando o nível de performance atingido ao final do projeto em $x_N = X$, a função de retorno $\Pi(X, \tau_N)$ normalmente decrescerá com o

aumento do tempo de lançamento devido à perda de mercado nos primeiros anos do ciclo de vida.

A função de retorno é descrita pela equação (5.3). Os parâmetros a e k são respectivamente os parâmetros de escala e forma da função, M é o valor máximo pago pelo mercado para o resultado do projeto, m é o valor mínimo e R é uma variável aleatória que representa o requerimento do mercado no instante do lançamento. Para mais detalhes, ver Silva e Santiago (2009).

$$\Pi(x_N, \tau_N) = \left[(M - m) \cdot \exp\left(-\left(\frac{\tau_N}{a}\right)^k\right) \cdot P(x_N \geq R) \right] + m \quad (5.3)$$

Os custos de desenvolvimento podem variar a cada fase, tornando o modelo mais aderente a situações reais em que os custos são normalmente crescentes ao longo das mesmas. Por outro lado, assume-se que estes custos independem do estado de desenvolvimento do projeto no instante da avaliação, mas dependerão da duração da fase. Desta forma o custo pode ser representado por:

$$C_k(Y_j, u_j, t_k) = \begin{cases} 0, & \text{se } u_j = \text{abandonar} \\ K_k(t_k, u_j), & \text{se } u_j = \text{continuar} \\ K_k(t_k, u_j) + \alpha_k, & \text{se } u_j = \text{melhorar} \\ K_k(t_k, u_j) + \beta_k & \text{se } u_j = \text{acelerar} \end{cases} \quad (5.4)$$

A função $K_k(\cdot)$ representa o custo da fase k seguinte ao estágio j ($j = k - 1$) e varia com a duração da mesma representada no modelo por t_k . Um desembolso adicional α_k ou β_k ocorrerá sempre que a decisão anterior for “melhorar” ou “acelerar” respectivamente.

Seja $G_j(y_j, u_j)$ a função do retorno gerado pela aplicação do controle u_j no estado Y_j que é representada pela seguinte equação:

$$G(Y_j, u_j) = \begin{cases} 0, & u_j = \text{abandonar} \\ E_{t_j} \left[E_{\omega_j | t_j} \left[-C_{j+1}(Y_j, u_j, t_{j+1}) + V_{j+1}(Y_{j+1}) | t_j \right] \right] & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.5)$$

Na equação acima V_{j+1} representa o valor do projeto de desenvolvimento no estágio $j + 1$ de decisão e é calculado como:

$$V_j(Y_j) = \max_{u_j \in \Theta} G(Y_j, u_j) \quad (5.6)$$

onde $\Theta = (\text{Abandonar}, \text{Continuar}, \text{Melhorar}, \text{Acelerar})$ representa o conjunto de controles disponíveis. Finalmente, ao determinar como condição de contorno que $V_N(Y_N) = \Pi(Y_N)$ é possível escrever o modelo de programação dinâmica como:

$$\begin{aligned} \text{Objetivo: } V_0 &= \max_{u_0 \in \Theta} G(Y_0, u_0) \\ \text{s.a.: } V_N(Y_N) &= \Pi(Y_N) \\ V_j(Y_j) &= \max_{u_j \in \Theta} G(Y_j, u_j) \end{aligned} \quad (5.7)$$

5.3 Uma Contribuição ao Modelo de Silva e Santiago (2009)

No modelo de Silva e Santiago (2009), os parâmetros de forma e escala são determinados pelas vendas esperadas observadas na função de vendas. No entanto, a função proposta pelos autores não é a mais adequada para projetos de pesquisa financiados por agências ou entidades privadas que oferecem uma quota de mercado no caso de sucesso do desenvolvimento do produto.

Algumas organizações, como empresas incubadas por universidades, recebem financiamento de agências que estão interessadas que as mesmas desenvolvam um produto específico para um determinado mercado. Assim, se o produto tiver sido bem sucedido durante o seu desenvolvimento ele será negociado para um mercado previamente estabelecido. Isto sugere que o produto não será lançado no mercado, com um volume de vendas zerado, conforme sugerido no modelo dos autores. Além disso, mesmo após o fim do ciclo de vida do produto, este pode permanecer no mercado, em paralelo com a nova tecnologia ou ainda sofrer inovação incremental.

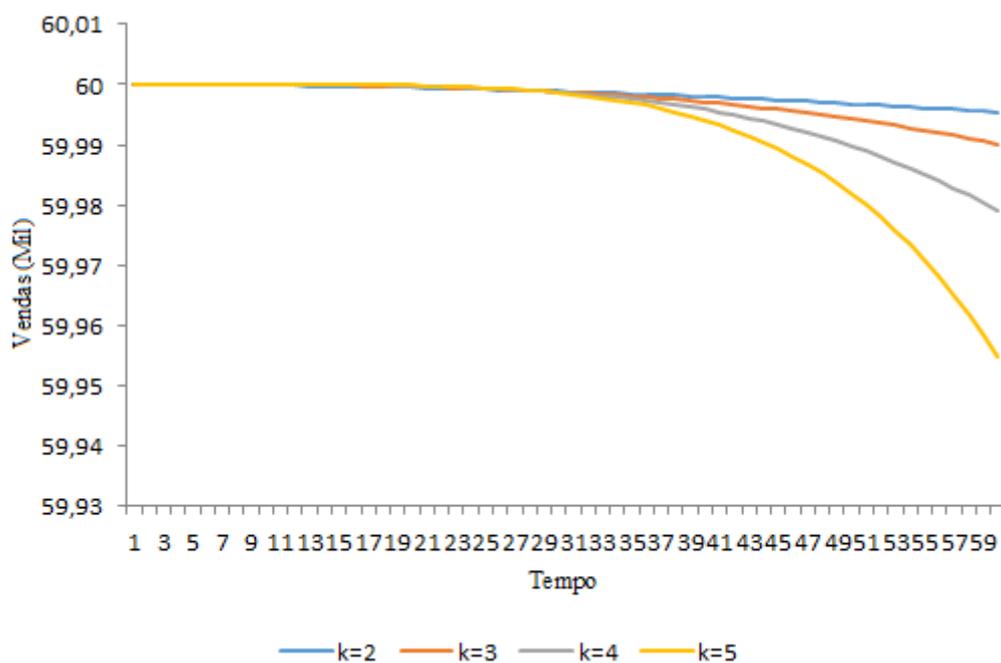
Assim, desenvolveu-se neste trabalho uma função para a quantidade mínima de vendas que será incorporada à função de vendas do modelo. A nova função é mostrada na Equação (5.8).

$$V(t) = \left[(V(k/a)) \cdot (t/a)^{k-1} \cdot e^{-((t/a)^k)} \right] + v(t)$$

$$v(t) = v - (t/a)^k \quad (5.8)$$

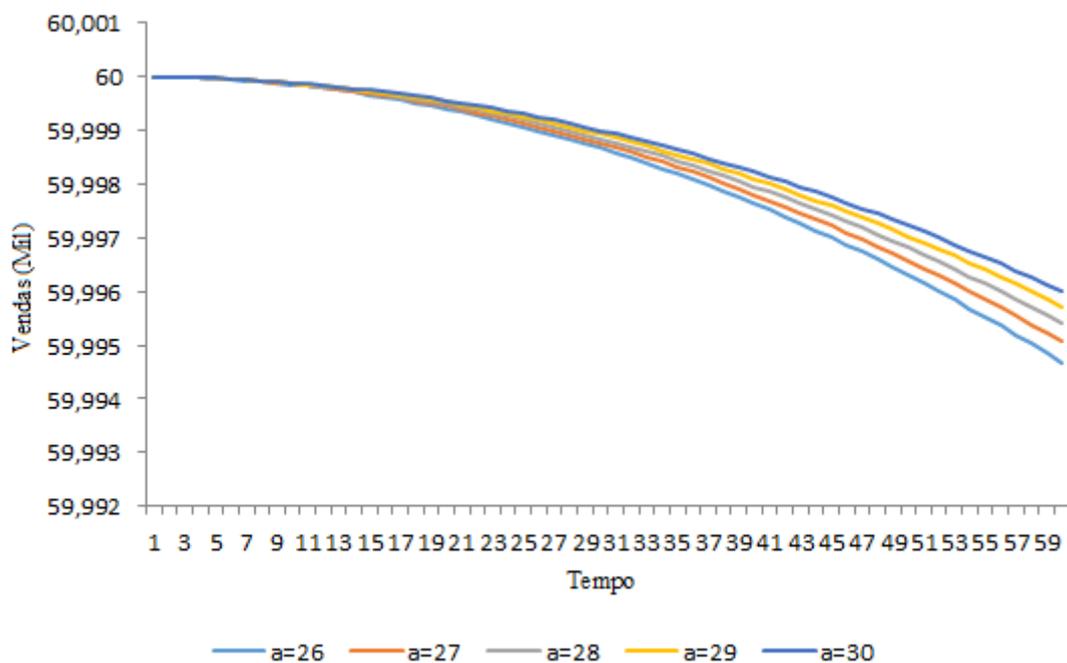
A função de volume mínimo de vendas é uma função decrescente no tempo, com início e fim diferente de zero. As Figura 5-2 e Figura 5-3 mostram o deslocamento da função $v(t)$ durante o ciclo de vida do produto, em relação aos parâmetros de forma e escalar, respectivamente.

Figura 5-2 – variação de $v(t)$ em função do parâmetro de forma (k), $a = 28$



Fonte: Elaboração própria.

Figura 5-3 – variação de $v(t)$ em função do parâmetro de escala (a), $k = 2$



Observe que o mínimo da função de vendas fica mais ou menos inclinado em função da variação dos parâmetros de forma e escala. Esta mudança altera a “cara” da função de vendas, como pode ser visto nas Figura 5-4 e Figura 5-5 abaixo.

Figura 5-4 – Variação de $V(t)$ em função do parâmetro de forma (k), $a = 28$

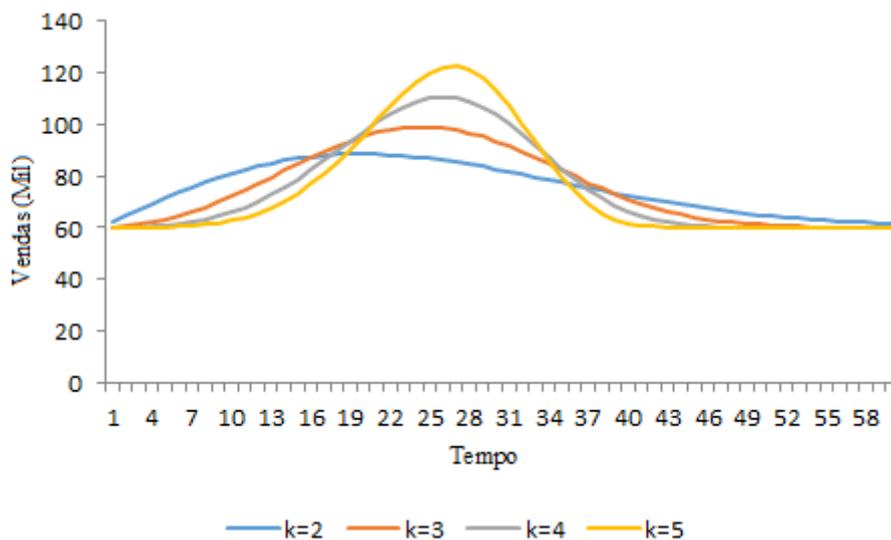
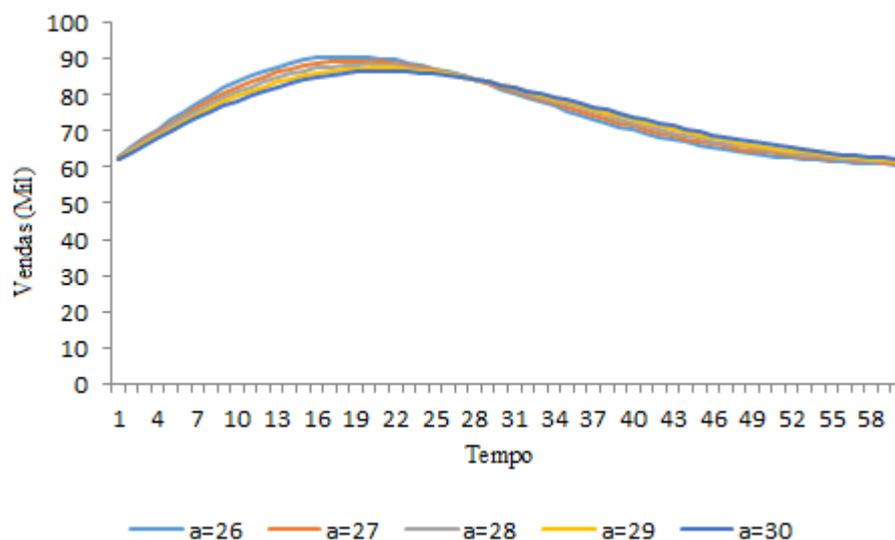


Figura 5-5 – Variação de $V(t)$ em função do parâmetro de forma (a), $k = 2$ 

A função de *payoff* depende dos parâmetros de forma e escala que são determinados pela “cara” da função de volume de vendas. Portanto, é necessário encontrar uma função que melhor se aproxime da expectativa de vendas do produto pelos gestores do projeto.

Abaixo será feito um exemplo para demonstrar o impacto da escolha desses parâmetros sobre o valor esperado de um projeto de desenvolvimento de produto, que pode ser representado pelo modelo de Silva e Santiago (2009), mas com o volume de vendas dado pela Eq. (5.8). No exemplo, o projeto tem três fases, com a função de densidade de probabilidade da incerteza tecnológica definida por $x = (-0.5, -0.4, -0.3, -0.1, 0.0, 0.1, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 0.9, 1.0)$, no último estágio. O aumento esperado no desempenho é de 0,25 unidades, devido à utilização da opção de melhoria ($M = 0,25$).

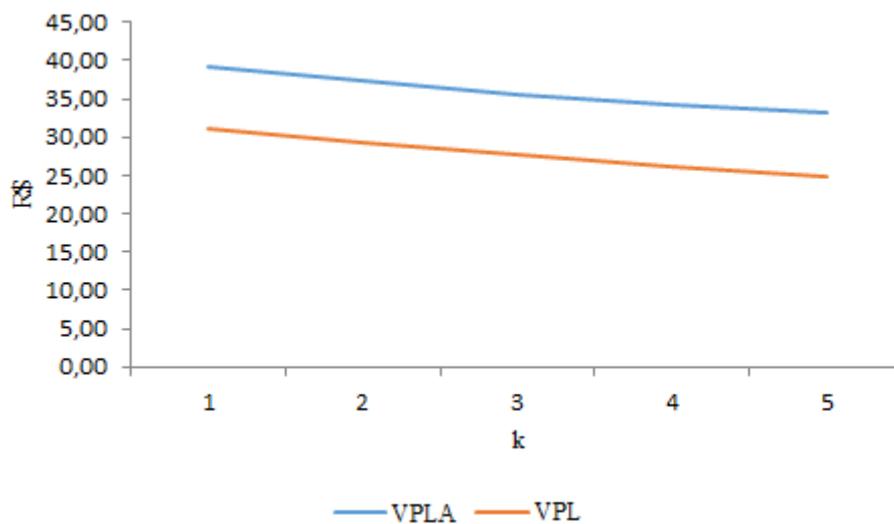
A expectativa do mercado é uma variável aleatória normalmente distribuída com média 0,03 e desvio padrão igual a 2 unidades. O valor máximo pago pelo mercado (M) é de 300 unidades e o mínimo, $m = 0$. O parâmetro de forma (k) é 2 e parâmetro de escala (a) é de 10. Outros dados podem ser vistos na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 - Parâmetros utilizados durante o projeto

Fase	Tempo	Custo C (fixo)	Custo C (var)	Custo M (fixo)	Custo M (var)
1	U(2,3;4,5)	1	1.3	3	1
2	U(2,4)	2	2	2	2
3	U(3,5)	3	3	4	3

A partir desta análise obtêm-se um VPL de R\$ 37,7 e flexibilidade de R\$ 8,0. Variando os parâmetros de forma e escala, chega-se nos seguintes valores (ver Figura 5-6 e Figura 5-7).

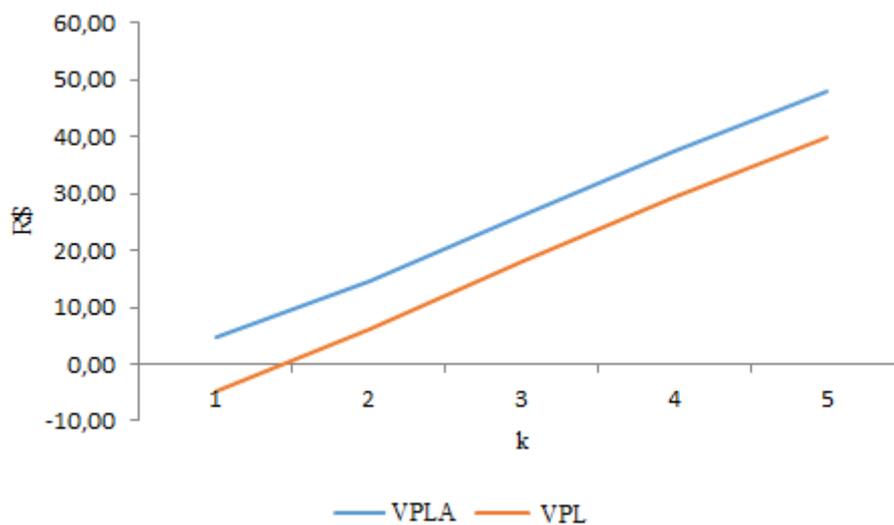
Figura 5-6 - Variação dos VPLs dependendo do parâmetro de forma (k), $a = 10$



Fonte: Elaboração própria.

Note que conforme o valor de k aumenta, o valor de projeto com e sem flexibilidade diminui.

Figura 5-7 - Variação dos VPLs dependendo do parâmetro de escala (a), $k = 2$



Fonte: Elaboração própria.

Por fim, note que conforme o parâmetro de escala aumenta, o valor do projeto com e sem flexibilidade aumenta. Além disso, dependendo do valor escolhido para este parâmetro o valor esperado do projeto pode ser negativo.

6 PESQUISA-PROJETO

6.1 Descrição do Projeto

O crescente uso e evolução da automação traz como possibilidade a utilização da tecnologia *Smart Grid* nas residências e redes de distribuição. Esta tecnologia veio com o intuito de solucionar a maior parte dos atuais problemas relativos à ineficiência da rede de distribuição elétrica e modernizar a mesma.

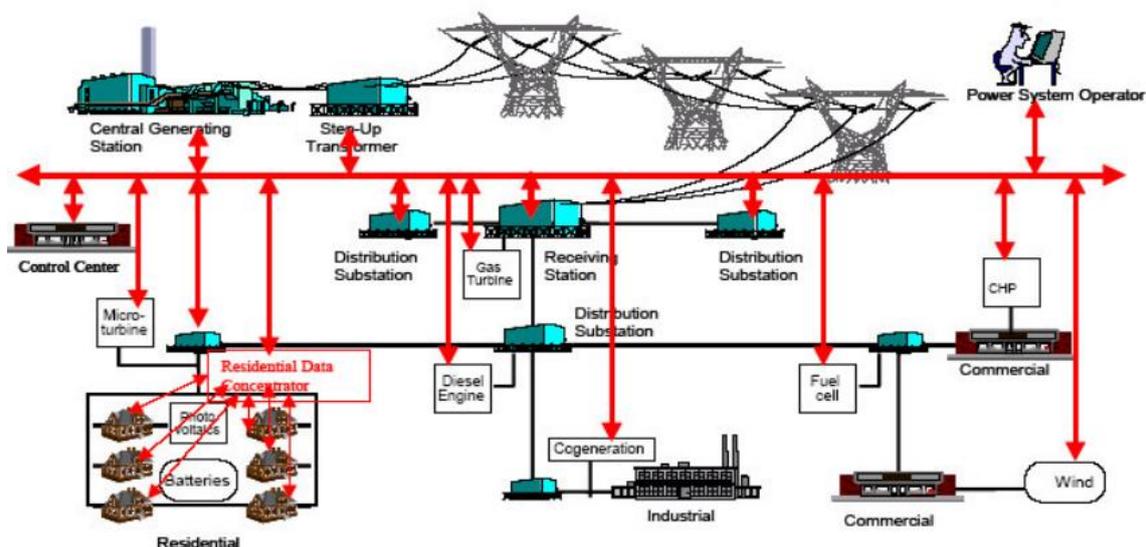
O *Smart Grid* é uma rede elétrica que usa eficientemente a energia considerando o comportamento e ações dos usuários conectados a ela, isto inclui geradores, consumidores, entre outros. Desta forma, garante-se um sistema de potência sustentável e economicamente eficaz com poucas perdas e alto nível de segurança.

A implantação do *Smart Grid* exige a atualização dos medidores analógicos para digitais, instalação de sensores para monitoramento em tempo real do sistema e concentradores pela rede englobando a geração, transmissão e consumo de energia elétrica. No entanto, o *Smart Grid* não é capaz de transmitir as informações sozinho, portanto, necessita de tecnologias de transmissão de dados atuando conjuntamente. Uma das tecnologias que poderá ser utilizada é a tecnologia de *Power Line Communications* (PLC) ou Comunicação pela Rede de Energia.

Existem duas aplicações de PLC, a interior (*indoor*) e a exterior (*outdoor*). Na primeira aplicação, a transmissão de dados, em poucos kilobit por segundo (kbps), é realizada através da instalação elétrica do cliente, seja ele residencial (casa, apartamento, escola), comercial, ou industrial, podendo, em tese, chegar a todas as tomadas, permitindo acesso a serviços como: internet em alta velocidade, automação residencial, recepção de canais interativos de televisão, e proporcionando a inclusão digital nas escolas. Na segunda aplicação, a transmissão de dados é realizada em megabit por segundo (Mbps), por meio da rede de média e baixa tensão da concessionária de energia elétrica para a supervisão e o controle da rede elétrica dentro do conceito de redes inteligentes.

Essas duas tecnologias (*Smart Grid* e PLC) são complementares e projetos de modem PLC para aplicações em telecomunicações e *Smart Grid* no Brasil ainda estão sendo desenvolvidos. Neste contexto, o HBDO (nome fictício) é um projeto que está sendo desenvolvido pela Smarti9, *spin-off*¹⁶ incubada no Centro Regional de Inovação e Transferência de Tecnologia (CRITT)¹⁷ da UFJF, que visa desenvolver um sistema de comunicação híbrido, cooperativo e saudável¹⁸ e de banda larga para constituir uma rede PLC, a qual utiliza uma infraestrutura já instalada (ver Figura 6-1). A realização do projeto é feita em sua maioria por professores e alunos de graduação, mestrado, doutorado e pós-doutorado da UFJF, nas próprias dependências da instituição.

Figura 6-1 - Exemplo de rede de comunicação PLC



Fonte: ANEEL (2007)

Do ponto de vista econômico, a tecnologia PLC apresenta uma grande vantagem com relação a outras tecnologias para a transmissão de dados, uma vez que já existe infraestrutura básica para a comunicação. Já do ponto de vista social, a tecnologia pode representar a democratização dos meios de transmissão de informação.

¹⁶ Significa uma nova empresa que nasceu de um grupo de pesquisa de uma universidade, com o objetivo de explorar um novo produto ou serviço de alta tecnologia.

¹⁷ O CRITT, criado em maio de 1995, é o Núcleo de Inovação Tecnológica (NIT) da UFJF, vinculado à Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico (SEDETEC). A atuação do CRITT envolve a prospecção de projetos da UFJF para empreendedores e empresas que buscam assessoria para o desenvolvimento de novos produtos ou aperfeiçoamento de processos de produção em diferentes áreas.

¹⁸ É um sistema que utiliza mais de um meio de comunicação para troca de informações entre os dispositivos, os quais podem se tornar repetidores e alcançarem um nó/usuário distante. É saudável no sentido de ter um baixo risco de radiação eletromagnética.

Não serão apresentados mais informações a respeito do projeto, uma vez que ele é confidencial.

6.2 O projeto de P&D

Nesta sessão será utilizado o modelo de Silva e Santiago (2009) com algumas adaptações para avaliar o projeto HBDO de desenvolvimento de produto. De forma a adequar o modelo ao projeto em estudo, algumas alterações, como a inserção de um valor mínimo de vendas à equação de volume, foram feitas. Também algumas análises de sensibilidade foram acrescentadas e/ou aprofundadas. O objetivo é avaliar a tecnologia sob o ponto de vista financeiro.

O desenvolvimento tecnológico foi modelado em macro etapas. Mais especificamente, de acordo com entrevistas com os gestores do projeto e com base nas bibliografias existentes, o processo de comercialização de tecnologia foi classificado em quatro etapas, a saber:

- I. **Processo Administrativo:** essa fase compreende todo o processo burocrático junto à universidade;
- II. **Testes com Protótipo:** essa etapa consiste nos primeiros testes a serem realizados para aprimorar o produto e analisar o que vai ser produzido;
- III. **Testes do Produto:** essa fase consiste na conversão da tecnologia em um produto comercializável. Ainda nessa etapa, serão levantadas informações e opiniões sobre o novo produto.
- IV. **Lançamento no Mercado:** O produto será colocado no mercado com todas as adaptações/aperfeiçoamentos que foram indicados nas fases anteriores. Nesse estágio, a tecnologia começa a gerar um fluxo de caixa positivo.

Assume-se que o investimento referente ao estágio de Processos é um custo perdido (*sunk cost*), já que o primeiro ponto de decisão acontece ao final dessa etapa. Também, a tecnologia proporciona retorno financeiro apenas a partir do último estágio, pois só nessa fase a tecnologia é transformada em um produto final. O retorno da fase de lançamento representa o *payoff* do projeto.

Os parâmetros de controle de cada uma dessas etapas estão descritos na Tabela 6-1. É importante observar que o último estágio de revisão não possui a opção gerencial

(controle) de melhorar (M) a performance tecnológica nem de acelerar (AC) o desenvolvimento do projeto, apenas a de abandonar (A) ou continuar (C).

Tabela 6-1– Parâmetros da fase do projeto de desenvolvimento

Fase	Controles	Duração Prevista
Processos	C	3 meses
Protótipo	C/A/M/AC	12 meses
Produto	C/A/M/AC	12 meses
Lançamento	C/A	-

Fonte: Elaboração própria.

Com o intuito de medir o grau de incerteza tecnológica em cada etapa do projeto, o parâmetro de confiabilidade foi usado como medida da incerteza técnica. De acordo com especialistas do projeto, a confiabilidade e robustez das tecnologias de comunicação de dados variam bastante em relação a localização geográfica, condições climáticas, topologia do terreno e característica da rede de distribuição de energia elétrica. Assim, um estudo sobre a variável de confiabilidade faz-se necessário.

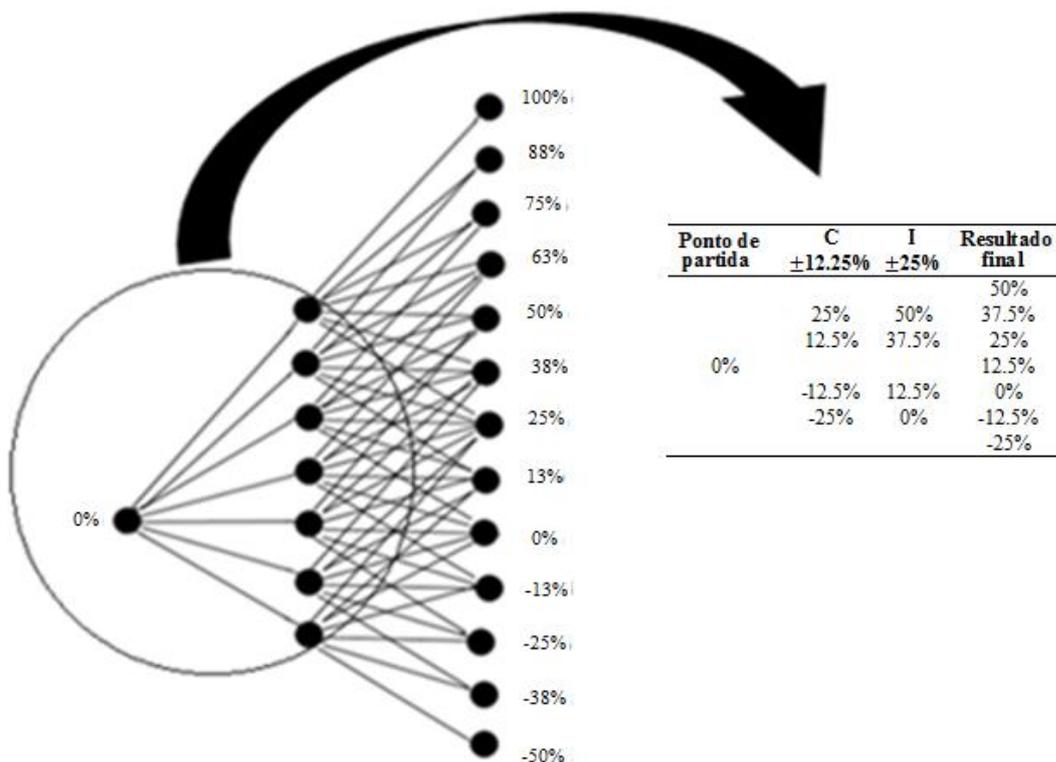
Dessa forma, de acordo com os especialistas do projeto a evolução da dimensão ligada a esta variável de controle apresenta uma oscilação para mais ou para menos a cada estágio da ordem de 12,5%, no caso da escolha da opção de continuar, além de um deslocamento de 25% adicionais, no caso da escolha da opção de melhorar. Seguindo essa lógica, a árvore de incerteza sobre o parâmetro de confiabilidade aponta para nós terminais que vão de desempenhos excepcionais, como 100%, até desempenhos decepcionantes, como -50% (Figura 6-2).

Na verdade, não existe uma noção precisa por parte de avaliadores e pesquisadores a respeito dos parâmetros que norteiam a evolução da árvore de incerteza. Parte-se do ponto inicial que representa uma expectativa factível por parte dos pesquisadores, e dependendo do nível de incerteza sobre os estágios finais possíveis, calibram-se os parâmetros que definem os incrementos das opções de continuar e melhorar.

A forma com que o mercado percebe o resultado do projeto é dado pela performance final do produto dado o parâmetro de confiabilidade. A partir da análise gráfica acima, sobre os níveis finais de incerteza técnica, foi considerado que a

exigência do mercado é normalmente distribuída com média 0,13 e desvio padrão 0,4, aproximadamente, da unidade de medida utilizada¹⁹.

Figura 6-2- Árvore de incerteza técnica



Fonte: Elaboração própria.

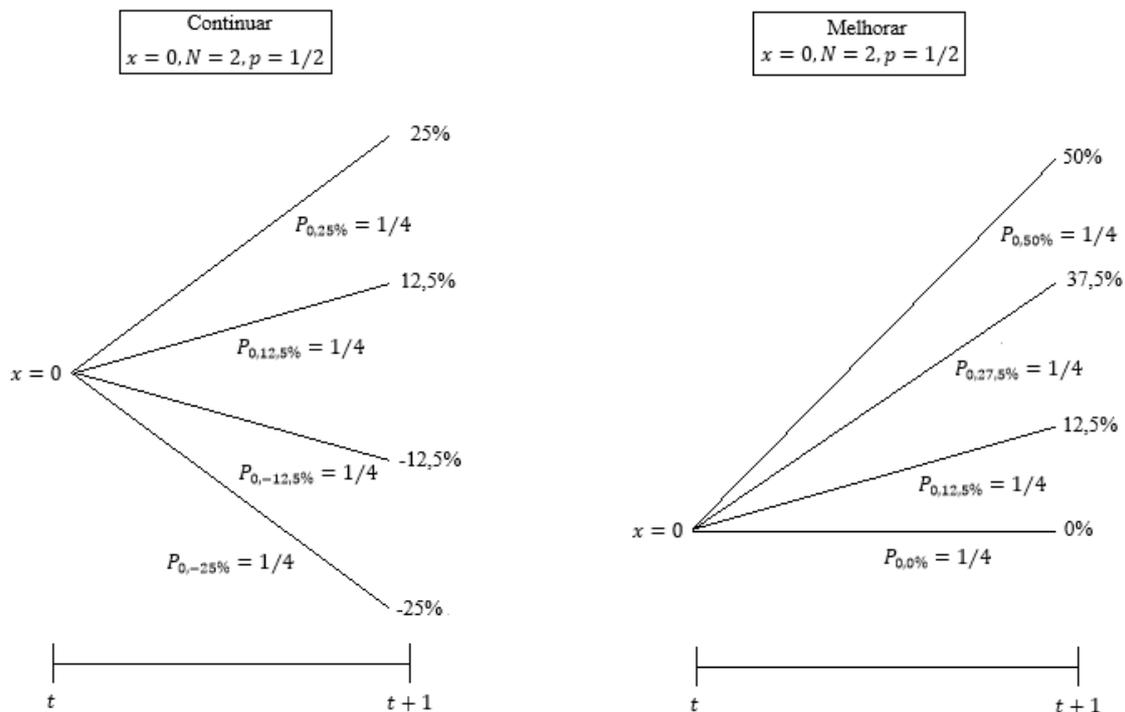
Outro parâmetro que afeta o cálculo final de valor associado a cada um dos nós da árvore é a probabilidade de sucesso, algo que também não deixa de ser guiado por uma forte componente intuitiva. Trata-se de um espaço mais de incerteza do que de risco, pois não se conhece perfeitamente o espaço probabilístico de eventos finais ligados a essa pesquisa. Com base nas descrições feitas pelos pesquisadores sobre a incerteza associada à pesquisa, este parâmetro foi estabelecido subjetivamente em 50%.

O desempenho do produto, em cada período, obedece a uma distribuição independente daquelas dos períodos anteriores, de forma que, devido as contingências enfrentadas pelo projeto, o desempenho pode melhorar com uma probabilidade p , e piorar, com uma probabilidade $(1 - p)$. A Figura 6-3 mostra um exemplo das

¹⁹ Esses valores foram definidos de acordo com a expectativa dos pesquisadores. No entanto, vale falar que um teste de sensibilidade foi feito de forma a analisar o impacto de um aumento no parâmetro do desvio padrão da variável exigência de mercado, σ , no valor do projeto. Conclui-se que tanto o valor do projeto quanto o valor da flexibilidade diminuiram com a elevação de σ , o que, no caso do projeto em estudo, está coerente com o resultado de Huchzermeier e Loch (2001) para esse parâmetro.

probabilidades de transição (p/N , se sucesso, ou $(1 - p)/N$, em caso de deterioração do produto) de um período para o outro, com $N = 2$. Uma explicação mais detalhada, assim como uma análise de sensibilidade das probabilidades de transição, será feita nas próximas seções.

Figura 6-3 – Probabilidades de transição – exemplo



Fonte: Adaptado de Crespo (2009).

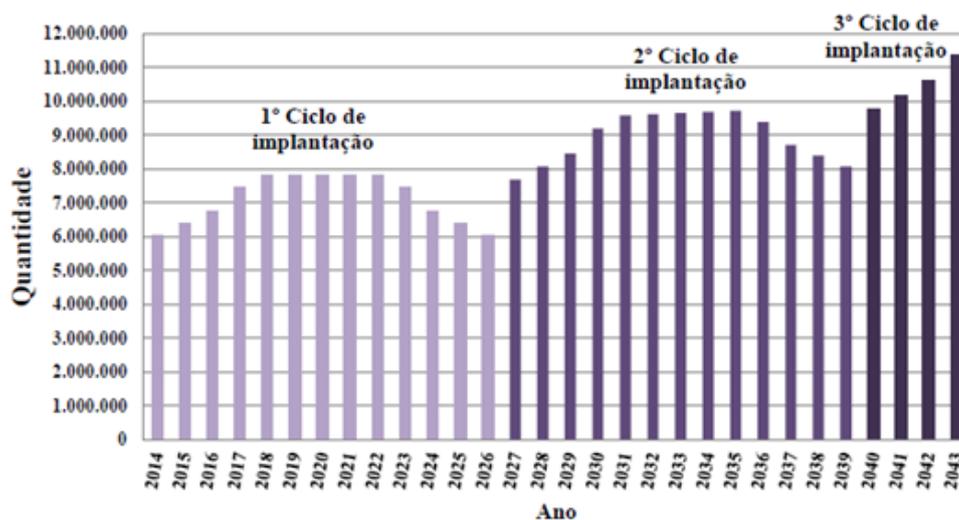
De acordo com o modelo de Silva e Santiago (2009), a percepção do projeto pelo mercado não se altera ao longo do tempo, uma vez que os valores finais da performance ficam fixos. Todavia, apesar desse raciocínio facilitar os cálculos da função *payoff*, $\Pi(\cdot)$, os parâmetros da função são sensíveis ao mercado e a desconsideração desse fato no modelo pode comprometer os resultados. Assim, a fim de verificar o grau de comprometimento, o presente trabalho fez algumas análises de sensibilidade que serão apresentadas mais adiante.

Antes de calcular a função retorno, entretanto, é preciso determinar uma curva para o volume provável de vendas do produto gerado pelo projeto HBDO ao longo do tempo de vida no mercado. A partir do estudo dessa curva será possível determinar os valores dos parâmetros de forma e escala presentes na função *payoff*. Contudo, conforme visto anteriormente, as tecnologias de PLC e *Smart Grid* (ou medidores

inteligentes) são complementares e, por isso, uma análise do ciclo dos medidores deve ser feita em paralelo ao desenvolvimento do projeto.

De acordo com Lamin (2013), o processo de instalação de medidores inteligente no Brasil é passível de ocorrer na forma de três ciclos consecutivos (ver Figura 6-4).

Figura 6-4 - Quantidade de medidores instalados por ano no grau avançado



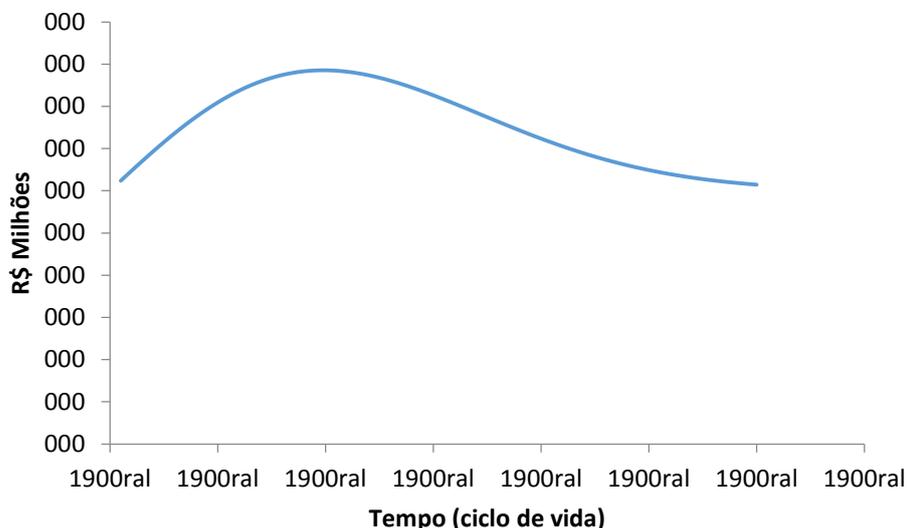
Fonte: Lamin (2013)

Note que o primeiro ciclo de instalação de medidores inteligentes no Brasil tem início em 2014 e previsão de terminar por volta de 2026. Os pesquisadores do HBDO estimam que, por volta de 2016, o produto desenvolvido será lançado no mercado e tem um tempo de vida esperado de 5 anos. Assim, o HBDO pegaria o início do primeiro ciclo de instalação dos medidores e teria “fim” ainda no final do primeiro ciclo. Essa análise é importante, pois a tecnologia desenvolvida depende do número de medidores inteligentes instalados até o momento de inserção no mercado e, também, a partir dessa análise é possível definir que o pico da demanda de vendas do produto do HBDO ocorrerá próximo ao 20º mês, como mostra a Figura 6-5.

O produto inicia o processo de vendas com um volume mínimo positivo, uma vez que uma parcela do mercado já foi estabelecida, via contrato, com alguma concessionária de energia. Também, os especialistas esperam que a concorrência se inicie a partir do segundo ano que o produto tenha sido lançado, mas como uma parcela de mercado já estará garantida, então o fim do processo é suave. Dessa forma, para a construção do gráfico acima, foi preciso adotar os parâmetros de escala e de forma como sendo $\alpha = 28$ e $k = 2$, respectivamente. Estes parâmetros foram estabelecidos

após alguns testes de sensibilidade dos mesmos. A análise de sensibilidade desses parâmetros será apresentada nas próximas sessões.

Figura 6-5 – Volume de vendas



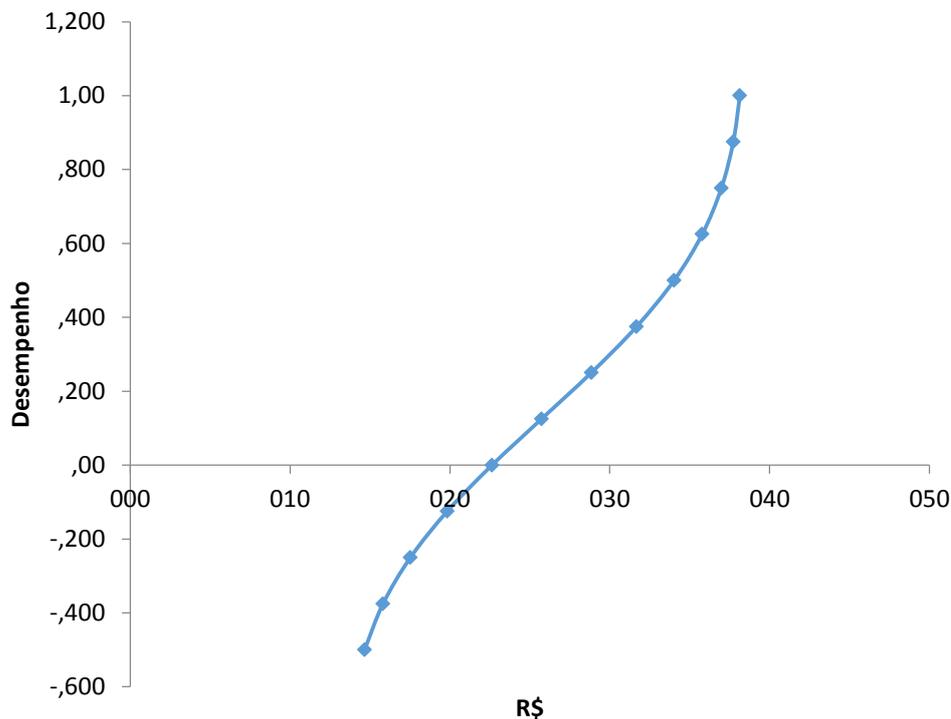
Fonte: Elaboração própria.

Observe ainda que, para que a curva de volume de vendas atendesse as expectativas dos especialistas e para que tivesse o formato acima, foi preciso adaptar a função de volume de vendas de Silva e Santiago (2009), somando-se um valor mínimo de vendas à função. A função de volume de vendas utilizada neste trabalho foi $V(t) = \left[(V(k/a)) \cdot (t/a)^{k-1} \cdot e^{-((t/a)^k)} \right] + v$, onde a constante V representa o maior volume de vendas que o mercado absorverá durante o ciclo de vida do produto (t) e v representa o menor volume de vendas durante o mesmo período.

Uma análise do fluxo de caixa ao longo dos cinco anos de duração do projeto permitiu que se definisse um valor máximo e mínimo pago pelo mercado de aproximadamente R\$ 77,35 milhões e R\$ 13,2 milhões, respectivamente. Esses valores foram definidos de acordo com a previsão do fluxo de caixa da análise tradicional, disponibilizada pelos gestores do projeto, não sofrendo, portanto, nenhuma variação no modelo. Todas estas informações determinaram a função *payoff*²⁰, apresentada na Figura 6-6.

²⁰ $\Pi(x_N, \tau_N) = \left[(M - m) \cdot \exp\left(-\left(\frac{\tau_N}{a}\right)^k\right) \cdot P(x_N \geq R) \right] + m.$

Figura 6-6 – Função *Payoff* – Tempo Determinístico

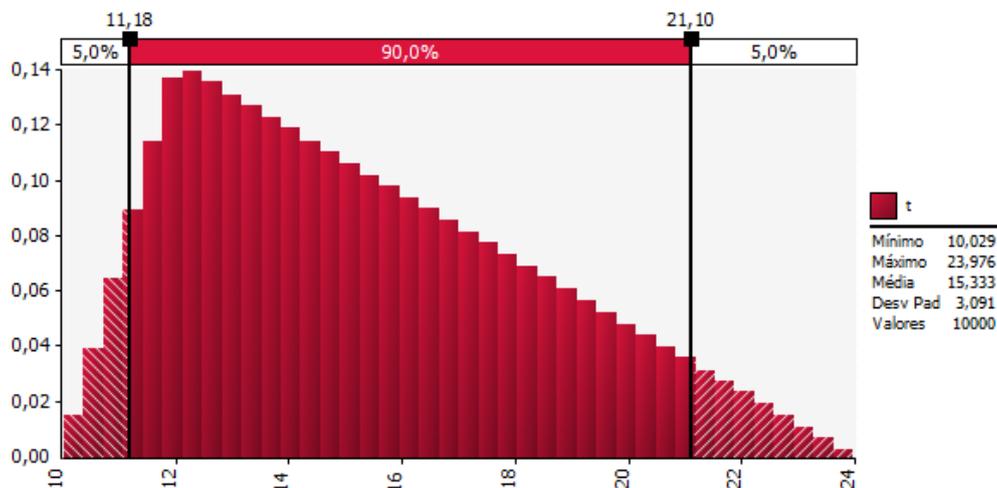


Fonte: Elaboração própria.

O gráfico da função *payoff* foi definido com tempo previsto do projeto de 27 meses; entretanto, o tempo de desenvolvimento não será tratado unicamente de forma determinística, como é feito usualmente em modelos de avaliação, mas admitindo-se a possibilidade de atrasos e antecipações. Com base nas informações levantadas junto à empresa, o planejamento do projeto prevê que ele aconteça em 2 anos e 3 meses, com uma subdivisão em um estágio de 3 meses e 2 estágios de 1 ano cada.

Como o desenvolvimento pode acontecer com um ano em cada estágio, existe a possibilidade de se promover uma antecipação, da mesma forma como podem ocorrer atrasos em relação ao tempo esperado. Assim, a incerteza do tempo de duração das fases de Protótipo e Produto foi modelada na forma de uma distribuição de probabilidades triangular com valor mínimo igual a 10, máximo igual a 24 e modal igual a 12 meses, sendo a duração dos estágios independentes entre si, como mostra a Figura 6-7. Note que a opção de acelerar possibilita que o projeto adiante um mês, fazendo com que o tempo mínimo em cada fase possa ser de 9 meses.

Figura 6-7 - Distribuição do tempo



Fonte: Saída do *software* @RISK 6.

Assim como em Crespo (2009), a distribuição de probabilidade para cada fase foi considerada como sendo da forma triangular. A diferença é que uma das características do projeto HBDO é que o tempo modal é próximo ao tempo mínimo e abaixo da média. Ou seja, no caso do HBDO, os especialistas acreditam que a possibilidade de o projeto acelerar é maior que de sofrer atrasos.

Também é importante esclarecer que os estágios Processos e Lançamento possuem tempos determinísticos de 3 meses e 60 meses, respectivamente. Os estágios de Protótipo e Produto são os únicos com tempo estocástico e seguindo a variação de mínimo, moda e máximo acima. Dessa forma, em termos de tempos finais, considerando as duas distribuições e o tempo de implementação das três primeiras fases em conjunto, tem-se $T_p^{min} = 3 + 9 + 9 = 21$ meses, $T_p^{max} = 3 + 24 + 24 = 51$ meses e $T_p^{moda} = 3 + 12 + 12 = 27$ meses. O tempo mínimo possível do projeto considera a possibilidade de acelerar nos estágios de Protótipo e Produto. Já o tempo máximo possível, considera que essas etapas poderão sofrer atrasos.

O percentual de custo fixo e variável ao longo do desenvolvimento do projeto foi dividido de forma a representar a realidade com base nas características específicas de cada etapa (Tabela 6-2). Observe que o custo foi dividido entre determinístico e estocástico em relação ao tempo, ou seja, a variável custo estocástico está relacionada à quantidade de bolsas possíveis de serem remanejadas (estagiários contratados ou

desligados do projeto) no tempo, enquanto custo fixo representa a quantidade de estagiários (bolsas) fixos no projeto.

Tabela 6-2 – Duração, custos fixos e variáveis de cada etapa

Etapas	Distribuição Tempo	Tratamento do Tempo/ Tipo de Custo	Opções (valores em R\$)		
			Continuar	Melhorar	Acelerar
Processos	-	Determinístico	R\$ 5.000,00	-	-
		Determinístico	R\$ 750.000,00	R\$ 40.000,00	-
Protótipo	T(10;12;24)	Estocástico			
		<i>Fixo</i>	R\$ 400.000,00	R\$ 40.000,00	R\$ 0,00
		<i>Variável (por mês)</i>	R\$ 29.166,67	R\$ 0,00	R\$ 2.000,00
		Determinístico	R\$ 1.250.000,00	R\$ 40.000,00	-
Produto	T(10;12;24)	Estocástico			
		<i>Fixo</i>	R\$ 700.000,00	R\$ 40.000,00	R\$ 0,00
		<i>Variável (por mês)</i>	R\$ 45.833,33	R\$ 0,00	R\$ 3.000,00
Lançamento	-	Determinístico	R\$ 1.500.000,00	-	-
		Determinístico	R\$ 2.005.000,00	R\$ 80.000,00	-
TOTAL	-	Estocástico			
		<i>Fixo</i>	R\$ 1.105.000,00	R\$ 80.000,00	R\$ 0,00
		<i>Variável (por mês)</i>	R\$ 37.500,00	R\$ 0,00	R\$ 5.000,00

Fonte: Elaboração própria.

Em geral, os custos fixos de desenvolvimento no modelo determinístico correspondem aos custos fixos no modelo estocástico, somados com os custos variáveis na duração modal. A componente variável dos custos no modelo estocástico está diretamente ligada à variação do tempo de duração previsto para cada estágio.

No caso da opção de acelerar, onde se considera que haverá um deslocamento de um mês na distribuição do tempo do estágio, os custos estão relacionados à contratação de novos bolsistas. Portanto, os custos dessa opção são somente variáveis.

Os custos da opção de melhorar estão relacionados com o objetivo de alcançar melhores níveis de performance do produto. No caso do projeto HBDO, estes custos se referem ao aumento das características (tecnologia) do escopo²¹.

Já os custos de abandono ao longo das etapas foram considerados nulos, uma vez que não existe multas associadas ao abandono do projeto por parte da empresa. A

²¹ O aumento do escopo é introduzido por tecnólogos que adicionam características não originalmente contempladas.

contrapartida da *spin-off* em estudo são relatórios que devem ser feitos justificando a falha do projeto.

Com essa forma de distribuição dos custos, não fica muito claro quanto custará o projeto, dadas as incertezas e as opções disponíveis para lidar com elas ao longo do tempo. Contudo, a melhor referência para os custos totais do projeto são os valores considerados para o tratamento de tempo determinístico, que informam que o projeto custará entre R\$ 2,01 milhões e R\$ 2,10 milhões, a depender das opções escolhidas (continuar como está ou melhorar).

Fazendo a mesma consideração sobre o tratamento estocástico do tempo, esses limites seriam entre R\$ 1,83 milhões (opção de acelerar nos estágios de Protótipo e Produto) e R\$ 2,98 milhões (opção de melhorar, com atraso máximo de 24 meses nos estágios de Protótipo e Produto).

6.3 Resultados da avaliação

O modelo adotado na análise do projeto HBDO enxerga duas distribuições (estágios de Protótipo e Produto) de probabilidade triangulares com os seguintes parâmetros: mínimo 10, moda 12 e máximo 24, ou simbolicamente, $T[10;12;24]$ cada uma. Caso a opção de acelerar seja exercida, existe a possibilidade de adiantar as fases de Protótipo e Produto em um mês, fazendo com que o mínimo de duração de cada fase seja de 9 meses. As etapas Processos e Lançamento possuem tempo determinísticos.

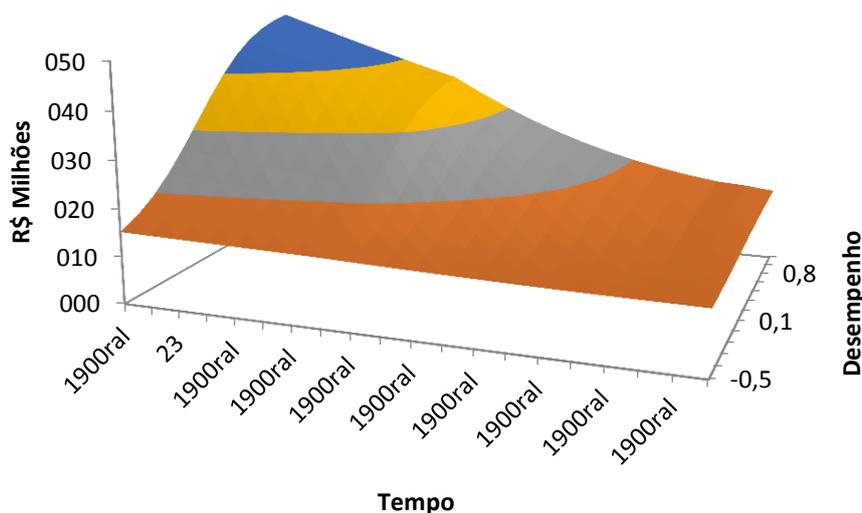
Os custos das fases de Protótipo e Produto são diretamente relacionados a duração dessas fases e estão divididos entre custos fixos e custos estocásticos, sendo estes últimos correspondentes à quantidade de bolsas que podem ser concedidas ou cortadas em caso de aceleração ou atraso do projeto. Os custos das fases Processos e Lançamento são fixos e não sofrem alterações.

Adotou-se uma probabilidade subjetiva de 50% de sucesso. Note que, como o projeto apresenta duas possibilidades de transição de estados (Protótipo e Produto), a probabilidade de transição será de 25%. De acordo com Huchermeier e Loch (2001), a probabilidade de transição no caso de se ter um avanço positivo na variável desempenho é calculada por p/N , caso contrário, $(1 - p)/N$. Mais detalhes serão apresentados na sessão 5.4.1. A taxa de juros foi adotada arbitrariamente em 7% a.a..

Com relação aos dados da função *payoff*, utilizou-se M de R\$ 77,35 milhões, m de R\$ 13,2 milhões, $k = 2$, $a = 28$, média de 0,13 e desvio padrão de 0,4, na unidade

de medida utilizada pelos pesquisadores do projeto. Dessa forma, a função *payoff* com tempo variando de acordo com a descrição acima, e com os níveis de desempenho (performance) tecnológico variando de resultados positivos de 100% a resultados negativos de -50%, pode ser representado como mostra a Figura 6-8.

Figura 6-8 - Função *Payoff* – Tempo Estocástico projeto



Fonte: Elaboração própria.

Note que, conforme o tempo de conclusão do projeto diminui e os níveis de performance aumentam, o retorno do projeto aumenta. Caso contrário, se o tempo aumenta e os níveis de performance diminuem, o retorno do projeto diminui.

A partir dos dados acima, o valor esperado do projeto de P&D foi calculado por meio de uma planilha de Excel/@Risk. A planilha foi estruturada de forma a simular²² os valores da variável tempo necessários para a realização independente das fases de Protótipo e Produto do projeto.

Os resultados obtidos foram calculados utilizando-se o procedimento “*backwards*” da programação dinâmica para cada caminho aleatório, considerando-se que em todo momento o gestor do projeto poderia escolher uma das opções disponíveis. O valor estimado do gerenciamento ativo do projeto (VPLA), considerando a incerteza de tempo, foi de R\$ 18,71 milhões utilizando no primeiro estágio de revisão a opção de melhorar. O VPL (valor do projeto sem flexibilidade, gerenciamento passivo) foi de R\$

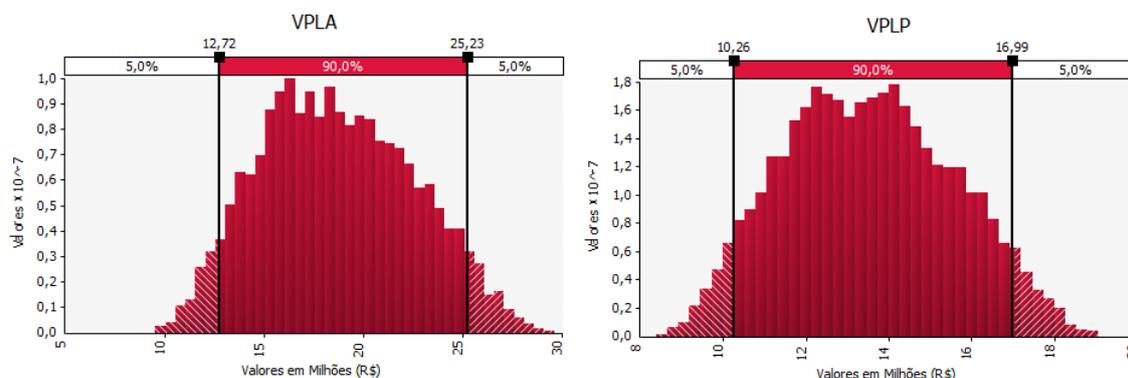
²² As simulações foram feitas utilizando a distribuição triangular, considerando que a soma de tempo de todas as fases do projeto de P&D não poderia ultrapassar 4 anos e 3 meses.

13,52 milhões, obtendo, dessa forma, um valor estimado de R\$ 5,19 milhões para a flexibilidade gerencial (VPLA-VPL).

Este resultado foi alcançado através de uma simulação onde foram gerados 10.000 números aleatórios para a duração de cada fase a cada interação, totalizando 100 milhões de caminhos aleatórios. Neste caso, uma representação gráfica do projeto como um todo perde o sentido, devido a diversidade de nós possíveis a cada estágio, no duplo domínio desempenho *versus* tempo.

Observe na Figura 6-9 que as distribuições dos VPLs foram significativamente positivas para o projeto em estudo. Isso pode ser justificado pelo fato dos retornos do projeto serem muito elevados e os custos, em contra partida, serem relativamente muito baixos. Note ainda que, apesar da análise tradicional ter apresentado um VPL expressivo positivo, ao longo do desenvolvimento de um projeto de pesquisa, os preços podem mudar, as exigências do mercado e os custos do projeto podem variar e dificuldades técnicas podem surgir, podendo até inviabilizar o projeto. Dessa forma, é interessante fazer uma análise das múltiplas fontes de incertezas que um projeto de P&D pode enfrentar. No caso do presente trabalho, o projeto se mostrou mais promissor diante do tratamento múltiplo da incerteza.

Figura 6-9 – Distribuição de VPLs



Fonte: Saída do *software @RISK 6*.

É interessante ressaltar que, sem considerar a incerteza do tempo de desenvolvimento, o valor do projeto seria de R\$ 25,32 milhões, 35% maior do que o valor encontrado (R\$ 18,71 milhões). Este fato mostra que uma decisão tomada desconsiderando incerteza no tempo de desenvolvimento superestima, neste caso, o valor do projeto e poderia implicar em uma decisão sub-ótima. Este resultado,

entretanto, serve apenas para demonstrar a existência de uma alteração devido ao impacto da incerteza temporal.

6.3.1 Análise de sensibilidade: probabilidade

A variável desempenho (performance - i) representa uma característica que distingue o produto dos demais concorrentes (diferencial do produto). Do período t para o próximo período, a performance do produto pode melhorar com probabilidade p , ou pode deteriorar com probabilidade $(1 - p)$, devido eventos adversos inesperados.

Ou, sob outro ponto de vista, o modelo trabalhado nesta dissertação, considera que a cada transição a variável de performance possui N possibilidades de transição de estados, cada um com probabilidade p/N , onde p representa a probabilidade em se ter um avanço positivo na variável desempenho. Dessa forma, com alguma adaptação no modelo de Huchzermeier e Loch (2001), a transição do estado de desenvolvimento de i para o estado de desenvolvimento j segue a probabilidade de transição:

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{p}{N}, & \text{se } j \in \left\{ i + \frac{1}{8}, \dots, i + \frac{N}{8} \right\}, \\ \frac{1-p}{N}, & \text{se } j \in \left\{ i - \frac{1}{8}, \dots, i - \frac{N}{8} \right\}, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Note que essa aproximação leva a um modelo de árvore recombinante, o que reduz o número de nós em cada período e, portanto, a complexidade computacional. Observe ainda que a equação acima representa o caso em que a opção escolhida é continuar o projeto. A opção de melhora resulta num deslocamento da probabilidade de transição, qual seja:

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{p}{N}, & \text{se } j \in \left\{ i + \frac{1}{4} + \frac{1}{8}, \dots, i + \frac{1}{4} + \frac{N}{8} \right\}, \\ \frac{1-p}{N}, & \text{se } j \in \left\{ i + \frac{1}{4} - \frac{1}{8}, \dots, i + \frac{1}{4} - \frac{N}{8} \right\}, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

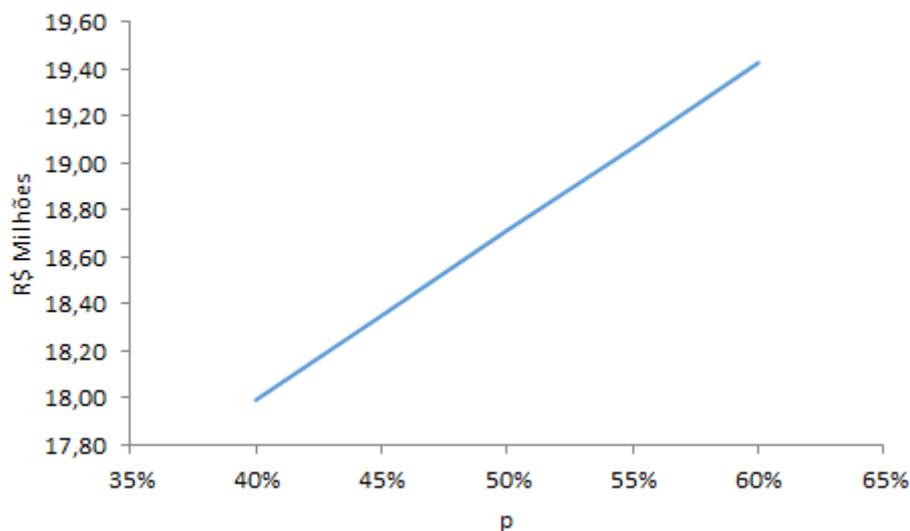
O avanço de $N/8$, assim como o incremento de $1/4$, na variável acima é baseado na opinião dos especialistas do projeto HBDO. Também, caso p assumia valor acima de

50%, tem-se uma chance maior de se obter um avanço positivo na variável desempenho, sendo essa probabilidade distribuída igualmente entre as N possibilidades.

De acordo com Huchzeremeier e Loch (2001), se $p = 0,5$, N caracteriza a variabilidade da performance do produto, e o valor esperado do estado de performance para o lançamento do produto será $E_i = 0$ no tempo zero. Se $p > 0,5$, a performance esperada no lançamento será $E_i > 0$. Já se $p < 0,5$, a performance esperada no lançamento será $E_i < 0$.

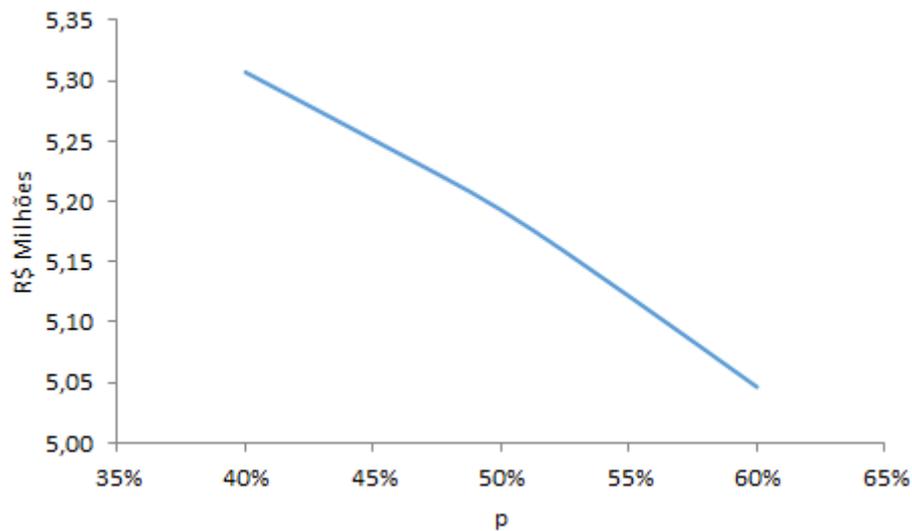
Dessa forma, percebe-se que a escolha da probabilidade influencia os resultados esperados e, por isso, esta sessão se dedica a estudar os seus efeitos no valor do projeto, bem como no valor da flexibilidade. A Figura 6-10 mostra variação do VPLA do projeto conforme a probabilidade, p , é sensibilizada. Observe que o valor do projeto aumenta com a visão otimista dos pesquisadores sobre o projeto, quase linearmente.

Figura 6-10 – Valor Esperado do Projeto x Probabilidade



Fonte: Elaboração própria

Já com respeito a flexibilidade o caso contrário ocorre (Figura 6-11). Neste caso o valor flexibilidade diminui, conforme p aumenta. Isto ocorre pois quanto maior a probabilidade de sucesso maior a chance de um projeto gerar retornos positivos e por isso, uma opção (abandonar, por exemplo), deixa de ser valiosa.

Figura 6-11 - Flexibilidade x Probabilidade

Fonte: Elaboração própria.

6.3.2 Análise de sensibilidade: parâmetros de forma e escala

A determinação dos parâmetros de forma e escala foram muito importantes para a estimação do valor esperado do projeto HBDO, afetando diretamente no retorno do projeto. Portanto, esta sessão investigará a sensibilidade dos resultados do projeto de P&D em relação a variação das constantes a e k .

À medida que o valor de a aumenta a janela de oportunidade se distancia do intervalo de duração do projeto, o que faz com que o retorno do HBDO aumente. Isto implica diretamente em um aumento no valor do projeto (Tabela 6-3). Note que, apesar da alteração no valor do projeto, a decisão ótima permaneceu a mesma (Melhorar - M).

À medida que o valor de k aumenta, o decaimento da função de retorno se torna mais brusco, porém mais distante do intervalo de duração do projeto. Este fenômeno faz com que o retorno do HBDO seja maior à medida que k aumenta. Isto implica numa variação positiva do valor do projeto com o aumento do parâmetro de forma (Tabela 6-4).

Tabela 6-3 - Resultados dos cenários de aumento do parâmetro de escala*

Cenário	Resultado	Incerteza		
		Desvio Moda	Desvio Moda	
			min.	máx.
0%	15%	100%		
<i>a26k2</i>	Valor	R\$ 23.022.901,03	R\$ 16.619.471,36	
	Ação	M	M	
<i>a27k2</i>	Valor	R\$ 24.176.121,21	R\$ 17.594.922,04	
	Ação	M	M	
<i>a28k2</i>	Valor	R\$ 25.324.852,65	R\$ 18.713.565,80	
	Ação	M	M	
<i>a29k2</i>	Valor	R\$ 26.437.583,98	R\$ 19.583.753,14	
	Ação	M	M	
<i>a30k2</i>	Valor	R\$ 27.502.835,14	R\$ 20.561.148,09	
	Ação	M	M	

Fonte: Elaboração própria.

*A coluna “Desvio Moda” indica o percentual de desvio em torno da moda de 12 meses. Isso ocorre devido a diferença entre a moda de 12, o mínimo de 10 e máximo de 24.

Tabela 6-4 - Resultados dos cenários de aumento do parâmetro de forma*

Cenário	Resultado	Incerteza		
		Desvio Moda	Desvio Moda	
			min.	máx.
0%	15%	100%		
<i>a28k0</i>	Valor	R\$ 24.165.954,52	R\$ 23.921.149,41	
	Ação	M	M	
<i>a28k1</i>	Valor	R\$ 24.745.778,74	R\$ 21.087.693,93	
	Ação	M	M	
<i>a28k2</i>	Valor	R\$ 25.324.852,65	R\$ 18.713.565,80	
	Ação	M	M	
<i>a28k3</i>	Valor	R\$ 26.138.183,67	R\$ 16.898.345,72	
	Ação	M	M	
<i>a28k4</i>	Valor	R\$ 27.128.458,05	R\$ 15.808.408,01	
	Ação	M	M	

Fonte: Elaboração própria.

*A coluna “Desvio Moda” indica o percentual de desvio em torno da moda de 12 meses. Isso ocorre devido a diferença entre a moda de 12, o mínimo de 10 e máximo de 24.

6.3.3 Análise de sensibilidade: aumento da incerteza do tempo

Assim como em Silva (2009) e Crespo (2009), esta seção avalia o impacto da incerteza do tempo no valor do projeto. Será detalhado o comportamento do valor do projeto e do valor da flexibilidade gerencial com o aumento do parâmetro de duração do projeto.

O projeto de desenvolvimento é modelado, neste trabalho, como um caminho de macrofases cujas durações são variáveis aleatórias independentes umas das outras e também dos estados do projeto. A duração de uma fase k qualquer, é uma variável aleatória contínua no intervalo $[t_k^{min}; t_k^{moda}; t_k^{max}]$. O tempo médio de duração da fase é \bar{t}_k e a variância é σ_k^2 . A incerteza do tempo de desenvolvimento é definida como o desvio padrão²³ da duração total do projeto (σ_P), onde $\sigma_P = \sqrt{\sigma_P^2} = \sqrt{(\sum_k \sigma_k^2)}$, uma vez que as durações das etapas são independentes.

É importante ressaltar que, condicionado ao lançamento, isto é, considerando que todas as etapas do projeto serão realizadas, a duração total do projeto (T_P) é uma variável aleatória contínua distribuída no intervalo $[T_P^{min}; T_P^{moda}; T_P^{max}]$, com $T_P^{min} = \sum_k t_k^{min}$, $T_P^{moda} = \sum_k t_k^{moda}$ e $T_P^{max} = \sum_k t_k^{max}$. O valor esperado desta duração é $T_P^e = \sum_k t_k^{moda}$ e a distribuição de probabilidade de T_P é específica para cada projeto e desconhecida a priori, embora possa ser, com algum esforço, determinada.

A partir disso, foram construídos 10 cenários (Tabela 6-5). A coluna “Desvio Moda” representa o percentual de desvio em torno da moda aplicado em cada um dos cenários e a coluna “ σ_P ” apresenta o desvio padrão total da duração do projeto. Para que os resultados não fossem influenciados pelas diferenças entre os custos das etapas, o aumento da variabilidade entre os cenários foi, em termos relativos, sempre o mesmo em todas as fases (SILVA, 2009). A duração de cada fase foi considerada à priori triangularmente distribuída.

Os resultados mostram que tanto o valor do projeto quanto o valor da flexibilidade são sensíveis à variabilidade da duração total do projeto. Também, apesar dos diferentes cenários, a decisão ótima permaneceu a mesma (Melhorar). De acordo com Silva (2009), isto demonstra que a ação ótima é pouco sensível à variabilidade temporal do projeto.

²³ A distribuição triangular é uma distribuição de probabilidade contínua que possui um valor mínimo a , um valor máximo b e uma moda c , de modo que a sua variância é dada por $\frac{a^2+b^2+c^2-ab-ac-bc}{18}$.

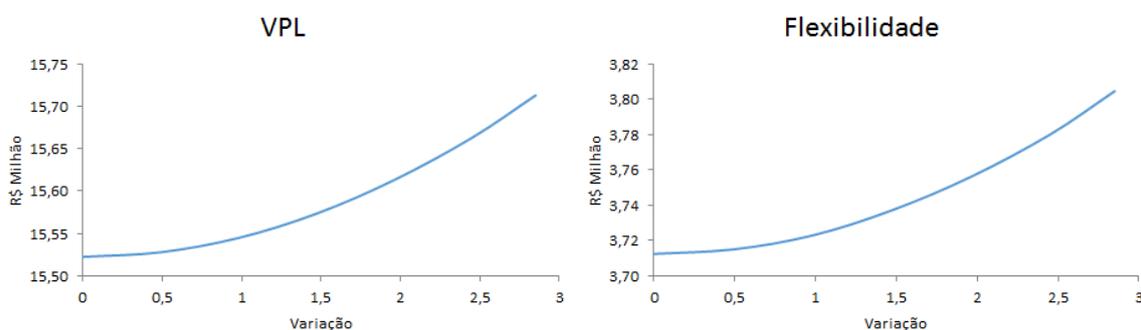
Tabela 6-5 - Resultados por cenário (distribuição triangular)*

Cenário	Meia Largura	σ_p	VPLA	Flexibilidade	Decisão Ótima
C1	0%	0,00	R\$ 15.522.309,41	R\$ 3.712.433,21	Melhorar
C2	5%	0,49	R\$ 15.527.791,98	R\$ 3.714.953,60	Melhorar
C3	10%	0,98	R\$ 15.544.708,60	R\$ 3.722.856,46	Melhorar
C4	15%	1,47	R\$ 15.573.264,52	R\$ 3.737.051,86	Melhorar
C5	20%	1,96	R\$ 15.612.959,56	R\$ 3.756.070,11	Melhorar
C6	25%	2,45	R\$ 15.662.758,46	R\$ 3.779.964,06	Melhorar
C7	29%	2,85	R\$ 15.712.763,31	R\$ 3.804.564,48	Melhorar

Fonte: Elaboração própria.

*Para construção desse quadro foi usado a média como sendo 17 meses, entretanto é importante falar que uma análise parecida foi realizada com a moda sendo 12 meses, obtendo-se resultado próximo.

À medida que o desvio padrão da variável tempo aumenta, a probabilidade de que o projeto leve mais ou menos tempo para terminar também aumenta. No caso do presente trabalho, o aumento da variância da variável tempo contribui tanto para o aumento do valor da flexibilidade quanto para uma elevação do valor do projeto (Figura 6-12).

Figura 6-12 - VPLA x Flexibilidade x Variação

Fonte: Elaboração própria.

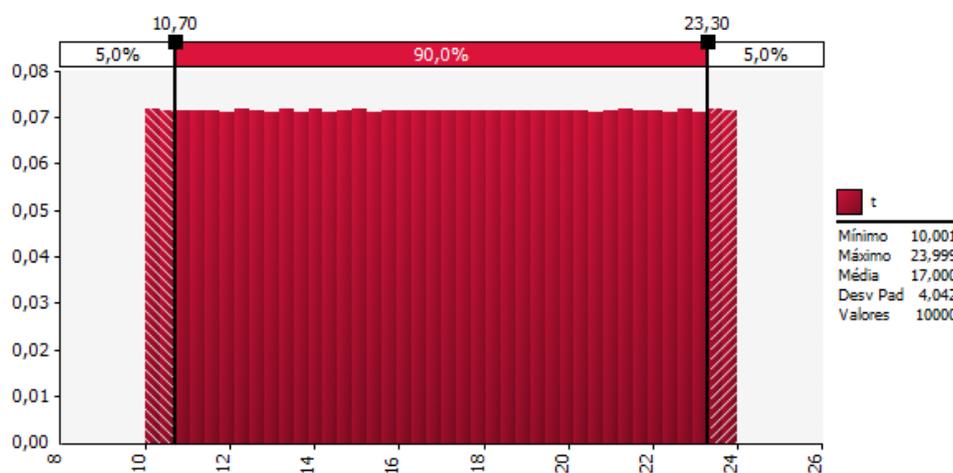
Este comportamento é melhor compreendido quando se observa o desvio em torno da média temporal da tabela acima (Tabela 6-5). Por um lado verifica-se que à medida que a variância aumenta, o limite inferior diminui, sugerindo que a fase pode ser implantada mais rapidamente e a um custo menor; por outro lado, o aumento do limite superior, que implica em mais tempo e custos maiores para a implantação da fase, pode ter suas consequências mitigadas pelo exercício da opção de abandono, por exemplo, embutidas no projeto HBDO e que pode ser exercida em qualquer uma de suas fases.

A teste de comparação, neste ponto foram feitas algumas análises adotando-se a duração de cada fase como seguindo uma distribuição uniforme. A diferença agora está

no fato de que a duração de uma fase k qualquer, é uma variável aleatória contínua no intervalo $[t_k^{min}, t_k^{max}]$. Assim, a duração total do projeto (T_p) é uma variável aleatória contínua distribuída no intervalo $[T_p^{min}, T_p^{max}]$, com $T_p^{min} = \sum_k t_k^{min}$ e $T_p^{max} = \sum_k t_k^{max}$. O valor esperado desta duração é $\bar{T}_p = \sum_k \bar{t}_k$.

A Figura 6-13 mostra a incerteza no tempo de desenvolvimento, modelado na forma de uma distribuição de probabilidades uniforme, com valor mínimo igual a 10, máximo igual a 24 e média igual a 17 meses, ou $U[10,24]$.

Figura 6-13 - Distribuição do tempo



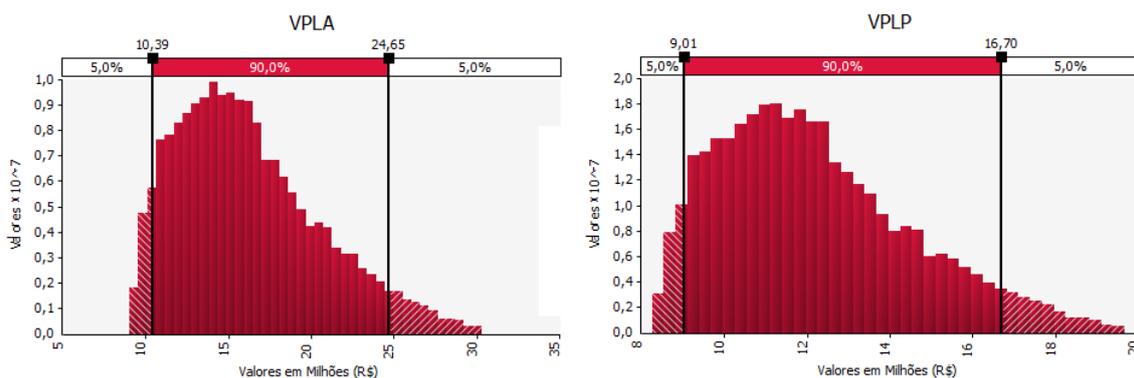
Fonte: Saída do *software* @RISK 6.

O VPLA do projeto, considerando a incerteza de tempo seguindo uma distribuição uniforme, foi de R\$ 16,25 milhões utilizando no primeiro estágio de revisão a opção de melhorar. O VPL foi de R\$ 12,18 milhões, obtendo, dessa forma, um valor estimado de R\$ 4,07 milhões para a flexibilidade gerencial (Figura 6-14). Observe que esse valor é 22% menor que o valor considerando a incerteza do tempo seguindo uma distribuição triangular. Esse resultado sugere, portanto, que a avaliação do projeto é sensível ao tipo de distribuição escolhida.

Seguindo o procedimento anterior, agora foram construídos 9 cenários (Tabela 6-6) para a variabilidade do tempo. A coluna “Meia largura” representa o percentual de desvio em torno da média aplicado em cada um dos cenários e a coluna “ σ_p ” apresenta o desvio padrão total da duração do projeto²⁴.

²⁴ A distribuição uniforme é uma distribuição de probabilidades contínua com valor mínimo a e valor máximo b , de forma que a sua variância é dada por $\frac{(b-a)^2}{12}$.

Figura 6-14 - Distribuição de VPLs



Fonte: Saída do *software* @RISK 6.

Tabela 6-6 - Resultados por cenário (distribuição uniforme)*

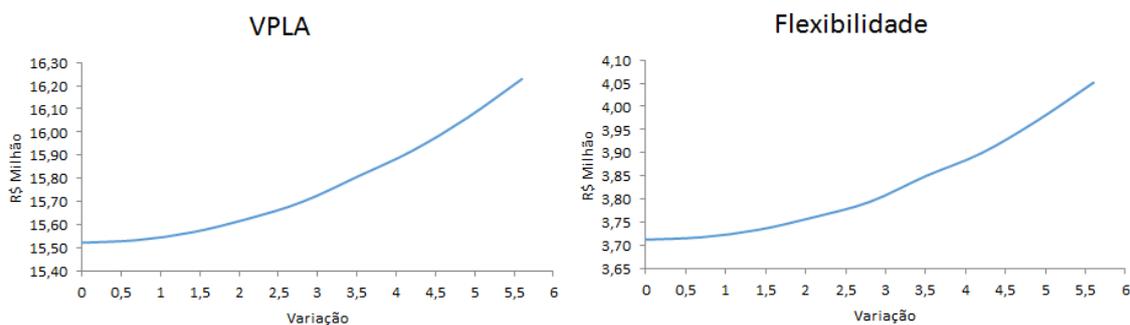
Cenário	Meia Largura	σ_p	VPLA	Flexibilidade	Decisão Ótima
C1	0%	0,0	R\$ 15.522.309,41	R\$ 3.712.433,21	Melhorar
C2	5%	0,7	R\$ 15.533.455,76	R\$ 3.717.717,15	Melhorar
C3	10%	1,4	R\$ 15.567.007,90	R\$ 3.733.482,59	Melhorar
C4	15%	2,1	R\$ 15.624.199,70	R\$ 3.760.881,31	Melhorar
C5	20%	2,8	R\$ 15.698.123,88	R\$ 3.794.008,97	Melhorar
C6	25%	3,5	R\$ 15.806.547,42	R\$ 3.849.615,19	Melhorar
C7	30%	4,2	R\$ 15.918.296,28	R\$ 3.899.220,74	Melhorar
C8	35%	4,9	R\$ 16.060.313,27	R\$ 3.969.792,86	Melhorar
C9	40%	5,6	R\$ 16.228.969,08	R\$ 4.051.453,90	Melhorar

Fonte: Elaboração própria.

*Para construção desse quadro foi usado a média como sendo 17 meses, entretanto é importante falar que uma análise parecida foi realizada com a moda sendo 12 meses, obtendo-se resultado próximo.

A Figura 6-15 mostra que para o caso da duração das fases seguir uma distribuição uniforme tanto o valor esperado do projeto quanto o valor da flexibilidade aumentam com o aumento da incerteza temporal. Este resultado se assemelha ao obtido com a distribuição triangular, o que é bastante coerente.

A explicação dos resultados obtidos com as comparações feitas, entretanto, demandam um estudo mais detalhado a respeito de suas distribuições de probabilidades. Mais especificamente, tal tarefa envolveria o estudo de suas funções de distribuição de probabilidade acumulada. No entanto, este não é o foco deste trabalho.

Figura 6-15 - VPLA x Flexibilidade x Variação

Fonte: Elaboração própria.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve por objetivo adaptar o modelo de Silva e Santiago (2009) a fim de que o mesmo abrangesse projetos de pesquisa e desenvolvimento com *market share* garantido. Para tanto algumas críticas foram apontadas em relação ao modelo, como à insensibilidade de alguns parâmetros da função *payoff* e à inflexibilidade dos custos variáveis em relação à performance tecnológica e a duração das fases.

Com o intuito de testar a contribuição realizada ao modelo, através da modificação da função de volume de vendas para que ela se tornasse decrescente no tempo e com ponto inicial diferente de zero, a viabilidade financeira de um projeto de P&D (o HBDO) foi realizada com o modelo adaptado. A avaliação do projeto captou, por meio de um modelo de treliça, a incerteza técnica da evolução de desempenho da tecnologia e considerou o tempo das fases (Protótipo e Produto) necessárias para a conclusão do projeto como uma variável aleatória, seguindo cada fase, de forma independente, uma distribuição temporal triangular, $T[10;12;24]$.

Para valoração do projeto foi aplicada a técnica de Simulação de Monte Carlo. Com base nesta técnica, para cada caminho aleatório gerado, calcula-se o valor do projeto por meio da equação da programação dinâmica. O valor esperado do projeto é então calculado tirando-se a média dos valores obtidos para cada um dos caminhos simulados.

Os resultados indicaram um VPLA de R\$ 18,59 milhões, utilizando no primeiro estágio de revisão a opção de melhorar. O VPL foi de R\$ 13,45 milhões, obtendo, dessa forma, um valor estimado de R\$ 5,14 milhões para a flexibilidade gerencial.

Observe que, apesar da análise tradicional ter apresentado um VPL expressivo positivo, ao longo do desenvolvimento de um projeto de pesquisa, dentre outros, dificuldades técnicas podem surgir, podendo até inviabilizar o projeto. Dessa forma, é interessante fazer uma análise das múltiplas fontes de incertezas que um projeto de P&D pode enfrentar. No caso do presente trabalho, o projeto se mostrou mais promissor diante do tratamento múltiplo da incerteza.

Para contornar alguns possíveis problemas de viés dos resultados do modelo, uma vez que alguns parâmetros da função *payoff* foram considerados fixos e gerados a partir da análise tradicional, testes de sensibilidade foram realizados. A análise de sensibilidade foi utilizada para organizar os resultados de forma que se pudesse observar o comportamento do valor do projeto, tendo em vista a variação de parâmetros como: a probabilidade de sucesso, os parâmetros de forma e escala e o desvio padrão do tempo necessário para se completar as fases do projeto.

A respeito da variação da probabilidade, quanto maior p maior o valor do projeto e menor a flexibilidade. Já as variações nos parâmetros de forma e escala geram um aumento do valor do projeto, uma vez que elevam os retornos. Por fim, os resultados obtidos para o desvio padrão do tempo mostram que o valor da flexibilidade e o valor do projeto aumentam conforme a incerteza do tempo, seguindo uma distribuição triangular, aumenta.

A fim de contribuir para a literatura e a nível de comparação, uma análise do valor do projeto com o tempo seguindo uma distribuição uniforme também foi realizada, U[10;24]. Concluiu-se que o VPLA e o VPL do projeto foram menores que os estimados anteriormente com a distribuição triangular, implicando num valor menor para a flexibilidade. No entanto, tanto o VPLA quanto a flexibilidade aumentam com o aumento da variação do tempo, resultado semelhante ao obtido com a distribuição triangular. Maiores explicações sobre os resultados obtidos com as comparações feitas demandam um estudo mais detalhado a respeito de suas distribuições de probabilidades, o que não é o foco do presente trabalho.

Pode-se dizer que a metodologia desenvolvida por Silva e Santiago (2009) é útil para avaliação de projetos em situações reais, entretanto algumas melhorias ainda precisam ser feitas. Alguns parâmetros da função *payoff*, por exemplo, precisam ser

calculados da forma tradicional, não sofrendo, portanto, nenhuma variação no modelo dos autores. Assim, este trabalho contribui para a adaptação do modelo dos autores para que o mesmo compreenda um número maior de projetos, como os projetos com *market share* garantido. Também buscou-se realizar alguns testes de sensibilidade, garantido maior confiança aos resultados. Essas contribuições são importantes principalmente devido à idiossincrasia dos problemas dos projetos de P&D que impede de fazer generalizações a respeito do impacto das múltiplas incertezas no valor do projeto.

Conclui-se este trabalho sugerindo que em trabalhos futuros haja um tratamento matemático mais adequado com respeito à função de custo para que esta se torne mais sensível às mudanças de performance do produto/tecnologia e as alterações da duração das fases de desenvolvimento do produto/tecnologia. Também, sugere-se que os parâmetros fixos da função *payoff* seja calculado com base nas expectativas de valor de mercado e não da forma tradicional.

REFERÊNCIAS

- AMRAN, M.; KULATILAKA, N. Real Options. **Harvard Business School Press, Boston**, 1999.
- ANDERSON, J.C.; NARUS, J.A. **Business Market Management: Understanding, Creating, and Delivering Value**, 2nd ed., Pearson-Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2004.
- ARCHIBUGI D. Pavitt's taxonomy sixteen years on: a review article, **Economics and Innovation and New Technology**. vol. 10, p. 415-425, 2001.
- BAE, S.C.; KIM, D. The effect of R&D investments on Market value of firms: Evidence from the U.S., Germany, and Japan. **The Multinational Business Review**, 11(3), p. 51-75, 2003.
- BASTIAN-PINTO, C.; BRANDÃO, L.; HAHN, W. J. Flexibility as a source of value in the production of alternative fuels: The ethanol case. **Energy Economics**, v. 31, n. 3, p. 411-422, 2009.
- BATISTA, F. R. S. **Estimação do valor incremental do mercado de carbono nos projetos de fontes renováveis de geração de energia elétrica no Brasil: uma abordagem pela teoria das opções reais**. Tese de Doutorado. PUC-Rio. 2007.
- BELL, M.; PAVITT, K. The development of technological capabilities. **Trade, Technology and International Competitiveness**, v. 22, p. 69-101, 1995.

- BLACK, F.; SCHOLLES, M. The pricing of options and corporate liabilities. **The Journal of Political Economy**, p. 637-654, 1973.
- BLANK, L.; TARQUIN, A. **Engenharia econômica**. Grupo A, 2008.
- BOER, F. P. Traps, pitfalls and snares in the valuation of technology. **Research Technology Management**, v. 41, p. 45-54, 1998.
- BRANDÃO, L. Uma aplicação da teoria das Opções Reais em tempo discreto para avaliação de uma concessão rodoviária no Brasil. **Rio de Janeiro**, 2002.
- BREALEY, R.-MYERS. S. Principles of Corporate Finance. **McGraw-Hill**, cap, v. 14, p. 17-18, 1999.
- BREMSER, W. G.; BARSKY, N. P. Utilizing the balanced scorecard for R&D performance measurement. **R&D Management**, v. 34, n. 3, p. 229-238, 2004.
- BRIGHAM, E. F.; EHRHARDT, M. C. **Administração Financeira: teoria e prática**. Atlas, 2008.
- CAMPOS, B.; RUIZ, A. U.; Padrões Setoriais de Inovação na Indústria Brasileira. **Revista Brasileira de Inovação**, Rio de Janeiro (RJ), 8 (1), p. 167-210, janeiro/junho 2009.
- CAPORAL, A.; BRANDÃO, L. E. T. Avaliação de uma Unidade de Geração de Energia Através da Teoria de Opções Reais. **Brazilian Business Review**, v. 5, n. 2, p. 108-127, 2008.
- CARBONELL, P.; ESCUDERO, A. I. R.; ALEMAN, J. L. M. Technology newness and impact of go/no-go criteria on new product success. **Marketing Letters**, v. 15, n. 2, p. 81-97. 2004.
- CHESBROUGH, H. W. **Open Innovation: The new imperative for creating and profiting from technology**. Harvard Business Press, 2003.
- COHEN, W. M.; LEVINTHAL, D. A. Innovation and learning: the two faces of R & D. **The Economic Journal**, v. 99, n. 397, p. 569-596, 1989.
- COOPER, R. G. PERSPECTIVE - Third Generation New Product Processes; **Journal of Product Innovation Management**, 11, p. 3-14, 1994.
- COOPER, R. G. Managing technology development projects. **Research-Technology Management**, v. 49, n. 6, p. 23-31, 2006.
- COOPER, R. G.; KLEINSCHMIDT, E. J. The impact of product innovativeness on performance. **Journal of Product Innovation Management**, v. 8, n. 4, p. 240-251, 1991.

- COPELAND, T. ; WESTON, J. F. **Financial Theory and Corporate Policy**. Addison Wesley, 1992.
- COPELAND, T.; ANTIKAROV, V. **Opções reais – Um novo paradigma para reinventar a avaliação de investimentos**. Editora Campus. Rio de Janeiro, 2001.
- COPELAND, T.; KOLLER, T.; MURRIN, J. Avaliação de Empresas-Valuation. Tradução: Maria CSR Ratto. McKKinsey & Company. **Inc.. São Paulo: Makron Books**, 2000.
- COPELAND, T.; WESTON, J. F.; SHASTRI, K. Financial Theory and Corporate Policy. 1000 p. **Editorial Pearson Addison Wesley, New York, USA**, 2005.
- COX, J. C.; ROSS, S. A.; RUBINSTEIN, M. Option pricing: A simplified approach. **Journal of Financial Economics**, v. 7, n. 3, p. 229-263, 1979.
- CREPON, Bruno; DUGUET, Emmanuel; MAIRESSEC, Jacques. Research, Innovation And Productivi [Ty: An Econometric Analysis At The Firm Level.**Economics of Innovation and new Technology**, v. 7, n. 2, p. 115-158, 1998.
- CRESPO, C. F. S. **Avaliação do impacto econômico de uma projeto de pesquisa e desenvolvimento no valor de uma planta “gas-to-liquid” usando a teoria das opções reais**. Rio de janeiro: Pontifícia Universidade Católica do RJ. 2009.
- DAMODARAN, A. **Damodaran on Valuation, Study Guide: Security Analysis for Investment and Corporate Finance**. John Wiley & Sons Incorporated, 1994.
- DE NEGRI, J.; SALERNO, M. S., **Inovação, padrões tecnológicos e desempenho das firmas industriais brasileiras**. Brasília, Ipea, 2005.
- DIAS, M. A. G. **Investimento sob Incerteza em Exploração e Produção de Petróleo**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Industrial, PUC-Rio. Rio de Janeiro, agosto de 1996.
- DIAS, M. A. G. Valuation of exploration and production assets: an overview of real options models. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 44, n. 1, p. 93-114, 2004.
- DIAS, M. A. G.; ROCHA, K. M. C. **Petroleum concessions with extendible options: investment timing and value using mean reversion and jump processes for oil prices**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 1999.
- DIB, O. A. **Participação Do Cliente Na Geração De Ideias De Novos Produtos Panorama Do Setor De Máquinas E Implementos Agrícolas No Brasil.. 119 f**. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de

- Materiais). Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação de Engenharia Mecânica e de Materiais, UTFPR do Campus Curitiba. 2008.
- DIXIT, A. K.; PINDYCK, R. S. Investment under uncertainty, 1994. **Princeton UP, Princeton**, 1994.
- DOSI, Giovanni. Institutions and markets in a dynamic world. **The Manchester School**, v. 56, n. 2, p. 119-146, 1988.
- DOSI, Giovanni. Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. **Research Policy**, v. 11, n. 3, p. 147-162, 1982.
- EDQUIST, Charles. Systems of innovation. **The Oxford Handbook of Innovation**, p. 181-208, 2005.
- ETTLIE, J. E.; ELSENBACH, J. M. Modified Stage-Gate® Regimes in New Product Development. **Journal of Product Innovation Management**, v. 24, n. 1, p. 20-33, 2007.
- FAULKNER, T. W. Applying 'options thinking' to R&D valuation. **Research Technology Management**, v. 39, n. 3, p. 50-56, 1996.
- FRYXELL, G. E. Multiple outcomes from product R&D: profitability under different strategic orientations. **Journal of Management**, v. 16, n. 3, p. 633-646, 1990.
- GENTLE, J. E. **Random Number Generation and Monte Carlo Methods**. New York: SpringerVerlag, 1998.
- GOVINDARAJAN, V.; TRIMBLE, C. Forgetting, as a Way of Innovating. **Chief Executive-New York-**, v. 216, p. 46, 2006.
- GRILICHES, Z. Market Value, R&D, and patents. **Economics Letters**, v. 7, n. 2, p. 183-187, 1981.
- HAGEDOORN, J.; CLOODT, M. Measuring innovative performance: is there an advantage in using multiple indicators? **Research Policy**, v. 32, n. 8, p. 1365-1379, 2003.
- HALL, B. H.; GRILICHES, Z.; HAUSMAN, J. A. **Patents and R&D: Is There A Lag?** National Bureau of Economic Research, Inc, 1986.
- HALL, B. H.; MAIRESSE, J. Exploring the relationship between R&D and productivity in French manufacturing firms. **Journal of Econometrics**, v. 65, n. 1, p. 263-293, 1995.
- HALL, B. H.; ORIANI, R. Does the market value R&D investment by European firms? Evidence from a panel of manufacturing firms in France, Germany, and

- Italy. **International Journal of Industrial Organization**, v. 24, n. 5, p. 971-993, 2006.
- HAMEL, G.; PRAHALAD, C. K. **Competindo pelo futuro**, Rio de Janeiro: Campus, 1995.
- HERTZ, O.B. Risk analysis in capital investment. **Harvard Business Review**, 42(1), p. 95-106, jan. feb. 1964.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2005.
- HUCHZERMEIER; LOCH, C. H. Project Management Under Risk: Using the Real Options Approach to Evaluate Flexibility in R&D. **Management Science**, v. 47, n. 1, p. 85-101, 2001.
- HULL, C. J. **Options, Futures, and Other Derivatives**. Prentice hall, New Jersey. 2003.
- JAFFE, A. B. Technological opportunity and spillovers of R&D: evidence from firms' patents, profits and market value. **The American Economic Review**, 76(5), p. 984-1001, 1986.
- JEFFERSON, G. H. et al. R&D performance in Chinese industry. **Economics of Innovation and New Technology**, v. 15, n. 4-5, p. 345-366, 2006.
- JUNG, C. F. **Metodologia para Pesquisa & Desenvolvimento: aplicada a novas tecnologias, produtos e processos**. Rio de Janeiro: Axcel Books do Brasil, 2004.
- KAFOUROS, M. I. R&D and productivity growth: Evidence from the UK. **Economics of Innovation and New Technology**, v. 14, n. 6, p. 479-497, 2005.
- KASH, D. E.; RYCOFT, R. W. Patterns of innovating complex technologies: a framework for adaptive network strategies. **Research Policy**, v. 29, n. 7, p. 819-831, 2000.
- KASSAI, J. R.; KASSAI, S.; SANTOS, A.; NETO, A. A. (2000). **Retorno de Investimento; abordagem matemática e contábil do lucro empresarial**. São Paulo: Editora Atlas, 2000.
- KHURANA, A. Strategies for global P&D. **Research Technology Management**, 2006.
- KLINE, S. J.; ROSENBERG, N. An overview of innovation. **The Positive Sum Strategy: harnessing technology for economic growth**, v. 14, p. 640, 1986.
- KOGUT, B.; KULATILAKA, N. Capabilities as real options. **Organization Science**, v. 12, n. 6, p. 744-758, 2001.
- LAPPONI, J. C. **Projetos de investimento na empresa**. Elsevier, 2007.

- LAMIN, H. **Análise de impacto regulatório da implantação de redes inteligentes no Brasil**. Tese de doutorado em Engenharia Elétrica – Brasília: Universidade de Brasília. 2013.
- LEV, B. **Intangibles: Management, measurement and reporting**. Brookings Institution Press, 2001.
- LIAO, Z. International R&D project evaluation by multinational corporations in the electronics and IT industry of Singapore. **R&D Management**, v. 31, n. 3, p. 299-307. 2001.
- LIMA, F. G. **Um método de análise e previsão de sucessões cronológicas unidimensionais lineares e não-lineares**. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Administração), Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2004.
- LUEHRMAN, T. A. Strategy as a portfolio of real options. **Harvard Business Review**, v. 76, p. 89-101, 1998.
- MAGALHÃES, F. Jr. **Avaliação de Campo de Petróleo Maduro por Opções Reais**. Dissertação de Mestrado Profissionalizante em Administração - Rio de Janeiro: Faculdades Ibmecc. 2006.
- MANUAL, DE OSLO. Diretrizes para coleta e interpretação de dados sobre inovação. Terceira Edição, OECD, 2005.
- MARX, K.; ENGELS, F. O manifesto comunista de 1848. **Porto Alegre: L&PM Pocket**, 2002.
- MASKELL, P.; MALMBERG, A. Localised learning and industrial competitiveness. **Cambridge Journal of Economics**, v. 23, n. 2, p. 167-185, 1999.
- MERTON, R. C. Theory of rational option pricing. **The Bell Journal of Economics and Management Science**, p. 141-183, 1973.
- MONTEIRO, R. C. **Contribuições da abordagem de avaliação de opções reais em ambientes econômicos de grande volatilidade: uma ênfase no cenário latino-americano**. Tese de Doutorado. 2003.
- MUN, J. **Real options analysis: Tools and techniques for valuing strategic investments and decisions**. Wiley. com, 2006.
- MYERS, S. C. Determinants of corporate borrowing. **Journal of financial economics**, v. 5, n. 2, p. 147-175, 1977.

- MYERS, S. Finance Theory and Financial Strategy. **Interfaces**, January-February, pp. 126-137, 1984.
- NELSON, R. R.; WINTER, Sidney G. In search of useful theory of innovation. **Research Policy**, v. 6, n. 1, p. 36-76, 1977.
- NICHOLS, N. A. Scientific management at Merck: an interview with CFO Judy Lewent. **Harvard Business Review**, v. 72, n. 1, p. 88-99, 1994.
- OZER, M. Process implications of the use of the Internet in new product development: a conceptual analysis. **Industrial Marketing Management**, v. 32, n. 6, p. 517-530. 2003.
- PAXON, D. A. **Real R&D Options**. Butterworth-Heinemann (Elsevier Science), Burlington, MA, USA, 2003.
- PARISI, M. L.; SCHIANTARELLI, F.; SEMBENELLI, A. Productivity, innovation and R&D: Micro evidence for Italy. **European Economic Review**, v. 50, n. 8, p. 2037-2061, 2006.
- PATEL, P.; PAVITT, K. The technological competencies of the world's largest firms: complex and path-dependent, but not much variety. **Research Policy**, v. 26, n. 2, p. 141-156, 1997.
- PAVITT, K. Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory. **Research Policy**, v. 13, n. 6, p. 343-373, 1984.
- PAVITT, K. **What We Know about the Strategic Management of Technology**. California management review, v. 32, n. 3, 1990.
- PENNINGS, E.; LINT, O. The option value of advanced R & D. **European Journal of Operational Research**, v. 103, n. 1, p. 83-94, 1997.
- PENROSE E. **The theory of the growth of the firm**, New York: John Wiley, 1959.
- PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, DL, **Microeconomics**. 1998.
- ROMER, Paul M. The origins of endogenous growth. **The Journal of Economic Perspectives**, v. 8, n. 1, p. 3-22, 1994.
- ROSS, S. A.; WESTERFIELD, R. W.; JORDAN, B. D. **Princípios de administração financeira: essentials of corporate finance**. São Paulo: Atlas, 1998.
- ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F. A.; AMARAL, D. C.; TOLEDO, J. C.; SILVA, S. L.; ALLIPRANDINI, D. H.; SCALICE, R.; K. **Gestão de desenvolvimento de produto: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006.

- SANTIAGO, L. P.; BIFANO, T. G. Management of R&D projects under uncertainty: A multidimensional approach to managerial flexibility. **Engineering Management, IEEE Transactions on**, v. 52, n. 2, p. 269-280, 2005.
- SANTIAGO, L. P.; VAKILI, Pirooz. On the value of flexibility in R&D projects. **Management Science**, v. 51, n. 8, p. 1206-1218, 2005.
- SANTOS FILHO, A. D. **Teoria das opções reais aplicada a projetos de investimento em prestação de serviços de tecnologia da informação**. Dissertação. Fundação Getúlio Vargas. 2003.
- SANTOS, E. M. **Qual o valor de um projeto de pesquisa? Uma comparação entre os métodos de opções reais, árvore de decisão e VPL tradicional na determinação do valor de um projeto real de pesquisa e desenvolvimento (P&D)**. Dissertação de mestrado. UNIFEI – MG. 2001.
- SANTOS, E. M.; PAMPLONA, E. O. Teoria das Opções Reais: uma atraente opção no processo de análise de investimentos. **Revista de Administração da Universidade de São Paulo**, v. 40, n. 3, 2005.
- SANTOS, D. T. E.; SANTIAGO, L. P. Métodos de valoração de tecnologias. Belo Horizonte: Laboratório de Apoio à Decisão e Confiabilidade, Departamento de Engenharia de Produção, UFMG. 2008. **Disponível em:** <http://www.institutoinovacao.com.br/arquivos_internos/artigos/Metodos_de_ValoracaV_de_Tecnologias.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2013.
- SCHUMPETER, J. **Capitalism, Socialism, and Democracy**. New York, Harper & Brothers, 1942.
- SCHWARTZ, E. S.; MOON, Mark. Rational pricing of internet companies. **Financial Analysts Journal**, p. 62-75, 2000.
- SHARPE, W. F. Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium Under Conditions of Risk. **The journal of finance**, v. 19, n. 3, p. 425-442, 1964.
- SHERIF, M. H.; KHALIL, T. M. **Management of Technology Innovation and Value Creation: Selected Papers from the 16th International Conference on Management of Technology**. World Scientific Publishing Company, 2008.
- SILVA, M. M.; ALLIPRANDINI, D. H. Relação entre o processo de stage-gates e aprendizagem organizacional no PDP: um estudo de caso. In: **XXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)**. Salvador, BA. 2001.
- SILVA, T. A. O.; SANTIAGO, L. P. New product development projects evaluation under time uncertainty. **Pesquisa Operacional**, v. 29, n. 3, p. 517-532, 2009.

- SILVA, T. A. O. **Avaliação de projetos de pesquisa e desenvolvimento considerando a incerteza do tempo**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- SMITH, J. M.; NAU, R. F. Valuing risky projects: Option pricing theory and decision analysis. **Management Science**, v. 41, p. 614-636, 1995.
- SOLOW, R. M. A Contribution to the Theory of Economic Growth. **Quarterly Journal of Economics**. p. 70, February, 1956.
- TEECE, D. J.; PISANO, G.; SHUEN, A. Dynamic capabilities and strategic management. **Strategic Management Journal**, v. 18, n. 7, p. 509-533, 1997.
- TIDD, J.; BESSANT, J.; PAVITT, K. Gestão da inovação: integração das mudanças tecnológicas, de mercado e internacionais. **Lisboa, Monitor**, 2003.
- TITMAN, S. Urban land prices under uncertainty. **The American Economic Review**, v. 75, n. 3, p. 505-514, 1985.
- TOURINHO, O. AF. **The valuation of reserves of natural resources: an option pricing approach**. Tese de Doutorado. University of California, Berkeley, 1979.
- TRIGEORGIS, L. **Real Options: Managerial flexibility and Strategy Inresource Allocation**. the MIT Press, 1996.
- TRIGEORGIS, L.; MASON, S. P. Valuing managerial flexibility. **Midland Corporate Finance Journal**, v. 5, n. 1, p. 14-21, 1987.
- VALERI, S. G. **Estudo do processo de revisão de fases no processo de desenvolvimento de produtos em uma indústria automotiva**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2000.
- VALERI, S. G.; MARTINI, L. G.; SERPA, A. L.; DINIZ, M. A. N.; ROZENFELD, H. **Análise da implementação de um “gate system” em uma indústria fornecedora do setor automotivo**. Anais do 2º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto; São Carlos, SP; 30-31 ago, 2000.
- VAN DER MEER, H. Open innovation—the Dutch treat: challenges in thinking in business models. **Creativity and Innovation Management**, v. 16, n. 2, p. 192-202, 2007.
- VIDAL, A. P. **Avaliação de Projeto de Mineração Aplicando a Teoria de Opções Reais**. Rio de Janeiro, 75p. Dissertação (Mestrado em Administração de Empresas) – Departamento de Administração, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008.

WHEELWRIGHT, S. C. **Managing New Product and Process Development: Text Cases**. SimonandSchuster. com, 2010.

WITTWER, J. W. Monte Carlo simulation basics. **Vertex42. com**, 2004.