

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE ECONOMIA
MONOGRAFIA DE BACHARELADO

**AVALIAÇÃO DE UM PROJETO DE P,D&I NO
SETOR DE ÓLEO & GÁS PELA ABORDAGEM DA
TEORIA DAS OPÇÕES REAIS E PELO FLUXO DE
CAIXA DESCONTADO**

LUIZ EDUARDO SERRÃO ZAPPA
Matrícula nº: 114008257

ORIENTADOR: João Carlos Ferraz

MARÇO 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE ECONOMIA
MONOGRAFIA DE BACHARELADO

**AVALIAÇÃO DE UM PROJETO DE P,D&I NO
SETOR DE ÓLEO & GÁS PELA ABORDAGEM DA
TEORIA DAS OPÇÕES REAIS E PELO FLUXO DE
CAIXA DESCONTADO**

LUIZ EDUARDO SERRÃO ZAPPA

Matrícula nº: 114008257

ORIENTADOR: João Carlos Ferraz

MARÇO 2020

As opiniões expressas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(a) autor(a).

Dedico esse trabalho aos meus pais José Roberto G. Zappa e Rita E. S. Serrão e aos meus avós José G. Zappa Filho, Lenice Zappa, José G. Serrão (*in memoriam*) e Philomena E. S. Serrão

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por toda a compreensão e incentivo que me forneceram ao longo de minha vida acadêmica.

Aos meus familiares e amigos por estarem caminhando ao meu lado nessa jornada.

Aos professores que se dedicam pela qualidade de ensino da instituição, que contribuem diretamente pela formação profissional de seus alunos. Em especial um agradecimento ao professor João Carlos Ferraz por me orientar e apoiar na elaboração desse projeto de graduação e por todo o tempo dedicado.

Agradeço à UFRJ, pelas oportunidades e pelo ambiente de formação de qualidade que me proporcionaram.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram para minha formação.

RESUMO

O presente trabalho analisa a adequabilidade de duas ferramentas de avaliação de investimento em projetos quando aplicados a projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I). Quais sejam: a abordagem tradicional do Fluxo de Caixa Descontado (FCD) comparando-a com a Teoria das Opções Reais (TOR).

Esta monografia encontra que a grande desvantagem do FCD é considerar a rota de desenvolvimento de um projeto como algo estático, quando na realidade, ao longo do tempo, decisões são tomadas pelos gestores, alterando o seu rumo de acordo com o cenário que se releva, principalmente frente a eventos externos e internos às empresas. Estes eventos cambiantes demandam flexibilidade nos processos de decisão. E essas flexibilidades existem em muitos projetos, mas não são capturadas pelo FCD. Talvez os projetos mais típicos desta configuração são os projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P,D&I). Nesses é inerente a incerteza quanto aos seus resultados o que demanda uma postura de flexibilidade para introduzir-se alterações adaptativas em processos de decisão o que requer um marco de referência não estático.

Por sua vez a TOR apresenta um ferramental para precificar flexibilidades. Assim, nesta monografia será apresentada uma revisão teórica das duas abordagens (FCD e TOR), ressaltando-se suas construções (incluindo procedimentos de cálculo) na busca da identificação de suas vantagens e desvantagens.

Em seguida será discutido um caso hipotético de projeto de pesquisa do setor de Óleo & Gás, com a aplicação das duas abordagens, destacando-se as diferenças das abordagens. Para isso, será apresentada uma sessão dedicada a teorização da TOR no setor de P,D&I, particulares desse tipo de projeto e introduzido o ambiente de P,D&I nacional para melhor contextualizar o tema.

A revisão da literatura e o caso hipotético demonstram que a abordagem pela teoria das opções reais representa um ferramental relevante para avaliação de projetos de investimentos, especialmente em contexto de riscos e incertezas, uma vez que sua interatividade informacional possibilita ao gestor um melhor nível de informação do que modelos tradicionais, permitindo tomadas de decisões que ampliem as possibilidades de se gerenciar os retornos esperados de um projeto.

Palavra-Chaves: Teoria das Opções Reais. Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação. Avaliação de projetos de investimento. Óleo & Gás. Fluxo de Caixa Descontado.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUÇÃO | 7 |
| CAPÍTULO I: AVALIAÇÃO DE INVESTIMENTOS | 9 |
| I.1 CONTEXTO: DOS MÉTODOS TRADICIONAIS DE AVALIAÇÃO ATÉ AS OPÇÕES REAIS | 9 |
| I.2 FLUXO DE CAIXA DESCONTADO (FCD) E VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL) | 10 |
| I.2.1 VALOR ESPERADO | 12 |
| I.2.2 LIMITAÇÕES MÉTODO VPL E FLEXIBILIDADES GERENCIAIS | 12 |
| CAPÍTULO II: OPÇÕES FINANCEIRAS | 17 |
| II.1 CONCEITOS BÁSICOS | 17 |
| II.2 TIPOS DE OPÇÕES FINANCEIRAS | 18 |
| II.3 POSIÇÃO EM OPÇÕES | 20 |
| II.4 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS | 21 |
| CAPÍTULO III: TEORIA DAS OPÇÕES REAIS..... | 23 |
| III.1 HISTÓRIA DAS OPÇÕES REAIS..... | 23 |
| III.2 PERCEPÇÃO DO MERCADO | 25 |
| III.3 PARTICULARIDADES OPÇÕES REAIS X OPÇÕES FINANCEIRAS..... | 28 |
| III.4 OS TIPOS DE OPÇÕES | 31 |
| III.5 MODELOS DE PRECIFICAÇÃO DO PRÊMIO DE UMA OPÇÃO | 32 |
| III.5.1 VARIÁVEIS DE ENTRADA | 32 |
| III.5.2 MODELO BINOMIAL..... | 35 |
| III.6 OPÇÕES REAIS EM PD&I..... | 49 |
| CAPÍTULO IV: PARTICULARIDADES DO INVESTIMENTO EM PD&I | 52 |
| IV.1 O VALE DA MORTE..... | 52 |
| IV.2 PD&I NA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS BRASILEIRA | 56 |
| CAPÍTULO V: CASO HIPOTÉTICO..... | 60 |
| V.1 CONTEXTO..... | 60 |
| V.2 O PROJETO | 61 |
| V.3 ABORDAGEM PELO FLUXO DE CAIXA DESCONTADO | 64 |
| V.4 UMA VARIANTE DO FCD: A ABORDAGEM PELO VALOR ESPERADO..... | 64 |
| V.5 ABORDAGEM PELAS OPÇÕES REAIS | 68 |
| CONCLUSÃO..... | 75 |

| | |
|---|-----------|
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 77 |
|---|-----------|

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Valor Esperado do Fluxo de Caixa Descontado | 12 |
| Figura 2 - Valor da Flexibilidade: Incerteza e Capacidade de Reagir | 16 |
| Figura 3- Payoffs (retornos) de uma opção financeira de compra..... | 19 |
| Figura 4 - Payoffs (retornos) de uma opção financeira de venda..... | 20 |
| Figura 5 - Influência de Seis Variáveis no Valor das Opções Reais | 22 |
| Figura 6 - Esquema binomial de um período..... | 37 |
| Figura 7 - Cálculo dos CV de um ativo de risco V e uma opção de compra europeia do ativo V | 39 |
| Figura 8 - Exemplo de um seguro total de um projeto | 40 |
| Figura 9 - Dinâmica do ativo V e da opção F..... | 42 |
| Figura 10 - Dinâmica do portfólio sem risco..... | 42 |
| Figura 11 - Duas maneiras de calcular o valor presente | 44 |
| Figura 12 - Dinâmica do ativo de risco | 45 |
| Figura 13 - Dinâmica do derivativo F..... | 46 |
| Figura 14 - Dinâmica do derivativo F..... | 46 |
| Figura 15 - Retomando exemplo sobre seguro de um projeto..... | 47 |
| Figura 16 - Dinâmica do seguro do projeto | 48 |
| Figura 17 - Construção da Árvore Binomial pelo Método Forward | 48 |
| Figura 18 - Construção da Árvore Binomial pelo Método Backward..... | 49 |
| Figura 19 - Projeto de PD&I visto como uma sequência de decisões e resultados | 50 |
| | 50 |
| Figura 20 - Escala TRL..... | 50 |
| Figura 21 - Processo de PD&I revisitado | 51 |
| Figura 22 - Árvore de Decisão para investimentos sequenciais em PD&I..... | 51 |
| Figura 23 - Vendas vs Fluxo de Caixa: Ciclo de Inovação | 54 |
| Figura 24 - Distribuição investimento de PD&I contratos até a 10ª rodada..... | 56 |
| Figura 25 - Distribuição investimento de PD&I contratos da 11ª à 13ª rodada e Contratos da 1ª Rodada de Partilha de Produção | 57 |
| Figura 26 - Distribuição investimento de PD&I Contratos de Concessão a partir da 14ª Rodadas de Licitação e nos Contratos de Partilha de Produção a partir da 2ª Rodada | 57 |
| Figura 27 - Distribuição investimento de PD&I contratos de cessão onerosa | 57 |
| Figura 28 - Volume de obrigações geradas por ano (até o 2º trimestre de 2019).. | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 29 - Distribuição percentual do volume total acumulado de recursos gerados, em todo o período de 1998 ao 2º trimestre de 2019, por empresa petrolífera..... | 58 |
| Figura 30 - Série Histórica Preço do Brent Crude | 60 |
| Figura 31 - Fluxos de Caixa do Projeto de P,D&I..... | 63 |
| Figura 32 - Cenários dos Fluxos de Caixa do Ano 5 | 65 |
| Figura 33 - Cenários esperados do Fluxo de Caixa para o 6º ano | 65 |
| Figura 34 - Árvore Binomial com as probabilidades de cada cenário ao longo dos anos..... | 66 |
| Figura 35 - Árvore Binomial com os Valores Futuros de cada cenário ao longo dos anos..... | 66 |
| Figura 36 - Árvore Binomial das probabilidades de cada cenário..... | 67 |
| Figura 37 - Árvore Binomial com os Valores Futuros (investimento e FC positivo) de cada ano do projeto | 68 |
| Figura 38 - Valores Esperados e Valores Presentes de cada ano do projeto | 68 |
| Figura 39 - Valores futuros do custo | 69 |
| Figura 40 - Diferença de cálculos do Valor Presente utilizando ou não a probabilidade neutra ao risco..... | 70 |
| Figura 41 - Árvore Binomial das probabilidades neutra ao risco..... | 71 |
| Figura 42 - Árvore Binomial dos Valores Futuros de cada ano | 71 |
| Figura 43 - Valor Esperado e Valor Presente de cada ano | 71 |
| Figura 44 - Cálculo da Árvore Binomial pelo método Backward | 72 |
| Figura 45 - Árvore Binomial dos custos de investimento calculados pelo método Backward..... | 72 |
| Figura 46 - Árvore Binomial das receitas calculadas pelo método Backward | 72 |
| Figura 47 - Árvore Binomial pelo método Backward | 73 |
| Figura 48 - Árvore Binomial com a modelagem da opção de abandono no terceiro ano | 73 |
| Figura 49 - Árvore Binomial com a modelagem da opção de abandono no terceiro ano | 74 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|--|----|
| Equação 1 – Fórmula VPL | 11 |
| Equação 2 – Fórmula WACC | 11 |
| Equação 3 – Fórmula Custo do Capital Próprio (K_e)..... | 11 |
| Equação 4 - Fórmula do valor de uma opção financeira de compra | 19 |
| Equação 5 - Fórmula para cálculo do valor de uma opção financeira de venda ... | 20 |
| Equação 6 - Determinação da quantidade utilizada do ativo de risco para produzir um portfólio sem risco..... | 42 |
| Equação 7 - Cálculo do valor presente de uma opção | 44 |
| Equação 8 - Probabilidade neutra ao risco | 45 |
| Equação 9 - Medida da probabilidade sem risco do derivativo F..... | 47 |

INTRODUÇÃO

Investimentos em inovação – de importância estratégica para o processo de desenvolvimento econômico são carregados de incerteza quanto aos seus resultados. Por esta carga de incerteza, um dos desafios para gestores de projetos desta natureza é contar com ferramentas que permitam uma adequada avaliação econômico-financeira, em particular a identificação de ganhos (ou perdas) potenciais ao longo de sua execução, para se decidir, também ao longo do tempo, pela continuidade ou interrupção de alocação de recursos aos projetos. O presente trabalho analisa a adequabilidade de duas ferramentas de análise de investimentos quando aplicadas a projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I): a abordagem tradicional do Fluxo de Caixa Descontado (FCD) comparando-a com a Teoria das Opções Reais (TOR). Projetos desse tipo são caracterizados por incertezas quanto aos seus resultados o que demanda flexibilidades nos processos de decisão, como abandonar o projeto em um estado intermediário, dar continuidade ou aguardar a fim de se obter mais informações para se decidir pela continuação ou não do projeto.

Em ambientes incertos, e que por isso requerem flexibilidade, os métodos tradicionais de avaliação de viabilidade financeira de projetos podem não ser precisos. Um dos métodos mais utilizados, o modelo de fluxo de caixa descontado (FCD) supõe que todas as decisões são realizadas no início do projeto e que as mesmas não são alteradas e desenvolvidas ao longo do tempo. Com a abordagem pela teoria das opções reais, múltiplos percursos são considerados de acordo com decisões que podem ser realizadas ao longo do ciclo de vida do projeto. Estas decisões representam flexibilidades gerenciais que permitem escolher a melhor estratégia ou opção quando novas informações se tornam disponíveis. Assim, projetos que envolvem incertezas futuras são avaliados de forma mais consistente pela abordagem da teoria das opções reais do que pelo fluxo de caixa descontado. Esta é a principal conclusão deste trabalho.

No capítulo 1 será apresentado o método de fluxo de caixa descontado, largamente aplicado por empresas para tomada de decisões sobre investimento. Será demonstrado que, em ambientes de incertezas, esse método não captura todo o valor de um projeto, assim, subestimando ou superestimando e levando a decisões equivocadas.

Uma vez posta as limitações da aplicação do FCD em ambientes com incerteza, será introduzida a teoria das opções reais e como ela pode capturar valores ao

permitir flexibilidades aos processos de decisão em ambientes incertos. Para tal fim, é apresentado no capítulo 2 a ferramenta de opções financeiras, que formam toda a base teórica para a construção das opções reais. No capítulo 3 será apresentada a teoria das opções reais e o método binomial para valoração das mesmas.

No capítulo 4 serão apresentadas particularidades de projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), como sua alta taxa de insucesso e as principais causas disso, além do conceito de “Vale da Morte”, zona em que há maior descontinuação de projetos de PD&I. Ainda será apresentado o ambiente de PD&I no setor de óleo e gás nacional, descrevendo suas particularidades, em particular o ambiente regulatório existente da Agência Nacional do Petróleo (ANP) que, ao determinar o investimento compulsório em inovação, afeta diretamente o processo de pesquisa nesta indústria.

No capítulo 5 será apresentado um caso hipotético, aplicando-se a Teoria das Opções Reais a um projeto de PD&I no setor de óleo e gás comparando os valores obtidos com o método tradicional do fluxo de descontado e o da TOR.

No último capítulo serão apresentadas as principais reflexões geradas no desenvolvimento desse trabalho e dos resultados obtidos da aplicação no caso hipotético.

CAPÍTULO I: AVALIAÇÃO DE INVESTIMENTOS

Neste primeiro capítulo será realizada uma introdução ao cenário dos métodos de orçamento de capital, em que se busca auxiliar as organizações na decisão de realizar investimentos de longo prazo. Após essa contextualização, será apresentada uma das metodologias mais utilizadas para avaliação de investimentos, o método do Valor Presente Líquido (VPL), e suas limitações em cenários que apresentam incertezas e flexibilidades gerenciais.

I.1 CONTEXTO: DOS MÉTODOS TRADICIONAIS DE AVALIAÇÃO ATÉ AS OPÇÕES REAIS

Diversos métodos foram desenvolvidos para avaliar investimentos quando o comprometimento de recursos em projetos tornou-se um ponto crucial para a sobrevivência das empresas (ARNOLD E HATZOPOULOS, 2000).

Contudo, as técnicas predominantes pareciam incapazes de capturar todos os aspectos importantes de um investimento. Com isso, existiram problemas na avaliação de investimentos devido a um *gap* entre a teoria e a prática nesta área de orçamento de capital, como sinalizam Graham e Harvey (1999) e Arnold e Hatzopoulos (2000).

Os métodos predominantes desenvolvidos até a década de 70 falhavam em avaliar o benefício de se ter flexibilidades em alterar os percursos de um projeto a medida que novas informações passavam a ser conhecidas (COPELAND E ANTIKAROV, 2001). Um dos métodos mais utilizados era o Fluxo de Caixa Descontado (atualmente ainda permanece como um dos mais utilizados pelas firmas). Nesse método estima-se o valor esperado dos fluxos de caixa futuros e, por meio de uma taxa de juros ajustada ao risco do projeto, traz-se esses fluxos a valor presente. Com base nesses cálculos, são gerados indicadores tais como Valor Presente Líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR), tempo de retorno (payback) e o VPL/Investimento Atualizado.

Um dos maiores avanços ocorreu em 1973 quando Black e Scholes publicaram um artigo em que apresentaram uma equação para precificar uma opção financeira do tipo europeia (detentor dessa opção só pode exercer seu direito no dia do vencimento). Apesar das opções financeiras já terem sido discutidas um pouco antes, a fórmula passou a determinar um preço justo, isto é, um preço ajustado à relação risco e retorno do ativo subjacente. (BLACK E SCHOLES, 1973).

Por sua vez, o crescimento da utilização de opções afetou também outras áreas da economia. Uma das mais importantes foi na área de orçamento de capital. O

primeiro esforço sistemático é de Myers (1977) que identificou em muitos projetos a presença de opções reais¹. Essa aparecia através de projetos que consistiam de diferentes estágios, em que a empresa só poderia adentrar um novo estágio se o precedente tivesse sido concluído com sucesso ou, em caso de projetos de expansão de fábricas, de acordo com o comportamento do mercado.

A utilização de modelos de precificação de opções no processo de orçamento de capital tornou-se uma das mais promissoras ferramentas de avaliação. Com isso, a análise das opções reais se tornou uma grande área de expansão de trabalhos aplicados assim como de pesquisa, depois do artigo de Black e Scholes.

A abordagem pela teoria das opções reais permite incluir o valor das flexibilidades e incertezas existentes, fornecendo valores mais adequados aos projetos. Além disso, usando a análise das opções reais é possível realizar um link entre decisões de investimento e a estratégia de uma organização, uma vez que se obtém instruções de como agir no futuro de forma a maximizar o valor do projeto.

Apesar de a análise das opções reais parecer o ferramental mais adequado para os gerentes, ela ainda não veio a ser largamente utilizada pelo mercado.

I.2 FLUXO DE CAIXA DESCONTADO (FCD) E VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

De forma geral, a avaliação de um projeto utilizando a abordagem pelo VPL, condiciona a aceitação do mesmo quando o VPL possuir valor positivo, sendo que no caso igual a zero é indiferente realizar ou não o projeto. No caso do VPL ser menor que zero, o projeto seria rejeitado.

A vantagem da avaliação pelo VPL baseada no FCD é que a mesma traduz somente os FCs, ao contrário de outros parâmetros de medição, como *Payback*, *Payback Descontado* e a Taxa Interna de Retorno (TIR), que podem dificultar a interpretação dos resultados.

Brealy & Myers (2003) mencionam que a seleção de investimentos pela regra do VPL facilita a separação entre o gestor da empresa e os detentores de capital, pois independe dos diferentes interesses entre os envolvidos.

¹ Por opções reais entende-se o direito que o seu detentor tem de alterar o caminho do ativo subjacente (geralmente um projeto) ao longo do tempo. Por exemplo, a opção de expandir ou vender uma fábrica é uma opção real em que o ativo subjacente é a fábrica.

Para se obter o VPL deve-se descontar os fluxos de caixa previstos a uma taxa de desconto K conforme a fórmula abaixo:

Equação 1 – Fórmula VPL

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1 + K)^t} - FC_0$$

Onde FC_t representa o valor esperado de cada um dos FC (Fluxos de Caixa) do projeto, K é a taxa de desconto de acordo com o risco do projeto e t é um instante específico associado a um FC_t do projeto e FC_0 é o desembolso inicial.

Para a obtenção da taxa de desconto apropriada, geralmente, se faz uso do Custo Médio Ponderado de Capital – em inglês *Weight Average Cost of Capital (WACC)* – que considera uma ponderação entre o Custo de Capital Próprio empregado e do Custo do Capital de Terceiros, em função da composição da estrutura de capital e do benefício fiscal da dívida.

Conforme a fórmula abaixo, o WACC considera a ponderação entre o custo do capital próprio, e o custo do capital de terceiros que são emprestados à empresa, abatido do benefício fiscal decorrente do pagamento dos juros da dívida.

Equação 2 – Fórmula WACC

$$WACC = Ke \frac{Capital\ Próprio}{(Capital\ Próprio + Capital\ de\ Terceiros)} + Kd \frac{Capital\ de\ Terceiros}{(Capital\ Próprio + Capital\ de\ Terceiros)} \times (1 - Alíquota\ IR)$$

Onde Ke é o Custo do Capital Próprio cujo cálculo é realizado através do *Capital Asset Price Model (CAPM)*. Formalmente:

Equação 3 – Fórmula Custo do Capital Próprio (Ke)

$$Ke = Rf + Beta \times (E(Rm) - Rf)$$

Rf é Taxa Livre de Risco; $Beta$ é o risco sistêmico da ação que corresponda ao risco do capital próprio e $E(Rm)$ é o retorno esperado da carteira de mercado. A Taxa Livre de Risco equivale à taxa de juros de um título de renda fixa emitido pelo governo, o qual se considera com risco igual a zero.

Para o cálculo do Custo de Capital de Terceiros (Kd) emprestado àquele projeto e/ou empresa, considera-se as taxas de juros do país em que o projeto estiver inserido e o risco de *default*. As empresas de classificação de risco procuram avaliar esses componentes.

I.2.1 VALOR ESPERADO

O método do FCD pode ser aplicado utilizando-se o valor esperado. Para isso, basta que o fluxo de caixa de cada ano seja decomposto em cenários, atribuindo probabilidades de ocorrência para cada um deles. Os cenários multiplicados por suas probabilidades fornecem o valor esperado (média) para determinado ano, esse é o fluxo de caixa que é considerado para aquele ano (fluxo de caixa esperado). Isso fornece uma modelagem mais transparente, indicando as diversas possibilidades previstas pelo analista. Em termos numéricos, os valores finais são o mesmo.

O esquema abaixo apresenta um exemplo:

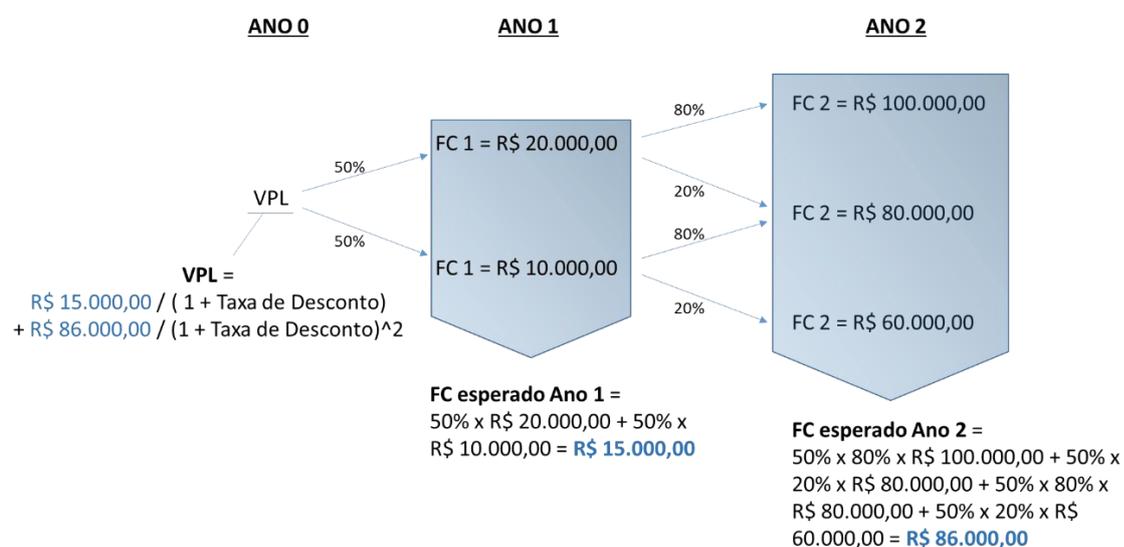


Figura 1 - Valor Esperado do Fluxo de Caixa Descontado

Fonte: elaboração própria

O valor esperado nada mais é que a decomposição do Fluxo de Caixa de cada ano em cenários. Quando se diz que o Fluxo de Caixa do Ano 1 é R\$ 15.000,00, o analista estimou a média (o valor esperado) para tal ano. Intuitivamente esse analista ao prever esse valor, projetou possíveis cenários e estimou o que era mais provável de acontecer, chegando a um valor único. O cálculo pelo valor esperado torna necessária a presença dessa memória de cálculo na modelagem, deixando o processo mais transparente para o analista e demais envolvidos, possibilitando *insights* ou identificação de erros.

I.2.2 LIMITAÇÕES MÉTODO VPL E FLEXIBILIDADES GERENCIAIS

Em projetos, geralmente, existem as decisões de se realizar um investimento ou não. Contudo utilizar a análise pelo FCD implica assumir que os investimentos estão

comprometidos, ou seja, a empresa já decidiu realizar aqueles investimentos. E isso nem sempre é o caso, principalmente em projetos que envolvem incertezas quanto aos resultados como são os projetos de inovação.

Em seu artigo, Mun (2006) verifica as diferenças entre as avaliações por opções reais e por FCD. O autor argumenta que em um mundo estocástico usar um modelo determinístico – como o FCD – pode potencializar erros, subestimando grosseiramente o valor do projeto. O FCD assume que todas as entradas são fixas para que, assim, se possa obter a saída. Neste caso, o FCD enxerga o mundo como se não houvesse flutuações nas condições do negócio que poderiam alterar sensivelmente o valor de um projeto, ou seja, não se valoram possíveis flexibilidades.

De acordo com Luehrman (1997), a avaliação por intermédio do cálculo do WACC possui limitações. No momento em que se considera a mesma estrutura de capital para todas as operações da empresa, assume-se o mesmo custo médio ponderado de capital para todos os projetos, assim podendo trazer os FC a valor presente de forma incorreta.

Desta forma, projetos com alta incerteza necessitam de altas taxas de desconto para refletir este risco inerente. Assim, enquanto todo o risco existente é capturado na avaliação deste investimento, nenhuma das recompensas é avaliada (como possibilidade de vender os ativos do projeto ou um fluxo de caixa mais elevado do que o esperado). As técnicas tradicionais do Fluxo de Caixa Descontado consideram um projeto como sendo rígido para o futuro: ele possui um início, em que se deve investir imediatamente, seguindo a sua operação na escala projetada até a sua conclusão. Porém, via de regra, os projetos não possuem uma gestão passiva, como estabelecido pelo método do FCD. Muito pelo contrário, os gestores participam ativamente em questões chaves do projeto, como postergar investimentos mais volumosos para acompanhar a evolução do marco regulatório daquele setor, ou reduzir a escala do projeto, caso se verifique uma redução futura da demanda. Essas flexibilidades possuem um valor monetário, e a Teoria das Opções Reais procura precificá-las.

Ao abordar as flexibilidades gerenciais se abre a possibilidade de se tomar decisões – e mudá-las – ao longo da execução de um projeto para ampliar retornos e/ou reduzir perdas. Uma limitação da análise pelo FCD é a não avaliação dessas flexibilidades gerenciais que existem em alguns projetos.

A flexibilidade gerencial possui o benefício de a empresa verificar o momento mais apropriado para o tipo de investimento a ser realizado, assim, permitindo minimizar

suas perdas, caso o mercado não se encontre favorável, ou maximizar os ganhos. As opções que derivam destas flexibilidades gerenciais são chamadas de opções reais.

De forma mais didática, pode-se resumir as suposições do método do FCD em contraponto com o que acontece de fato na realidade, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Desvantagens do FCD: Suposições X Realidade

| Suposições FCD | Realidade |
|--|--|
| Decisões são realizadas agora, e os fluxos de caixa são fixados no futuro. | Existem incertezas e variabilidade no futuro. Nem todas as decisões são realizadas hoje. Algumas são postergadas para o futuro, quando as incertezas são resolvidas. |
| Projetos são “mini firmas” e não interagem com toda a firma. | Empresas são portfólios de projetos e seus fluxos de caixa resultantes. Existem efeitos de rede, sinergia e diversificação entre eles. |
| Uma vez iniciado, todos os projetos são gerenciados passivamente. | Projetos geralmente são ativamente gerenciados através de ciclos de vida, <i>milestones</i> , opções, restrição orçamentária, etc. |
| Fluxos de caixa futuro são altamente previsíveis e determinísticos. | Pode ser difícil estimar fluxos de caixa futuros uma vez que eles são estocásticos e apresentam riscos por natureza. |
| A taxa de desconto do projeto usada é o custo de oportunidade do capital, o qual é proporcional ao risco não diversificável. | Existem múltiplas fontes de riscos do negócio com diferentes características, e alguns são diversificáveis ao longo da vida do projeto. |
| Todos os riscos são completamente representados pela taxa de desconto. | Organizações e riscos de projeto podem variar ao longo do projeto. |
| Todos os fatores que podem afetar as saídas dos projetos e os valores dos investidores são representados pelo modelo de FCD através do VPL ou TIR. | Devido às complexidades do projeto e externalidades, pode ser difícil ou impossível quantificar todos os fatores em termos de fluxos de caixa incrementais. |

| | |
|---|--|
| | Resultados não esperados podem ser significantes e estrategicamente importantes. |
| Fatores desconhecidos, intangíveis ou imensuráveis são valorados como zero. | Benefícios importantes como ativos intangíveis ou posições estratégicas qualitativas devem ser considerados. |

Fonte: Adaptado de Mun (2006, página 79)

Um exemplo real é apresentado na obra de Dias (2014) sobre a empresa HP (Hewlett-Packard) que ajuda a esclarecer o valor embutido na flexibilidade. A HP vende impressoras e aparelhos no mercado global e, em cada país, esses produtos são customizados. Por exemplo, no Brasil o display é em português, na Argentina em espanhol. Caso contrário perder-se-ia mercado para os concorrentes locais. Antes da utilização da Teoria das Opções Reais essa customização era realizada de uma forma e depois alterou-se.

Inicialmente, a HP tinha como meta prioritária o menor custo unitário possível. Dessa forma, centralizava toda sua produção em uma fábrica para obter ganhos de escala e, assim, reduzir o custo unitário. Projetava-se a demanda para cada país e a produção seguia essa programação. Essa forma de modelar a situação é muito parecida com o FCD: projetam-se a demanda e as receitas futuras e, com base nisso, determina-se o melhor arranjo industrial a fim de reduzir o custo e maximizar o lucro.

O problema dessa abordagem é que a demanda era incerta, frequentemente sobrava estoque em alguns países e faltava em outros. Esse arranjo centralizado, apesar de possuir o menor custo como referência, não era o mais ágil e flexível para capturar as oscilações na demanda.

Para transpor tal problema a HP passou a levar em consideração a flexibilidade no desenho de seu negócio. Primeiramente o modo de fabricação dos produtos foi alterado, os displays passaram a ser modularizados e produzidos à parte, e no final eram encaixados no resto do equipamento. O equipamento continuou sendo produzido centralmente, a fim de reduzir os custos unitários, porém o módulo passou a ter sua produção descentralizada, no país em que o equipamento estivesse sendo vendido. Deste modo, impressoras que estivessem sobrando em um país poderiam ser deslocadas para países vizinhos rapidamente, onde seriam customizadas. No arranjo antigo, uma

impressora nova específica para o país vizinho teria de ser produzida desde o início em uma fábrica distante, mesmo que estivessem sobrando impressoras em países vizinhos.

Com isso, a HP deixou de perder mercado e aumentou os lucros. Na visão rígida tradicional, essa abordagem não seria a mais rentável, pois o custo unitário aumentaria devido à perda de escala, com a descentralização de parte da produção e também devido à criação de um módulo e sua interface de encaixe. Contudo, o novo arranjo de negócio incorporou flexibilidade no negócio da HP e isso mais que compensou o aumento do custo unitário de fabricação. A incerteza tornou a flexibilidade mais importante que o custo unitário de fabricação.

Diante disso, fica clara a esquematização de Dias (2014), segundo a qual uma Opção Real tem mais valor quanto maior a incerteza (probabilidade de receber nova informação relevante) e quanto maior a flexibilidade (capacidade de reagir às mudanças de cenário). A Figura 1 abaixo ilustra tal afirmativa:

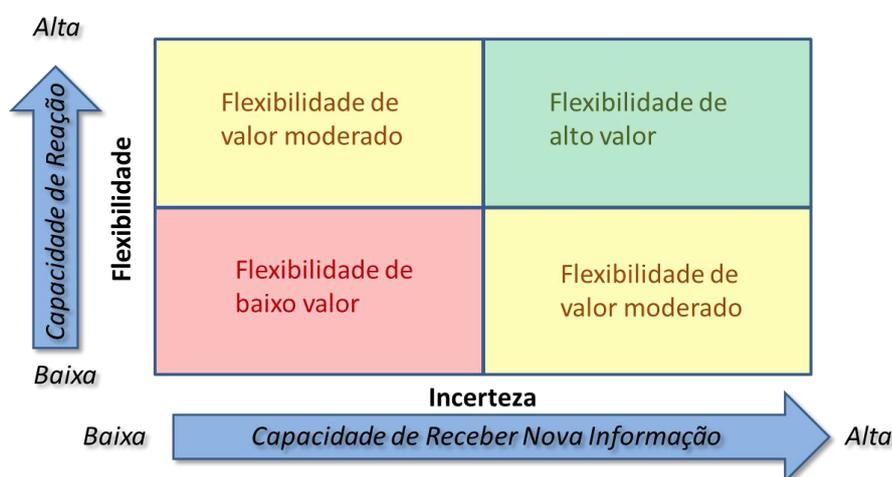


Figura 2 - Valor da Flexibilidade: Incerteza e Capacidade de Reagir

Fonte: adaptado de Dias (2014, página 75).

As situações de negócio de maior valor de Opções Reais são as que estão no quadrante superior à direita, tendo alta incerteza e capacidade de reação diante da mesma. No caso da HP, a incerteza era alta, mas inicialmente a capacidade de reagir era baixa. Com a mudança do arranjo, a HP aumentou sua capacidade de reação, aumentando o valor da sua Opção Real.

CAPÍTULO II: OPÇÕES FINANCEIRAS

Além da apresentação do método do FCD, também se faz necessária a apresentação dos conceitos básicos sobre opções financeiras, uma vez que as fórmulas das opções reais derivam diretamente das mesmas.

As opções financeiras pertencem a um grupo mais amplo denominado de derivativos. O mercado de derivativos é composto por contratos a termo, contratos futuros, *swaps* e opções. Os derivativos surgiram devido à imprevisibilidade dos preços de ativos na economia, a fim de se proteger (*hedge*) contra possíveis oscilações.

As opções se caracterizam pelo seu detentor (titular) possuir o direito de comprar o ativo objeto (opção de compra) ou vender o ativo objeto (opção de venda) a um determinado preço (preço de exercício) e dentro de um determinado período (data de exercício), pagando um preço antecipado (prêmio) por esse direito. Existe uma distinção nas opções em relação aos períodos em que se podem exercer os direitos. As opções do tipo americanas podem ser exercidas a qualquer momento até a data de exercício, enquanto as opções do tipo europeias podem ser exercidas somente na data de exercício.

Nos contratos de opções negociados no mercado financeiro destacam-se três tipos de participantes. Os *hedgers* que buscam proteção com relação a movimentos adversos nos preços de determinados ativos, os arbitradores que procuram obter um lucro sem riscos realizando transações simultâneas de um mesmo ativo em dois ou mais mercados e os especuladores que apostam na alta ou queda dos preços.

O ativo objeto, que é negociado pela opção, pode ser de diversos tipos como *commodities*, taxas de câmbio, índices, ações, entre outros. Existem diversas estratégias que envolvem a combinação de duas ou mais opções que possibilitam a administração do risco de perdas desfavoráveis. Contudo, estas questões específicas não serão abordadas nesse trabalho.

As opções que serão vistas neste capítulo são opções financeiras, que foram as primeiras a surgirem e é necessário seu entendimento para se adentrar na teoria das opções reais, no capítulo seguinte.

II.1 CONCEITOS BÁSICOS

Para que se possa precificar o valor das opções é necessário a determinação das seguintes variáveis básicas:

- Preço do ativo objeto (S): preço de mercado do ativo sobre o qual a opção de compra ou venda é baseada;

- Preço de exercício, ou *strike price*, (K): preço pelo qual o titular possui o direito de comprar, no caso de uma opção de compra, ou de vender, no caso de uma opção de venda, o ativo objeto da opção.
- Prazo até o vencimento (t): fração anual até o vencimento da opção.
- Volatilidade (σ): movimento que sofre o ativo objeto com o decorrer do tempo. Indica a incerteza ou risco proporcionado pelo retorno do ativo.
- Taxa de juros (r): taxa de juros que influi na determinação do preço da opção.
- Dividendos (D): dividendos que podem ser pagos pelo ativo objeto.

II.2 TIPOS DE OPÇÕES FINANCEIRAS

As opções lançadas no mercado financeiro podem ser de dois tipos:

- Opção de compra (*Call*): o titular (comprador) possui o direito, e não a obrigação, de comprar do lançador (vendedor), exigindo que este lhe venda, até a data de vencimento, uma quantidade determinada do ativo objeto a um preço previamente estipulado (preço de exercício).
- Opção de venda (*Put*): o titular (comprador) possui o direito, e não a obrigação, de vender ao lançador (vendedor), exigindo que este lhe compre, até a data de vencimento, uma quantidade determinada do ativo objeto a um preço previamente estipulado (preço de exercício).

Ainda em relação as opções de venda e de compra, existem duas categorias:

- Opções Americanas: podem ser exercidas a qualquer momento, desde o momento em que foram adquiridas até o vencimento.
- Opções Europeias: somente podem ser exercidas na data do vencimento.

As opções também podem ser classificadas em relação a probabilidade de exercício:

- *In-the-money* (dentro do dinheiro): quando o preço de exercício da opção é maior do que o preço do ativo no caso de uma *put* e o caso contrário em uma *call*.
- *At-the-money* (no dinheiro): quando a opção de compra ou de venda tem o preço de exercício igual ao preço da ação.

- Out-of-the-money (fora do dinheiro): quando o preço de exercício é maior do que o preço à vista em uma opção de compra ou quando o preço de exercício é menor do que o preço à vista em uma opção de venda.

De forma matemática, pode-se representar o valor de uma opção financeira de compra pela seguinte equação:

$$F(T) = \text{Máximo} [V(T) - K; 0]$$

Equação 4 - Fórmula do valor de uma opção financeira de compra

Onde, $V(T)$ é o valor do ativo objeto na data de expiração (T), K é o preço de exercício da opção. Pode-se utilizar como exemplo a opção de compra de uma ação de uma empresa daqui a 2 meses (data de expiração T), pelo valor de R\$ 40,00 (preço de exercício K). Passados dois meses, a ação dessa empresa está cotada na bolsa de valores pelo preço de R\$ 50,00 (esse é o $V(T)$). Assim, o valor da opção é de R\$ 10,00 ($V(T) - K = 50 - 40 = 10$). O gráfico abaixo representa os diversos payoffs (retornos) da opção em função do valor do ativo objeto.

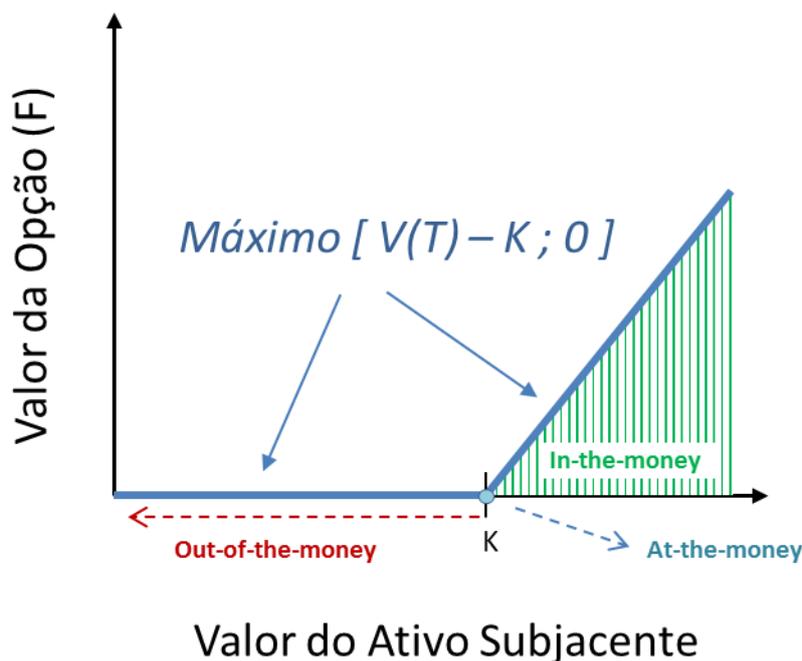


Figura 3- Payoffs (retornos) de uma opção financeira de compra

Fonte: elaboração própria com base em Dias (2014, página 106)

Pelo gráfico, fica fácil perceber que para qualquer valor do ativo objeto, $V(T)$, maior que o preço de exercício – K – da opção financeira, ela possuirá valor. Caso o valor do ativo esteja abaixo do preço de exercício, a opção não apresentará valor.

Já o valor de uma opção financeira de venda pode ser representado pela seguinte fórmula matemática:

$$F(T) = \text{Máximo} [K - V(T); 0]$$

Equação 5 - Fórmula para cálculo do valor de uma opção financeira de venda

De forma didática, pode-se exemplificar esse caso com a opção de venda de uma ação daqui a dois meses, pelo valor de R\$ 30,00. Passados os dois meses, o valor do ativo objeto está sendo cotado na bolsa de valores a R\$ 40,00. Não vale a pena o exercício da opção, visto que é possível vender a ação na bolsa por um valor maior. Graficamente uma opção financeira de venda é representada da seguinte forma:

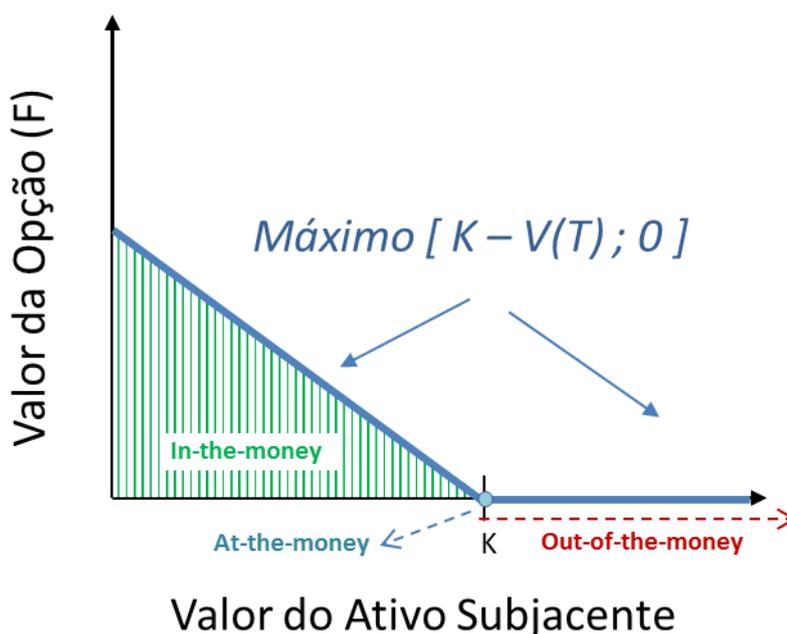


Figura 4 - Payoffs (retornos) de uma opção financeira de venda

Fonte: elaboração própria com base em Dias (2014, página 110)

II.3 POSIÇÃO EM OPÇÕES

Em um contrato de opção existem duas pontas, uma representada pelo lançador e outra pelo comprador e, de acordo com o tipo de opção, estes assumem uma posição comprada ou vendida. A posição é uma expressão utilizada no mercado financeiro. Quando se está em uma posição comprada se ganha com a subida do preço do ativo objeto, por analogia uma posição vendida se ganha com a queda do preço do ativo objeto. Existem quatro tipos de posições em opções:

- Posição Comprada em Call: Posição assumida pelo titular da *Call* que irá ganhar com o aumento de preço do ativo objeto acima do preço de exercício;

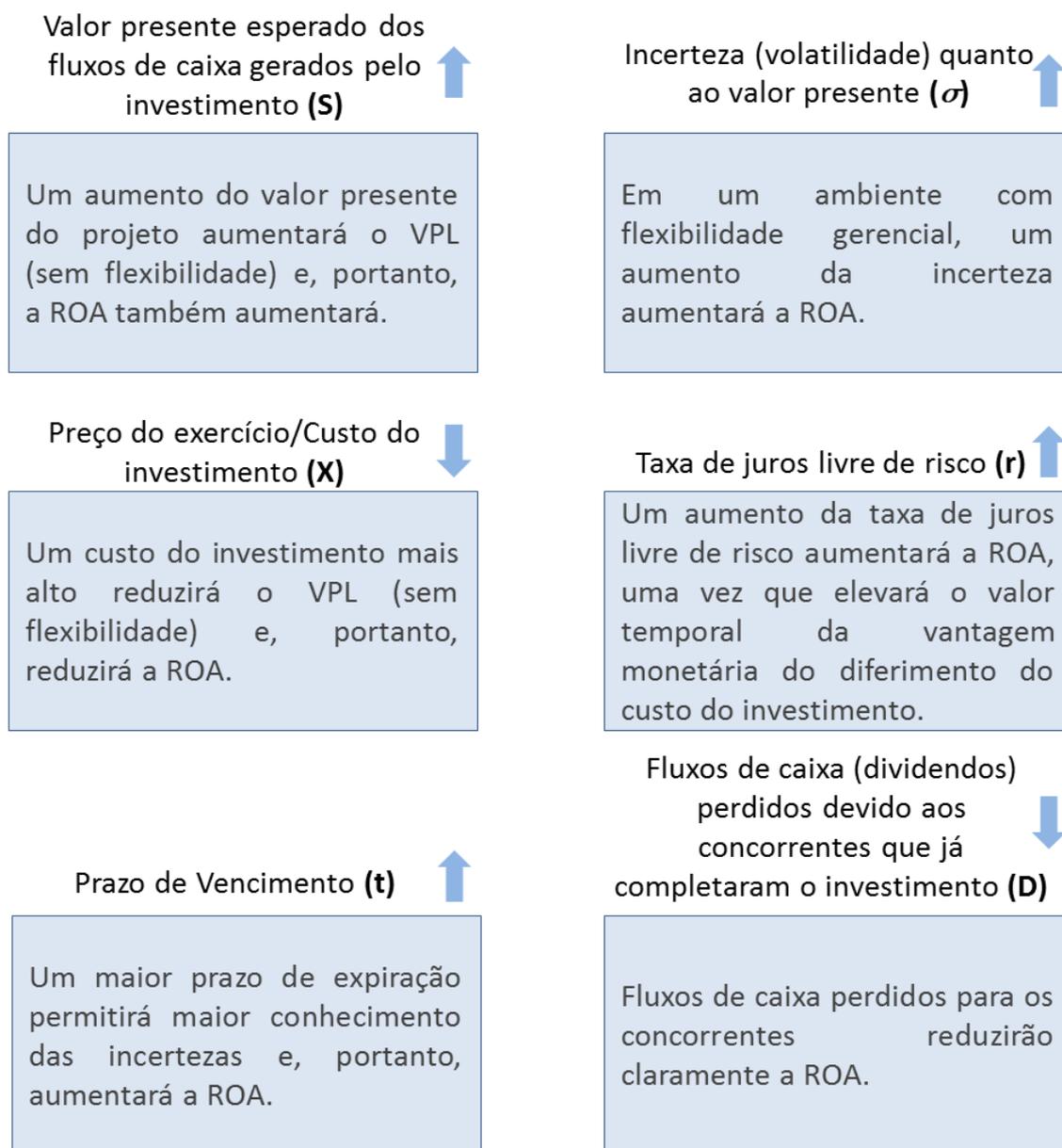
- Posição Vendida em Call: Posição assumida pelo lançador que irá ganhar com a queda do preço do ativo objeto abaixo do preço de exercício;
- Posição Comprada em Put: Posição assumida pelo lançador que irá ganhar com o aumento do preço do ativo objeto acima do preço de exercício;
- Posição Vendida em Put: Posição assumida pelo titular da *Put* que irá ganhar com a queda do preço do ativo objeto abaixo do preço de exercício.

II.4 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS

No livro de Copeland e Antikarov (2001) são apresentadas seis variáveis e suas influências nos valores das opções:

- Preço do Ativo Objeto (S): Se o valor do ativo objeto aumenta, o mesmo ocorre com o valor de opção de compra de uma opção.
- Preço de Exercício (X): Se o preço de exercício de uma opção aumenta, o valor da opção de compra diminui e o valor da opção de venda aumenta.
- Prazo até o Vencimento (t): Com o aumento da maturidade, o valor da opção também aumenta.
- Volatilidade (σ): A volatilidade do ativo objeto aumenta a probabilidade de seu valor estar acima do preço de exercício, assim aumentando as chances de se obter um retorno com a opção. Consequentemente o valor da opção também aumenta.
- Taxa de Juros (r): Com o aumento da taxa de juros livre de risco, o valor da opção também se eleva.
- Dividendos (D): O pagamento de dividendos representa um fluxo de caixa perdido, logo reduzirá o valor da opção.

De forma esquematizada:



Fonte: Adaptado de T. Copeland, T. Koller e J. Murrin, Valuation: Measuring and Managing the Valuation of Companies, 3ª edição, Nova York, John Wiley & Sons, 2000, página 685.

Figura 5 - Influência de Seis Variáveis no Valor das Opções Reais

CAPÍTULO III: TEORIA DAS OPÇÕES REAIS

Em alguns projetos – PD&I, investimentos em capacidade, expansão geográfica são os mais usais – aparecem investimentos em multiestágios e, a cada etapa, a empresa poderá avançar ou se retirar depois de conhecer mais informações. Estes projetos apresentam opções – opções reais, em contraponto as opções financeiras que são relativas à ativos financeiros – em que os decisores possuem o direito de investir.

Conforme Copeland e Antikarov (2001), uma opção real é o direito – não uma obrigação – de executar uma ação (Exemplo: expandir, contrair, abandonar...) sobre um ativo real a um determinado custo que se denomina preço de exercício, por um período determinado (maturidade da opção). O agente executor dessa opção pode ser um gerente, um consumidor, um regulador/planejador social ou qualquer outro tomador de decisão. Já o ativo real pode ser uma oportunidade de investir num projeto ou num ativo já existente (DIAS, 2014).

O principal diferencial da teoria das opções reais é que ela possibilita a valoração das flexibilidade para reagir a eventos incertos, ou seja, ela preenche a lacuna deixada pelo fluxo de caixa descontado, o que não acontece com o VPL, servindo, portanto para avaliar ativos reais (projetos de investimento). O ponto central de análise da TOR é a valoração do resultado líquido do projeto, considerando incertezas (SAITO et al., 2010).

Brandão (2002) complementa que, para um projeto possuir valor para opções reais, deve ter imbutido três características: o investimento necessário deverá ser total ou parcialmente irreversível, ter flexibilidade que admita adiamento, suspensão, ampliação e abandono, e, também, que os fluxos de caixa futuros sejam incertos.

III.1 HISTÓRIA DAS OPÇÕES REAIS

Conforme relata Brach (2003), o comércio de opções sobre ativos reais é mais antigo que as transações envolvendo dinheiro. Na Gênese, em 1728 A.C., é relatada a história de José que recomendou ao Faraó do Egito que investisse em grãos depois de interpretar os sonhos dele. Prevendo que iria ocorrer uma seca devastadora por sete anos após igual período de fartura, José recomendou que a melhor solução seria exercer a opção e comprar todos os grãos agora durante os sete anos de fartura a fim de salvar o Egito dos sete anos de fome. O risco nesse cenário era de a população do Egito morrer de

fome, e a opção real disponível era proteger-se desse risco fazendo estoque de grãos. O preço para exercer a opção era o de criar containers para armazenar os grãos.

Aristóteles, no primeiro livro da sua obra sobre Política, narra a história de Thales (meados da década de 620 A.C. à 546 A.C.), um famoso filósofo antigo. Por meio de seus conhecimentos astronômicos e meteorológicos, Thales previu uma excelente colheita de azeitonas com nove meses de antecedência. Com isso, ele realizou diversos contratos que garantiam a ele o aluguel futuro de prensas de oliva pagando uma pequena taxa. O risco que Thales corria era da incerteza da próxima colheita: se fosse ruim haveria pouca demanda pelas prensas e ele não conseguiria alugá-las, ficando com o prejuízo do pagamento antecipado das taxas. Ou seja, Thales adquiriu uma opção de compra, o custo de aquisição foi a taxa paga, e caso a colheita fosse ruim, ele não iria exercer a opção de alugar as prensas de oliva. A próxima colheita veio extremamente farta - como Thales previu -, permitindo o aluguel das prensas por altos preços, enquanto o filósofo havia pago apenas uma pequena taxa para ter o direito de exercer essa opção.

No Japão, durante a era de Tokugawa, por volta de 1600, já existia o comércio de opções de compra sobre o arroz. Os comerciantes compravam cupons de nobres japoneses que lhes davam o direito de adquirir o arroz das plantações. Se houvesse alguma mudança na necessidade antecipada pelo arroz, os comerciantes eram livres para comercializar cupons no Shogunato, um mercado centralizado.

Ainda nessa época, na década de 1630, houve um forte comércio de opções reais de tulipas entre holandeses de classe média. As tulipas foram introduzidas nos Países Baixos no século XVII, trazidas da Turquia. Suas flores passaram a ser muito procuradas por sua beleza, mas acessíveis apenas aos mais abastados financeiramente. As tulipas tornaram-se rapidamente um bem escasso, com a demanda superando em grande escala a oferta, aumentando ainda mais o status dos que as possuíam. Tempo e clima imprevisíveis tornavam as colheitas incertas. Por conta disso, surgiu o mercado futuro de tulipas. As pessoas realizavam contratos que lhes forneciam o direito de comprar tulipas da próxima colheita por um determinado preço, quando os bulbos ainda estavam no chão e não haviam flores. Se as colheitas futuras fossem ruins, o preço das tulipas iria subir, fornecendo aos detentores dos contratos o direito de comprá-las a um preço fixado previamente, vendê-las ao preço de mercado e embolsar a diferença. Os contratos de tulipas não eram negociados apenas na Holanda, mas também na Inglaterra. Os preços das tulipas escalaram rapidamente para um patamar muito alto (aumento de vinte vezes em janeiro de 1637) e, em fevereiro de 1637, a bolha das tulipas estourou. Como o preço

estava muito alto, as pessoas começaram a vendê-las, gerando uma avalanche de ofertas de venda, acarretando a primeira quebra de mercado da história.

Em 1668, um pouco depois da abertura da Bolsa de Amsterdã, iniciou-se o "comércio de tempo", um termo da época para opções e contratos futuros. Nos Estados Unidos, um comércio formalizado de opções e futuros começou apenas na metade do século XIX. A Câmara de Comércio de Chicago, o primeiro mercado formal de futuros e opções, abriu em 1848 e iniciou a comercialização desses tipos de contrato em 1870.

A negociação da primeira opção de ações ocorreu no mesmo ano da publicação do artigo de Black-Scholes (1973). Nele, Black e Scholes apresentam uma fórmula matemática que calculava o preço de uma opção de compra de uma ação. A publicação dessa fórmula facilitou o crescimento do mercado de opções e tornou-se a base da valoração e precificação. Em 1975, outras Bolsas começaram a oferecer opções de compra e em 1977 iniciou-se a comercialização de opções de venda.

Com a evolução do comércio de opções financeiras, pesquisadores começaram a enxergar opções nos ativos das empresas. Stewart Myers foi o pioneiro na formulação do conceito de que investimentos geram opções reais e cunhou o termo 'Opções Reais' em 1977. O autor argumentou que a valoração de projetos de investimento utilizando o tradicional método do Fluxo de Caixa Descontado (FCD) ignora o valor das opções que surgem em projetos com incerteza e risco.

Depois disso, Pindyck, na obra "Irreversibilidade, Incerteza e Investimento" (1989), expandiu a noção de opções de crescimento introduzindo o conceito de irreversibilidade na equação. O FCD não reconhece a irreversibilidade como um custo, o custo de oportunidade de o dinheiro ser investido e o custo de se perder flexibilidade ao realizar investimentos irreversíveis. Existe um valor ao deixar opções abertas (não as exercer) ou adiar o seu exercício até que mais informações estejam disponíveis. Dixit e Pindyck, em "Investimento sob incerteza" (1994), aprofundaram ainda mais esse conceito na obra "Investimento sobre Incerteza".

III.2 PERCEPÇÃO DO MERCADO

No artigo de Copeland e Tufano (2004) é descrita uma pesquisa – publicada em 2001 por John Graham e Campbell Harvey ("A teoria e prática de finanças corporativas: evidências de campo", 1999) – que 27% dos entrevistados, dentro de um

universo de 4.000 CFOs (*Chief Financial Officer*), afirmaram “utilizar ou quase sempre utilizar” algum tipo de opção para avaliar e decidir sobre investimentos.

A tabela abaixo resume os percentuais das técnicas e indicadores utilizados pelos CFOs. A gradação da pesquisa foi de 0 a 4, sendo 0 igual a “nunca utilizar” e 4 igual a “sempre”.

| Indicador/Técnica | %“sempre” ou “quase sempre” | Média |
|--|------------------------------------|--------------|
| Taxa Interna de Retorno | 75,61 | 3,09 |
| Valor Presente Líquido | 74,93 | 3,08 |
| Tempo de Retorno Nominal | 56,74 | 2,53 |
| Taxa de Vedação (hurdle rate) | 56,94 | 2,48 |
| Análise de Sensibilidade | 51,54 | 2,31 |
| Abordagem de Múltiplos de Lucro | 38,92 | 1,89 |
| Tempo de Retorno Descontado | 29,45 | 1,56 |
| Opções Reais | 26,59 | 1,47 |
| Taxa de Retorno Contábil | 20,29 | 1,34 |
| Simulação ou Value at Risk | 13,66 | 0,95 |
| Valor Presente Ajustado (APV) | 10,78 | 0,85 |
| Índice de Lucratividade | 11,87 | 0,83 |

Tabela 2 - Técnicas de Análise Econômica usadas "sempre" ou "quase sempre" por empresas dos EUA e do Canadá

Fonte: elaboração própria com base Dias (2014, página 144).

No mesmo artigo é apresentado também um grande número de decisores insatisfeitos com esta ferramenta. Os dados são de uma pesquisa realizada pela Bain & Company (2001) em que dos 451 executivos que tentaram utilizar a abordagem pela teoria das opções reais, 30% desistiram de utilizar no mesmo ano. Os principais motivos apresentados para desistência são relativos a conhecimentos técnicos.

Como muitos executivos pontuaram, as opções embutidas em decisões gerenciais são muito mais complexas e ambíguas que as opções financeiras. Na concepção deles seria arriscado reduzir a complexidade presente adotando modelos de opções padrões, como o modelo Black-Scholes-Merton. Aliado a este fator, rememoram os tempos do colapso da alta tecnologia no início da década de 2000 – conhecido como

bolha ponto com – no qual houve um exagero nas perspectivas de crescimento das empresas, criando uma descrença quanto a esta ferramenta de avaliação.

No artigo de Brandão, Dyer e Hahn (2005) novamente aparece a visão do uso prático de opções reais pelo mercado quando os autores destacam que o seu uso na indústria ainda é muito limitado devido a complexidade matemática desta técnica e a presença de hipóteses restritivas para que seja possível obter as soluções analíticas.

De acordo com Copeland e Tufano (2004), as críticas são justas ao modelo de opção mais utilizado – Modelo Black-Scholes-Merton – para avaliação de investimentos. Porém tão apropriado quanto as críticas, é indicar a fonte dessas dificuldades técnicas: Não é apenas o modelo Black-Scholes-Merton que efetivamente captura as complexidades e a iteratividade das decisões. Ainda neste artigo, Copeland e Tufano (2004) afirmam que o Modelo Binomial captura as flexibilidades existentes nas opções reais e não apresenta os problemas e dificuldades usualmente relatados pelos decisores. Cabe destacar a colocação de que a simples substituição para o Modelo Binomial não acarretaria em desaparecimento de todos os problemas, mas o principal deles é muito mais de gerenciamento do que de conhecimento técnico.

É apontado como a principal discrepância entre os valores teóricos e realizados de um investimento pela abordagem pela teoria das opções reais a desconexão entre como são avaliadas as opções e como elas são gerenciadas. Ao calcularem os valores das opções reais é assumido que o detentor irá sempre tomar a decisão ótima baseado em análises racionais das informações que forem conhecidas. Todavia, no momento que o detentor não tomar a decisão ótima, a opção se tornará menos valiosa.

Novamente aparece em destaque a dificuldade das opções reais em atrair sua utilização pelos decisores, desta vez no artigo de Putten e Macmillan (2004). Os autores apresentam como principais argumentos para pequena adoção por parte dos CFOs a superestimação do valor de projetos sobre incerteza. De acordo com os autores, esta relutância se dá pela utilização de ferramentas de avaliação de opções financeiras em projetos complexos de empresas. Estas ferramentas obrigam os gestores a realizarem muitas simplificações e com isso não conseguem capturar completamente os riscos e oportunidades existentes. Não obstante as empresas que apoiam suas avaliações de projetos apenas pelo método do VPL acabam subestimando o valor de seus projetos. Por conseguinte acabam não investindo o suficiente em projetos incertos mas com oportunidades extremamente promissoras.

Fica claro uma certa descrença por parte dos gestores na utilização da teoria das opções reais para avaliação de investimentos devido aos diversos fatores citados pelos próprios autores em seus artigos. Contudo, é recorrentemente ressaltada a importância de se adotar a abordagem pela teoria das opções reais para capturar as flexibiidades existentes em alguns projetos com incerteza e as subestimações existentes ao não considerar tais flexibilidades.

Pela análise dos artigos, pode-se destacar então a importância de se adotar um *framework* com um melhor *fit* com as necessidades dos gestores. Deste modo é fundamental que esse seja capaz de capturar eficazmente as flexibilidades inerentes ao projeto de forma clara aos gestores, facilitando a compreensão dos mesmos, proporcionando um maior surgimento de *insights* na valoração e no próprio decorrer das decisões a serem tomadas.

III.3 PARTICULARIDADES OPÇÕES REAIS X OPÇÕES FINANCEIRAS

Neste momento é relevante destacar as principais diferenças presentes entre as opções reais e as financeiras para uma melhor compreensão e distinção dos dois tipos de opções.

Primeiramente as opções financeiras possuem como ativo objeto um valor mobiliário (por exemplo, ação ou um título) enquanto que em opções reais este ativo objeto é algo tangível como um projeto. Por conta disto, em opções financeiras se torna mais fácil a estimativa dos parâmetros envolvidos – como a volatilidade do ativo objeto – por apresentar dados históricos ou ativos semelhantes. O mesmo não acontece com opções reais que geralmente são projetos inovadores.

Outra característica apontada por Copeland e Antikarov (2001) que as diferencia é que grande parte das opções financeiras são emitidas por agentes secundários e não pelas empresas em cujas ações se alicerçam. Por isso, o agente que a emite não tem influência sobre o que a empresa faz e nenhum controle sobre o preço da ação. Já em opções reais a gerência possui o controle do ativo que a opção se alicerça.

Em seu artigo Copeland e Tufano (2004) apresentam duas diferenças básicas entre as opções reais e financeiras. Uma delas é que as informações necessárias para avaliação das opções financeiras estão prontamente disponíveis, diferentes das opções reais. A opção de compra de uma ação, por exemplo, permite que o detentor realize suas

decisões com base no preço corrente da ação no mercado. Porém nas opções reais, o valor do ativo objeto não é tão claro, como por exemplo o valor de um novo medicamento que será introduzido no mercado ou de um projeto inovador.

A segunda diferença é a clareza dos termos presentes nas opções. Em opções financeiras o direito de exercer a opção é evidente. Voltando ao exemplo da opção de compra de uma ação, o detentor possui o direito de exercer aquela opção em um preço predeterminado. Nas opções reais usualmente não é claro que o detentor possui o direito de comprar ou por quanto tempo este direito de compra irá durar. Por isso muitas das opções reais são opções compostas – uma opção sobre outra opção – em que o detentor decide se continuará o projeto.

Complementando as peculiaridades de cada uma das opções expostas anteriormente, Minardi (2004) apresenta em seu artigo uma série de problemas ao se aplicar a teoria das opções reais, em contraposto às opções financeiras:

- Opções financeiras típicas possuem vida curta, enquanto as opções reais têm vida longa;
- Enquanto opções financeiras possam ser exercidas antecipadamente sem grandes repercussões, em opções reais esta decisão é crítica;
- Opções financeiras possuem preço de exercício determinado e único. Este em opções reais - geralmente o valor do investimento no projeto - pode variar ao longo do tempo, podendo até variar de maneira aleatória.
- Opções financeiras são exclusivas do investidor, enquanto o mesmo não ocorre com opções reais, em que o grau de exclusividade depende da estrutura de mercado²;
- No caso das opções financeiras a eficiência do mercado financeiro ajusta os preços rapidamente, refletindo todas as informações correntes. No caso de opções reais, os mercados de bens e serviços geralmente não são perfeitamente eficientes, permitindo a uma

² Se o mercado for monopolista, a empresa possui exclusividade de investimento em seu setor. Se o mercado for competitivo, o direito de investimento é um bem público de toda indústria, e o valor da opção real se deteriora com o passar do tempo. Por exemplo, o setor de P&D de uma determinada empresa desenvolveu um produto inovador. O valor de se lançar esse produto hoje pode ser maior que o valor de se lançar esse produto amanhã, pois outras empresas concorrentes poderão desenvolver produtos similares. Neste caso, o valor da opção de postergar o lançamento deteriora-se com o tempo.

empresa ter ganhos acima do equilíbrio de mercado, enquanto perdurar sua vantagem competitiva.

Outra distinção importante a ser feita é entre os parâmetros que envolvem as opções. Cobb e Charnes (2004) apresentam essa comparação entre essas variáveis que influenciam as opções reais e financeiras. Estas analogias estão resumidas na tabela abaixo.

Tabela 3 - Variáveis Análogas em Modelos de Opção Financeiras e Reais

| Opções Financeiras | Opções Reais – Analogia | Fonte de Incerteza |
|--------------------------------|---|---|
| Preço da ação | Valor Presente da expectativa de fluxo de caixa do investimento | Demanda do mercado por produtos e serviços, oferta de mão-de-obra, fornecedores de material e custos. |
| Preço de Exercício | Valor Presente atual exigido do investimento em ativo real | Disponibilidade, tempo, e preço de ativos reais para ser comprado. |
| Volatilidade | Volatilidade (do fluxo de caixa) | Volatilidade exigida pelo mercado, oferta de mão-de-obra, oferta de materiais e custos, correlação do modelo de suposições. |
| Tempo para vencimento da opção | Período para o qual a oportunidade de investimento está disponível. | Ciclo de vida do produto, vantagens competitivas. |
| Dividendos | Fluxos de caixa perdem competitividade | Ciclo de vida do produto, vantagens competitivas. |
| Taxa de retorno livre de Risco | Taxa de retorno livre de Risco | Inflação, mercado, taxas de juros. |

Fonte: Adaptado de Cobb e Charnes (2004, página 120).

III.4 OS TIPOS DE OPÇÕES

Em seu livro, Copeland e Antikarov (2001) classificam as opções reais de acordo com os tipos de flexibilidades embutidas.

- OPÇÃO DE DIFERIMENTO OU DE ADIAMENTO

Representa uma opção de compra do tipo americana encontrada geralmente em projetos que existe a possibilidade de adiar o seu início. Esta opção está ligada diretamente ao conceito de *timing* do investimento. Com o decorrer do tempo é possível adicionar mais informações sobre o projeto, assim tornando possível agregar mais valor a ele, visto que com mais informações é possível tomar decisões de investimentos com maior margem de segurança.

- OPÇÃO DE ABANDONO

Formalmente é uma opção de venda americana em que se pode vender um projeto por um preço fixo. A opção de abandono, ao contrário da opção de diferimento, consiste na desistência imediata de um determinado projeto, realizando o valor de liquidação dos ativos investidos. Opções de abandono são geralmente encontradas em indústrias de capital intensivo, como aeronáutica, ferroviária, mineração e na introdução de novos produtos em mercados incertos.

- OPÇÃO DE CONTRATAÇÃO

Reduzir a dimensão de um projeto através da venda de uma fração do mesmo a um preço fixo. Esta opção é diretamente relacionada com as condições atuais do mercado e o valor esperado dos fluxos de caixa gerados. Por exemplo, caso a demanda estiver abaixo do esperado, a tendência é reduzir a escala de produção.

- OPÇÃO DE EXPANSÃO

Uma opção de compra americana em que se paga mais para aumentar um projeto. Representa o contrário da opção de contração, caso a demanda supere as expectativas de mercado, se espera que ocorra uma expansão da capacidade produtiva.

- OPÇÃO DE CONVERSÃO

Portfólios de opções de compra e venda americana que permitem trocar um(ns) custo(s) fixo(s) entre dois modos de operação ou associada a mudança tecnológica. Por exemplo, uma opção de fechar e reabrir uma fábrica.

- OPÇÃO COMPOSTA

Representa uma opção sobre uma opção (ou opções). Os investimentos em um projeto podem ser fracionados em estágios, por exemplo, fase de projeto, fase de

engenharia e a fase de construção. O detentor possui a opção de parar ou adiar o projeto ao fim de cada fase.

- OPÇÃO ARCO-ÍRIS

São as opções que apresentam múltiplas fontes de incerteza.

III.5 MODELOS DE PRECIFICAÇÃO DO PRÊMIO DE UMA OPÇÃO

Os modelos de precificação surgiram inicialmente para avaliar opções financeiras. Contudo, o potencial de avaliação desses métodos para ativos objetivos reais foi identificado e diversos trabalhos passaram a ser publicados descrevendo *cases* destas aplicações e *frameworks* para auxiliar e refinar o processo de avaliação.

Para a valoração de opções reais existem distintas abordagens que podem ser separadas de acordo com a consideração do tempo (discreto ou contínuo). Abordagens de equações diferenciais estocásticas, simulação de Monte Carlo e equações de “solução fechada” – como a fórmula de Black & Scholes – avaliam em tempo contínuo, enquanto abordagens *lattice* multinominal consideram o tempo discreto, multinominal e multiplicativo ao longo do tempo de forma a se obter uma forma de “árvore”. (MILLER E PARK, 2002).

Nessa sessão será apresentado o modelo binomial que será explorado com mais detalhes devido à utilização do mesmo no caso hipotético. O principal motivo de sua escolha é que o modelo binomial é considerado o mais intuitivo de todos os métodos numéricos e não necessitar de conhecimentos mais avançados de matemática.

Primeiramente serão analisadas as variáveis de entrada e por fim o modelo em si.

III.5.1 VARIÁVEIS DE ENTRADA

As variáveis e suas influências nos preços das opções já foram expostas no capítulo 2. Como citado anteriormente, o cálculo das variáveis nas opções financeiras é relativamente mais simples quando comparado com as opções reais. Posto isso, é importante apresentar os cálculos e as aproximações envolvidos nessas variáveis em opções reais. Nesta sessão será discutida separadamente cada uma das seis variáveis.

- VALOR DO ATIVO OBJETO SUJEITO A RISCO

Uma dificuldade da abordagem pela teoria das opções reais é determinar o valor de mercado do ativo objeto. Borison (2003) em seu artigo apresenta uma discussão

sobre as principais abordagens para o cálculo do valor do ativo objeto, explorando as dificuldades, suposições e a mecânica de cada abordagem. O autor menciona como a abordagem clássica de procurar um portfólio replicado que seja composto por ativos negociados no mercado e que tenham retornos semelhantes ao do projeto que está sendo avaliado. Uma vez que o portfólio contém investimentos transacionados em mercado, é possível obter seu valor de mercado corretamente e, assim, permitindo calcular o valor do projeto. Para tal, depois de encontrar um portfólio replicado, o mesmo deve ser escalonado até reproduzir o projeto avaliado.

Entretanto, é “(...) praticamente impossível encontrar um ativo com preço de conhecimento público que seja perfeitamente correlacionado com os do projeto em pauta.” (COPELAND E ANTIKAROV, 2001, página 51). Para tal os mesmos autores sugerem que “em lugar de procurar alternativas nos mercados financeiros, recomendamos que se use o valor presente do próprio projeto, sem flexibilidade (...)” (COPELAND E ANTIKAROV, 2001, página 51). Eles sustentam a hipótese de que o valor presente dos fluxos de caixa do projeto sem flexibilidade – que é o VPL tradicional – é a “(...) melhor estimativa não tendenciosa do valor de mercado do projeto(...)” (COPELAND E ANTIKAROV, 2001, página 48). Esta hipótese é denominada por eles de MAD (*Market Asset Disclaimer*, em português Negação do Ativo Negociado).

Perlitz *et al.* (1999) apresentam uma discussão sobre os fatores que podem tornar uma abordagem para precificar opções reais inapropriada, evidenciando que a avaliação do ativo objeto não é trivial e que, para a escolha do modelo correto, é necessária uma investigação cautelosa. Contudo, quando uma empresa utiliza a abordagem pela teoria das opções reais, os gerentes provavelmente não terão tempo hábil, ou conhecimento específico, para avaliar se as hipóteses são respeitadas. Para tornar a análise das opções reais prática, métodos mais intuitivos devem ser utilizados.

Devido à ampla utilização do VPL de projetos pelo mercado, este deveria ser considerado como o valor presente do ativo objeto das opções reais. Perlitz *et al.* (1999) e Copeland e Antikarov (2001) acrescentam que como o VPL é o método padrão utilizado pelo mercado, então é razoável assumir que utilizando a abordagem pela teoria das opções reais se chegará mais próximo do valor correto do que se utilizasse o VPL, que não considera as flexibilidades.

- PREÇO DE EXERCÍCIO

O preço de exercício em opções reais algumas vezes não é muito bem definido. No caso de processos estocásticos para o preço de exercício, a dificuldade está

em determinar qual o processo esta variável se aproxima. Em tempos discretos, geralmente, é bem definido o preço de exercício.

- PRAZO ATÉ O VENCIMENTO

Em alguns casos o prazo até o vencimento pode ser difícil de determinar. Por exemplo, Kemna (1993) argumenta que quando se está avaliando uma opção para esperar, teoricamente o prazo até o vencimento seria infinito. Mas, na realidade, este quase sempre é determinado pelo tempo que os competidores demoram para entrar no mercado.

Perlitz *et al.* (1999) faz uma separação entre opções reais exclusivas e comuns. Na primeira só o detentor possui o direito de exercer a opção. Um exemplo clássico é o caso das patentes. As opções reais comuns podem ser exercidas pelos competidores também, o que torna sua avaliação mais complicada.

Miller e Park (2002) acrescentam mais alguns fatores que podem afetar o prazo até o vencimento como: riscos de mercado, competição, mudanças tecnológicas e fatores macroeconômicos. Estas variáveis são exógenas e difíceis de serem definidas.

- TAXA DE JUROS

Para períodos curtos, esta variável é fácil de calcular; basta considerar a taxa de juros de títulos públicos com maturidade equivalente ao do projeto. Contudo, para projetos longos, a taxa de juros pode ser desconhecida ou estocástica, o que torna sua estimação um pouco mais difícil (PERLITZ *et al.*, 1999).

- VOLATILIDADE

Esta é a variável que geralmente possui maior impacto sobre o valor da opção. De acordo com Miller e Park (2002) três abordagens diferentes podem ser encontradas na literatura para estimar a volatilidade: volatilidade de ativos gêmeos, simulação de Monte Carlo e equações de solução fechada.

Como será utilizado o modelo binomial em tempo discreto, a volatilidade estará expressa nos diferentes cenários de retorno para o projeto em análise. Assumindo a hipótese de MAD (*Market Asset Disclaimer*), o ativo gêmeo será representado pelo próprio retorno do projeto.

- DIVIDENDOS

Em opções financeiras, o pagamento de dividendos reduz o valor de opções de compra e aumenta o valor de opções de venda. Na teoria das opções reais, quando se está avaliando projetos, os fluxos de caixa livres são considerados como se fossem pagamento de dividendos. Devido à dificuldade de se estimar o dividend yield, muitos autores têm como referência o zero ou uma taxa constante (DAVIS, 1998).

Para Amram e Kulatilaka (1999) existe um *trade-off* entre precisão e aplicabilidade ao se utilizar a abordagem pela teoria das opções reais. Os autores argumentam que se os gerentes não conseguirem compreender um modelo mais complexo de análise das opções reais, eles não serão capazes de tomar suas decisões, tornando, assim, a avaliação incorreta de qualquer maneira. Os autores propõem o pagamento de dividendo como percentuais dos fluxos de caixa livre.

III.5.2 MODELO BINOMIAL

O ferramental de opções reais desenvolvido por Black e Scholes e Merton era obscurecido pela pesada complexidade matemática utilizada, fazendo com que muitos executivos tivessem receio de aplicá-lo em suas empresas por não compreenderem o mecanismo por dentro do ferramental matemático.

No final da década de 1970, o professor de Finanças da Universidade de Stanford, William Sharpe, descobriu uma maneira de apresentar o modelo de opções utilizando apenas matemática elementar (abordagem *lattice*), chegando aos mesmos resultados obtidos por Black e Scholes e Merton (SHARPE, 1978). Na literatura de opções reais surgiram muitos trabalhos que desenvolveram a abordagem *lattice* (treliça), dentre elas uma se tornou bastante utilizada, a abordagem proposta por Cox, Ross e Rubinstein (1979) que serviu como base para o modelo discutido nesta sessão. Apesar de concebido para precificar opções financeiras, o modelo também é útil para modelar e apreçar opções reais.

O modelo binomial faz uso do princípio econômico da não arbitragem para apreçamento de opções e considera o tempo discreto, sendo que quando o número de intervalos tende ao infinito, o modelo aproxima-se do modelo de Black e Scholes. A ideia por trás dele é desenvolver um portfólio para replicar os retornos futuros da opção. Para isto pode-se utilizar uma abordagem do portfólio replicado sem risco, e uma abordagem probabilística neutra em relação ao risco que desconta fluxos de caixa a uma taxa livre de risco. Maiores detalhes quanto às duas abordagens se encontram no livro de Copeland e Antikarov (2001).

Como indicam os dois autores, a “(...) vantagem da abordagem neutra em relação ao risco é que as probabilidades neutras em relação ao risco permanecem constantes de nó para nó. Consequentemente, a abordagem neutra em relação ao risco é de implementação mais fácil no computador do que a abordagem do portfólio replicado.” (COPELAND E ANTIKAROV, 2001, página 652). Por conta da implementação

computacional que será realizada no caso hipotético, será utilizada a abordagem neutra em relação ao risco, mas nessa sessão serão apresentadas as duas abordagens, pois na demonstração da abordagem neutra em relação ao risco são utilizados resultados da abordagem do portfólio replicado sem risco, fazendo-se necessária a apresentação das duas abordagens para melhor compreensão.

De forma geral, o modelo binomial assume que:

- O mercado é constituído por dois ativos transacionáveis – uma obrigação e uma ação;
- O preço do ativo segue um processo multiplicativo binomial em períodos discretos (pode assumir apenas dois valores distintos no tempo, referidos como ascendente e descendente);
- A taxa de juros é constante;
- É possível emprestar ou tomar emprestado à esta mesma taxa;
- Investidores preferem mais a menos, assim aproveitam-se de oportunidades de arbitragem.

Antes da apresentação do modelo binomial pelas duas abordagens indicadas, é importante enunciar e compreender a Lei do Preço Único. Ela postula que todos os ativos ou portfólios com os mesmos resultados (retornos), em uma data futura, devem ter o mesmo preço hoje. Em um mercado sem fricções, todos os ativos idênticos devem ter o mesmo preço no mesmo instante do tempo (DIAS, 2014). Ou seja, a Lei do Preço Único é um resultado direto do princípio de não arbitragem.

As opções podem ser replicadas por um portfólio de ativos de mercado (geralmente ações) que geram um ganho sem risco. Como o retorno futuro da opção é igual ao do portfólio replicado, os dois devem possuir o mesmo preço na data atual. Com essa estratégia, é possível encontrar o preço justo da opção. Como o portfólio é sem risco, o retorno deve ser a taxa livre de risco. Caso contrário um arbitrador conseguiria lucros sem riscos, fazendo com que essas oportunidades de arbitragem desaparecessem do mercado. A taxa livre de risco (r) de uma economia geralmente é a de um título de renda fixa do governo.

O conceito de não arbitragem será demonstrado através de um exemplo utilizando a abordagem binomial.

Considere a função $V(t)$ que fornece o valor do ativo V no tempo t , sendo $V(0) = V_0$, e o valor do ativo em $t = 0$. Já em $t = 1$, o ativo pode apresentar dois valores $V^+ = uV_0$ com probabilidade p e $V^- = dV_0$ com probabilidade $1 - p$, sendo $p \in (0,1)$. As

letras u e d representam os fatores de upside e downside do ativo V (o quanto o ativo varia nos cenários de alta e baixa respectivamente). Esquemáticamente esse exemplo ficaria assim:

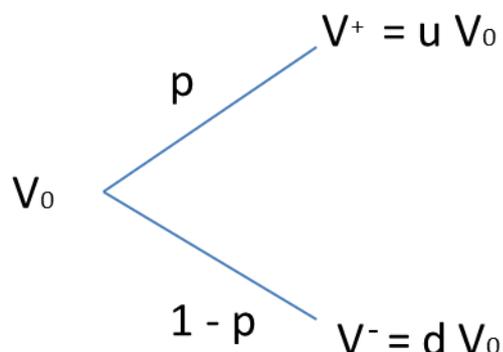


Figura 6 - Esquema binomial de um período

Fonte: Elaboração própria com base em Dias (2014, página 165).

Dada a taxa livre de risco $r \geq 0$, será provada a não arbitragem quando:

$$d < (1 + r) < u$$

Primeiramente se analisa a primeira desigualdade: $d < (1 + r)$. Caso isso não fosse verdade, ou seja, $d \geq (1+r)$, um arbitrador poderia pegar um dinheiro emprestado V_0 a taxa r , comprar o ativo V ao preço V_0 em $t=0$ e em $t=1$ e, no pior dos cenários, venderia o ativo por dV_0 . Como $d \geq (1+r)$, o especulador ganharia sem risco (se $d > r$), e no caso de $d = (1+r)$, o especulador ficaria no zero a zero, porém com a probabilidade p de o ativo V valer uV_0 em $t=1$. Ou seja, nesse caso específico é como se o arbitrador tivesse adquirido um bilhete de loteria a custo zero. Por isso, se $d \geq (1+r)$, existe espaço para arbitragem.

Para a segunda desigualdade: $(1 + r) < u$, será analisado, novamente, se o caso inverso fosse verdade, $(1 + r) \geq u$. Isso permitiria um arbitrador vender a descoberto (venda sem a posse) o ativo V em $t=0$, investir o valor advindo da venda (V_0) em um título de renda fixa, assim obtendo em $t=1$ o valor de $V_0 \cdot (1+r)$, necessitando apenas pagar $V_0 \cdot u$ pela venda a descoberto, lucrado a diferença $V_0 \cdot (1+r) - V_0 \cdot u$ sem risco. Como ficou provado, o caso de $(1 + r) \geq u$ gera oportunidade de arbitragem.

Matematicamente pode-se provar essa condição de não arbitragem da seguinte maneira: seja um portfólio (ϕ) de custo inicial igual a zero (compra-se um ativo com a venda a descoberto de outro ativo): $\phi(0) = \alpha V(0) + \beta B = 0$. Onde α e β são números reais que representam as quantidades do ativo V e do título de renda fixa sem risco B .

$$\phi(0) = \alpha V(0) + \beta B = 0 \rightarrow \beta = -\alpha V(0) / B$$

Em $t=1$, o título valerá $B(1+r)$ e o ativo V valerá $V(1)$. Logo, $\phi(1) = \alpha V(1) + \beta B(1+r) \rightarrow \phi(1) = \alpha V(1) + [-\alpha V(0) / B * B * (1+r)] = \alpha [V(1) - V(0) * (1+r)]$

Como $V(1)$ pode assumir dois cenários, em $t=1$ o portfólio (ϕ) pode assumir os valores V^+ e V^- . Assim, também existem dois cenários para o portfólio em $t=1$:

$$\Phi^+(1) = \alpha [u V(0) - V(0) * (1+r)] \rightarrow \Phi^+(1) = \alpha V(0) [u - (1+r)]$$

$$\Phi^-(1) = \alpha [d V(0) - V(0) * (1+r)] \rightarrow \Phi^-(1) = \alpha V(0) [d - (1+r)]$$

Para realizar arbitragem, deve-se encontrar um α que faça com que não haja perda em nenhum dos dois cenários e ganho em pelo menos um deles. Porém, ao se analisar as equações de $\Phi^+(1)$ e $\Phi^-(1)$, percebe-se que não existe nenhum valor de α que faça isso. Pois se $\alpha > 0$, a condição $(1+r) < u$ faz com que $\Phi^+(1) > 0$. Porém $d < (1+r)$ faz com que $\Phi^-(1) < 0$. Já se $\alpha < 0$, a condição $(1+r) < u$ faz com que $\Phi^+(1) < 0$ e $d < (1+r)$ faz com que $\Phi^-(1) > 0$. E quando $\alpha = 0$, $\Phi^+(1) = \Phi^-(1) = 0$.

Como se pode perceber, para qualquer escolha de α , não existe espaço para arbitragem quando $d < (1+r) < u$.

III.5.2.1 Método do Portfólio sem Risco

Demonstrada a Lei do Preço único, partir-se-á para a explicação do método do portfólio sem risco. Como o nome sugere, ele consiste em construir um portfólio sem risco, ϕ , formado por uma combinação linear entre o derivativo F e o ativo básico V da seguinte forma: $\phi = F - n V$, onde n é escolhido de forma a tornar o portfólio sem risco (como se fosse um título de renda fixa com um retorno futuro conhecido). Por conta disso, a taxa de desconto adequada para calcular o valor presente desse portfólio é a taxa livre de risco. Sabendo o valor do ativo básico V hoje ($t=0$) e o valor presente do portfólio todo, o valor da opção sai por diferença. Ou seja, o método do portfólio sem risco baseia-se na premissa de não arbitragem.

Como será visto posteriormente em um exemplo, esse método clarifica a resolução do problema que desafiou a academia antes de Black e Scholes e Merton, que é o cálculo do valor presente da opção F . O valor futuro da opção (valor na data de exercício) é de cálculo simples, uma vez que o valor da opção F é função do valor do ativo V , dado V , o valor de F é determinado. O problema era como trazer esse valor de F que está numa data futura para a data presente ($t=0$); como calcular a taxa de desconto da opção.

Pela teoria tradicional do CAPM, utilizar-se-ia o cálculo do prêmio de risco da opção F e esta seria trazida a valor presente pela taxa de desconto ajustada ao risco da opção F. Como a opção F está em função de V, o risco de F está vinculado ao risco de V. No entanto, o risco de F é diferente do risco de V. Dias (2014) nos fornece um exemplo simples para ilustrar essa diferença: considerando uma opção de compra europeia sobre um ativo V, o valor dela no vencimento será $F(V) = \text{Máx} [V - K , 0]$. Seja o preço de exercício (K) de 80 e o ativo básico V, que hoje ($t=0$) vale 100 e que em $t=T$ pode valer $V^+ = 110$ (com 50% de chance) ou $V^- = 90$ (também com 50% de chance). Para se comparar os riscos do ativo V e da opção F deve ser utilizado o coeficiente de variação (desvio-padrão dividido pelo valor esperado). Os cálculos estão na figura abaixo:

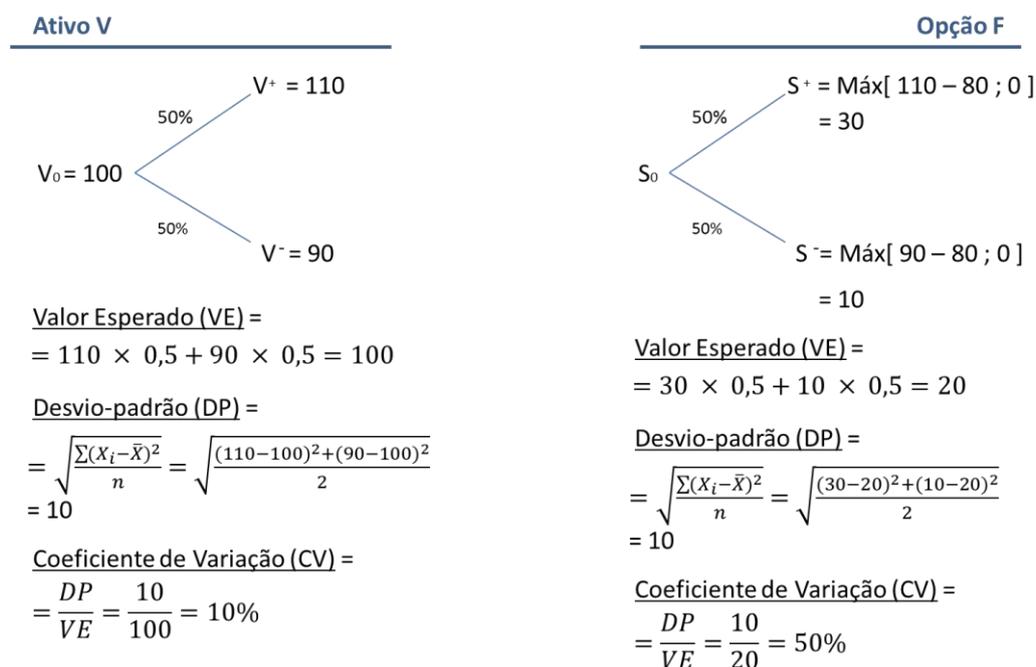


Figura 7 - Cálculo dos CV de um ativo de risco V e uma opção de compra europeia do ativo V

Fonte: elaboração própria

Como se pode perceber, o coeficiente de variação da opção é cinco vezes o do ativo básico subjacente V. Ou seja, quando o ativo V varia x%, a opção de compra sobre ele varia y%, sendo $y\% > x\%$. Por conta disso a taxa de desconto ajustada ao risco da opção F não é igual a taxa de desconto do ativo V. Conforme nos ensina Dias (2014), usar a mesma taxa de desconto de V para F era um erro comum antes dos artigos seminais de Black e Scholes e Merton em 1973.

Depois da demonstração acima em que se prova que se deve utilizar taxas de desconto diferentes para o ativo V e a opção F, será considerado agora um caso simples

para exemplificar o erro que acontece ao se utilizar a taxa ajustada do ativo V para descontar o valor futuro da opção F .

Suponha o valor atual ($t=0$) de um projeto sendo $V_0 = 100$ e, em $t=1$, este podendo assumir dois valores $V^+=180$ e $V^-=60$, a taxa livre de risco $r = 8\%$ a.a. enquanto as probabilidades dos dois cenários são 50% respectivamente. O objetivo é calcular o valor atual ($t=0$) de um seguro sobre esse projeto que garanta, em qualquer cenário, uma riqueza de 180. Ou seja, esse seguro equivale a uma opção de venda, cujo preço de exercício vale 180.

No cenário de subida V^+ , o preço do seguro S vale zero, pois $S = \text{Máx} [V - K, 0]$. Em V^+ essa equação ficaria como $S = \text{Máx} [180 - 180, 0] = 0$. Já no cenário de descida V^- , o valor do seguro S será $S = \text{Máx} [180 - 60, 0] = 120$.

A taxa ajustada ao risco do projeto V é a taxa de retorno esperado do mesmo que é: $\mu = (180*0,5 + 60*0,5)/100 - 1 = 120/100 - 1 = 20\%$.

Representando esquematicamente:

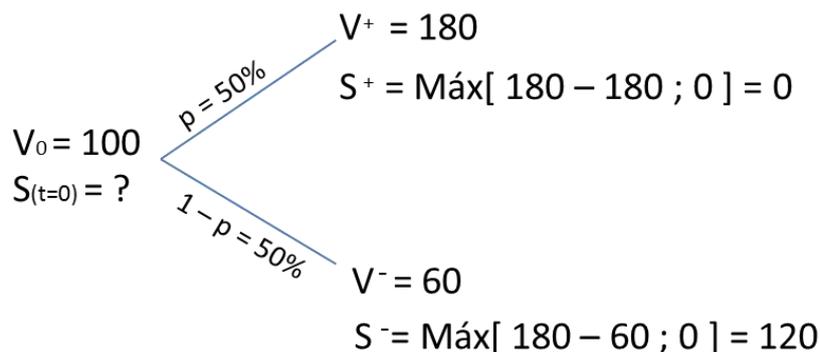


Figura 8 - Exemplo de um seguro total de um projeto

Fonte: elaboração própria com base em Dias (2014, página 171).

Ao se utilizar a taxa de retorno ajustada ao risco, μ , de 20% para calcular o valor presente do seguro $S(t=0)$ será visto que se comete um erro:

$$S(t=0) = (0,5*0 + 0,5*120)/(1 + 0,2) = 50$$

Para se perceber que esse valor está incorreto, basta se ter em mente que esse portfólio constituído pelo projeto é sem risco, ou seja, o retorno deve ser igual à taxa livre de risco. Caso contrário realizar uma arbitragem seria possível. Usando a taxa de retorno ajustada ao risco de 20%, o valor do portfólio hoje ($t=0$) é menor do que o valor atual de um título de renda fixa com o mesmo retorno no futuro. Calculando o valor presente dos dois casos:

Valor Presente do Portfólio usando $\mu = 20\%$: $S(t=0) + V_0 = 150$

Valor Presente de um título de renda fixa com $r = 8\%$: $180/(1 + 0,08) = 166,7$.

Observe-se que os dois valores presentes deveriam ser iguais devido a Lei do Preço Único, visto que em $t=1$ os dois valores futuros são iguais a 180. Isso abre oportunidade para arbitragem, isto é, pegando emprestado o valor 150 a uma taxa de 8% e comprando o portfólio que vale 150 em $t=0$. Em $t=1$, o valor do portfólio será 180 (não há risco) e o custo do dinheiro financiado será $150 * 1,08 = 162$, ou seja, o arbitrador obteria um lucro de $180 - 162 = 18$ sem risco. Esse ganho de lucro sem risco iria ser eliminado em um mercado com concorrência, ou seja, o valor do presente do portfólio na margem seria igual ao valor presente do título de renda fixa.

Qual é a taxa de desconto a ser utilizada para trazer a valor presente a opção F, então? O grande problema é que ela varia com o valor do ativo básico e com o tempo, tornando-se um problema extremamente complexo. No entanto, as abordagens do portfólio replicado sem risco, e da probabilidade neutra em relação ao risco contornam o problema do cálculo da taxa de desconto da opção F.

Voltando ao exemplo anterior, percebe-se que se deve calcular o valor presente do portfólio utilizando-se a taxa livre de risco (no caso do exemplo $r = 8\%$) para que esse iguale-se ao valor presente da renda fixa. O cálculo correto seria:

Valor presente do Portfólio = $(0,5*180 + 0,5*180)/(1+0,08) = 166,7$, ou seja, igual ao valor presente do título de renda fixa que possui o mesmo valor futuro ($VF=180$) em $t=1$.

Como V_0 é conhecido ($V_0 = 100$), por diferença pode se calcular o valor do seguro hoje ($S(t=0)$):

$$S(t=0) = 166,7 - V = 166,7 - 100 = 66,7$$

O valor do seguro hoje é 66,7 e não 50, que foi obtido usando a taxa de desconto incorreta. Perceba-se que o valor do seguro foi calculado utilizando-se apenas o valor corrente do projeto V_0 , a dinâmica de V e a taxa livre de risco, não sendo necessário calcular a taxa de desconto do seguro.

No exemplo acima, a quantidade do ativo utilizado no portfólio foi facilmente calculada, pois utilizou-se um seguro total. Mas como seria para um caso geral? Vejamos a dedução da equação para o cálculo da quantidade do ativo utilizado para se montar um portfólio sem risco contendo a opção F e n unidades do ativo subjacente V . Para tornar o caso ainda mais geral, considere que além dos dois estados de valorização/desvalorização do ativo subjacente (V^+ e V^-), também existe o pagamento de dividendos nos dois cenários

com os valores de c^+ e c^- . Pode-se imaginar o ativo subjacente V como um imóvel que daqui a 1 ano ($t=1$) pode valorizar-se para V^+ ou desvalorizar-se para V^- , sendo que no cenário de valorização o aluguel será de c^+ e no cenário de desvalorização o aluguel será c^- . Os estados do ativo V e da opção F sobre ele são graficamente representados assim:

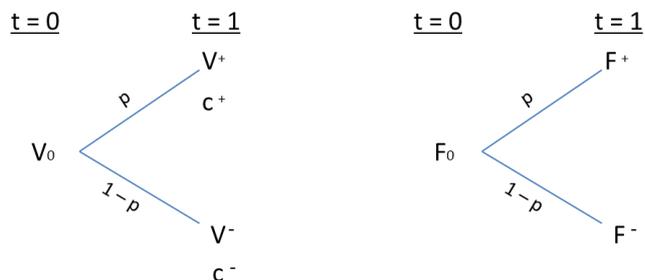


Figura 9 - Dinâmica do ativo V e da opção F

Fonte: elaboração própria com base em Dias (2014)

Já o portfólio sem risco é uma combinação linear da opção F e n ativos V , representado da seguinte forma: $\Phi = F - n V$

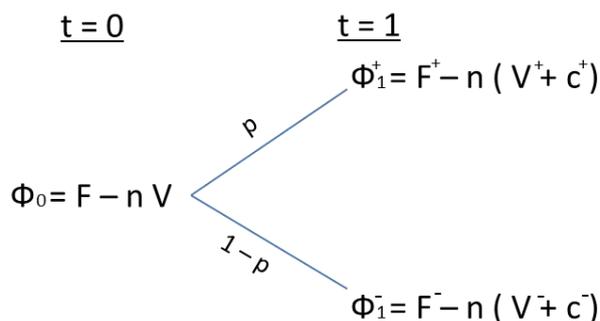


Figura 10 - Dinâmica do portfólio sem risco

Fonte: elaboração própria com base em Dias (2014)

Como o portfólio é sem risco, os valores dele nos cenários de subida (upside) e de descida (downside) devem ser iguais: $\Phi_1^+ = \Phi_1^-$. Essa igualdade irá fornecer o valor de n que o torna sem risco:

$$\Phi^+ = \Phi^- \therefore F^+ - n(V^+ + c^+) = F^- - n(V^- + c^-)$$

Equação 6 - Determinação da quantidade utilizada do ativo de risco para produzir um portfólio sem risco

$$n = \frac{F^+ - F^-}{(V^+ + c^+) - (V^- + c^-)}$$

O n é chamado delta-hedge em tempo discreto. Note-se que nessa solução não é utilizada a probabilidade dos cenários (p e $1-p$), nem a taxa ajustada ao risco do ativo V

(μ). Apenas usam-se os cenários V^+ , c^+ e V^- , c^- . Ou seja, é possível discordar das probabilidades do ativo V subir, pois pouco importa os valores das mesmas (desde que maiores do que zero e menores que 1); apenas é necessário existir consenso sobre os possíveis valores do ativo V e do seu dividendo.

Tendo fixado o valor presente ($t=0$) do ativo V e os dois cenários (V^+ , c^+ e V^- , c^-), existem infinitas combinações possíveis para as probabilidades (p e $1-p$) e da taxa ajustada ao risco (μ). Veja-se algebricamente:

$$V(t=0) = \frac{p(V^+ + c^+) + (1-p)(V^- + c^-)}{1 + \mu}$$

Caso os dividendos sejam fixos, os valores de c^+ e c^- cancelam-se, ficando a fórmula da seguinte maneira:

$$n = \frac{F^+ - F^-}{V^+ - V^-}$$

Os autores de opções reais geralmente definem o fator multiplicativo do cenário favorável de u (upside) e para o cenário desfavorável de d (downside). No caso mais geral (com dividendos) seria assim:

$$u = \frac{V^+ + c^+}{V} ; d = \frac{V^- + c^-}{V}$$

Pode-se reescrever o valor futuro ($t=1$) do portfólio sem risco em termos de u e d a partir da igualdade $\phi_1^+ = \phi_1^-$

$$\phi^+ = \phi^- = \frac{u F^- - d F^+}{u - d}$$

O valor presente ($t=0$) do portfólio sem risco é obtido por meio da taxa de juros sem risco r :

$$\phi(t=0) = \frac{u F^- - d F^+}{(u - d)(1 + r)}$$

Como $\phi(t=0) = F(t=0) + nV$, pode-se obter o valor presente da opção por diferença:

$$F(t=0) = \frac{u F^- - d F^+}{(u - d)(1 + r)} + nV$$

Como

$$n = \frac{F^+ - F^-}{(V^+ + c^+) - (V^- + c^-)} = \frac{F^+ - F^-}{u - d}$$

Substituindo n na equação do valor presente da opção F teremos:

Equação 7 - Cálculo do valor presente de uma opção

$$F(t = 0) = \frac{u F^- - d F^+}{(u - d)(1 + r)} + \frac{F^+ - F^-}{u - d}$$

III.5.2.2 Método da probabilidade neutra em relação ao risco

Esse método para o cálculo do valor presente de um derivativo consiste na mudança da medida de probabilidade. A ideia desse método é que o retorno total do ativo V sob a probabilidade real P (p e 1-p) é μ . Porém é possível alterar o valor da probabilidade P (p e 1-p) de tal forma que o retorno total do ativo V não seja mais μ , mas sim igual a taxa livre de risco r. Ou seja, contorna-se o problema de calcular a taxa de desconto ajustada ao risco para o derivativo.

A nova probabilidade que faz o retorno total do ativo ser a taxa livre de risco é denominada medida de probabilidade neutra ao risco (ou medida equivalente de martingale). Para trazer os valores ao presente (t=0), esse método primeiro corrige o risco (muda a probabilidade da medida P para a medida Q) e depois corrige o valor no tempo com a taxa livre de risco r. Esses valores serão iguais ao método de desconto tradicional do CAPM, em que na taxa de desconto estão presentes tanto o risco quanto o valor do dinheiro no tempo. Esquemáticamente:

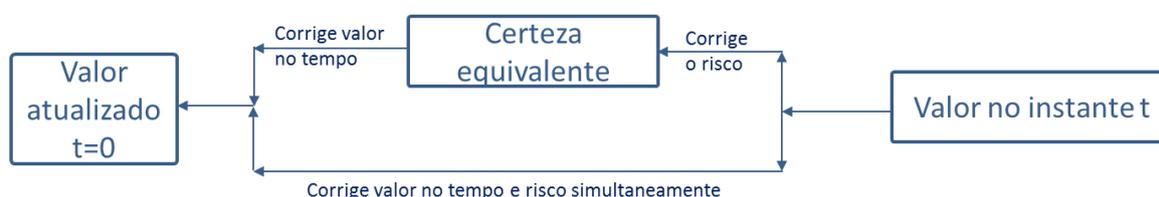


Figura 11 - Duas maneiras de calcular o valor presente

Fonte: elaboração própria com base em Dias (2014)

Como indaga Dias (2014), a primeira impressão é que seja desvantajoso realizar o cálculo do valor presente em duas etapas, mas o método da certeza equivalente é muito vantajoso para o cálculo do valor presente de derivativos, pois a correção na medida de probabilidade P feita no ativo V permite calcular o valor presente não só dele mas também da opção F utilizando a taxa livre de risco r. Isso será demonstrado a seguir.

Considere o ativo de risco V com os dois cenários V^+ e V^- que pagam os dividendos c^+ e c^- respectivamente com a probabilidade p e 1-p:

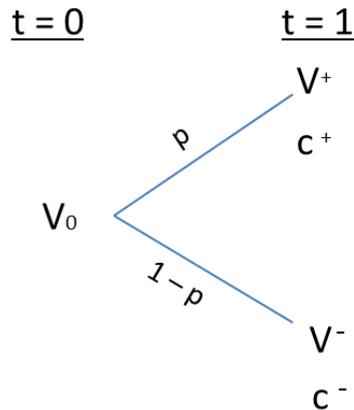


Figura 12 - Dinâmica do ativo de risco

Fonte: elaboração própria com base em Dias (2014, página 175)

Será necessário encontrar uma medida de probabilidade q que faça o retorno total (do ativo e dividendos) serem iguais a taxa livre de risco:

$$r = \frac{q(V^+ + c^+) + (1 - q)(V^- + c^-)}{V} - 1$$

Lembrando que:

$$u = \frac{V^+ + c^+}{V} ; d = \frac{V^- + c^-}{V}$$

Substituindo u e v e colocando a função em função de q :

$$r = qu + (1 - q)d - 1$$

Equação 8 - Probabilidade neutra ao risco

$$q = \frac{1 + r - d}{u - d}$$

Agora será provado que essa probabilidade neutra ao risco (q) que faz o ativo V ter retorno livre de risco também faz o retorno do derivativo F também possuir o retorno livre de risco r .

Seja F o derivativo que pode variar em $t=1$ para os valores F^+ e F^- com as probabilidades p e $1-p$ respectivamente:

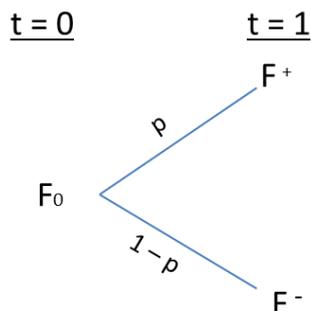


Figura 13 - Dinâmica do derivativo F

Fonte: elaboração própria com base em Dias (2014)

Seja q' a probabilidade que faz a taxa de retorno do derivativo F ser igual a taxa livre de risco (r), isto é:

$$r = \frac{q'F^+ + (1 - q')F^-}{F(t = 0)} - 1$$

Será demonstrado que $q' = q$, ou seja, que a probabilidade neutra ao risco do derivativo F é igual a probabilidade neutra ao risco do ativo V. Para isso, será utilizado o portfólio sem risco apresentado no item anterior para essa demonstração.

Como foi visto na abordagem do portfólio replicado sem risco, uma carteira sem risco em $t=0$ composta por $\phi = F - nV$, e o valor do derivativo F é calculado por diferença: $F = \phi + nV$. Dessa forma a dinâmica do derivativo F será:

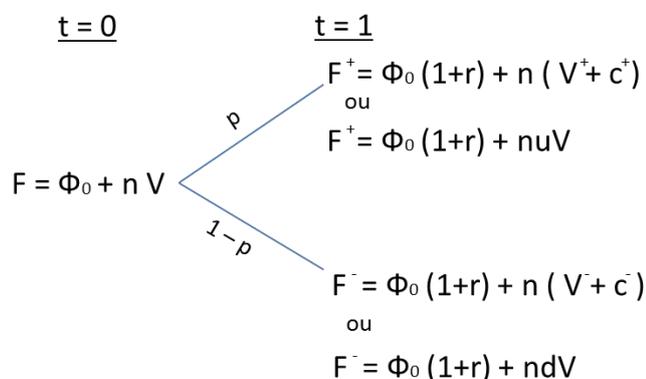


Figura 14 - Dinâmica do derivativo F

Fonte: elaboração própria com base em Dias (2014, página 175)

Lembrando que o portfólio ϕ é sem risco, logo em $t=1$ ele terá o valor de $\phi_0^*(1+r)$. Substituindo os valores de F, F^+ e F^- na equação da taxa livre de risco r :

$$\begin{aligned} r &= \frac{q'F^+ + (1 - q')F^-}{F(t = 0)} - 1 \\ &= \frac{q'[nuV + \phi_0(1 + r)] + (1 - q')[ndV + \phi_0(1 + r)]}{nV + \phi_0} - 1 \end{aligned}$$

Rearranjando a equação acima em termos de q' :

Equação 9 - Medida da probabilidade sem risco do derivativo F

$$q' = \frac{1 + r - d}{u - d}$$

Provou-se, então, que $q'=q$, ou seja, a medida da probabilidade sem risco calculada para o ativo V é igual à do derivativo F. Perceba que essa probabilidade neutra ao risco (q) independe do derivativo F, apenas da dinâmica do ativo V. Ou seja, uma vez calculada pode-se apreçar vários derivativos do mesmo ativo V sem ter que recalculá-la a probabilidade neutra ao risco (q). Essa é a grande vantagem computacional dessa abordagem, não precisando recalculá-la para cada cenário uma nova probabilidade neutra ao risco.

É importante ressaltar que na demonstração acima não foi assumida nenhuma hipótese de preferência em relação ao risco. Esse método não assume que os investidores são neutros ao risco; ele vale para investidores avessos ao risco, neutros ao risco ou propensos ao risco.

Para exemplificar essa abordagem, será utilizado o mesmo exemplo da abordagem do portfólio replicado sem risco para se visualizar que os valores encontrados para a precificação do derivativo F são iguais em $t=0$.

Relembrando o exemplo: um projeto cujo valor atual ($t=0$) é $V_0 = 100$ e em $t=1$ ele pode assumir dois valores $V^+=180$ e $V^-=60$ com as probabilidades de 50% em cada caso. Sabendo que a taxa livre de risco r é de 8% a.a., se quer saber qual o valor atual ($t=0$) do seguro sobre o projeto que garanta, em qualquer cenário, uma riqueza de 180. Esquematicamente:

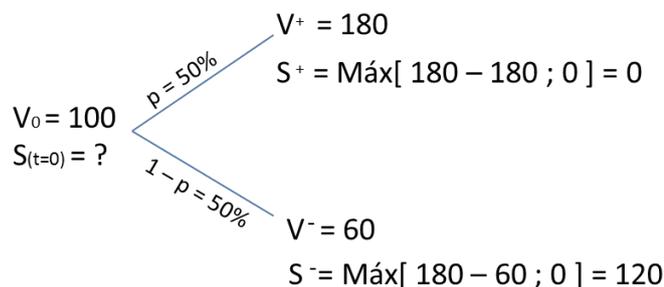


Figura 15 - Retomando exemplo sobre seguro de um projeto

Fonte: elaboração própria com base em Dias (2014)

Primeiramente deve-se calcular o valor da probabilidade neutra ao risco:

$$u = V^+/V = 180/100 = 1,8 ; d = V^-/V = 60/100 = 0,6$$

$$\text{Então, } q = (1+0,08-0,06)/(1,8-0,6) = 40\%$$

$$\text{Logo, } 1-q = 60\%$$

Com essa probabilidade neutra ao risco pode-se calcular o valor do seguro hoje ($t=0$):

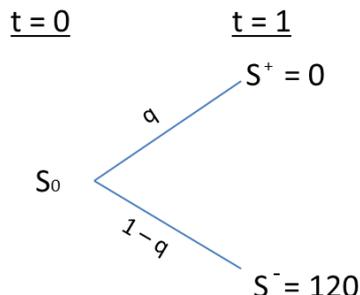


Figura 16 - Dinâmica do seguro do projeto

Fonte: elaboração própria com base em Dias (2014)

Calculando o valor do seguro total:

$$S_0 = \frac{qS^+ + (1 - q)S^-}{1 + r} = \frac{(0,4 \times 0) + (0,6 \times 120)}{1,08} = 66,7$$

O resultado é o mesmo encontrado para o método do portfólio sem risco.

Cox, Ross e Rubinstein (1979) destacam as principais características presentes nesta equação:

- A probabilidade objetiva (p) não aparece na fórmula. Desta forma, a taxa de retorno em cada nó permanece constante;
- O valor da opção não depende das atitudes dos investidores em relação ao risco;
- A única variável aleatória que o preço do ativo objeto depende é o próprio preço do ativo objeto.

III.5.3 Método Forward e Backward

A forma de construção das árvores binomiais pode variar conforme o método escolhido. Existem dois métodos:

Método Forward: incia-se a partir do instante inicial (tempo 0) e os demais ramos são construídos com base no valor do ramo anterior. Esquemáticamente:

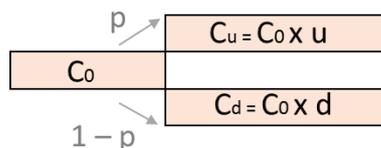


Figura 17 - Construção da Árvore Binomial pelo Método Forward

Fonte: elaboração própria

O valor de C_0 é conhecido, assim como as probabilidades de subida “p” e descida “1-p” e os fatores de subida “u” e de descida “d” do ativo subjacente, respectivamente. Com base nesses valores encontram-se os valores dos ramos no próximo instante ($t=1$). No cenário de subida o valor do ramo será $C_u = C_0 \times u$, já no cenário de descida será $C_d = C_0 \times d$.

Método Backward: por essa abordagem, parte-se do instante final e, com base nele, os ramos anteriores são calculados. Esquemáticamente:

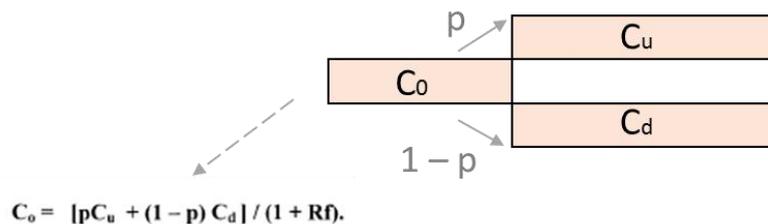


Figura 18 - Construção da Árvore Binomial pelo Método Backward

Fonte: elaboração própria

Os valores dos ramos finais C_u (cenário de subida) e C_d (cenário de descida) são conhecidos, assim como as probabilidades de subida “p” e descida “1-p”. Com base neles encontra-se o valor do ramo anterior.

III.6 OPÇÕES REAIS EM PD&I

Os projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, doravante chamados de projetos de PD&I, possuem uma característica intrínseca que é o alto grau de incerteza. As incertezas são das mais variadas, porém a mais proeminente é a incerteza técnica, em que não se sabe da viabilidade técnica daquele projeto por se tratar de algo inovador, nunca realizado antes.

As abordagens tradicionais de valoração de projetos acabam subavaliando os projetos de PD&I por não considerarem no cálculo as flexibilidades existentes e o gerenciamento ativo desses projetos. Em um projeto de PD&I, no mínimo o gestor deveria reavaliar periodicamente as incertezas presentes neles, com isso aumentando a probabilidade de sucesso o que, neste caso, maximizaria o seu valor.

Diversos autores elaboraram trabalhos fazendo uso de opções reais em PD&I como: Mun (2006), Silva e Santiago (2009), Paxon (2003), Huchzermeier e Loch (2001), Santiago & Vakili (2005), Santos e Pamplona (2002), Schwartz (2001). As abordagens metodológicas de OR utilizadas foram das mais diversas, desde modelos utilizando a

fórmula de Black & Scholes em tempo contínuo adaptando algumas variáveis às características de projetos de PD&I como também modelos binomiais no tempo discreto.

Os projetos de PD&I caracterizam-se por uma série de investimentos sequenciais, envolvendo diversas fases, que podem ser vistas como portões em que se decide continuar ou não. Santos e Pamplona (2001) apresentam uma esquematização linear dessas fases:



Figura 19 - Projeto de PD&I visto como uma sequência de decisões e resultados

Fonte: Santos e Pamplona, 2001

Caso o resultado da fase de pesquisa não corresponda às expectativas, o projeto pode ser paralisado, evitando perdas futuras. Existem outras opções também como esperar para obter novas informações, alterar o escopo do projeto, etc.

Dentro da própria fase de PD&I existem estágios em que se pode decidir em continuar ou não com o projeto. Pode-se representar a maturidade de um projeto de PD&I por meio do TRL (*Technology Readiness Levels*), uma metodologia criada pela NASA durante a década de 1970 e que pode ser aplicada para diferentes tipos de tecnologia. Essa metodologia gradua os projetos de 1 a 9, sendo 9 o estágio mais alto de maturidade. Os estágios são os seguintes:

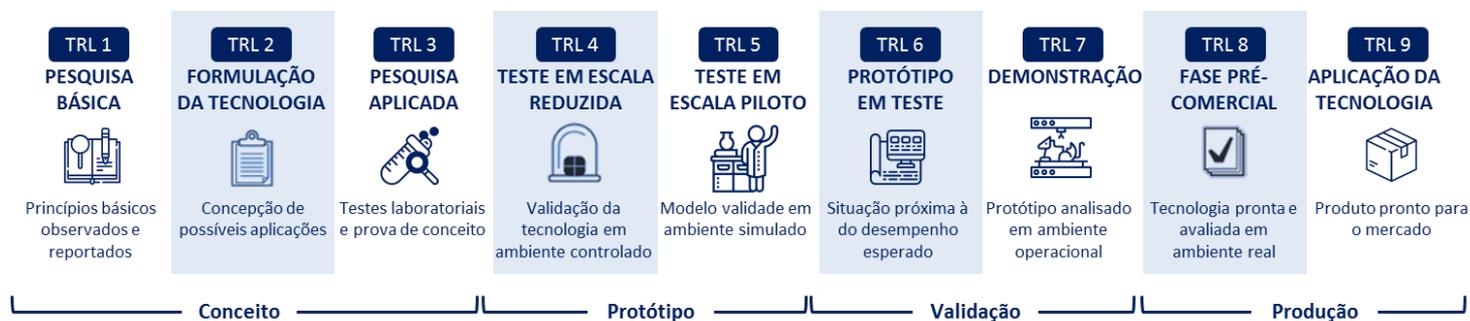


Figura 20 - Escala TRL

Fonte: Elaboração Própria

De forma mais ampla, do TRL 1 ao TRL 3 o projeto está na fase de Pesquisa/Conceito, do TRL 4 ao 5 na fase de Protótipo, do TRL 6 ao 7 da validação em ambiente operacional e do TRL 8 ao 9 da efetiva produção. Em cada uma dessas fases, o projeto pode ser descontinuado, ou seja, existem opções dentro do próprio processo de PD&I. Dessa forma a sequência de Santos e Pamplona (2001) pode ser ampliada, desagregando-se o processo de PD&I em pelo menos três etapas associadas ao TLR:

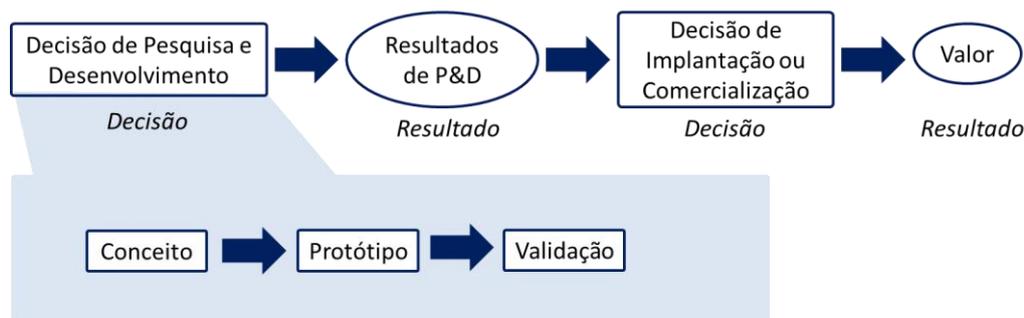


Figura 21 - Processo de PD&I revisitado

Fonte: elaboração própria

O projeto de PD&I pode ser encarado como uma opção de compra, em que o valor pago como prêmio (valor investido em cada etapa da pesquisa) fornece a opção de se dar prosseguimento ao projeto em cada etapa TLR do seu desenvolvimento. Essas opções de compra criam oportunidades futuras para a empresa sem que ela tenha que se comprometer-se com o investimento total do projeto. Como ressaltam Santos e Pamplona (2001), é esse ponto que causa as diferenças entre as abordagens tradicionais e a teoria das opções reais.

Transpondo o processo de PD&I para uma árvore de decisão, teríamos:

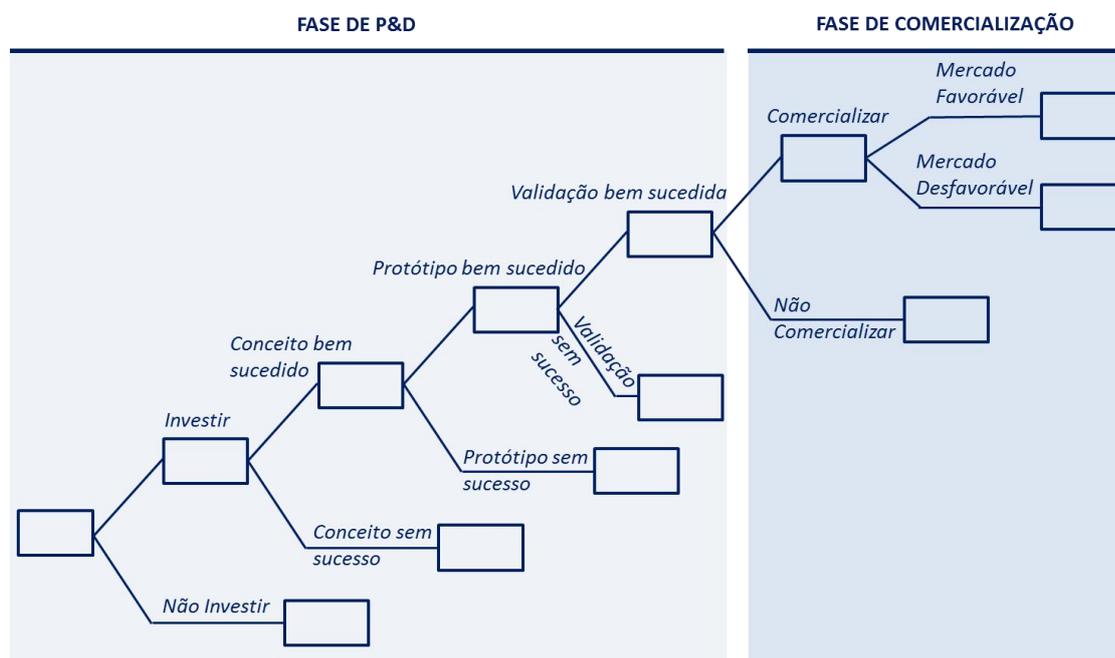


Figura 22 - Árvore de Decisão para investimentos sequenciais em PD&I

Fonte: elaboração própria

Essa estrutura é a de opções compostas, já apresentada anteriormente.

CAPÍTULO IV: PARTICULARIDADES DO INVESTIMENTO EM PD&I

IV.1 O VALE DA MORTE

Os projetos de PD&I percorrem diversas etapas até alcançarem a maturidade tecnológica e serem passíveis de implantação operacional ou comercialização. Ao longo dessas etapas muitos projetos são descontinuados por falta de viabilidade técnica ou econômica. A literatura especializada em inovação nomeia a região em que há maior descontinuação de projetos como “Vale da Morte”, Christensen et al. (2008) e Upadhyayula et al. (2017).

Esse Vale ocorre nos estágios de TRL 5 até 7 majoritariamente. Upadhyayula et al. (2017) ainda divide o Vale da Morte em dois: Vale da Morte Tecnológico (VMT) e Vale da Morte Comercial (VMC). O primeiro acontece entre os TRLs 5 e 6 por conta principalmente da atração de capital de risco (*venture capital*), seja por falta de marketing na divulgação do projeto para potenciais investidores como também pelos investidores de risco estarem interessados essencialmente em projetos que possuam um rápido retorno do investimento. Essa busca pelo retorno rápido pode acabar levando a seleção de tecnologias que não são sustentáveis financeiramente no longo prazo. Além desses, os autores elencam mais alguns motivadores pela descontinuação dos projetos nessa etapa:

- Falta de Automotivação: muitos pesquisadores acadêmicos percebem a tarefa de avançar com o projeto além do TRL 4 como algo não cientificamente desafiador enquanto que outros são avessos ao risco e optam por não comercializar suas inovações. Outro problema apontado são os incentivos: os pesquisadores acadêmicos ganham notoriedade em seu meio através de publicações, apresentações em conferências e interação com a indústria. Esses pesquisadores ao se tornarem cientistas empreendedores não ganham o reconhecimento no meio acadêmico por comercializar suas pesquisas realizadas.
- Falta de Cultura Empreendedora: o incentivo ao empreendedorismo não é tão evidente quanto a promoção da cultura de inovação nas universidades. Geralmente os pesquisadores acadêmicos são avaliados pelas publicações de suas pesquisas e não pela geração de propriedade intelectual com potencial de comercialização. Para a

maioria das universidades, a interação com a indústria significa apenas conseguir estágios para seus alunos ou pesquisas informais através de algum relacionamento existente entre pesquisadores e membros da indústria (e não programas estruturados de cooperação).

- Falta de um Framework estruturado para avaliar o desenvolvimento de tecnologias: investidores utilizam algum critério de decisão para seleção dos projetos de pesquisa a serem investidos. Os critérios variam dos mais diversos tipos, podendo ser de acordo com a intuição dos tomadores de decisão, ou utilizando ferramentas como o Valor Presente Líquido (VPL) ou VPL ajustado ao risco. Algumas dessas ferramentas subavaliam o potencial dos projetos, levando a rejeição de projetos que poderiam agregar valor.

O segundo, VMC, decorre sobretudo por falta de viabilidade econômica para o protótipo ser avaliado em ambiente operacional. Como destacam os autores, muitos projetos necessitam de um grande volume financeiro para serem testados em ambiente operacional. Apenas o capital de risco não é suficiente, o capital obtido nessa fase geralmente é por meio *private equity* ou financiamento por dívida (como empréstimos de bancos). Assim, os projetos são descontinuados se seus patrocinadores falharem em obter o financiamento necessário, como geralmente ocorre quando o capital de giro do patrocinador for significativamente inferior à dívida solicitada.

Nas duas situações (VMT e VMC), o fator preponderante para a descontinuação de projetos é a fonte de recursos financeiros. De forma esquemática pode-se representar o vale da morte ressaltando o volumoso despêndio financeiro na etapa de desenvolvimento do produto e teste de protótipo em ambiente operacional conforme a figura abaixo:

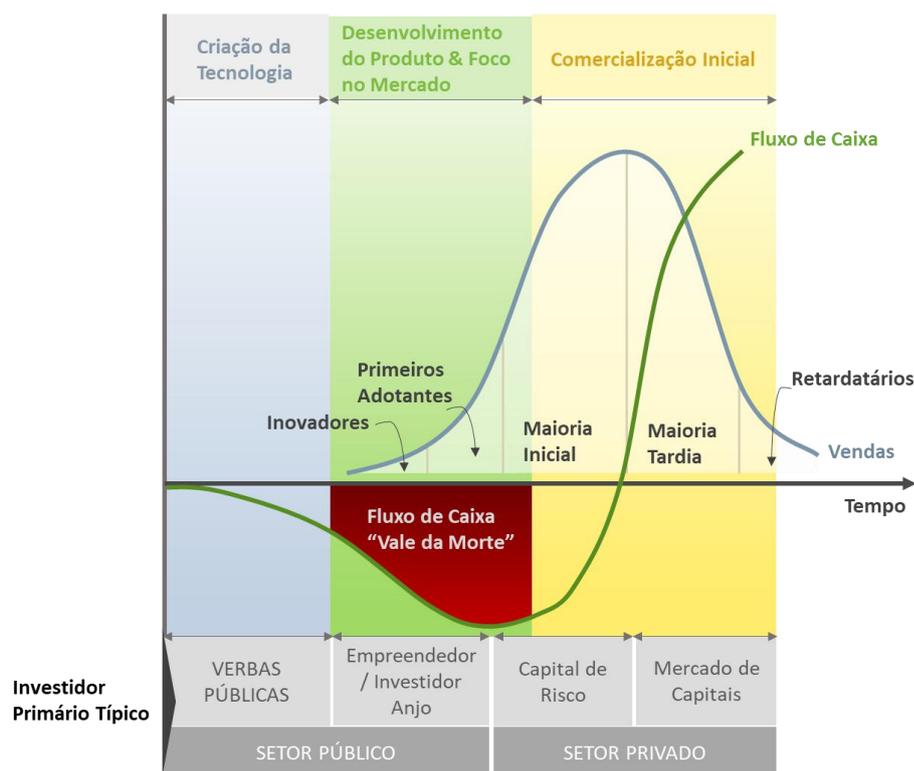


Figura 23 - Vendas vs Fluxo de Caixa: Ciclo de Inovação

Fonte: adaptado de Upadhyayula et al. (2017, página 4)

Christensen et. all (2008) também destacam em seu artigo que um dos principais destruidores da capacidade de inovação são as ferramentas financeiras, dentre elas eles apontam:

- Uso do Fluxo de Caixa Descontado (FCD) e Valor Presente Líquido (VPL) para avaliar oportunidades de investimento fazem com que tomadores de decisão subestimem o retorno e os benefícios de se continuar investindo em inovação.
- A forma como custos fixos e custos irrecuperáveis são considerados no momento de avaliar investimentos futuros fornecem uma vantagem injusta as firmas novas e uma “algebra” para empresas consolidadas no setor responderem a esses ataques concorrenciais com inovação.
- Ênfase no lucro por ação como principal indicativo de criação de valor para o acionista, com exclusão de quase todo o resto, desvia os recursos dos investimentos cujo retorno está além do curto prazo.

No tocante ao FCD, os autores afirmam que os analistas cometem o erro de assumir que o cenário de não investir continuará preservado no futuro, ou seja, que o estado atual da companhia irá persistir se investimentos não forem realizados. Na maioria

das situações, contudo, os investimentos dos competidores acarretam pressão para redução de preço e margem de lucro, mudanças tecnológicas, redução na participação de mercado, e, conseqüentemente, queda no preço da ação da firma. Assim, se deve comparar o investimento com o cenário de deteriorização de valor em caso contrário. Os autores reconhecem a dificuldade em estimar a perda de performance da empresa no cenário de não investir em inovação, mas esse fator deve ser levado em consideração na análise.

Os custos fixos (custos que não se alteram com a quantidade produzida, por exemplo, aluguel, encargos administrativos, etc) e os custos irrecuperáveis (custos comprometidos em equipamentos, edíficeis e custo de P&D) podem representar barreiras à inovação. Para decidir sobre o investimento em uma nova tecnologia/planta industrial, muitos analistas levam em consideração o custo total unitário, que é composto pelo custo fixo unitário (custo fixo dividido pela quantidade produzida) mais o custo variável unitário. Quando já houve um investimento em tecnologia ou planta e há capacidade ociosa, o custo total unitário geralmente será menor utilizando a capacidade ociosa da tecnologia/instalação existente do que implantando uma nova. No entanto, essa visão é míope ao não levar em consideração impactos futuros da nova tecnologia/instalação que poderia ser adotada.

Os autores fornecem como exemplo a indústria siderúrgica dos EUA no final da década de 60, quando as mini-fábricas como Nucor e Chaparral começaram uma inovação disruptiva tornando-se siderúrgicas integradas usando uma tecnologia chamada de produção contínua de tiras com um custo por tonelada muito baixo. Começaram entrando no segmento de clientes de níveis menos exigentes de cada mercado e aos poucos escalando para o mercado de alto nível com a melhoria da qualidade de seus aços por conta da melhoria da produção com a experiência. A USX, que era a siderúrgica dominante nesse mercado, percebeu o movimento dessas mini-fábricas, no entanto, considerou mais lucrativo alavancar sua tecnologia antiga do que implantar uma nova. A USX tinha 30% de excesso de capacidade e o custo marginal de aumentar a produção era menor que \$ 50 por tonelada, o que daria um fluxo de caixa de \$ 300 (\$ 350 de receita menos \$ 50 de custo marginal). Enquanto isso uma planta com a nova tecnologia gerava um fluxo de caixa médio de \$ 80 por tonelada.

Nucor, a atacante, não tinha custos fixos ou irrecuperáveis de investimentos anteriores para se calcular o custo marginal e tomar uma decisão, a nova planta era sua única opção, logo a decisão foi simples. Em contraste, a USX, possuía duas opções:

construir uma nova planta com um custo por tonelada menor ou utilizar ao máximo sua capacidade instalada que gerava um fluxo de caixa maior. A USX optou por maximizar seu fluxo de caixa utilizando a capacidade ociosa enquanto a Nucor continuou melhorando seus processos, aumentando participação no mercado com o aumento da qualidade de sua produção. A estratégia de maximizar o fluxo de caixa no curto prazo fez com que USX não maximizasse as vantagens de custo no longo prazo.

Quando as empresas estão decidindo sobre aumentar capacidade de produção, faz-se sentido comparar custos marginais quando a tecnologia é a mesma. Contudo, quando se trata de tecnologias diferentes, basear-se no custo marginal poderá levar a decisões sub-ótimas no longo prazo, por não levar em consideração novas capacidades competitivas que a nova tecnologia possa gerar.

IV.2 PD&I NA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS BRASILEIRA

Com a Lei do Petróleo (Lei 9.478) promulgada em 06 de agosto de 1997, foi criada a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que dentre as suas atribuições está a de estimular a pesquisa e a adoção de novas tecnologias para o setor de petróleo e gás natural. Diante dessa prerrogativa, a ANP incluiu desde a Rodada Zero nos contratos de concessão para exploração, desenvolvimento e produção de petróleo e/ou gás natural, cláusula de obrigação de Investimento em PD&I. Essa obrigação é detalhada no Regulamento Técnico ANP nº3/2015 e aprimorado pela Resolução ANP nº 799/2019.

Os contratos de concessão, de partilha e de cessão onerosa estabelecem que 1% da receita bruta da produção de petróleo, gás natural e outros hidrocarbonetos líquidos nos campos do respectivo contrato seja destinada a investimentos em PD&I. Esse montante deve ser destinado a Instituições Científicas credenciadas, Empresas Brasileira ou Empresas Petrolíferas. Os percentuais variam de acordo com rodada dos contratos:

Contratos de Concessão até a 10ª Rodada

| Contrato | Instituição Credenciada | Empresa Brasileira | Empresa Petrolífera |
|--------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|
| Concessão Rodadas 1 a 10 | De 50% a 100% | Até 50% | |

Figura 24 - Distribuição investimento de PD&I contratos até a 10ª rodada

Fonte: Manual orientativo ANP (2019)

Contratos de Concessão da 11ª à 13ª Rodada e Contratos da 1ª Rodada de

Partilha de Produção

| Contrato | Instituição Credenciada | Empresa Brasileira | Empresa Petrolífera e Demais |
|---------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------------|
| Concessão Rodadas 11 a 13 | De 50% a 90% | De 10% a 50% | Saldo Remanescente |
| Partilha Rodada 1 | | | |

Figura 25 - Distribuição investimento de PD&I contratos da 11ª à 13ª rodada e Contratos da 1ª Rodada de Partilha de Produção

Fonte: Manual orientativo ANP (2019)

Contratos de Concessão a partir da 14ª Rodadas de Licitação e nos Contratos de Partilha de Produção a partir da 2ª Rodada

| Contrato | Instituição Credenciada | Empresa Brasileira | Empresa Petrolífera e Demais |
|---------------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------------|
| Concessão a partir da Rodada 14 | De 30% a 40% | De 30% a 40% | Saldo Remanescente |
| Partilha a partir da Rodada 2 | | | |

Figura 26 - Distribuição investimento de PD&I Contratos de Concessão a partir da 14ª Rodadas de Licitação e nos Contratos de Partilha de Produção a partir da 2ª Rodada

Fonte: Manual orientativo ANP (2019)

Contratos de Cessão Onerosa

| Contrato | Instituição Credenciada |
|-------------------------|-------------------------|
| Cessão Onerosa Rodada 1 | 100% |

Figura 27 - Distribuição investimento de PD&I contratos de cessão onerosa

Fonte: Manual orientativo ANP (2019)

Do valor total gerado de obrigação de investimentos em PD&I, desde a implementação em 1998 até o 2º trimestre de 2019, a Petrobras foi responsável por cerca de 89,5% dos recursos financeiros gerados. Porém, de forma geral a participação da Petrobras tem decrescido, conforme pode-se perceber no gráfico abaixo:

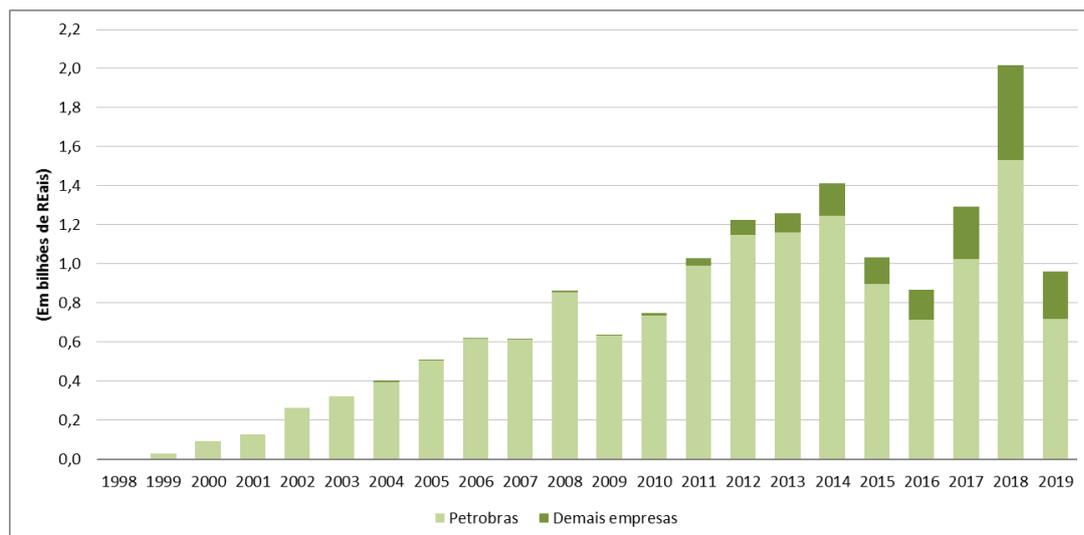


Figura 28 - Volume de obrigações geradas por ano (até o 2º trimestre de 2019)

Fonte: ANP (2019)

A distribuição dessa obrigação desde 1998 até o 2º trimestre de 2019 por empresa petrolífera:

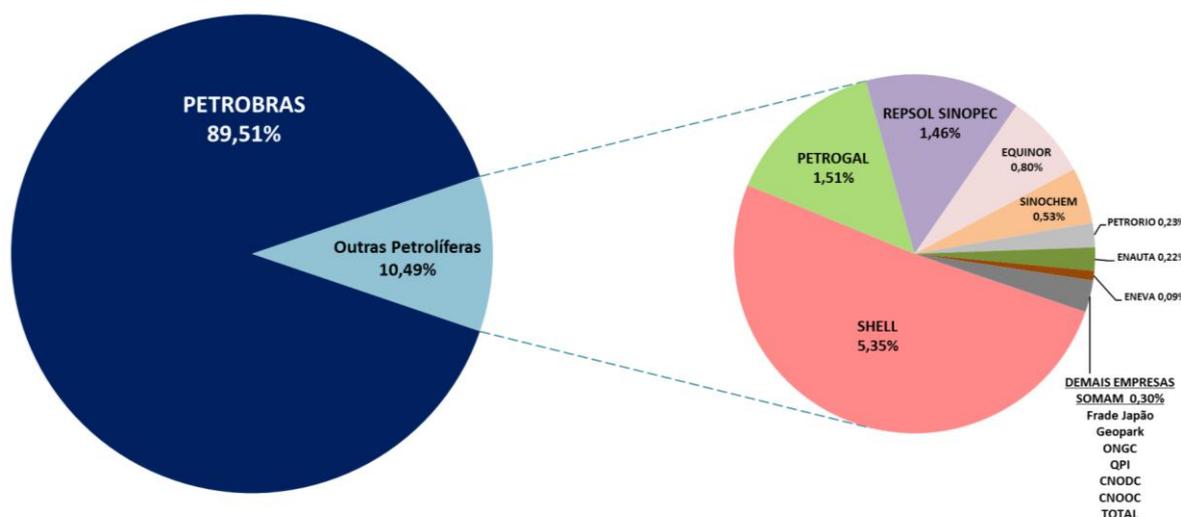


Figura 29 - Distribuição percentual do volume total acumulado de recursos gerados, em todo o período de 1998 ao 2º trimestre de 2019, por empresa petrolífera

Fonte: ANP (2019)

Como se pode perceber, a Petrobras possui a maior parte da obrigação de investimento em PD&I por conta de ser a empresa petrolífera que adquiriu mais contratos de concessão da ANP ao longo desses anos. Dentre as demais petrolíferas, destaca-se a Shell com quase 50% da obrigação.

O regulamento da ANP também define quais atividades são consideradas PD&I e que podem ser abatidas da cláusula de obrigação:

- Pesquisa básica, pesquisa aplicada e desenvolvimento experimental, incluída a pesquisa em meio ambiente e em ciências sociais, humanas e da vida;
- Construção de protótipo e unidade-piloto;
- Desenvolvimento de software, desde que este envolva significativos avanços tecnológicos ou científicos.

CAPÍTULO V: CASO HIPOTÉTICO

Nesta sessão será aplicada a teoria exposta anteriormente em um caso hipotético para uma melhor elucidação das questões propostas ao início da monografia. O caso foi baseado na experiência do autor em projetos de PD&I na indústria de Óleo & Gás e em referências bibliográficas como Santos et al. (2002), Saito et al. (2010) e Huchzermeier (2001). Por conta disso, ainda que os valores monetários e as taxas de retorno utilizados não reflitam com exatidão o montante despendido e o retorno esperado para projetos de P,D&I nessa indústria, o processo de valoração utilizado – considerando todas as etapas desses projetos – é semelhante ao adotado por empresas do setor sendo, assim, de interesse tanto acadêmico quanto prático.

V.1 CONTEXTO

A empresa petrolífera “Petro Y” possui atuação apenas nacional. Seu conselho de administração redesenhou os objetivos estratégicos de longo prazo, adicionando como prioridade a redução dos custos na perfuração de poços. Tal alinhamento estratégico foi definindo devido ao novo contexto mundial de queda brusca do preço do barril de petróleo nos últimos anos como se observa no gráfico abaixo:

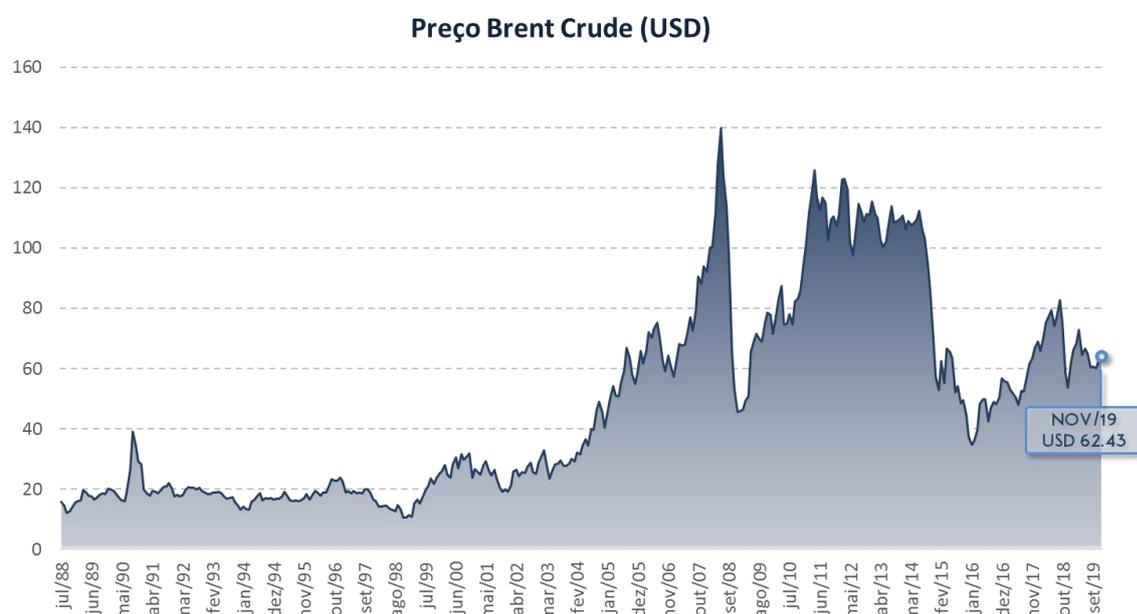


Figura 30 - Série Histórica Preço do Brent Crude

Fonte: elaboração própria com base em Macro Trends (2019)

Os analistas consultados para definição do novo plano estratégico indicaram cautela quanto ao aumento contínuo da demanda por petróleo. Em suas projeções, acreditam que a demanda mundial de petróleo irá crescer menos, perdendo espaço para fontes de energias renováveis como a eólica e a solar, podendo até declinar no médio

prazo caso aconteça mais rapidamente o barateamento das tecnologias empregadas na geração de energia por meio dessas fontes. Por conta disso, acreditam que o preço do petróleo dificilmente irá se elevar – e permanecer em patamar alto por muito tempo –, sendo mais provável que ocorra sua queda no longo prazo.

Diante dessas projeções, o conselho de administração considerou como primordial a busca por alternativas para a redução dos custos de perfuração de poços, assim, aumentando o número de poços que serão viáveis economicamente de serem explorados mesmo com um preço mais baixo do Brent, além, é claro, do aumento do lucro.

A empresa Petro Y possui um centro de pesquisa que possui como missão tornar viável econômica e tecnicamente os objetivos estratégicos da empresa. Com os novos direcionadores estratégicos, esse centro de pesquisa passou a priorizar projetos com objetivos de redução de custos no processo de perfuração como reduzir o tempo de construção de poços, aumentar a probabilidade de sucesso de haver petróleo na perfuração de um poço, etc.

V.2 O PROJETO

Um grupo de pesquisadores multidisciplinares apresentou uma proposta de projeto de pesquisa que tem como objetivo utilizar tecnologias digitais para reduzir o custo de prospecção de petróleo (etapa da exploração que localiza bacias sedimentares por meio de análise detalhada do solo e do subsolo). Os pesquisadores propõem a utilização de algoritmos de Machine Learning (processo de aprendizado em máquina) para melhorar a avaliação de diversas interpretações sísmicas existentes. A solução “aprende” com a inserção de novos dados e consegue identificar os padrões das estruturas geológicas que possam suportar petróleo e gás. Isso iria permitir o desenvolvimento mais rápido de modelos geológicos, avaliar os riscos de forma mais eficiente para novos postos de exploração e otimizar a construção de novos poços de petróleo. Essa tecnologia inovadora aumentaria o sucesso na taxa de perfuração, reduzindo o tempo de construção de um poço.

O objetivo deste capítulo, portanto, é avaliar se uma proposta de projeto desta natureza é viável economicamente e estimar o retorno esperado. Este exercício permitiria vislumbrar se se deve, hipoteticamente, investir nesse projeto ou não. Três abordagens serão utilizadas para essa valoração. A primeira será o Fluxo de Caixa Descontado, a segunda é o Valor Esperado e, por fim, a Teoria das Opções Reais com o uso do modelo

binomial. Com isso, se pretende demonstrar as diferenças entre elas e como a abordagem tradicional acaba não valorando as opções existentes no projeto.

Inicialmente será modelado os fluxos de caixa desse projeto ao longo de sua existência, destacando as receitas e despesas. O projeto é composto por 5 fases e seus custos, tempos de duração são:

- Fase 1 (I0): investimento para se testar o conceito do projeto. Custo: R\$ 500.000,00 e Tempo: 1 ano.
- Fase 2 (I1): investimento para elaboração do protótipo e dos testes em escala piloto. Custo: R\$ 550.000,00 e Tempo: 1 ano.
- Fase 3 (I2): investimento para validação do protótipo em ambiente operacional. Custo R\$ 590.000,00 e Tempo: 1 ano.
- Fase 4 (I3): investimento para aplicação em escala comercial. Custo: R\$ 650.000,00 e aplicação imediata.

Portanto, o custo total do projeto é estimado, em termos nominais, em R\$ 2.290.000,00.

Geralmente os custos para validação do protótipo em ambiente operacional (fase 3) e para aplicação em escala comercial (fase 4) são significativamente mais altos quando comparados com os custos do teste de conceito (fase 1) e teste em escala piloto (fase 2). Nesse caso específico isso não aconteceu e os custos permaneceram praticamente no mesmo patamar por conta da natureza do projeto. Por se tratar de um algoritmo, os custos de validação e aplicação são relativamente baixos quando comparados com outros tipos de projetos, como, por exemplo, a utilização de um novo equipamento em uma planta industrial em que se teria de adaptar a planta para receber o novo equipamento, paralisar a produção, que são custos bem mais altos do que a compra de um servidor e equipe de TI para implementação de um algoritmo.

Ao todo serão 3 anos na fase de pesquisa e desenvolvimento. Depois dessa fase, espera-se que o projeto tenha fluxos de caixas positivos aumentando até o 4 ano de operação, visto que o algoritmo de aprendizado de máquina aumenta sua performance à medida que mais dados são fornecidos para o mesmo, até um ponto em que ele tem sua performance estabilizada. Essa estabilização ocorrerá por volta do 4º ano. O horizonte considerado para utilização operacional é de 8 anos. Depois disso espera-se que novos investimentos devam ser feitos para acompanhar o desenvolvimento tecnológico para não o tornar obsoleto. Por exemplo, caso daqui a 11 anos a computação quântica já esteja

aplicada em escala comercial, esse algoritmo terá de ser reestruturado para utilizar todo potencial dessa nova tecnologia e não se torne ultrapassado frente aos concorrentes.

Posto isso, os fluxos de caixa serão os seguintes:

- Fluxo de Caixa Ano 1: R\$ 500.000,00
- Fluxo de Caixa Ano 2: R\$ 500.000,00
- Fluxo de Caixa Ano 3: R\$ 600.000,00
- Fluxo de Caixa Ano 4: R\$ 1.500.000,00
- Fluxo de Caixa Ano 5: R\$ 1.500.000,00
- Fluxo de Caixa Ano 6: R\$ 1.500.000,00
- Fluxo de Caixa Ano 7: R\$ 1.500.000,00
- Fluxo de Caixa Ano 8: R\$ 1.500.000,00

Podemos esquematizar os custos e os fluxos de caixa positivos da seguinte forma:

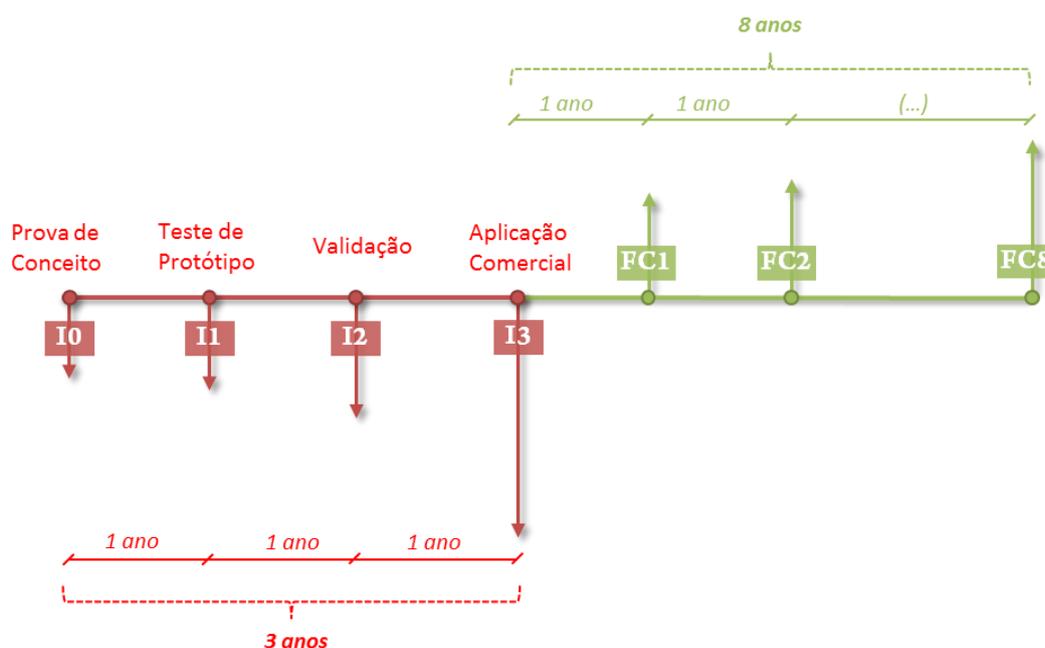


Figura 31 - Fluxos de Caixa do Projeto de P,D&I

Fonte: elaboração própria

As receitas mais que dobram do ano 3 para o ano 4 por conta da forma que a nova tecnologia é implementada na empresa “Petro Y”. As novas tecnologias, inicialmente, são implementadas em alguma área piloto. Provando-se o seu benefício, a tecnologia é expandida para aplicação em outras áreas. Estima-se que do terceiro para o quarto ano de receitas, a tecnologia seria aplicada em toda as áreas de interpretação sísmica da empresa, por isso, gerando um aumento expressivo de receita.

V.3 ABORDAGEM PELO FLUXO DE CAIXA DESCONTADO

Como já apresentado, essa é a abordagem mais amplamente utilizada pelos tomadores de decisões e que pode apresentar limitações ao não considerar as incertezas e a necessidade de flexibilidade nos projetos. Isso ficará claro no desenvolvimento dessa e das próximas sessões.

Feita a modelagem dos fluxos de caixa parte-se para o cálculo de Valor Presente Líquido do projeto. A empresa “Petro Y” utiliza para descontar seus projetos uma taxa de risco de 25% a.a. e a taxa livre de risco da economia é considerada como 8% a.a.. O cálculo do VPL é feito da seguinte forma:

$$VPL = -I_0 - \frac{I_1}{(1 + 0,25)} - \frac{I_2}{(1 + 0,25)^2} - \frac{I_3}{(1 + 0,25)^3} + \frac{FC_1}{(1 + 0,25)^4} + \frac{FC_2}{(1 + 0,25)^5} + \dots + \frac{FC_8}{(1 + 0,25)^{11}}$$

Substituindo os valores de Investimento e os Fluxos de Caixa positivos chegamos ao VPL de R\$ - 67.005,68. Ou seja, o projeto destruiu valor ao longo do tempo. Portanto, esse projeto seria rejeitado por apresentar um VPL < 0. Na próxima sessão a abordagem pelo valor esperado será realizada.

V.4 UMA VARIANTE DO FCD: A ABORDAGEM PELO VALOR ESPERADO

A modelagem do projeto utilizando o Valor Esperado é praticamente igual à do Fluxo de Caixa Descontado, acrescentando-se possíveis cenários para o projeto. Para tornar mais didático, será modelado separadamente o período de receitas (a partir do 4º ano) e o período de investimentos (até o 3º ano).

Os Fluxos de Caixas positivos são esperados começarem no ano 4 com valor de R\$ 500.000,00 (Fluxo de Caixa esperado 1). Os pesquisadores estimam que esse fluxo de caixa pode crescer a cada ano 10% (u) com probabilidade de 80% (p) ou cair 50% (d) com probabilidade de 20% (1 - p). Assim, por exemplo, no ano 5 os cenários possíveis seriam:

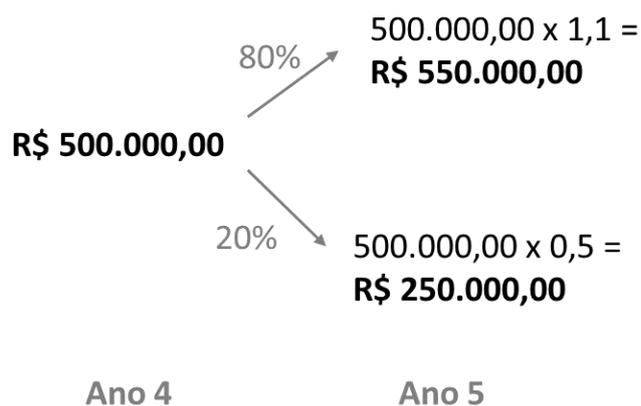


Figura 32 - Cenários dos Fluxos de Caixa do Ano 5

Fonte: elaboração própria

Ou seja, no ano 5 o fluxo de caixa esperado é $80\% \times \text{R\$ } 550.000 + 20\% \times \text{R\$ } 250.000 = \text{R\$ } 490.000,00$ (Fluxo de Caixa esperado 2). Deve-se construir esses cenários para cada ano subsequente. No ano 6 seria:

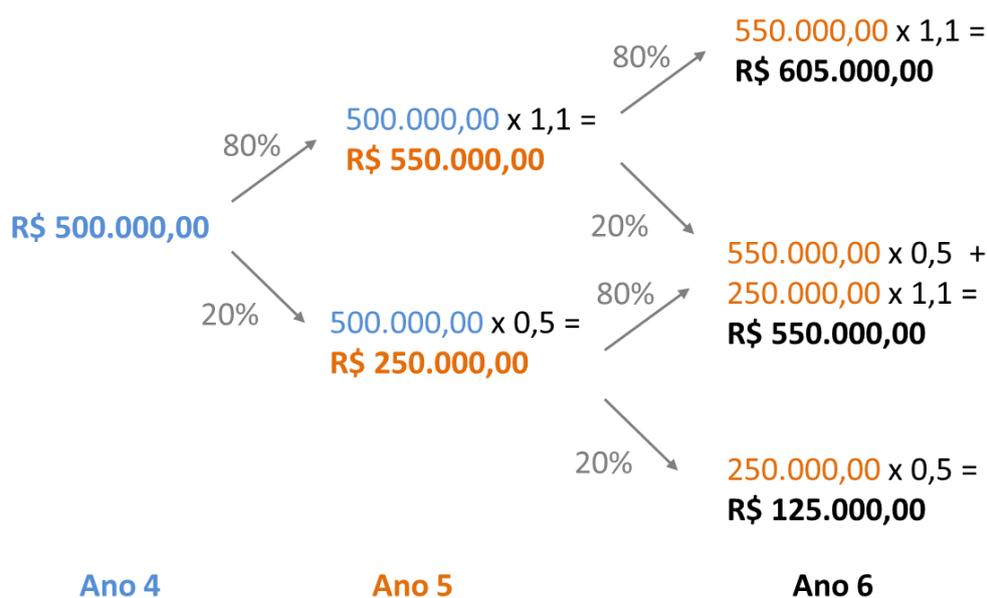


Figura 33 - Cenários esperados do Fluxo de Caixa para o 6º ano

Fonte: elaboração própria

No sexto ano o valor esperado do Fluxo de Caixa seria: $80\% \times 80\% \times \text{R\$ } 605.000,00 + 80\% \times 20\% \times \text{R\$ } 550.000,00 + 20\% \times 80\% \times \text{R\$ } 550.000,00 + 20\% \times 20\% \times \text{R\$ } 125.000,00 = \text{R\$ } 568.200,00$ (Fluxo de Caixa esperado 3).

Após realizar a construção completa dessa árvore binomial, deve-se trazer os Fluxos de Caixa Esperados de cada ano a valor presente (trazer todos os fluxos para o ano 4). A fórmula seria:

VP FC no ano 4

$$= FC Esperado_1 + \frac{FC Esperado_2}{(1 + 25\%)} + \frac{FC Esperado_3}{(1 + 25\%)^2} + \dots$$

$$+ \frac{FC Esperado_8}{(1 + 25\%)^7}$$

Uma maneira mais rápida para computar esses valores é construindo em uma planilha eletrônica duas árvores binomiais, uma com as probabilidades de subida (p) e descida (1 - p) em cada cenário, e outra árvore com os Valores Futuros de cada cenário. E por fim multiplicar-se-ia essas duas árvores binomiais para se encontrar os valores esperados em cada ano. Elas ficariam assim:

| Ano | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | | | | | 20,97% |
| | | | | | | | 26,21% | |
| | | | | | 40,96% | | 32,77% | 36,70% |
| | | | 64,00% | 51,20% | 40,96% | 40,96% | 39,32% | 27,53% |
| | | 80,00% | 38,40% | 40,96% | | 20,48% | 24,58% | 11,47% |
| 100% | | 32,00% | | 15,36% | | | 8,19% | |
| | | 20,00% | 9,60% | | 2,56% | 5,12% | | 2,87% |
| | | | 4,00% | | 0,80% | | 1,54% | |
| | | | | 0,80% | | 0,64% | | 0,43% |
| | | | | | 0,16% | | 0,15% | |
| | | | | | | 0,03% | | 0,04% |
| | | | | | | | 0,01% | |
| | | | | | | | | 0,00% |

Figura 34 - Árvore Binomial com as probabilidades de cada cenário ao longo dos anos

| Ano | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|------------|---|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | | | | | | 974.358,55 |
| | | | | | | | 885.780,50 | |
| | | | | | 732.050,00 | | 805.255,00 | 3.100.231,75 |
| | | | 605.000,0000 | 665.500,00 | | 1.830.125,00 | 2.415.765,00 | 4.227.588,75 |
| | | 550.000,00 | 907.500,00 | | 1.331.000,00 | | 2.745.187,50 | |
| 500.000,00 | | 550.000,0000 | 907.500,00 | | 907.500,00 | 1.663.750,00 | 1.663.750,00 | 3.202.718,75 |
| | | 250.000,00 | 412.500,00 | | | 756.250,00 | | 1.455.781,25 |
| | | | 125.000,0000 | | 275.000,00 | | 567.187,50 | |
| | | | | 62.500,00 | | 171.875,00 | | 397.031,25 |
| | | | | | 31.250,00 | | 103.125,00 | |
| | | | | | | 15.625,00 | | 60.156,25 |
| | | | | | | | 7.812,50 | |
| | | | | | | | | 3.906,25 |

Figura 35 - Árvore Binomial com os Valores Futuros de cada cenário ao longo dos anos

Com a multiplicação dessas duas árvores binomiais chega-se aos seguintes valores esperados para cada ano e os respectivos valores trazidos para o valor presente no ano 4:

| Ano | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|----------------------------|--------------|------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| Valor Esperado em cada ano | 500.000,00 | 490.000,00 | 568.200,00 | 729.316,00 | 991.507,28 | 1.394.046,16 | 2.001.942,07 | 2.916.559,42 |
| Valor Presente do VE | 500.000,00 | 392.000,00 | 363.648,00 | 373.409,79 | 406.121,38 | 456.801,05 | 524.797,10 | 611.646,84 |
| Somatório dos VPs | 3.628.424,16 | | | | | | | |

Chega-se ao valor presente no ano 4 dos Fluxos de Caixa positivo de R\$ 3.628.424,16. Em seguida deve-se utilizar esse valor na árvore binomial dos custos de investimento do projeto para se chegar ao valor presente do projeto no ano 0 (hoje).

O investimento inicial (I0) é de R\$ 500.000,00 e os pesquisadores esperam que nas próximas etapas de investimento (I1, I2 e I3) o custo do investimento possa aumentar 30% (u) com probabilidade de 65% (p) ou diminuir 30% (d) com probabilidade de 35% (1 - p).

O procedimento dos cálculos é exatamente igual ao dos Fluxos de Caixa positivo. Começa-se no ano zero com um custo de R\$ 500.000,00 que, no ano 1, pode crescer para $1,3 \times R\$ 500.000,00 = R\$ 650.000,00$, com probabilidade de 65%, ou diminuir para $0,7 \times R\$ 500.000,00 = R\$ 350.000,00$, com probabilidade de 35%. Assim, o valor esperado do custo de investimento no ano 1 será $65\% \times R\$ 650.000,00 + 35\% \times R\$ 350.000,00 = R\$ 545.000,00$.

As árvores binomiais da probabilidade e do Valor Futuro do Investimento são:

| Ano | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----|---------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | | 17,85% |
| | | | | 27,46% | |
| | | | 42,25% | | 38,45% |
| | | 65,00% | | 44,36% | |
| | 100,00% | | 45,50% | | 31,05% |
| | | 35,00% | | 23,89% | |
| | | | 12,25% | | 11,15% |
| | | | | 4,29% | |
| | | | | | 1,50% |

Figura 36 - Árvore Binomial das probabilidades de cada cenário

Fonte: elaboração própria

Para a árvore binomial do Valores Futuros do investimento, utiliza-se o valor encontrado de R\$ 3.628.424,16 como Valor Futuro do ano 4 (é a receita do projeto trazida a valor presente no ano 4). Os custos do investimento ocorrerão nos anos 0 até 3 da seguinte forma:

| Ano | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------|--------------|--------------|---|----------------|--------------|
| | | | | | 3.628.424,16 |
| | | | | - 1.098.500,00 | |
| | | - 845.000,00 | | | 3.628.424,16 |
| | - 650.000,00 | | | - 591.500,00 | |
| - 500.000,00 | | - 455.000,00 | | | 3.628.424,16 |
| | - 350.000,00 | | | - 318.500,00 | |
| | | - 245.000,00 | | | 3.628.424,16 |
| | | | | - 171.500,00 | |
| | | | | | 3.628.424,16 |

Figura 37 - Árvore Binomial com os Valores Futuros (investimento e FC positivo) de cada ano do projeto

Fonte: elaboração própria

Realizando a multiplicação dessas duas árvores binomiais chega-se aos seguintes valores esperados para cada ano e os respectivos valores trazidos para o valor presente no ano 0 (hoje):

| Ano | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Valor Esperado em cada ano | - 500.000,00 | - 545.000,00 | - 594.050,00 | - 647.514,50 | 3.628.424,16 |
| Valor Presente do VE | - 500.000,00 | - 436.000,00 | - 380.192,00 | - 331.527,42 | 1.486.202,54 |
| Somatório dos VPs | - 161.516,89 | | | | |

Figura 38 - Valores Esperados e Valores Presentes de cada ano do projeto

Chega-se a um Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ - 161.516,89. Ou seja, não se aceitaria investir em tal projeto, pois o retorno dele não é suficiente para cobrir a taxa de risco.

Comparando o método do Fluxo de Caixa Descontado com o do Valor Esperado, percebe-se a vantagem do Valor Esperado ao permitir construir diferentes cenários atribuindo probabilidades para os mesmos, permitindo observar como o valor do projeto se comporta em cada ano e cenário. A aplicação do método do Valor Esperado é importante para introduzir o conceito de opções e a valoração das mesmas.

V.5 ABORDAGEM PELAS OPÇÕES REAIS

Nessa sessão se aplica a Teoria das Opções Reais com o modelo binomial para a avaliação econômica do projeto de PD&I do setor de petróleo e gás.

Primeiramente faz-se necessário o calcula da probabilidade neutra ao risco. Os valores de subida ($u = 1,3$) e descida ($d = 0,7$) estimados pelos cientistas devem ser ajustados pelo valor no tempo. Por exemplo, o custo inicial estimado é de R\$ 500.000,00 podendo subir 30% (custo iria para R\$ 650.000,00) ou descer 0,7 (custo iria para R\$ 350.000,00). Esquematizando:

| | 0 | 1 |
|---|------------|--------------|
| | | - 650.000,00 |
| - | 500.000,00 | |
| | | - 350.000,00 |

Figura 39 - Valores futuros do custo

Fonte: elaboração própria

O valor presente desses custos será o valor esperado do ano 1 trazido a valor presente:

$$VP \text{ custos} = 65\% \times \frac{650.000}{(1 + 25\%)} + 35\% \times \frac{350.000}{(1 + 25\%)} = 436.000$$

De posse de valor presente, recalculamos os novos fatores de subida (u) e descida (d) corrigidos pelo valor no tempo:

$$u = \frac{650.000}{436.000} = 1,491$$

$$d = \frac{350.000}{436.000} = 0,803$$

Substituindo os novos fatores calculados na equação da probabilidade neutra ao risco encontra-se:

$$q = \frac{1 + r - d}{u - d} = \frac{1 + 8\% - 0,803}{1,491 - 0,803} = 40,29\%$$

Ao se utilizar a probabilidade neutra ao risco, pode-se trazer os fluxos a valor presente utilizando a taxa livre de risco ao invés da taxa de risco. Isso será visto comparando o cálculo do Valor Presente do custo de investimento do ano 1 com e sem a probabilidade neutra ao risco:



Figura 40 - Diferença de cálculos do Valor Presente utilizando ou não a probabilidade neutra ao risco

Fonte: elaboração própria

Pode-se perceber dos cálculos acima que o Valor Presente nos dois casos é igual (R\$ 436.000,00). A diferença é que a probabilidade neutra ao risco permite trabalhar com a taxa livre de risco ao se trazer o Valor Esperado a valor presente. Como já foi apresentado na revisão teórica, antes desse caso, essa característica da probabilidade neutra ao risco é vantajosa ao retirar da discussão a estimação de qual taxa de risco utilizar, fazendo que os pesquisadores tenham que estimar apenas o quanto acreditam que o Fluxo de Caixa possa subir ou descer em cada cenário e as respectivas probabilidades de cada cenário.

O procedimento para o cálculo do Valor Esperado utilizando a probabilidade neutra ao risco é igual ao apresentado na sessão anterior: deve-se continuar calculando os próximos cenários multiplicando pelos fatores de subida ($u = 1,3$) ou descida ($d = 0,7$) e as respectivas probabilidades neutras ao risco. Para facilitar o cálculo computacional será elaborada a árvore binomial da probabilidade neutra ao risco e depois a árvore binomial do Valor Futuro de cada cenário para, por fim, multiplicar essas duas árvores binomiais para se encontrar o Valor Esperado para cada ano:

| Ano | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----|---------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | | 2,64% |
| | | | | 6,54% | |
| | | | 16,24% | | 15,62% |
| | | 40,29% | | 29,08% | |
| | 100,00% | | 48,12% | | 34,73% |
| | | 59,71% | | 43,09% | |
| | | | 35,65% | | 34,31% |
| | | | | 21,28% | |
| | | | | | 12,71% |

Figura 41 - Árvore Binomial das probabilidades neutra ao risco

Fonte: elaboração própria

| Ano | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|
| | | | | | 3.628.424,16 |
| | | | | - 1.098.500,00 | |
| | | | - 845.000,00 | | 3.628.424,16 |
| | | - 650.000,00 | | - 591.500,00 | |
| | - 500.000,00 | | - 455.000,00 | | 3.628.424,16 |
| | | - 350.000,00 | | - 318.500,00 | |
| | | | - 245.000,00 | | 3.628.424,16 |
| | | | | - 171.500,00 | |
| | | | | | 3.628.424,16 |

Figura 42 - Árvore Binomial dos Valores Futuros de cada ano

Fonte: elaboração própria

Multiplicando as duas árvores binomiais chega-se ao valor esperado para cada ano e valor presente de:

| Ano | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Valor Esperado em cada ano | - 500.000,00 | - 470.880,00 | - 443.455,95 | - 417.629,07 | 3.628.424,16 |
| Valor Presente do VE | - 500.000,00 | - 436.000,00 | - 380.192,00 | - 331.527,42 | 1.486.202,54 |
| Somatório dos VPs | - 161.516,89 | | | | |

Figura 43 - Valor Esperado e Valor Presente de cada ano

Fonte: elaboração própria

Como era de se esperar o Valor Presente Líquido é de R\$ - 161.516,89 igual ao calculado na sessão anterior. A única diferença aqui, como já explicado, é que ao se utilizar a probabilidade neutra ao risco, ao invés de se descontar o Valor Esperado de cada ano pela taxa de risco, o desconto é feito pela taxa livre de risco.

O próximo passo é calcular novamente esse VPL utilizando a árvore binomial pelo método Backward (conforme apresentado na sessão III.5.3 Método Forward e Backward), que nada mais é do que começar a árvore binomial de trás para frente. Começa-se no ano 3 com os Valores Futuros de custo de investimento necessário para cada um dos cenários e esses valores serão trazidos para o ano 2 descontando pela taxa livre de risco e ponderando pela probabilidade neutra ao risco. O cálculo para cada cenário seguirá a lógica:

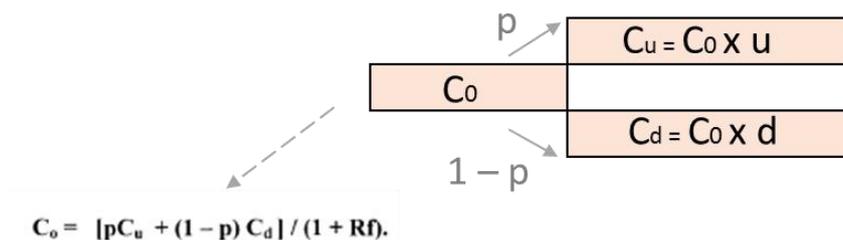


Figura 44 - Cálculo da Árvore Binomial pelo método Backward

Fonte: elaboração própria

Em seguida se projeta uma árvore binomial pelo método backward para os custos e para as receitas:

| 0 | 1 | 2 | 3 |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Cálculo backward custos | | | |
| | | | - 1.098.500,00 |
| | | - 1.581.840,00 | |
| | - 1.711.049,60 | | - 591.500,00 |
| - 1.647.719,42 | | - 851.760,00 | |
| | - 921.334,40 | | - 318.500,00 |
| | | - 458.640,00 | |
| | | | - 171.500,00 |

Figura 45 - Árvore Binomial dos custos de investimento calculados pelo método Backward

Fonte: elaboração própria

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Cálculo backward receita | | | | |
| | | | | 3.628.424,16 |
| | | | 2.902.739,33 | |
| | | 2.322.191,46 | | 3.628.424,16 |
| | 1.857.753,17 | | 2.902.739,33 | |
| 1.486.202,54 | | 2.322.191,46 | | 3.628.424,16 |
| | 1.857.753,17 | | 2.902.739,33 | |
| | | 2.322.191,46 | | 3.628.424,16 |
| | | | 2.902.739,33 | |
| | | | | 3.628.424,16 |

Figura 46 - Árvore Binomial das receitas calculadas pelo método Backward

Fonte: elaboração própria

Pode-se então somar as duas árvores binomiais para se chegar ao VPL do projeto:

Em nenhum dos cenários do terceiro ano é mais vantajoso abandonar o projeto ao invés de continuá-lo. Portanto, a opção de abandono não será exercida em nenhum desses cenários.

Em seguida deve-se aferir a opção pelo abandono no segundo ano:

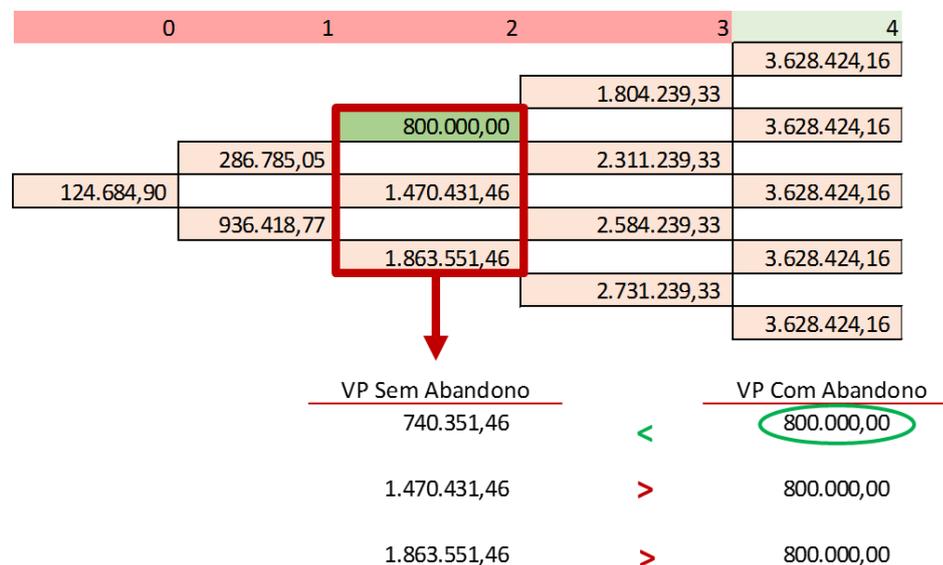


Figura 49 - Árvore Binomial com a modelagem da opção de abandono no terceiro ano

Fonte: elaboração própria

No segundo ano percebe-se que, no cenário 1, o valor presente sem abandono (R\$ 740.351,46) é menor do que o valor presente com abandono, ou seja, nesse cenário a opção de abandono seria exercida. Por conta do exercício dessa opção, o VPL torna-se positivo com o valor de R\$ 124.684,90 e o projeto torna-se economicamente viável (VPL > 0).

$$\begin{aligned}
 \text{VPL Opção} &= \text{VPL com Opção} - \text{VPL sem Opção} = 124.684,90 - (-161.516,89) \\
 &= \text{R\$ } 286.201,79
 \end{aligned}$$

Diante do caso proposto, foi possível mensurar o valor que a opção de abandono no segundo ano adiciona ao projeto, tornando-o viável economicamente. A Teoria das Opções Reais consegue valorar as opções existentes, capturando valores no projeto que não são mensurados pelas abordagens tradicionais. O caso apresentado considerou apenas a opção de abandono para ilustrar a aplicação das opções reais. Contudo as modelagens podem se tornar mais complexas, identificando-se mais opções possíveis no projeto, como a opção de reduzir a escala do projeto ou a opção de aguardar com objetivo de maturar alguma tecnologia que possa ser aplicada no projeto e que aumente sua performance ou reduza seu custo.

Conclusão

O presente trabalho comparou o método mais tradicional de avaliação de projetos de investimento, o Fluxo de Caixa Descontado, com a Teoria das Opções Reais, apresentando as vantagens e limitações de cada método, especialmente em projetos com alta incerteza. Para tal fim, realizou-se uma revisão bibliográfica de ambos métodos, perpassando desde o seu contexto histórico até o ferramental teórico, a fim de introduzir o tema e as teorias utilizadas ao longo do trabalho.

Conforme apresentado, a abordagem pela teoria das opções reais para análise de projetos de investimento com incertezas e instabilidades vem se mostrando como um ferramental que proporciona um nível de informações diferenciado aos gestores, além de fornecer uma avaliação mais justa acerca da viabilidade do investimento.

O benefício dessa metodologia frente às metodologias tradicionais de análise investimentos está na capacidade de analisar e orientar o percurso de um projeto de investimento, tanto pela precisão da técnica como pelas informações originárias das fases de desenvolvimento. Desta forma, ao gerar conexões entre informações pré-existentes com novas informações advindas no decorrer do ciclo de vida do projeto, a TOR proporciona maior segurança ao gestor nos processos de tomada de decisão.

Posteriormente, adentrou-se nas particularidades existentes em projetos de P,D&I. Esses se caracterizam por uma série de investimentos em etapas que podem ser identificadas de acordo com a escala TRL. Além disso, tratam-se de projetos com elevada incerteza, apresentado uma grande taxa de insucesso principalmente nas fases que levam do TRL 5 ao 7 (teste de protótipo em escala piloto até o teste em ambiente de produção), nomeados de Vale da Morte Tecnológico (TRL 5 ao 6) e Vale da Morte Mercadológico (TRL 7). Um dos principais motivos pela elevada taxa de insucesso é a escassez de financiamentos nessas etapas, por conta de muitos investidores avaliarem projetos de P,D&I com os ferramentais tradicionais de valoração de investimentos.

Por fim, apresentou-se um caso hipotético de avaliação de um projeto em P,D&I na indústria de Óleo & Gás. O presente estudo possibilitou a aplicação direta das duas metodologias apresentadas (Fluxo de Caixa Descontado e TOR), comparando a diferença na valoração do mesmo projeto por elas. A TOR possibilitou uma modelagem mais realista do projeto, indicando ao gestor do projeto as decisões que maximizam o retorno do projeto, ao revelar se se deve continuar ou abandoná-lo em cada uma das etapas de investimento. Uma das limitações do caso hipotético foi a de não considerar uma

deterioração do valor da empresa em caso de não investimento (uma das armadilhas do FCD apresentada no quarto capítulo), pois o foco desse trabalho foi o de comparação da metodologia do FCD com a TOR. No entanto, uma análise mais realista deveria considerar uma queda no valor da firma em caso de não investimento em inovação.

Defronte do exposto no caso hipotético e na revisão da literatura sobre opções reais, pode-se concluir que a abordagem pela teoria das opções reais representa um ferramental relevante para avaliação de projetos de investimentos, especialmente em um contexto de riscos e incertezas, uma vez que sua interatividade informacional possibilita ao gestor um nível de informação tal, que pode auxiliá-lo na tomada das decisões a fim de ampliar a capacidade de gerenciar os retornos esperado de um projeto.

Para interessados em se aprofundar no tema, livros-texto referência no assunto são o de Pindyck e Dixit (Investimento sob Incerteza, Princeton: Princeton University Press) que apresenta a TOR tanto na abordagem em tempo discreto quanto em tempo contínuo e o de Copeland e Antikarov (Opções Reais: Um guia prático, Texere). No caso de aplicações na indústria de Óleo & Gás, os dois volumes de Marco Antônio Guimarães Dias (Análise de Investimentos com Opções Reais - Teoria e Prática com Aplicações em Petróleo e em Outros Setores) são referência no assunto, sendo o primeiro volume voltado para a aplicação no tempo discreto com o método binomial e o segundo no tempo contínuo. Ao longo das duas obras são apresentados diversos casos de aplicação da teoria na avaliação de investimento na indústria de petróleo e sua implementação em planilhas eletrônicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL-BAPTISTA, M. A.; DESTERRO, M. D. P. D.; BRANDÃO, L. E. T. Valuing the Option to Enter a New Market: The Belvedere Coal Project Acquisition in Australia. **EnANPAD - XXXIV Encontro da ANPAD**, setembro 2010.

AMRAM, M.; KULATILAKA, N. Real Options: Managing Strategic Investment in a Uncertain World. **Harvard Business School Press**, 1999.

ANP. Manual Orientativo. **ANP**, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/arquivos/pdi/investimentos-pdi/rtri/manual-orientativo.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2019.

ARNOLD, G. C.; HATZOPOULOS, P. D. The Theory-Practice Gap in Capital Budgeting: Evidence from the United Kingdom. **Journal of Business Finance & Accounting**, v. 27, p. 603-626, Junho 2000.

BAURENS, S. **Valuation of Metals and Mining Companies**. [S.l.]: University of Zürich, 2010.

BLACK, F.; SCHOLES, M. The pricing of options and corporate liabilities. **Journal of Political Economy**, Maio 1973.

BORISON, A. Real Options Analysis: Where are the Emperor's Clothes? **Presented at Real Options Conference, Washington, DC**, Julho 2003.

BRANDÃO, L. E. T. **Uma aplicação da teoria das opções reais em tempo discreto para avaliação de uma concessão rodoviária no Brasil**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica, 2002.

BRANDÃO, L. E.; DYER, J. S.; HAHN, W. J. Using Binomial Decision Trees to Solve Real Option Valuation Problems. **Inform**, Maio 2005.

BRASIL, H. G. et al. **Opções Reais - Conceitos e aplicações a empresas e negócios**. São Paulo: Saraiva, 2007.

BREALEY, R. A.; MYERS, S. C. **Principles of Corporate Finance**. [S.l.]: Irwin/McGraw-Hill, 2003.

CASTOR, B. V. J. Planejamento Estratégico em Condições de Elevada Instabilidade. **Revista FAE**, Curitiba, v. 3, n. 2, p. 1-7, maio/agosto 2000.

CHRISTENSEN, C. M.; KAUFMAN, S. P.; SHIH, W. C. Innovation Killers: How Financial Tools Destroy Your Capacity to Do New Things. **Harvard Business Review**, Janeiro 2008.

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

COPELAND, T.; ANTIKAROV, V. **Opções Reais - Um Novo Paradigma para Reinventar a Avaliação de Investimentos**. 1^a. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2001.

COPELAND, T.; TUFANO, P. A Real-World Way to. **Havard Business Review**, p. 90-94, Março 2004.

COX, J. C.; ROSS, S. A.; RUBINSTEIN, M. Option pricing: A Simplified Approach. **Journal of Financial Economics**, v. 7, p. 229-264, 1979.

DAVIS, G. A. Estimating volatility and dividend yield when valuing real options to invest or abandon. **The Quarterly Review of Economics and Finance** **38**, 1998. 725-754.

DIAS, M. A. G. **Análise de Investimentos com Opções Reais**. Rio de Janeiro: Interciência Ltda., v. 1, 2014.

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

GRAHAM, J. R.; HARVEY, C. R. The theory and practice of corporate finance: Evidence from the field. **Journal of Financial Economics**, n. 61, Dezembro 1999.

HUCHZERMEIER, A.; LOCH, C. H. Project management under risk: Using real options approach to evaluate flexibility in R&D. **Management Science**, p. 85-101, 2001.

KEMNA, A. G. Z. Case Studies on Real Options. **Financial Management**, v. 22, p. 259-270, 1993.

LUEHRMAN, T. A. Valuation used to be the province of financial specialists. That's no longer true. What's It Worth ? A General Manager's Guide to Valuation. **Havard Business Review**, Maio-Junho 1997. 132-142.

LUEHRMAN, T. A. Investment Opportunities as Real Options: Getting Started on the Numbers. **Havard Business Review**, p. 51-67, Julho-Agosto 1998.

MCKINSEY. Making Real Options Real. **THE MCKINSEY QUARTERLY - NUMBER 3**, n. 3, p. 128 - 141, 1998.

MILLER, L. T.; PARK, C. S. Decision Making Under Uncertainty—Real Options to the Rescue? **The Engineering Economis**, v. 47, n. 2, p. 105-150, 2002.

MINARDI, A. M. A. F. Teoria de opções aplicada a projetos de investimento. **RAE - Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v. 40, n. 2, p. 74-79, Abril/Junho 2000.

MUN, J. **Real options Analysis – Tools and Techniques for Valuing Strategic Investments and Decisions**. New Jersey, EUA: [s.n.], 2006.

MUN, J. Real Options and Monte Carlo Simulation versus Traditional DCF in Layman's Terms. **Managing enterprise risk**, Amsterdam, p. 75-106, 2006.

MYERS, S. C. Determinants of Corporate Borrowing. **Journal of Financial Economics**, 1977.

PERLITZ, M.; PESKE, T.; SCHRANK, R. Real options valuation the new frontier in R&D project evaluation. **R&D Management**, 1999.

PUTTEN, A. V.; MACMILLAN, I. Making Real Options Really Work. **Havard Business Review**, p. 134-141, Dezembro 2004.

SAITO, M. B.; JÚNIOR, J. L. T.; OLIVEIRA, M. R. G. D. A teoria das opções reais: uma aplicação a projetos de investimento em inovação tecnológica considerando-se o valor da flexibilidade gerencial. **VII SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, 2010.

SAITO, M. B.; JÚNIOR, J. L. T.; OLIVEIRA, M. R. G. D. A teoria das opções reais: uma aplicação a projetos de investimento em inovação tecnológica considerando-se o valor da flexibilidade gerencial. **VII SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, 2010.

SANTIAGO, L. P.; VAKILI, P. On the Value of Flexibility in R&D Projects. **Management Science**, v. 1206-1218, n. 51, 2005.

SANTOS, E. M.; PAMPLONA, E. Teoria das Opções Reais: A Aplicação em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). **Segundo Encontro Brasileiro de Finanças - IBMEC**, Rio de Janeiro, 2002.

SCHWARTZ, E. **The Real Options Approach to Valuation: Challenges and Opportunities**. Los Angeles, EUA: [s.n.], 2001.

SHARPE, W. F. **Investments**. [S.l.]: [s.n.], 1978.

SILVA, T. A. O.; SANTIAGO, L. P. New product development projects evaluation under time uncertainty. **Pesquisa Operacional**, v. 29, 2009. ISSN 3.

UPADHYAYULA, V. K. K. et al. Advancing game changing academic research concepts to commercialization: A Life Cycle Assessment (LCA) based

sustainability framework for making informed decisions in Technology Valley of Death (TVD). **ELSEVIER**, Dezembro 2017.

VIDAL, A. P. et al. **Avaliação de um Projeto de Mineração Aplicando a Teoria das Opções Reais**. [S.l.]: [s.n.], 2008.