

7 Conclusões

7.1. Principais Contribuições e Conclusões da Tese

Essa tese metodológica e normativa analisou a combinação de opções reais com outras teorias – opções reais híbridas, visando resolver problemas complexos de investimento sob incertezas especialmente do setor petróleo.

Nesse tópico será feita uma lista das principais contribuições dessa tese, assim como algumas conclusões. Extensões serão sugeridas no tópico 7.2.

Foi feita uma revisão sintética do estado da arte da *teoria* de OR, assim como o estado da *prática* de OR em corporações e em outras instituições. Isso foi feito em termos gerais e também focado no setor petróleo. O fato de OR incentivar o uso de novas informações, por ex., através do seqüenciamento dos investimentos, valoriza os conceitos de *aprendizagem em organizações* nessa era do conhecimento. Isso tem facilitado a difusão dos conceitos de OR em empresas e é uma motivação para essa tese abordar e dar ênfase a tópicos como valor da informação e medidas de aprendizagem.

Os capítulos 2, 3, 4, 5 e 6 apresentaram, em maior ou menor grau, algumas inovações ou novas contribuições para a literatura de opções reais. O capítulo 3, o mais extenso, foi o que apresentou a maior quantidade de inovações e por isso mereceu um detalhamento e uma formalidade maior.

No capítulo 2, foram apresentados alguns modelos que trazem algumas novidades na literatura tradicional de opções reais. Um exemplo é o modelo de escala ótima de desenvolvimento dum campo de petróleo, mostrando a existência de *regiões intermediárias de espera* (ou conjuntos desconectados de exercícios) que tinham sido ignoradas anteriormente em modelos similares. O modelo de opções de expansão, também apresentou alguma novidade³⁹⁴ em termos de como modelar essas opções no contexto de desenvolvimento da produção de petróleo.

³⁹⁴ Por ex., a depleção secundária agindo como um dividendo perdido que penaliza a espera no exercício da opção de expansão.

Além disso, a incerteza técnica é importante fonte de valor em aplicações de opções de expansão, motivando ainda mais os desenvolvimentos do cap. 3.

No capítulo 2 também foram estudados importantes aspectos básicos que foram usados em aplicações especialmente do capítulo 5. Um deles foi o modelo da função VPL de desenvolvimento de um campo de petróleo. O VPL é função de variáveis-chaves como preços do petróleo, a qualidade e o volume de uma reserva, além da função investimento. Também foi discutida no cap. 2 a modelagem de incerteza de mercado através de processos estocásticos, em especial para os preços do petróleo. Num horizonte de 10 a 30 anos, além da maior simplicidade, o uso do movimento geométrico Browniano para modelar o preço do petróleo, parece ser bem melhor do que sugerido em boa parte da literatura de OR. Também foram abordados nesse capítulo aspectos práticos de uso de opções reais em empresas de petróleo e de regulação em E&P de petróleo.

No cap. 2, também foram apresentados alguns exemplos numéricos simples, que serviram de motivação para a necessidade prática de se estudar o valor da OR tanto no contexto de incertezas técnicas e de mercado, como nos casos com e sem interação estratégica.

No capítulo 3 foi discutida em profundidade a modelagem de *incerteza técnica*. Essa incerteza tem sido muito mal abordada na maior parte da literatura de opções reais. Um modelo adequado de incerteza técnica, que pudesse ser integrado no contexto dinâmico de opções reais, foi um dos principais objetivos dessa tese. Esse modelo permeou as aplicações no capítulo 5, inclusive se integrando ao modelo de jogos de opções reais em exploração de petróleo.

Uma proposição básica é que a incerteza técnica não demanda prêmio de risco na análise econômica de projetos em corporações com acionistas diversificados. A teoria clássica de finanças mostra que, rejeitar projetos de VPL positivo *por causa* da aversão ao risco de gerentes em relação à incerteza técnica, em média destrói valor do ponto de vista dos acionistas³⁹⁵.

Os conceitos inovadores de *distribuição de revelações* e de *processos de revelação* se mostraram relevantes para ajudar a resolver importantes problemas práticos de opções reais e de jogos de opções reais, em que a incerteza técnica tem

³⁹⁵ Conflitos de *agência* entre gerentes e acionistas são muito comuns na literatura de finanças. Ver por ex., Byrd & Parrino & Oritsch (1998), que gerentes podem ter *preferências diferenciais* em relação ao risco e *diferentes horizontes* para os resultados de investimentos.

um papel relevante. Esses conceitos estão diretamente ligados ao conceito de expectativas condicionais, largamente usado em finanças e em economia, o que ajudou na sua aplicabilidade. Note que as variáveis com incerteza de mercado *também* são modeladas como expectativas condicionais a uma *filtração*³⁹⁶, mas indexadas pelo tempo e seguindo leis de processos estocásticos contínuos em que a incerteza em geral não é reduzida com o tempo. No caso de incertezas técnicas, essa filtração em geral é indexada por eventos (em vez do tempo) e seguindo leis de redução esperada de variância, aqui modeladas por processos de revelação.

A medida de aprendizagem η^2 proposta está diretamente associada ao conceito de distribuição de revelações. Esses conceitos apresentaram uma quantidade surpreendente (grande) de vantagens, propriedades matemáticas favoráveis e conexões com outras teorias. Isso justificou, em parte, a maior extensão do capítulo 3, que procurou explorar esses aspectos. Essa medida tem um lugar natural em aprendizagem probabilística, já que é a redução percentual esperada de variância, o que lhe confere a interpretação intuitiva de medida de redução de incerteza. Outra vantagem é a facilidade de estimação de η^2 através de métodos estatísticos populares tais como regressões e ANOVA. Isso porque essa medida pode ser vista como o R^2 de modelos paramétricos de regressões (lineares ou não), ou como somas de quadrados no contexto de ANOVA. Além disso, em essência, $\eta^2(X | S)$ é uma medida não paramétrica, já que independe das distribuições específicas de X e S , ela só depende das variâncias envolvidas.

A medida de aprendizagem proposta é baseada na suposição que a variância é representativa como medida incerteza nas aplicações propostas. Isso é verdade na grande maioria dos problemas de OR, VOI, finanças corporativas e economia. Mas η^2 não é uma panacéia, apesar de ser usada em diferentes aplicações não relacionadas com essa tese. Por ex., em aplicações tais como a de seguros, a variância não é representativa o suficiente, sendo necessário trabalhar com medidas de dependência para as *caudas* das distribuições, já que o foco de aplicações de seguros é analisar eventos extremos. Em alguns casos, como na teoria de comunicação de dados, usar o conceito de *entropia* para representar a incerteza pode ser mais conveniente. Porém, aqui se defende a tese de que em

³⁹⁶ Em textos mais matemáticos, se especifica que o processo estocástico é condicional a uma filtração \mathfrak{F}_t . Em outros textos, isso fica subentendido para não carregar na notação.

problemas de valor econômico da informação, em OR e algumas outras aplicações, a medida η^2 tem vantagens que não foram observadas por outras medidas concorrentes usadas na literatura de VOI.

O uso da medida η^2 , por ex., substitui o uso de medidas de verossimilhança (ou de confiabilidade da informação) muito usadas na literatura tradicional de VOI e na literatura Bayesiana. Vários exemplos e proposições mostraram as vantagens. A medida de verossimilhança apresenta vantagens quando já se tem os dados (usa um valor específico de $S = s$, advindo dos dados) para atualizar a distribuição a priori e obter *uma* distribuição posterior usando a lei de Bayes. Para análises ex-ante, como nos problemas de VOI, essas vantagens desaparecem, inclusive pela existência de infinitas (no caso de distribuições contínuas) possíveis distribuições posteriores. Além disso, uma medida de confiabilidade não é tão boa no contexto de aprendizagem, já que inexistente uma relação monotônica entre os conceitos de confiabilidade e aprendizagem econômica. Ou seja, o seu justo sucesso na literatura estatística não deveria se repetir no contexto econômico de VOI. Além disso, a *distribuição a priori* aqui teve uma importância até maior do que tem na literatura Bayesiana tradicional. Aqui, ela é não apenas um *ponto de partida*, representando o conhecimento inicial sobre um ativo³⁹⁷, como um *ponto de chegada*, em termos de ser (ex-ante) o *limite* de um processo de revelação total. Assim, as OR são Bayesianas pela relevância da distribuição a priori no modelo, embora o teorema de Bayes não tenha tido aqui um papel relevante.

A tese procurou desenvolver uma teoria de medidas de aprendizagem probabilística, através de vários exemplos intuitivos e da formalização de uma lista de axiomas que essas medidas de aprendizagem devem ter para serem adequadas em problemas de valor econômico da informação, incluindo problemas de opções reais. A discussão de alguns detalhes técnicos se mostrou importante em uma classe de aplicações. Por ex., os limites de Fréchet-Hoeffding foram importantes quando a estrutura da informação usou a distribuição da v.a. S (sinal ou informação), como nas aplicações de fator de chance exploratório (v.a. de

³⁹⁷ Esse conhecimento inicial, no caso de um campo de petróleo, geralmente custou dezenas de MM\$. Ignorar ou dar pouca importância à distribuição a priori, parece ser inaceitável nesse caso.

Bernoulli) do cap. 3³⁹⁸ e na aplicação de jogos de opções do cap.5. No cap. 3 se definiu o conceito de *estrutura de informação flexível*, que dá as características probabilísticas relevantes do sinal (ou nova informação) S. Esse conceito foi usado nas aplicações do cap. 5 para definir como integrar a nova informação no modelo de OR. Nessas aplicações, a medida de aprendizagem η^2 foi o elemento comum e importante da estrutura de informação flexível.

A preocupação com a consistência da distribuição bivariada com FC e S usando os limites Fréchet-Hoeffding, foi um *diferencial* dessa tese em relação à literatura que examina dependência na exploração de petróleo, já que essa análise não foi feita anteriormente para esse tipo de aplicação. Essa análise tem sido feita quase apenas em estudos matemáticos sobre distribuições multivariadas, mas ela é importante em estudos aplicados por colocar limites no aprendizado possível.

O estudo de *processos de revelação de Bernoulli*, i. é, de seqüências de distribuições bivariadas de Bernoulli, se mostrou bastante relevante em aplicações de exploração de petróleo e de grande interesse para a teoria. Nas aplicações, exemplos são os jogos de OR analisados no cap. 5, e em análises de portfólios exploratórios ou análises de entrada em novas bacias ou áreas de fronteira, numa visão de longo prazo (aplicações mencionadas, mas não desenvolvidas por questões de espaço). Na teoria, esse estudo tem interesse, pois uma seqüência de distribuições bivariadas de Bernoulli é a seqüência mais simples possível de distribuições multivariadas. Além disso, a distribuição de Bernoulli pode ser vista como o elemento básico da gênese de várias outras distribuições conhecidas.

No capítulo 4, foram sumarizados os conceitos básicos da teoria dos jogos, especialmente os conceitos de equilíbrio de Nash (EN) e equilíbrio perfeito em subjogos (ENPS), a fim de modelar, de forma endógena, a interação estratégica entre as firmas. Em seguida, foram analisados alguns dos mais importantes jogos tradicionais. Por causa das aplicações do capítulo 5, a ênfase foi nos jogos guerra de atrito e barganha cooperativa. Foi mostrado que a interação estratégica principal no caso de exploração de petróleo é modelada com a *guerra de atrito*. No caso do jogo de *barganha*, o foco foi na *solução cooperativa de Nash* devido à

³⁹⁸ E foi importante do ponto de vista teórico e prático para mostrar que, se assumir que FC e S são v.a. intercambiáveis, então não é necessário se preocupar com esses limites, pois a distribuição bivariada intercambiável de Bernoulli aceita qualquer intensidade de aprendizagem.

sua importância prática e pela sua conexão com o ENPS do modelo de barganha não-cooperativa, em casos limites do modelo de ofertas alternadas de Rubinstein.

No cap. 4 foi introduzida e discutida a emergente literatura de jogos de opções reais. Como nova contribuição, foi mostrado que, pelo menos no caso mais comum de jogos de OR onde os equilíbrios são especificados através de *estratégias de gatilho*, existem dois métodos que solucionam de forma equivalente esses dois jogos, o *método diferencial* e o *método integral*. Foram estudados exemplos clássicos de duopólios simétricos e assimétricos sob incerteza. Além de indicar a aplicabilidade dos dois métodos de solução, o formato da solução do caso assimétrico, permite uma extensão imediata para outras funções demanda. Também foi discutido o caso de oligopólio sob incerteza, especialmente pelo fato desse modelo usar outros conceitos que simplificaram de forma extraordinária a solução, facilitando a simulação de oligopólios.

Os equilíbrios são de *Markov* no sentido de serem condicionais às variáveis de estado correntes e não à sua história. Por ex., no modelo de duopólio simétrico, se o preço inicial for abaixo do gatilho do líder (P_L), então existem 50 % de chances para cada jogador ser o líder e 0% de chances de haver investimento simultâneo. Se o preço inicial for igual ou superior ao gatilho do seguidor (P_F), então existem 100% de chances de ambos exercerem simultaneamente as suas opções. No caso de $P(t = 0) \in (P_L, P_F)$, então existem chances tanto de qualquer uma das firmas ser líder e a outra seguidora, como a chance de exercício simultâneo por “equivoco”, i. é, as ações que levam as firmas a terem os piores resultados possíveis, mesmo abaixo do valor do seguidor, podem ser equilíbrio.

No capítulo 5 foram apresentadas aplicações mais detalhadas que ilustraram principalmente as teorias desenvolvidas nos capítulos 2, 3 e 4. A primeira aplicação foi relacionada ao desenvolvimento de campos de petróleo sob incertezas de mercado (preço e investimento) e sob incertezas técnicas (qualidade e volume da reserva), ou seja, 5 variáveis de estado (4 incertezas e o tempo, já que a opção é finita), o que mostrou a relevância das distribuições de revelações na prática. Nessa aplicação, o problema foi formulado para efetuar a seleção de alternativas de investimento em informação, com diferentes custos de aprendizagem, diferentes tempos de aprendizagem e diferentes poderes de revelação (medidos por η^2). A consideração de todos esses importantes elementos juntos, não tinha sido feita antes na literatura tradicional de VOI e nem no

contexto de OR. A solução relativamente simples, com a ajuda de uma simulação de Monte Carlo, num problema aparentemente tão complexo, mostrou o poder prático dessa metodologia.

Outra aplicação importante apresentada no cap. 5 foi a de jogos de OR no contexto de exploração de petróleo. Essa aplicação foi dividida em duas partes – ou dois jogos – que se integram. O primeiro jogo é o não-cooperativo de guerra de atrito em que o prêmio em disputa é a revelação de informação advinda da perfuração do prospecto do rival, que se torna pública. No caso assimétrico, esse jogo da espera tem, em geral, um único ENPS que é a firma mais “forte” ganhando o prêmio, no caso sendo a firma seguidora (que exerce, se exercer, a opção depois do líder), onde forte significa ser o mais paciente. Esse jogo não é de todo satisfatório, pois deixa ganhos mútuos de revelação de informação sem ser explorados. A solução Pareto-ótimo nesse caso é a troca de jogo a favor do jogo da barganha, com a negociação de um contrato de parceria. O jogo de barganha é analisado através da solução cooperativa de Nash. Tanto no jogo de guerra de atrito como no jogo da barganha são usadas estratégias de gatilhos, em que opções são exercidas em “tempos de parada”, definidos como o primeiro instante em que a variável de estado (aqui preço do petróleo) atinge um certo gatilho. Foram estabelecidas janelas (intervalos) de preços em que o jogo guerra de atrito tem relevância (i. é, efetiva interação estratégica) e foi mostrado que nessa janela o jogo de barganha pode dominar totalmente o jogo guerra de atrito, a depender do ganho adicional de revelação de informação obtido com a parceria, devido à revelação de informação privada (detalhes técnicos que não são publicados).

Assim, a troca do jogo não-cooperativo de guerra de atrito pelo jogo cooperativo de barganha, através de um contrato de parceria, na maioria dos casos práticos é a melhor alternativa. A companhia de petróleo tem mais incentivos para propor a parceria quanto menor for o VME dos prospectos e maior for o grau de dependência dos prospectos. No entanto, dados econométricos (Hendricks & Porter, 1996) mostraram que, no caso da fase de perfuração exploratória, a conduta não-cooperativa é a predominante. Vários fatores podem explicar isso, desde custo de transação para deixar a posição inicial (o jogo começa como não cooperativo), conservadorismo corporativo e/ou medo de fazer um mau negócio

na troca de participações em ativos, assimetria severa entre os jogadores³⁹⁹, ou até mesmo falta de consciência de *todo* o potencial de ganho que é possível no caso de prospectos dependentes, que são *mais valiosos e de menor risco* quando em parceria. Em muitos casos, os gerentes têm consciência da redução de risco, mas não do ganho de valor relevante que pode ser compartilhado com a revelação de informação de prospectos dependentes. Assim, essa tese estimula parcerias, ao destacar a quantificação do ganho adicional que pode ser obtido numa parceria, devido *apenas* à questão da revelação de informação de prospectos dependentes.

No capítulo 6, foram apresentadas algumas outras OR híbridas. Um destaque foi o método das OR evolucionárias. Esse método tem a vantagem da *flexibilidade* de modelagem por ser um método de otimização de *uso geral*. Ele usa conceitos evolucionários tais como os *algoritmos genéticos*, que são úteis especialmente para casos complexos, onde não existe um método analítico ou direto para encontrar o ótimo. Outra vantagem é que não demanda grandes conhecimentos matemáticos de técnicas de otimização sob incerteza para resolver problemas de OR. A maior desvantagem, o tempo computacional para avaliar por simulação de Monte Carlo as dezenas de gerações de dezenas de soluções-candidatas (cromossomas), tende a ser cada vez menor devido ao aumento exponencial da velocidade de processamento computacional ao longo do tempo.

Nesse sentido, as OR evolucionárias podem ter um papel importante no uso efetivo de OR em empresas num futuro próximo. A difusão prática de OR deverá ser acompanhada pela disponibilidade de programas “amigáveis” de OR. Para isso, no médio prazo a popularização de OR dependerá de programas de uso geral, que não demandem conhecimentos matemáticos sofisticados, em que o usuário possa escolher processos estocásticos de um menu, assim como escolher distribuições a priori de variáveis com incerteza técnica e a estrutura da informação dos sinais (usando η^2 ?), que possa incluir outros agentes no modelo através da ativação de opções de interação estratégica para que o programa possa pesquisar equilíbrios, etc. Essas são algumas das importantes características práticas que devem ser demandadas. Programas de OR evolucionárias podem ter uma importante participação nesse mercado, devido às suas qualidades práticas.

³⁹⁹ Basta uma de duas firmas não ter interesse que a parceria não sai. Isso pode ser explicado por assimetrias. Exs.: firma com poucos prospectos x firma com muitos prospectos; firma com prospectos que tem prazo grande (leilão recente) x firma com prospectos expirando, etc.

7.2. Sugestões de Extensões do Trabalho

Diversas extensões e estudos adicionais podem ser feitos tanto no plano teórico como prático.

A aplicação da teoria desenvolvida pelo autor sobre distribuições de revelações já vem ocorrendo. Por ex., em projetos do Pravap 14 para o caso de opções de expansão, onde a incerteza técnica é bastante relevante. No entanto, outras aplicações são possíveis usando esse conceito. Um exemplo é o caso mencionado no cap. 2 sobre *poços inteligentes*. É uma aplicação complexa, mais pelo problema de como modelar a ação ótima de controle com a informação, do que pelo problema da análise econômica do valor do mapa das ações ótimas para cada possível informação recebida.

No plano teórico, diversas análises podem ser feitas especialmente para estender a nova teoria apresentada no cap. 3. Por ex., seria de interesse uma análise mais profunda da medida de aprendizagem η^2 dentro da teoria de comparação de experimentos de Blackwell (item 3.1.4.2), a fim de estabelecer um teorema similar ao de Blackwell para η^2 . Também, o teorema da decomposição do aprendizado aqui apresentado, poderia ser estendido de alguma maneira para o caso de v.a. dependentes compondo a soma de funções da variável de interesse.

No caso de processos de revelação de Bernoulli, várias novas pesquisas poderiam ser feitas. Aqui foram analisados alguns processos. Vários outros processos poderiam ser analisados, por ex., *outros* processos que fossem totalmente convergentes ou que fossem recombinantes. Além disso, pode ser de interesse a análise de outras propriedades desses processos.

Em termos de aplicação, pode-se explorar o efeito combinado de *dois processos de revelação de Bernoulli em paralelo*: um endógeno (com sinais fortes, mas menos frequentes) e um exógeno (com sinais fracos, mas com maior frequência). O processo endógeno pode tanto ser numa aplicação com interação estratégica, como num caso sem essa interação, em que uma firma tem uma seqüência de atividades exploratórias que revelam informações para os prospectos ainda não perfurados. Outra extensão é na análise de portfólio exploratório com oportunidades dependentes, tanto em termos do valor desse portfólio, como para determinar uma seqüência ótima econômica de exercícios de opções exploratórias.

Diversos outros jogos de interesse para a indústria do petróleo poderiam ser analisados no contexto de jogos de OR. Por ex., jogos de sinalização e em especial os jogos de leilões. No cap. 4 foi sugerido o uso da medida η^2 para modelar a incerteza sobre tipos de jogadores em leilões. Existe uma carência de literatura de jogos de OR aplicados a leilões. De interesse prático é a integração de jogos de leilões com o de barganha. A idéia seria analisar a alternativa de participar do leilão através de uma coalizão (parceiros) para um subconjunto das áreas oferecidas e em outras áreas participar sozinha do leilão.

Uma extensão complexa, mas interessante, foi sugerida no item 5.3, em que se poderia usar um modelo similar ao de valor da informação do item 5.2, para modelar a *fase de delimitação* e integrá-lo no modelo estratégico do item 5.3.

Outra extensão no modelo estratégico do item 5.3 é permitir que, em caso de revelação de informação (pública), houvesse alguma revelação também sobre a qualidade da reserva q . Além disso, em caso de parceria, poderia ser considerada revelação de informação privada adicional sobre o volume⁴⁰⁰.

Se essa tese servir de motivação para novas pesquisas nas literaturas de opções reais, valor da informação, jogos de opções e de outras opções reais híbridas, então a tese terá cumprido um de seus objetivos mais importantes.

Nesse sentido, em vez de ser um ponto de chegada, é preferível que essa tese seja considerada um ponto de partida.

⁴⁰⁰ Já que detalhes que não são divulgados ao público, tais como a profundidade do contato óleo-água, permite alguma revisão do volume de reserva no prospecto vizinho.