

1

Introdução e Motivação

1.1.

Os Objetivos da Tese

A teoria das opções reais é uma metodologia consolidada para a análise de investimentos sob condições de incerteza. Modelos de opções reais em petróleo vêm sendo desenvolvidos desde a tese pioneira de Tourinho (1979) e dos trabalhos de pesquisa no Laboratório de Energia do MIT no início dos anos 80, cujo artigo publicado mais conhecido é o de Paddock & Siegel & Smith (1988). Hoje em dia existem dezenas de artigos de opções reais (OR) em petróleo tanto na literatura acadêmica como na literatura profissional.

No entanto, há uma carência na literatura existente em termos de metodologias consistentes e adequadas para a modelagem de pelo menos duas importantes questões descritas a seguir.

Primeiro, a integração da *incerteza técnica* em modelos de opções reais tem deixado muito a desejar. Alguns artigos, mesmo autores consagrados e experientes como Cortazar & Schwartz & Casassus (2001), tem cometido inconsistências tais como tratar a incerteza técnica de forma similar à incerteza de mercado modelando-a com um processo estocástico em tempo contínuo tal como o movimento geométrico Browniano (MGB). Incerteza técnica será bastante discutida no capítulo 3, em que uma nova metodologia será apresentada, e sua praticidade será constatada em aplicações no capítulo 5. Essa incerteza tem grande importância prática (especialmente em petróleo) e sua correta e adequada integração em modelos de opções reais é fundamental para uma maior aceitação dessa teoria em diversas indústrias tais como a indústria de petróleo.

Segundo, a realidade é sempre mais complexa do que qualquer modelo matemático. Modelos de OR não são exceções dessa máxima. O problema é que muitas vezes os modelos tradicionais de OR são *demasiadamente* simplificados para atenderem adequadamente determinadas aplicações e/ou, quando formulados de forma razoável, são muito difíceis de serem resolvidos (problemas complexos

de otimização sob incertezas). Esses problemas demandam soluções especiais que combinem outras teorias com a teoria das opções reais tradicionais, ou seja, demandam *opções reais híbridas* (ORH), que é o objeto dessa tese. Um exemplo é o caso em que o efeito da competição é importante a ponto de ser necessário modelá-lo endogenamente, combinando a teoria dos jogos com a teoria das OR. Modelos de *jogos de opções* (“*option games*”) é uma das principais opções reais híbridas e será dado um destaque especial para elas no capítulo 4 e nas aplicações do capítulo 5.

O desenvolvimento de metodologias e modelos de opções reais híbridas representa um grande desafio, pois é necessário conhecer com razoável profundidade não apenas a teoria de OR (que já possui uma certa complexidade) como outras teorias não menos complexas tais como a teoria dos jogos, a teoria de decisão estatística Bayesiana/teoria clássica de valor da informação, teoria de computação evolucionária e outras teorias que serão combinadas para formar as chamadas opções reais híbridas.

Esse desafio – que essa tese procura responder, demanda um grande esforço bibliográfico para aprender os conceitos e modelos de outras teorias. É necessário também discernimento e criatividade para combinar essas teorias de forma adequada para solucionar problemas práticos complexos e relevantes. Por isso se notará que essa tese faz referências bibliográficas a artigos e livros de disciplinas diversas tais como das áreas de biologia, psicologia, medicina, probabilidade, estatística, teoria dos jogos, computação evolucionária, teoria da informação (entropia), física computacional e – naturalmente, finanças corporativas com destaque em opções reais. Esse esforço é motivado pela crença que a metodologia híbrida, quando aplicada adequadamente, gera oportunidades de saltos de qualidade no conhecimento. A combinação de várias teorias e conceitos gera uma certa complexidade. Para contrabalançar essa complexidade, serão usados inúmeros exemplos simples que permitirão o entendimento intuitivo dos conceitos a serem usados mais tarde em aplicações mais completas.

O foco de aplicações dos modelos da tese é em petróleo – especialmente exploração e produção (E&P) de petróleo, devido à origem e interesse profissional do autor. No entanto, as metodologias aqui apresentadas são muitas vezes mais gerais e podem ser aplicadas em outras áreas tais como em análise de projetos de

pesquisa e desenvolvimento (P&D) e em alguns casos até em aplicações fora do contexto de análise econômica de projetos¹.

O estilo dessa dissertação combina *informalidade intuitiva* com *formalidade descritiva*. O autor julga que ambas são necessárias para se atingir os objetivos de uma tese de doutorado. A informalidade intuitiva possibilita clarificar os conceitos usados e metodologias aplicadas através de exemplos simples, tabelas e figuras. Note que mesmo livros rigorosos, como o Dixit & Pindyck (1994), usam amplamente os exemplos numéricos para ilustrar idéias. Já a formalidade descritiva permite precisar mais esses conceitos e métodos através de definições, equações, lemas, proposições e teoremas. Os lemas são geralmente resultados conhecidos que apóiam as proposições. As proposições procuram destacar algum resultado que se aplica com alguma generalidade, mas de interesse específico dessa tese e com alguma inovação. Os teoremas fazem o mesmo, mas têm maior importância, são ainda mais formais na apresentação e são inéditos na literatura².

1.2.

A Organização da Tese

Essa dissertação está organizada em 9 capítulos. Nesse primeiro capítulo está sendo apresentada uma introdução contendo a motivação e os objetivos do tema escolhido para essa tese.

No segundo capítulo se abordará a *teoria tradicional das opções reais*, com discussão sobre a incerteza de mercado (com foco em preços do petróleo) e em aplicações na área de exploração e produção de petróleo. É feita uma breve revisão bibliográfica de OR e, para motivar o tema da tese, é feito um relato do estado da prática de OR em empresas. A seguir são discutidos os processos estocásticos populares para preços do petróleo tais como o movimento geométrico Browniano, assim como os mais complexos modelos de reversão à média, combinados ou não com processos de saltos (Poisson). São mostrados brevemente alguns modelos de E&P de petróleo. Desde modelos simples, como o modelo clássico de Paddock & Siegel & Smith (1988), como modelos mais complexos, tais como os modelos com opção de escala, com opção de expansão, com opções

¹ Em 2002, após assistir a palestra do autor dessa tese no MIT, o Prof. Myers sugeriu que o conceito de *distribuição de revelações* fosse aplicado na área médica para pré-avaliar tratamentos.

² Ao melhor do conhecimento do autor, que investigou mais de 3000 itens bibliográficos (artigos, teses e livros).

estendíveis, de troca de ativos de risco, de abandono e de regulação. Também nesse capítulo será discutida a função valor presente líquido (VPL), que é obtida no exercício da opção real de desenvolver um campo de petróleo.

No terceiro capítulo será analisado o problema da incerteza técnica. Serão discutidas metodologias de valor da informação e metodologias para integrar esses conceitos em modelos dinâmicos de opções reais. Esse é o capítulo da tese com maior número de inovações, apresentando conceitos tais como os de distribuições de revelações, processos de revelação e medidas de aprendizagem. É ensaiada uma teoria sobre medidas de aprendizagem com uma lista de axiomas. São analisados em especial os processos de revelação de Bernoulli, de grande importância para investimentos em exploração de petróleo. Essas inovações foram demandadas por problemas práticos bem definidos, aos quais a teoria das opções reais tradicional não dá uma resposta satisfatória. A base teórica desses conceitos será bem estabelecida inclusive através de alguns novos lemas, teoremas e proposições. Esses novos conceitos estão diretamente ligados ao conceito de expectativa condicional – largamente usada na moderna teoria de finanças, o que facilitará o seu uso em modelos de opções reais híbridas. Esses modelos serão aqui classificados como um tipo de *opção real Bayesiana* devido ao importante papel desempenhado pela distribuição a priori.

No capítulo 4 serão abordadas a teoria dos jogos e a sua combinação com a teoria das OR – os *jogos de opções reais*. Serão focados principalmente os jogos não-cooperativos, em especial os jogos de momento (“*timing games*”) – com destaque para os jogos de preempção e de guerra de atrito. Mas também será analisado o mais importante tipo de jogo cooperativo, o jogo da barganha. Será revista a conexão do jogo cooperativo de barganha com a versão não-cooperativa de barganha. Será feita também uma introdução à teoria de jogos de opções reais, mostrando duas metodologias equivalentes para solucionar os principais jogos de opções reais (apresentado em Dias & Teixeira, 2003) assim como alguns “artifícios” matemáticos usados para facilitar a solução de alguns casos como o de oligopólio sob incerteza (analisado em parte do artigo de Dias & Teixeira, 2004). Será feita também uma introdução ao jogo exploratório da espera, que será depois detalhado no capítulo 6, de aplicações em petróleo.

No capítulo 5 são apresentadas as duas principais aplicações em E&P de petróleo para as opções reais híbridas. Primeiro uma aplicação de opções reais

Bayesianas, onde se tem um campo de petróleo já descoberto mas com alguma incerteza técnica. Usando a metodologia de distribuição de revelações do capítulo 3, são analisadas várias alternativas de investimento em informação – com diferentes custos, tempos e benefícios de aprendizagem – integrado num modelo dinâmico de opções reais que considera também o momento ótimo de desenvolver o campo, combinando simulação de Monte Carlo com o método tradicional de equação diferencial parcial (EDP). O objetivo é selecionar a melhor alternativa de investimento em informação e o momento ótimo de desenvolver. A segunda – e principal aplicação, analisa a interação estratégica entre duas companhias de petróleo que detêm blocos exploratórios vizinhos com prospectos correlacionados. Esse jogo de espera da perfuração exploratória é analisado dentro do modelo de jogos de opções reais descrito no capítulo 4. Primeiro é considerado o caso clássico não-cooperativo de guerra de atrito e depois considerando a alternativa de mudança de jogo para um jogo cooperativo de barganha. A mudança de jogo considera que o equilíbrio do jogo não-cooperativo é dado de entrada do jogo de Barganha: é o ponto de discordância da solução cooperativa de Nash para jogos de barganha. O valor de cada estratégia está associado a valores de opções reais tanto para o caso de espera quanto ao caso de exercício da opção. Além disso, vários conceitos desenvolvidos no capítulo 3 (medidas de aprendizagem, processos de revelação de Bernoulli, etc.) são aplicados para capturar o efeito de externalidade positiva do exercício da opção de perfurar o poço pioneiro.

No capítulo 6 serão mostradas outras opções reais híbridas, com destaque para opções reais evolucionárias, que usam técnicas de computação evolucionária para resolver problemas complexos de otimização em opções reais. Também serão brevemente discutidas outras ORH tais como opções reais nebulosas (usa lógica nebulosa ou “fuzzy”), opções reais e teoria das restrições, opções reais com preferências modeladas pela teoria da utilidade e pela teoria de prospectos, planejamento estratégico com opções reais, opções reais e teoria de organização, opções reais e teoria modular de desenho (“design”) de projetos, etc.

No capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões da tese e sugestões de extensões dos modelos e metodologias aqui apresentadas.

No capítulo 8 é apresentada a lista de referências bibliográficas. Por razões de espaço, optou-se por colocar apenas os itens bibliográficos *citados* na tese, sem

colocar uma outra lista (muito maior) de itens bibliográficos *consultados* para se fazer essa tese.

No capítulo 9 são apresentadas algumas demonstrações – que pelo seu tamanho ou importância não foram mostradas no corpo principal da tese, assim como alguns tópicos técnicos complementares (ex.: as equações do tempo para um movimento geométrico Browniano alcançar uma barreira). Além disso, é apresentada uma lista do conteúdo do CD-Rom anexo a essa tese (especialmente planilhas/software).