



Pierry Souto Macedo da Silva

**Modelo de seleção de portfólio de projetos com
restrição de risco**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sílvio Hamacher
Co-orientador: Prof. Bruno Fânzeres dos Santos

Rio de Janeiro
Abril de 2018



Pierry Souto Macedo da Silva

**Modelo de seleção de portfólio de projetos com restrição
de risco**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Silvio Hamacher

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Bruno Fânzeres dos Santos

Co-orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Davi Michel Valladão

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Thuener Armando da Silva

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de abril de 2018

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Pierry Souto Macedo da Silva

Em 2009, graduou-se em Engenharia de Produção pelo Universidade Federal Fluminense – UFF. Durante sua graduação, teve oportunidade de assessorar professores na monitoria de disciplinas e participar da empresa júnior de engenharia. Em 2010, concluiu a pós-graduação em Engenharia de Petróleo pela Universidade Petrobras, e desde então, atua como engenheiro de petróleo.

Ficha catalográfica

Silva, Pierry Souto Macedo da

Modelo de seleção de portfólio de projetos com restrição de risco / Pierry Souto Macedo da Silva ; orientador: Silvio Hamacher ; co-orientador: Bruno Fânzeres dos Santos. – 2018.

78 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Gerenciamento de risco. 3. Portfólio de projetos. 4. Programação linear inteira mista. 5. Conditional value-at-risk. 6. Movimento geométrico Browniano. I. Hamacher, Silvio. II. Santos, Bruno Fânzeres dos. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

A Deus e aos meus pais, Carlos[†] e Atila, meu amor Natasha e irmãos.

Agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que me deram forças e incentivos para que pudesse concluir com êxito a pós-graduação em Engenharia de Industrial e que tornaram possível meu desenvolvimento profissional ao longo de todo curso. Não há palavras suficientes para descrever minha gratidão.

Agradeço a Deus por ter iluminado meus caminhos e me dado forças para superar os inúmeros desafios que foram colocados diante de mim.

À minha família, minha sincera gratidão por todo apoio, companheirismo e carinho demonstrados, inclusive nos momentos em que os compromissos com a pós-graduação impediam que estivéssemos tão próximos quanto gostaríamos.

Faço um destaque especial para a minha esposa, Natasha Soares, que sempre esteve ao meu lado e mesmo não gostando, compreendeu meus momentos de ausência. A sua presença foi essencial para o meu desenvolvimento.

Sou grato a oportunidade oferecida pela Pontifícia Universidade Católica - PUC-RIO e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES. Sinto muito orgulho pela PUC-Rio constar na trajetória da minha vida.

Aos meus orientadores Silvio Hamacher e Bruno Fânzeres, meu agradecimento por seus valiosos direcionamentos, solicitude e pelo zelo demonstrado com o meu trabalho.

Meus sinceros votos de agradecimentos a todos os professores e profissionais da Pontifícia Universidade Católica - PUC-RIO, com destaque para Claudia Teti e Maria Graça, que me proporcionaram grandes momentos e troca de experiências e conhecimentos, complementando, significativamente, minha trajetória no curso.

Aos novos amigos que fiz, especialmente o Lucas Condeixa, Leonardo Bastos, Diego Moah e Iuri Martins, agradeço pela cumplicidade de todos os momentos, pelas palavras de incentivo e pelo suporte fornecido, que contribuíram para que pudesse estruturar novos conceitos e ter um pensamento diferenciado diante de determinadas situações.

No mais, agradeço muito também a empresa na qual trabalho, que permitiu a realização do curso como parte do meu programa de treinamento. À minha gestora, Daniela Martinelli, por sua compreensão e suporte fundamentais para completar meus estudos. Ao colega de trabalho Sergio Bruno, demonstro minha gratidão pelas valiosas análises críticas e orientação recebida. Aos demais colegas, sou grato por todo apoio.

Resumo

Silva, Pierry Souto Macedo da; Hamacher, Silvio (Orientador); Santos, Bruno Fânzeres dos (Co-orientador). **Modelo de seleção de portfólio de projetos com restrição de risco**. Rio de Janeiro, 2018. 78p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No seu planejamento plurianual de investimentos, as organizações do setor de Exploração e Produção (E&P) estruturam alternativas de projetos de produção de petróleo e gás natural, sujeitas a diversas restrições e a incertezas técnicas e econômicas. Como não há como assegurar que os resultados dos projetos ocorram conforme o previsto, é possível que seu retorno seja inferior ao esperado, o que, dependendo da relevância, pode provocar um efeito adverso no resultado operacional e nas condições financeiras da companhia. Nesse mérito, a dissertação apresenta e aplica um modelo de programação estocástica linear inteira mista para seleção de portfólio de projetos que permita a maximização dos resultados, com restrição de risco. A aplicação considerou dados realistas do segmento de *upstream* de uma empresa do setor. Para representar os cenários econômicos, optou-se pela utilização da simulação de Monte Carlo do modelo Movimento Geométrico Browniano. Com o Valor Presente Líquido como retorno e *Conditional Value-at-Risk* representando a medida de risco, foi possível estabelecer a fronteira eficiente do risco-retorno, com a qual o decisor pode definir uma solução de portfólio, conforme sua aversão ao risco.

Palavras-chaves

Gerenciamento de risco; portfólio de projetos; programação linear inteira mista; *conditional value-at-risk*; movimento geométrico browniano.

Abstract

Silva, Pierry Souto Macedo da; Hamacher, Silvio (Advisor); Santos, Bruno Fânzeres dos (Co-Advisor). **A risk-constrained project portfolio selection model.** Rio de Janeiro, 2018. 78p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In their multi-annual investment planning, oil and gas companies consider alternatives of production projects, subject to a variety of constraints, and technical and economic uncertainties. Considering that it is not possible to guarantee that these projects will perform as predicted, the return can be less than expected and can lead to a significant adverse effect to the operational results and to financial conditions of a given organization. Therefore, this dissertation proposes a mixed integer linear stochastic programming model for project portfolio selection that maximizes the return with risk constraint. The application considered realistic data from the upstream segment of an oil and gas company. Monte Carlo simulation of the Geometric Brownian Motion model was considered to represent the economic scenarios. Using the Net Present Value as the function and Conditional Value-at-Risk as a risk measure, it was possible to establish the efficient frontier of risk-return, which can assist the decision-maker to define the project portfolio according to their risk aversion.

Keywords

Risk management; project portfolio; mixed-integer linear programming; conditional value-at-risk; geometric brownian motion.

Sumário

1. Introdução	13
1.1. Objetivos gerais e específicos	16
2. Revisão bibliográfica	17
2.1. Orçamentação de capital	17
2.2. Seleção de projetos de E&P sob incerteza	19
2.3. Programação estocástica de 2 estágios	20
2.4. Estocasticidade no E&P	21
2.5. Risco-retorno	25
2.6. Modelos de otimização sob incerteza	26
3. Metodologia	31
3.1. Tipo de pesquisa	31
3.2. Etapas da pesquisa	31
3.3. Limitações da pesquisa	36
4. Modelo matemático	38
4.1. Fluxo de caixa de projeto de E&P	38
4.2. Modelo de otimização	42
5. Análise e mensuração das variáveis econômicas	46
5.1. Série histórica das variáveis econômicas	46
5.2. Estimativa e validação dos parâmetros	49
5.3. Geração de cenários	57
6. Análise e discussão dos resultados da otimização	59
6.1. Experimento piloto	59
6.2. Otimização com Movimento Geométrico Browniano	61
6.3. Avaliação para o Movimento Geométrico Browniano	65
6.4. Indicador de qualidade e valor da informação	66

6.5. Sensibilidade com o Movimento de Reversão à Média	66
6.6. Comparativo dos resultados entre os modelos	68
7. Considerações finais	70
7.1. Sugestão para trabalhos futuros	71
8. Referências bibliográficas	72

Lista de figuras

Figura 1: Recuperabilidade de ativos	15
Figura 2: Distribuições dos retornos esperados.....	25
Figura 3: Classificação das medidas de risco	29
Figura 4: Etapas da pesquisa	32
Figura 5: Relação campo x projeto x alternativa.....	38
Figura 6: Fluxo de caixa.....	40
Figura 7: Histórico do preço de referência do óleo (Brent)	46
Figura 8: Histórico do preço de referência do gás (HH)	48
Figura 9: Histórico da taxa de câmbio	48
Figura 10: Intuição sobre o MGB	50
Figura 11: Brent – retorno logaritmo versus o logaritmo do último preço	53
Figura 12: HH – retorno logaritmo versus o logaritmo do último preço.....	53
Figura 13: Câmbio – retorno logaritmo versus o logaritmo do último preço.....	54
Figura 14: Teste da razão R_k	55
Figura 15: Intuição sobre o MRM.....	55
Figura 16: Simulação de cenários técnicos	57
Figura 17: Brent – simulação de cenários por MGB.....	58
Figura 18: Brent – simulação de cenários por MRM	58
Figura 19: Dispersão do VPL - MGB	60
Figura 20: Dispersão do VPL – MRM.....	61
Figura 21: MGB – (VPL) x (VPL - CVaR)	62
Figura 22: MGB – (VPL) x (CVaR)	62
Figura 23: MRM – (VPL) x (VPL - CVaR).....	67
Figura 24: MRM – (VPL) x (CVaR).....	67

Lista de tabelas

Tabela 1: Índices e seus domínios.....	39
Tabela 2: Variáveis e suas descrições.....	43
Tabela 3: Parâmetros e suas descrições.....	44
Tabela 4: Parâmetros MGB.....	51
Tabela 5: Teste da raiz unitária.....	52
Tabela 6: Parâmetros movimento de reversão à média.....	56
Tabela 7: Experimento piloto.....	60
Tabela 8: MGB - VPL médio para diferentes níveis de risco.....	63
Tabela 9: Percentuais de participação nos projetos.....	64
Tabela 10: MRM - VPL médio em diferentes níveis de risco.....	68
Tabela 11: Comparativo dos percentuais de participação nos projetos.....	69

1. Introdução

Na busca por rentabilidade, perpetuidade e alcance dos seus objetivos estratégicos, a definição de portfólio de projetos de investimentos a partir de diversas alternativas disponíveis é um processo com destacada relevância para qualquer organização (De Souza et al., 2010).

Em um ambiente econômico dinâmico e competitivo, o alinhamento do portfólio de projetos face ao planejamento estratégico da organização é reconhecido como um dos fatores determinantes para seu sucesso (Sefair et al., 2017). Motivadas por diferentes elementos, como a maior demanda por energia, as companhias do setor de petróleo e gás natural têm investido em grandes carteiras de projetos (Modica e Rabechini Jr, 2010).

A partir do plano de exploração ou exploração, a depender do reservatório já ter sido descoberto ou não, respectivamente, as equipes técnicas estruturam alternativas de projetos face uma previsão de curvas físicas, tais como produção futura de petróleo (óleo ou condensado) e gás natural (associado em solução, associado livre ou não associado), injeção e movimentação de fluidos (gás natural e água, por exemplo) e outras, bem como seus respectivos orçamentos de investimentos, custos operacionais, outras receitas, custos de abandono etc (Brashear et al., 1999). As alternativas de um mesmo projeto podem distinguir-se entre si pela expectativa de início ou definição de escopo, o que as torna mutuamente exclusivas.

Cabe destacar que decidir pela priorização de uma alternativa de projeto dentre várias concorrentes viáveis contribui para o sucesso ou não da empresa, o que indica a relevância da companhia em utilizar ferramentas específicas e eficazes para auxílio à tomada de decisão (Souza, 2016). Há uma correlação positiva entre o sucesso na seleção do portfólio de projetos e do negócio, segundo Meskendahl (2010) e Zhang et al. (2008).

Além disso, em geral, as organizações costumam ter mais projetos candidatos do que capacidade de realização, de forma que é possível que a decisão de seleção esteja imersa em um conjunto de restrições (financeiras, operacionais, políticas e estratégicas, por exemplo), interdependência e interações entre os projetos, podendo apresentar alternativas de projetos concorrentes ou de objetivos conflitantes, o que limita a escolha e destaca a importância da sua alocação eficiente (Hassanzadeh et al., 2014).

Como característica dessa indústria, Brashear et al. (1999) destacam que os resultados das alternativas de projetos são sujeitos a incertezas decorrentes, principalmente, de fatores técnicos (como dados de geoengenharia, por exemplo) e de mercado (associado as variáveis econômicas). A depender da estocasticidade desses fatores, a dispersão da distribuição de retornos pode configurar um cenário que a organização esteja exposta a um risco de perda expressivo (Sefair et al. 2017; April et al. 2003).

Modica e Rabechini Jr (2010) citam que seleção dos projetos “adequados” é um elemento impulsionador para o crescimento das empresas, enquanto investir em projetos “errados” pode comprometer receitas e levar a perda de mercado, implicar em reconhecimento de perdas, e num caso extremo, inviabilizar sua própria existência.

Para a indústria alvo do estudo, um exemplo do reconhecimento de perdas pode ser visto pelo recente histórico nas demonstrações financeiras das principais companhias de petróleo e gás natural, decorrentes do teste de recuperabilidade de ativos (*Impairment Test*), conforme consta na Figura 1 (Evaluate Energy, 2018). Anualmente, para atender as normas contábeis, como por exemplo o IFRS (*International Financial Reporting Standards*), o teste de *impairment* busca avaliar as perdas de valor do capital aplicado (ativo imobilizado) quando comprovado que não poderão produzir resultados suficientes para recuperação deste valor (CPC 01, 2010). Caso haja uma melhora no valor recuperável dos ativos, no teste do ano seguinte, as provisões existentes podem ser revertidas. A Figura 1 apresenta as reversões e indicativos de perda (associados aos investimentos realizados) registrados nas demonstrações financeiras das principais companhias da indústria de petróleo e gás natural.

* US\$ bilhões

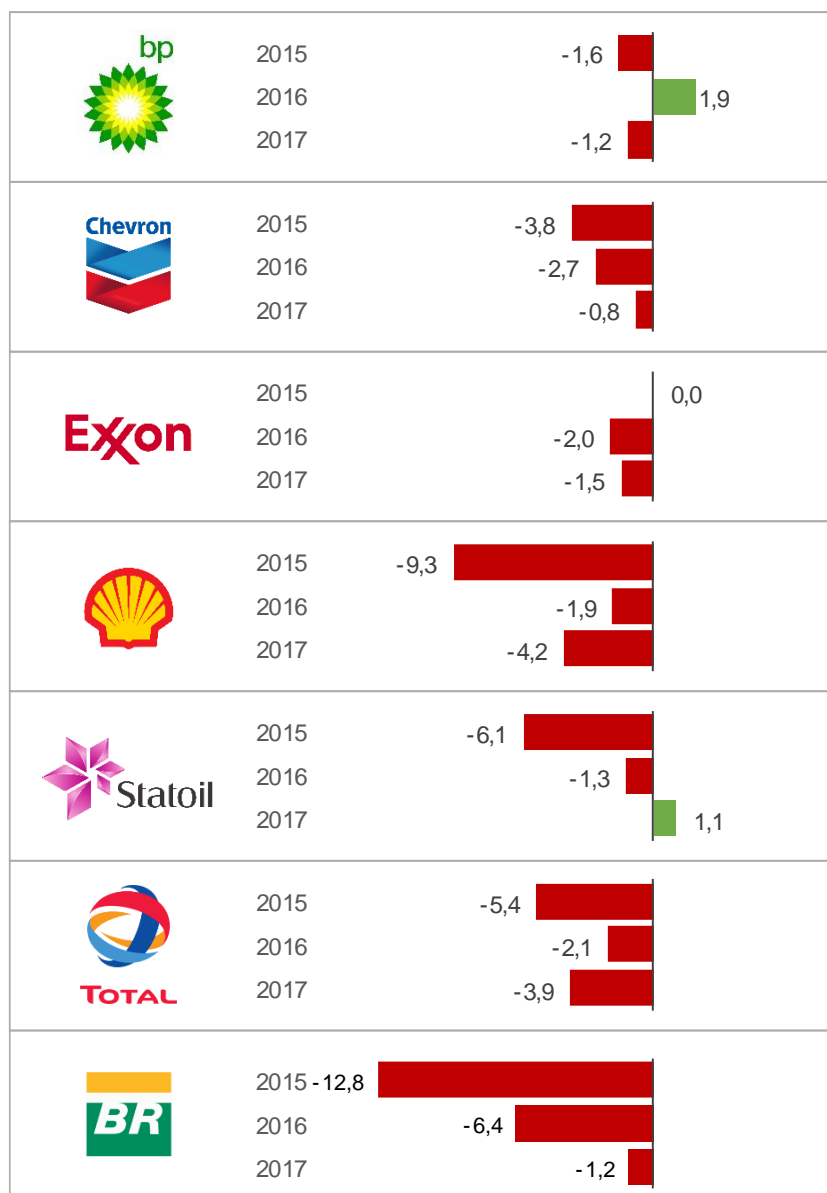


Figura 1: Recuperabilidade de ativos

Fonte: Evaluate Energy (2018)

Além de desperdiçar seus recursos escassos em projetos inapropriados, caso não obtenha sucesso com as escolhas, a companhia perde algumas vantagens competitivas que obteria se tivesse escolhidos os melhores projetos (Esfahani et al., 2016).

Em vista disso, a seleção de portfólio é um problema complexo de decisão estratégica, não trivial, com importantes implicações organizacionais, que pode

envolver objetivos múltiplos e, às vezes, de difícil mensuração ou divergentes (Liesiö et al., 2007).

1.1. Objetivos gerais e específicos

Esta dissertação tem por objetivo geral propor um modelo de seleção de portfólio de projetos de uma organização na indústria de petróleo e gás natural, à luz de uma abordagem em que incerteza e risco sejam considerados para o suporte à decisão.

A partir de um conjunto de projetos de uma empresa de petróleo e gás, um estudo irá aplicar, discutir resultados e realizar análise de sensibilidade do modelo de otimização de portfólio proposto. Para tal, como objetivos específicos, espera-se:

- (i) construção e aplicação de modelo de otimização estocástica para seleção de portfólio de projetos com abordagem de risco e incerteza;
- (ii) seleção e aplicação de modelo para geração de cenários para as incertezas econômicas;
- (iii) análise crítica dos resultados, incluindo sensibilidade, para mensurar o ganho da utilização do modelo de otimização.

Além dessa introdução, esta dissertação está disposta em mais 7 (sete) seções. A Seção 2 expõe uma contextualização teórica sobre a seleção de portfólio com abordagem de risco em um ambiente de incerteza. A Seção 3 apresenta a metodologia para o trabalho e a Seção 4 o detalhamento do modelo utilizado. A Seção 5 traz as análises e mensuração dos parâmetros das variáveis econômicas, seguida pela Seção 6 com as análises e resultados obtidos com a modelagem. Por fim, as conclusões do trabalho estão contidas na Seção 7 e a listagem das referências bibliográficas na Seção 8.

2. Revisão bibliográfica

Nesta seção será apresentado o embasamento no referencial teórico acerca do tema, discorrendo inicialmente sobre as disciplinas de orçamentação de capital e seleção de projetos sob incerteza, no qual é destacada a importância da alocação eficiente para a seleção de projetos. Em seguida, são apresentados breves resumos dos métodos de programação estocástica de 2 estágios e de como a incerteza é caracterizada nos projetos de Exploração de Produção (E&P). Por fim, há uma contextualização do risco-retorno e os principais modelos de otimização sob incerteza com aversão a risco.

2.1. Orçamentação de capital

Dias (2014) apresenta a orçamentação de capital (*capital budgeting*), termo popularizado por Dean (1951), como sendo o processo de análise e decisão de investimento, com objetivo de maximizar o valor da firma e consequentemente dos seus investidores. A decisão pode envolver a opção de investir ou desinvestir em projetos, bem como adquirir ou vender ativos.

Segundo definição do *Project Management Institute* (PMI, 2004), um portfólio é um conjunto de projetos ou programas, não necessariamente interdependentes ou diretamente relacionados, agrupados a fim de atender aos objetivos de negócios estratégicos. De acordo com o guia (PMI, 2004), as organizações gerenciam seus portfólios (ou seja: identificam, priorizam, autorizam, gerenciam e controlam projetos) com base em metas específicas.

Os projetos possuem diferentes classificações, a depender do horizonte econômico (curto ou longo prazo), natureza (táticos, estratégicos ou exploratórios, por exemplo), incerteza (técnica, econômica e estratégica), finalidade (reposição, redução de custos, investimento em informação, expansão) e outros (Dias, 2014).

Souza (2016) cita algumas razões para a adequada definição do portfólio de projetos, tais como: financeira, competitividade, uso racional de recursos, alinhamento estratégico e balanceamento da carteira. Além desses objetivos, o autor também destaca o cuidado para a seleção de portfólio, visto que erros na seleção de projetos podem gerar conflitos de recursos e interesses, projetos selecionados em desalinho com a missão e estratégia da companhia, entre outros.

Quando se trata de um único projeto, a decisão pode ser simplificada em realizar ou não. Entretanto, isso não ocorre em maior parte das situações, sendo mais comum ter uma gama de projetos disponíveis, o que torna a decisão mais complexa. Nesse mérito, o uso de métodos estruturados revela-se de vital importância, por permitir que a decisão esteja embasada em métricas apropriadas e consistentes de forma a aumentar a chance de alcance dos objetivos organizacionais (De Souza et al., 2010).

Face sua relevância econômica e estratégica, diversas metodologias foram desenvolvidas e amplamente discutidas pela academia para auxiliar a seleção de projetos. Esfahani et al. (2016) citam vários métodos, tais como: método de programação matemática (linear ou não linear), análise de decisão multicritério, método de análise hierárquica, algoritmo genético, lógica *fuzzy* e outros. Devido a suas diferentes abordagens e aplicações práticas bem-sucedidas, não há consenso sobre qual metodologia é mais eficiente.

Ao avaliar alguns métodos, Souza (2016) os classificou conforme sua abordagem quantitativa, qualitativa ou híbrida. Os modelos quantitativos oferecem uma decisão mais precisa face o objetivo do problema e suas restrições. Todavia, a depender da característica, podem envolver modelagem e cálculos complexos, o que pode requerer o uso de *softwares*. Os modelos qualitativos permitem considerar o juízo dos gestores envolvidos na decisão e geralmente apresentam facilidade de uso e aprendizado. Entretanto, a depender da gama de projetos envolvidos, seu uso pode ser dificultado ou até inviabilizado. Por sua vez, os modelos híbridos buscam simultaneamente potencializar os benefícios e mitigar as limitações das abordagens exclusivamente qualitativa ou quantitativa.

2.2. Seleção de projetos de E&P sob incerteza

Na indústria do petróleo, além dos desafios inerentes ao processo de seleção de portfólio, novos elementos são acrescentados ao problema de otimização, em especial, a elevada incerteza associada aos projetos (Condeixa et al., 2016). Ao avaliar as incertezas descritas por Brashear et al. (1999), percebe-se que são decorrentes principalmente de fatores:

- (i) econômicos ou de mercado (exógenos aos projetos), correlacionadas aos movimentos das variáveis econômicas, tais como: cotações internacionais do preço do petróleo e seus derivados, taxa de câmbio, inflação etc;
- (ii) técnicos (endógenos aos projetos), como: expectativa de produção futura dependente das características permoporosas dos reservatórios, históricos de produção, injeção e pressão, processamento e interpretação sísmica e outros.

Dias (2014) também comenta sobre as incertezas estratégicas, que são representadas pela interação entre as empresas que compõem o mercado em análise, no seu exercício ótimo de opções, baseada na teoria dos jogos e que busca analisar conflito e cooperação. Para o trabalho em questão, as incertezas estratégicas não serão contempladas no estudo.

Por influenciar diretamente no planejamento e resultados esperados – tais como plano de desenvolvimento, expectativa de produção, receitas, custos e outros –, a literatura apresenta diversos trabalhos que indicam que os projetos do portfólio da indústria de petróleo devem ser avaliados como uma série de decisões de investimento feitos sob incerteza (Rose, 1992; Ross, 2004).

O uso de modelos estocásticos apresenta ganhos para o devido tratamento dos problemas dessa natureza (Souza, 2016), desde de que representem adequadamente a incerteza dos parâmetros envolvidos, ao considerar simultaneamente a gama de cenários, com sua respectiva probabilidade de ocorrência.

É sabido que adicionar incertezas em um problema determinístico oferece maiores desafios à otimização. Todavia, em um ambiente incerto, desconsiderar a estocasticidade dos parâmetros pode resultar em valores não realistas que invalidem

as decisões tomadas, comprometendo o alcance dos resultados desejados e a continuidade da organização (Capolei et al., 2015). Para a indústria do petróleo, a elevada incerteza associada aos projetos reduz substancialmente os reais ganhos do uso de modelos determinísticos.

Além das incertezas, em geral, os projetos de desenvolvimento e produção de petróleo são intensivos em capital (comumente um montante significativo) e duração (empreendimentos de médio e longo prazo) (Carneiro, 2008). Essa característica influencia diretamente nas preferências dos decisores, que apresentam forte viés para compor carteiras com elevada rentabilidade (Sefair et al., 2017).

Esses fatos destacam a relevância e motivação para o desenvolvimento de métodos para a otimização de problemas estocásticos, tais como a programação robusta, *fuzzy* e estocástica (Ribas, 2012).

2.3. Programação estocástica de 2 estágios

Diversos modelos para seleção de portfólio de projetos têm sido propostos a partir do uso da programação estocástica, e devido as suas vantagens para solução, a maioria constrói o problema a partir de restrições lineares (Condeixa et al., 2016).

Em seu trabalho, Ribas (2012) comenta que a programação estocástica de dois estágios é a abordagem mais aplicada na indústria do petróleo, todavia, destaca que sua eficácia é fortemente influenciada pela caracterização da incerteza através dos cenários. O uso insuficiente de cenários ou de baixa qualidade podem indicar soluções não realistas ou sem valor.

Pelo método de programação estocástica de 2 estágios, proposto por Dantzig (1955) e Beale (1955), no primeiro estágio é indicada a decisão do tipo “aqui e agora” (*here-and-now*), de caráter definitivo, tomada antes da realização das incertezas, a partir apenas das informações disponíveis no momento (princípio de *nonanticipativity constraint*). Somente após a ocorrência de cada cenário, o método indica as decisões de segundo estágio (*recourse problem* - RP), com caráter corretivo para obter o ótimo em cada incerteza mapeada.

A qualidade de uma modelagem estocástica pode ser avaliada através do indicador *Value of the Stochastic Solution* (VSS), enquanto que o ganho com a informação sobre o futuro é expresso pelo indicador *Expected Value of Perfect Information* (EVPI) (Birge e Louveaux, 2011).

O EVPI representa a diferença entre o valor associado à decisão tomada, tendo como base a informação corrente, e o valor esperado se informações perfeitas sobre o futuro estivessem disponíveis (solução *wait-and-see* – WS). Se fosse possível obter a informação exata do futuro, esse indicador representaria o valor máximo que o decisor estaria disposto a pagar para saber sobre o que acontecerá no futuro. Já o VSS busca avaliar a contribuição por utilizar um modelo estocástico (solução de RP), em relação a uma abordagem puramente determinística, em geral, feita a partir de valores médios dos parâmetros incertos (solução de *expected value* - EV) (Birge e Louveaux, 2011).

Ao analisar o EVPI e o VSS, portanto, pode-se avaliar o quão longe a solução estocástica encontrada está da solução “ótima” (EVPI), caso o futuro fosse conhecido, e o quanto de otimalidade seria perdida caso a incerteza fosse desprezada em um modelo determinístico (VSS) (Birge e Louveaux, 2011).

2.4. Estocasticidade no E&P

As incertezas associadas às quantidades recuperáveis e comercializáveis de petróleo e gás natural são derivadas da imprecisão da estimativa das características permoporosas dos reservatórios, bem como pela impossibilidade de refletir em modelos de simulação toda a dinâmica associada a movimentação dos fluidos nos reservatórios.

Para uma uniformização e comparabilidade da estimativa de volumes, é interessante seguir critérios para representar os diferentes níveis de incerteza, tais como os critérios para estimativa de reservas e recursos.

Os padrões de classificação de reservas e recursos de petróleo internacionalmente aceitos foram definidos por organizações técnicas, agências governamentais e indústria petrolífera e seguem as definições estabelecidas pela *Society of Petroleum Engineers* (SPE), *World Petroleum Congress* (WPC), *American Association of Petroleum Geologists* (AAPG), *Society of Petroleum Evaluation Engineers* (SPEE), *Securities Exchange Commission* (SEC) e agências reguladoras da atividade em cada país produtor. No Brasil, as reservas e recursos devem ser estimadas segundo as orientações da Agência Nacional de Petróleo (ANP), conforme Resolução nº 47/2014 - Regulamento Técnico de Estimativa de Recursos e Reservas de Petróleo e Gás Natural (RTR).

Na estimativa de reservas, a categorização 1P está associada a um alto grau de confiança de que a quantidade será recuperada, enquanto que as categorizações 2P e 3P indicam uma recuperação menos provável que a categorização 1P e 2P, respectivamente (ANP, 2014). Essas categorizações são decorrentes da simulação de geo-engenharia em modelos determinísticos a partir da construção de cenários pessimista, moderado e otimista, respectivamente. Os cenários são construídos face a estimativa das propriedades permo-porosas dos reservatórios, não estando, portanto, isenta da subjetividade do profissional que as estimam.

Em relação ao processo estocástico de variáveis, Dias (2015) apresenta que podem ser indexadas ao tempo ou por eventos (não relacionados com o tempo). Brashear et al. (1999) citam evolução da exploração, avanço da tecnologia de recuperação, mudanças nos regimes fiscais ou políticas de países, novas informações sobre os volumes, por exemplo, como eventos não relacionados com o tempo, que influenciam na estocasticidade dos projetos de E&P.

As incertezas associadas às variáveis econômicas estão atreladas principalmente a variação do preço de referência do óleo, preço de referência do gás e taxa de câmbio (US\$/R\$).

Para o preço do óleo, as duas referências mais relevantes são o WTI (*West Texas Intermediate*) e Brent. Enquanto o WTI reflete o valor comercializado na Bolsa de Nova York (NYMEX - *New York Mercantile Exchange*, referência para o mercado americano), associado ao produto extraído principalmente na região do Golfo do México, o Brent é comercializado na Bolsa de Londres (IPE - *International Petroleum Exchange*), tendo como referência o petróleo do Mar do Norte e Oriente Médio (Gomes, 2013). As referências diferenciam-se pela qualidade do óleo (grau de leveza), sendo o WTI mais leve e, portanto, é esperado uma valoração em relação ao Brent.

O preço de referência do gás natural é influenciado principalmente pelas forças de mercado e disponibilidade regional. A demanda do gás natural está associada à utilização como fonte de calor e energia, pelo mercado residencial, comercial e industrial. Os níveis de produção e capacidade de transporte do gás dependem fortemente da infraestrutura do gasoduto e definem a sua disponibilidade. Por isso, diferentemente do óleo, não há mercado global para o gás natural.

Seus principais preços de referência são o *Henry Hub* (HH), nos EUA, e o *National Balancing Point* (NBP), no Reino Unido. O NBP considera toda disponibilidade contida no sistema nacional de transmissão de qualquer local do país, sendo utilizado como uma referência para o mercado atacadista na Europa (Salles e Campanate, 2017). O HH consiste em um hub de distribuição no sistema de gasoduto em Erath, Louisiana (EUA), sendo uma referência para o mercado da América do Norte. Devido a sua importância, é considerado como o ponto de fixação de preços para os contratos futuros de gás natural negociados na *New York Mercantile Exchange* (NYMEX) e os *swaps over the counter* (OTC) negociados na *Intercontinental Exchange* (ICE) (Salles e Campanate, 2017).

Para o estudo deste trabalho, serão considerados o Brent e Henry Hub como preço de referência do óleo e gás natural, respectivamente.

A literatura apresenta diversos modelos de previsão para *commodities*, com diferentes níveis de complexidade. Brennan e Schwartz (1985) apresentam um trabalho em Opções Reais, no qual o preço futuro do cobre foi modelado pelo processo estocástico conhecido como Movimento Geométrico Browniano (MGB), utilizando o preço à vista como o único fator estocástico.

A depender dos mecanismos de oferta e demanda de mercado, os preços de *commodities* podem apresentar uma natureza de reversão (Movimento de Reversão à Média - MRM), com valores oscilando em torno de um nível de equilíbrio e atraídos por ele Uhlenbeck e Ornstein (1930). Basicamente, o argumento por trás desta observação é que se o preço está abaixo do nível de equilíbrio, os produtores irão restringir a oferta, de forma que a tendência de escassez irá provocar uma elevação do preço. Já se o preço estiver alto, o estímulo a entrada de produtores de maior custo, a redução do consumo e uso de produtos substitutos irão influenciar o preço para baixo. A reversão à média tem maior ou menor intensidade (velocidade) a depender da série e sua resposta aos choques estocásticos.

Existem vários modelos movimento de reversão à média na literatura, sendo o primeiro modelo descrito por Uhlenbeck e Ornstein (1930), chamado Ornstein-Uhlenbeck (O-U), considerado simples e por isso, bastante popular. Todavia, por permitir a ocorrência de valores negativos, o modelo original de O-U não é aplicável para as séries de preços. Para contornar esse inconveniente, é possível trabalhar com o retorno logaritmo dos preços (MRM Exponencial de O-U), que mesmo que seja negativo, irá refletir em um preço positivo. No decorrer dessa dissertação, quando

houver menção ao processo estocástico movimento de reversão à média deve-se entendê-lo como o MRM Exponencial de O-U.

Na busca por melhor aderência da previsão aos dados observados, Gibson e Schwartz (1990) introduziram os modelos com mais de um fator estocástico para preços de *commodities*. Os autores propuseram um modelo para os preços do petróleo que considera o preço à vista (conforme um movimento geométrico browniano) e o retorno de conveniência (seguindo um movimento de reversão à média), para representar o fluxo de benefícios de possuir estoque físico. Os resultados indicaram que o retorno de conveniência é a variável de maior volatilidade, com tendência de reverter para a sua média de longo prazo. O preço à vista é menos volátil e sua evolução assemelha-se a um passeio aleatório.

Schwartz (1997) analisou a estocasticidade dos preços das *commodities* face a modelos com um fator (logaritmo do preço à vista seguindo o movimento de reversão à média), dois fatores (preço à vista conforme movimento geométrico browniano e taxa de conveniência por movimento de reversão à média) e três fatores (preço à vista conforme movimento geométrico browniano, taxa de conveniência e taxa de juros por movimento de reversão à média). Os resultados indicaram um desempenho mais fraco para o modelo de um fator e os modelos de dois e três fatores tiveram desempenhos equivalentes, o que indica que a taxa de juros como um fator estocástico agrega pouca informação.

Schwartz e Smith (2000) propuseram um modelo de dois fatores, modelando os choques estocásticos de curto prazo pelo MRM de O-U e longo prazo por MGB. Esse trabalho ganhou bastante destaque, em especial em artigos de Opções Reais, por oferecer uma robusta estimativa na medida neutra ao risco. Todavia, conforme descrito no próprio artigo, o mesmo não vale para a medida real de probabilidade.

A literatura apresenta diversos outros modelos, em diferentes setores, agregando outros fatos estilizados associados a série de preços, tais como sazonalidade, saltos e outros. Maiores detalhes em Manoliu e Tompaidis (2000), Lucia e Schwartz (2001), Aiube (2013) e Dias (2015).

Nesta dissertação, as variáveis econômicas serão representadas pelos processos estocásticos movimento geométrico browniano e movimento de reversão à média .

2.5. Risco-retorno

Em geral, a seleção de projetos é fortemente direcionada para maximizar o retorno esperado de uma variável puramente econômica, proveniente do método de fluxo de caixa descontado (FCD), tais como o indicador de valor presente líquido esperado ($E[VPL]$) do portfólio (Capolei et al., 2015).

Entretanto, diferentemente de um ambiente determinístico, no qual os resultados apresentam valor único, ao considerar a estocasticidade dos projetos de E&P seus resultados econômicos são representados por uma variável aleatória com uma distribuição de probabilidade induzida pelos fatores de incerteza.

Ao desconsiderar uma medida de risco, a abordagem simplista de maximização do retorno esperado do portfólio para o direcionamento da função objetivo apresenta limitações e fragilidades e, a depender do perfil de distribuição do retorno, pode levar a resultados indesejáveis (Sefair et al. 2017; April et al. 2003).

Essa possibilidade é ilustrada pela Figura 2, na qual, apesar da possibilidade de perdas (sinalizada na faixa de valores negativos), o método neutro ao risco indicaria a escolha do portfólio com retorno esperado mais atraente, em detrimento do portfólio com menor retorno esperado, porém sem indicativos de perda (Da Silva et al., 2017).

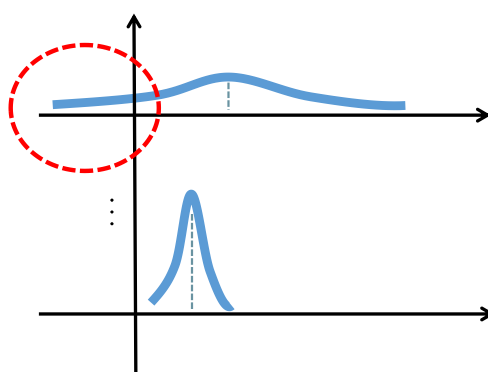


Figura 2: Distribuições dos retornos esperados

Fonte: Fonte: Da Silva et al. (2017)

Por estas razões, ao selecionar seu portfólio de projetos, é indicado que os gestores considerem a dispersão dos retornos e façam a seleção em uma perspectiva de risco-retorno (Sefair et al., 2017). Essa sugestão revela-se mais relevante nos ambientes sujeitos a elevadas incertezas.

Dada a quantidade significativa de investimento necessário para a realização de um projeto, gestores e investidores na indústria de E&P apresentam um forte viés contra portfólios de baixa performance, inclinando-se para medidas de risco para quantificar o risco de investimento (Sefair et al., 2017).

2.6. Modelos de otimização sob incerteza

Markowitz (1952) foi pioneiro ao apresentar uma modelagem de otimização que considera a variância dos retornos dos ativos do portfólio como uma medida de risco para realizar a seleção de uma carteira com o mínimo risco. Marco da Teoria Moderna de Portfólio, o risco do modelo é tratado considerando a variância individual de cada ativo, bem como a covariância de todas as combinações de pares de ativos. Ao considerar as diferentes correlações entre os ativos, o modelo propõe uma carteira de investimento ótima dado um limite de retorno, devido ao efeito de diversificação.

A partir desse modelo, é possível construir um portfólio customizado para atendimento da estratégia de risco-retorno do decisor. Ao interligar os pontos de retorno associados ao portfólio ótimo nos diferentes níveis de risco surge a fronteira eficiente. Uma característica marcante desta fronteira é que para obter maior rentabilidade, é necessário que o investidor esteja disposto a aceitar um maior risco, e vice-versa. A área abaixo da curva apresenta as combinações de projetos que não são eficientes em termos de risco ou retorno, e por isso não devem ser adotados (Esfahani et al., 2016).

Por sua característica não linear, o modelo proposto por Markowitz (1952), também conhecido como média-variância (MV – *Mean Variance*), exige o uso de programação quadrática para sua resolução.

Em geral, os projetos da indústria de petróleo e gás natural possuem uma distribuição de probabilidade do retorno assimétrica, exibindo uma alta probabilidade de lucros baixos e baixa probabilidade de altos lucros (Sefair et al., 2017). Ao desconsiderar essa característica assimétrica no modelo original de Markowitz, o resultado da otimização pode incorrer em erros por tratar igualmente ganhos e perdas, e por não conseguir distinguir alternativas com a mesma variabilidade, porém com retornos diferentes.

Como alternativa ao modelo de média-variância (MV), Markowitz (1959) propôs o modelo de média-semivariância (MSV – *Mean SemiVariance*), associado a possibilidade de retornos abaixo de um benchmark pré-definido pelo tomador de decisão (retorno alvo ou valor esperado), sem a necessidade de nenhuma suposição sobre a distribuição de retorno. Essa nova medida de risco revelou-se mais interessante por ser mais aderente ao comportamento do investidor (avesso a resultados ruins).

Por não revelar-se uma preocupação para os investidores, os retornos acima do referencial são desconsiderados no modelo MSV, sendo o foco direcionado apenas para mitigar os resultados indesejados. Apesar de representar um avanço em relação ao modelo original, a otimização ainda exige o uso de programação quadrática para sua resolução.

Como uma tentativa de linearizar o procedimento de otimização de portfólio de Markowitz (1959), Konno e Yamazaki (1991) apresentaram uma estratégia alternativa para a minimização do risco de um portfólio, considerando o desvio absoluto médio (MAD - *mean absolute deviation*) como medida de risco. No seu estudo, os autores concluíram que a minimização do desvio absoluto médio implica na minimização da variância.

Com resultados semelhantes ao modelo de Markowitz (1959), a linearização do modelo proposta por Konno e Yamazaki (1991) dispensa o cálculo de variâncias e covariâncias, reduzindo com isso o tempo computacional para determinar o portfólio ideal, o que favoreceu a uma maior facilidade na atualização do modelo.

Como uma extensão do modelo de Konno e Yamazaki (1991), Mansini e Speranza (2005) propõem uma modelagem que considera somente o semi-desvio absoluto abaixo da média (MASD - *mean absolute semideviation*) como medida de risco. Desde de que os coeficientes não sejam negativos, o modelo MAD pode ser obtido pela combinação linear dos semi-desvios absoluto acima e abaixo da média. Ao utilizar o coeficiente 1 (um) para valores abaixo da média e 0 (zero) para valores acima, somente os valores abaixo da média serão considerados.

Além de introduzir essa nova medida de risco, o modelo proposto pelas autoras considera na função objetivo a combinação do retorno esperado e o risco do portfólio, bem como incorpora outras características na composição das carteiras ótimas (custos de transação, por exemplo).

Uma outra evolução foi a introdução de medidas de riscos associadas com resultados extremamente desfavoráveis, baseadas em quantis, tais como VaR (*Value-at-Risk*) e CVaR (*Conditional Value-at-Risk*).

O *Value-at-Risk* pode ser entendido como o maior valor de η que garante uma probabilidade $(1 - \alpha)$ de ocorrência de um retorno inferior a η . Para um ativo que permite retornos negativos, o VaR pode ser visto como a magnitude da possível perda associada ao quantil esquerdo $(1 - \alpha)$ da distribuição do retorno. Por sua vez, o *Conditional Value-at-Risk* representa o valor médio do retorno condicional aos eventos com probabilidade inferior a $(1 - \alpha)$ (Rockafellr e Uryasev, 2002). Seja $f(X, s)$ a variável que descreve o retorno de um ativo X nos diferentes cenários s, o $CVaR_{\alpha}(X)$ ao nível de significância $\alpha \in (0, 1)$ pode ser obtido pela equação (2.6.1).

$$CVaR_{\alpha}(X) = \max_{\eta} \left\{ \eta - \frac{1}{1 - \alpha} * E [\max (\eta - f(X, s), 0)] \right\} \quad (2.6.1)$$

Em seu trabalho, Roman e Mitra (2009) citam que as medidas de risco podem ser classificadas em duas categorias, (i) medidas de dispersão e (ii) baseadas em quantis, conforme ilustrado na Figura 3. Para as medidas de dispersão são consideradas as medidas que consideram os desvios em relação a um valor de referência (valor esperado, por exemplo). Essa categoria é subdividida em (a) medidas simétricas, quando consideram o desvio acima ou abaixo em relação ao valor de referência (tais como: desvio padrão e variância), e (b) medidas assimétricas, quando abordam apenas a possibilidade de ocorrer perdas ou valores desfavoráveis, abaixo de um valor de referência (*downside risk*). Na segunda categoria, encontram-se as medidas de risco baseadas em quantis, quando considera-se o risco a partir da área da cauda esquerda da distribuição de probabilidade dos retornos do ativo (*tail risk measures*), podendo assumir somente valores positivos ou negativos, tais como *Value-at-Risk* (VaR) e *Conditional Value-at-Risk* (CVaR).

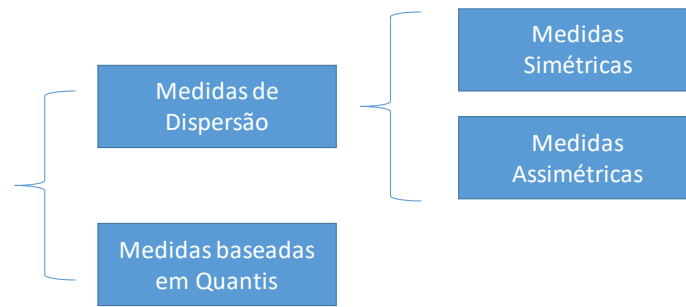


Figura 3: Classificação das medidas de risco

Fonte: Autor (2018)

Quanto às propostas de representação do risco surgidas após o modelo original de Markowitz, algumas podem ser entendidas como extensões diretas do modelo original, porém outras, fazem a substituição da medida de risco por outras estatísticas da função de distribuição do retorno da carteira (Benati e Rizzi, 2007).

Apesar de surgirem como alternativa para uma abordagem de risco para a seleção de portfólio, algumas inclusive bastante utilizadas pelo mercado financeiro (como o VaR), nem todos os métodos atendem aos critérios para uma medida coerente de risco, introduzidas por Artzner et al (1997).

Nesse mérito, segundo Maffra (2013), o CVaR ganha destaque e revela-se mais apropriado para o gerenciamento do risco. Em seu trabalho, Street (2010) os axiomas de uma medida coerente de risco propostos por Artzner et al (1997) ajustados para a medida do CVaR.

- (i) Invariância à Translação: ao somar um ativo de risco X com um ativo livre de risco K , o CVaR da carteira é incrementado no mesmo valor.

$$\text{CVaR}(X + K) = \text{CVaR}(X) + K \quad (2.6.2)$$

- (ii) Superaditividade: o CVaR de uma carteira composta por ativos de risco X e Y é maior ou igual a soma da medida de risco individual dos ativos, seguindo o princípio de diversificação.

$$\text{CVaR}(X + Y) \geq \text{CVaR}(X) + \text{CVaR}(Y) \quad (2.6.3)$$

- (iii) Homogeneidade Positiva: Ao se aumentar a quantidade do ativo de risco em $\lambda \geq 0$, a medida de risco aumenta na mesma proporção.

$$\text{CVaR}(\lambda X) = \lambda \text{CVaR}(X) \quad (2.6.4)$$

(iv) Monotonicidade: Para um par de ativos de risco, onde $X \leq Y$, então:

$$\text{CVaR}(X) \leq \text{CVaR}(Y) \quad (2.6.5)$$

3. Metodologia

Nesta seção será apresentada a classificação da pesquisa, bem como sua adequação ao estudo proposto. Em seguida, serão descritas as etapas para condução da pesquisa, desde a formulação do problema até a análise dos resultados. Por fim, são apresentadas as limitações do estudo.

3.1. Tipo de pesquisa

A classificação dessa pesquisa está referenciada à taxonomia proposta por Vergara (1997), na qual a pesquisa é definida quanto aos fins e meios. Como esta pesquisa visa propor, aplicar e discutir resultados de um modelo de otimização estocástica para a formação de portfólio de projetos, trata-se de uma pesquisa aplicada quanto aos fins, já que possui finalidade prática de resolução de um problema concreto. Quanto aos meios, a pesquisa é classificada como experimental, visto que ocorre manipulação de variáveis independentes, seguida da análise dos consequentes resultados.

3.2. Etapas da pesquisa

Para a realização da pesquisa foi considerada a sequência de atividades conforme consta na Figura 4, cujo detalhamento de cada etapa é descrito em seguida.

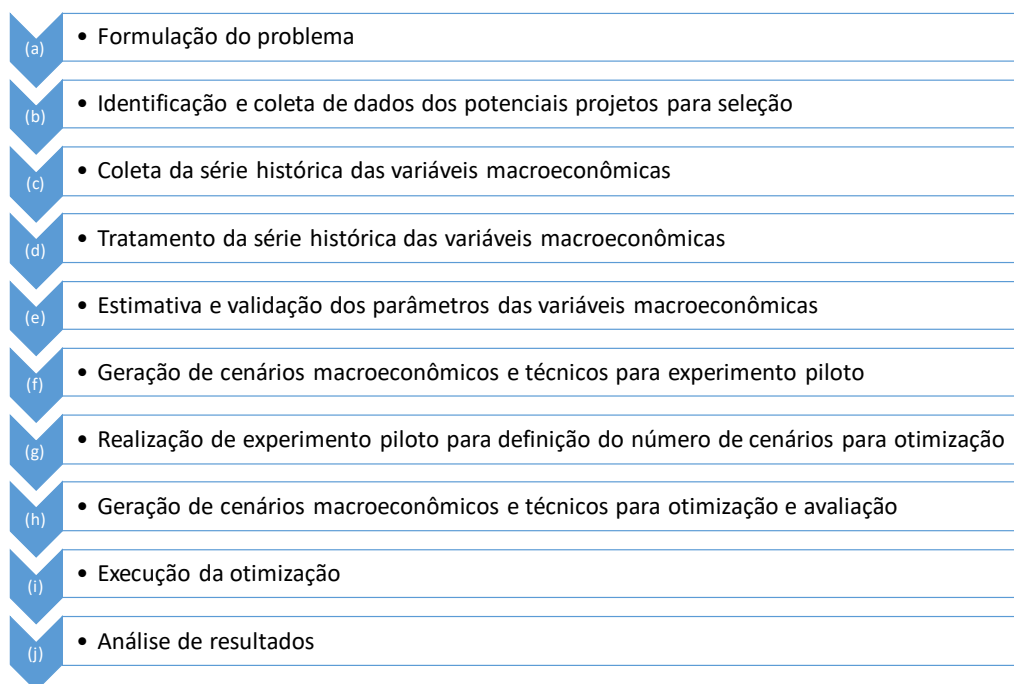


Figura 4: Etapas da pesquisa

Fonte: Autor (2018)

a) **Formulação do problema**

A formulação do problema foi realizada a partir da sua compreensão por meio de entrevista não estruturada com profissionais de avaliação de projetos da indústria de E&P, pesquisa bibliográfica e elaboração do referencial teórico. Para a função objetivo do modelo proposto, optou-se pela utilização do indicador valor presente líquido para representar o retorno do portfólio. Por atender aos critérios para uma medida coerente de risco, bem como permitir considerar distribuição de retornos esperados com caudas pesadas, escolhe-se o CVaR, que foi modelado no modelo proposto como uma restrição que impõe um limite máximo de exposição do portfólio. As demais restrições foram decorrentes das características da indústria ou empresa. O modelo matemático proposto é descrito com mais detalhes no Capítulo 4.

b) **Identificação e coleta de dados dos potenciais projetos para seleção**

Para a indicação dos potenciais projetos para seleção foi realizada a análise do portfólio somente do segmento de E&P de uma empresa (ano de exercício base:

2016). A partir dos dados reais foi simulada uma base realista dos projetos, preservando com isso a confidencialidade da empresa. Os projetos exploratórios foram descartados, devido a elevada incerteza, imaturidade e por seus resultados estarem sujeitos a descoberta das jazidas de hidrocarbonetos, assim como os projetos de manutenção da produção também foram desconsiderados, visto que a decisão de realizar estes projetos já foi tomada.

Com isso, foram indicados 40 potenciais projetos de desenvolvimento da produção em reservatórios já descobertos, sem histórico de produção, em campos com declaração de comercialidade sob regime de concessão. Para cada projeto, foi considerada a possibilidade de postergação do seu início em no máximo dois anos, o que implica em dizer que foram consideradas três alternativas para a execução de cada projeto. Optou-se por considerar a independência dos projetos: a expectativa de produção de cada projeto não é alterada pela seleção ou não dos demais. Esse fato implica em não haver correlação entre os projetos, além de não concorrerem entre si para a produção futura de petróleo e gás natural.

As incertezas técnicas associadas à previsão das curvas físicas e orçamentárias de cada projeto são representadas nas categorizações “1P”, “2P” e “3P”, seguindo os critérios para classificação de estimativa de reservas constantes na Resolução nº 47 - Regulamento Técnico de Estimativa de Recursos e Reservas de Petróleo e Gás Natural (ANP, 2014).

c) Coleta da série histórica das variáveis econômicas

As variáveis econômicas foram coletadas na plataforma *Bloomberg*, considerando todo o histórico de realização diário disponível até o dia 31/12/2016. Os valores históricos para o preço de referência do óleo (*Brent*), preço de referência do gás (*Henry Hub*), taxa de câmbio (US\$/R\$) e índice de inflação americana (CPI – índice de preços ao consumidor) foram obtidos pelos respectivos códigos de consulta, a saber: *EUCRBRDT Index*, *NGUSHHUB Index*, *BRL Currency* e *CPURNSA Index*. Como o dado de inflação é mensal, optou-se por também utilizar a média mensal para os valores diários das séries de preço de referência do óleo, gás natural e taxa de câmbio.

d) Tratamento da série histórica das variáveis econômicas

Apesar do preço de referência Brent ser um petróleo inglês, sua cotação, mesmo na Inglaterra, é referenciada ao dólar americano (US\$) e por isso, para a estimação dos parâmetros, a série de preços nominais foi deflacionada (para valores reais, em moeda constante) pelo índice CPI. Como o preço de referência do gás Henry Hub também está atrelado ao dólar americano (US\$), a série histórica também foi deflacionada pelo CPI. Para manter coerência em fluxo real face as demais variáveis, a correção do histórico da taxa de câmbio também foi realizada pelo índice de inflação americana (CPI). Apesar da série histórica possuir valores desde o ano 1992, para taxa de câmbio foram coletados valores apenas a partir do ano 1999, ano em que o regime cambial brasileiro se tornou flutuante.

e) Estimativa e validação dos parâmetros das variáveis econômicas

Para a estimativa dos parâmetros para as variáveis econômicas (preço de referência do óleo, gás e taxa de câmbio) foi considerado o processo estocástico Movimento Geométrico Browniano (MGB). Para avaliar a hipótese das variáveis se comportarem segundo movimento geométrico browniano foi realizado o teste padrão da raiz unitária, conforme proposto por Dickey-Fuller (1979), e o teste da razão de variância (Pindyck, 1999). Como modelo alternativo, para análise de sensibilidade e comparação dos resultados obtidos, as variáveis econômicas também foram analisadas à luz do Movimento de Reversão à Média.

f) Geração de cenários econômicos e técnicos para experimento piloto

A partir da estimativa dos parâmetros, os cenários econômicos foram gerados com uso da simulação de Monte Carlo para os processos estocásticos movimento geométrico browniano e movimento de reversão à média. Para os cenários técnicos, em cada projeto, foi realizada também a simulação de Monte Carlo para indicar o nível de incerteza (1P, 2P ou 3P) para a previsão das curvas físicas (produção futura, injeção e movimentação de fluidos, e outros) e seus respectivos orçamentos (investimentos, custos operacionais, outras receitas, custos de abandono etc).

g) Realização de experimento piloto para definição do número de cenários para otimização

Para suporte à definição do número mínimo de cenários para a otimização realizou-se um experimento piloto do modelo, visando somente a maximização do valor presente líquido, sem considerar o risco. Para o experimento piloto foram gerados 1.000 cenários independentes para o movimento geométrico browniano e movimento de reversão à média. A partir dos resultados de cada amostra foram estimados para cada processo estocástico os parâmetros estatísticos.

O número mínimo de cenários para a otimização foi calculado considerando os parâmetros estatísticos da otimização piloto, erro máximo de 5% em relação ao valor médio e grau de confiança de 95%. A utilização do cálculo do número de cenários busca evitar os custos de tempo e processamento computacional, bem como garantir resultados confiáveis.

h) Geração de cenários econômicos e técnicos para otimização e avaliação

Os cenários para otimização também foram gerados com uso da técnica de simulação de Monte Carlo, respeitando o número mínimo de cenários independentes definidos na etapa anterior. Como a otimização é feita sob a ótica amostral, foi realizada uma avaliação da viabilidade da solução de primeiro estágio com o dobro do número de cenários utilizado para obter a política, considerando o *trade-off* entre o esforço computacional e qualidade da resposta. Não houve alteração dos parâmetros estimados para os processos estocásticos movimento geométrico browniano e de reversão à média.

i) Execução da otimização

O modelo foi desenvolvido e executado na plataforma AIMMS 3.14 para desenvolvimento de modelos matemáticos, com o *solver* CPLEX 12.6. A otimização foi feita em um processador Intel i7-3960X 3.3GHz com 24GB RAM. Um banco de dados em Microsoft Access foi criado para armazenamento dos conjuntos, parâmetros e resultados do modelo.

j) Análise de resultados

Inicialmente, foram reportados os resultados para o cálculo dos parâmetros das variáveis econômicas. Em seguida, uma breve exposição do experimento piloto

e indicação do número mínimo de cenários. Por fim, foram apresentados os resultados do modelo de otimização, com a comparação dos valores obtidos na abordagem do movimento geométrico browniano e movimento de reversão à média.

3.3. Limitações da pesquisa

Para essa pesquisa, pode-se elencar as seguintes limitações.

- Efeito diversificação: O modelo foi executado apenas com o portfólio do segmento de E&P (*upstream*), o que limitou seus resultados à incorporação somente do efeito de diversificação técnica. Para incluir o efeito de diversificação de mercado é necessário considerar os projetos de outros segmentos da indústria do petróleo (*downstream*), tais como transporte, refino, distribuição etc. Com isso, o *hedge* entre projetos de diferentes segmentos, cujo resultado possui correlação negativa face as premissas econômicas, seria incorporado no gerenciamento de risco do portfólio.
- Independência dos projetos: Por simplificação, foi considerada a independência dos potenciais projetos na composição da carteira. Todavia, os projetos de um mesmo reservatório concorrem entre si para a produção futura de petróleo e gás natural. Para considerar o efeito de correlação de projetos e suas interdependências é necessário executar os modelos de previsão de geoengenharia nos diferentes cenários combinatórios de realização ou não dos projetos, em todas suas opções de início de produção e nas diversas incertezas técnicas. Executar os modelos de previsão de geoengenharia para um único cenário técnico já requer elevado esforço computacional, revelando-se inviável quando inúmeros cenários são considerados, o que impede uma análise mais apurada da correlação entre projetos.
- Planejamento físico: Neste trabalho, o modelo assumiu que o planejamento financeiro não gera conflito com as restrições físicas para realização dos investimentos, tais como disponibilidade de sondas de perfuração / completação de poços, barcos para lançamentos de linhas

de coleta e escoamento, equipe de execução dos projetos e outros. Todavia, é sabido que a indústria possui sua capacidade de realização de investimentos limitada aos recursos críticos, cuja disponibilidade e custo variam conforme o aquecimento ou não do mercado.

- Modelo de geração dos cenários: Para a projeção dos cenários econômicos optou-se pela utilização dos modelos de um fator para representar as variáveis econômicas, conforme movimento geométrico browniano e movimento de reversão à média. Contudo, por não ser objeto principal de pesquisa, não houve a análise profunda de padrões de comportamento (fatos estilizados), que poderiam ser incluídos no modelo de projeção, tais como a sazonalidade, variações bruscas em um curto intervalo de tempo (saltos) e outros.
- Estocasticidade por eventos: Devido à dificuldade de estimar, as variáveis estocásticas atreladas a eventos não foram consideradas no modelo de projeção. Entretanto, conforme seu histórico, a indústria de petróleo apresenta significativa incerteza devido a eventos, como guerras, instabilidade econômica, crescimento do PIB e outros, o que limita a projeção de cenários às informações acumuladas até a data das estimativas.

4. Modelo matemático

Nesta seção será apresentada uma breve contextualização sobre a composição do fluxo de caixa de um projeto de E&P, seguida do detalhamento do modelo de otimização para a seleção de portfólio de projetos.

4.1. Fluxo de caixa de projeto de E&P

Na elaboração do plano de negócios, as organizações estruturam potenciais projetos nos campos em que possuem participação (WI - *Work Interest*). Essa participação é registrada no contrato assinado junto à União, quando ocorre a definição do consórcio vencedor do leilão para exploração da área. Para futura alteração nessa participação, é necessário estabelecer aditivo ao contrato.

Na Figura 5, há a ilustração de quatro campos de petróleo e gás natural, delimitados por um polígono fechado, denominado *ring fence*. Em cada campo, há a ocorrência de um ou mais reservatórios, que representam acumulações de hidrocarbonetos, para os quais são definidos planos de exploração, que são refletidos na organização dos projetos.

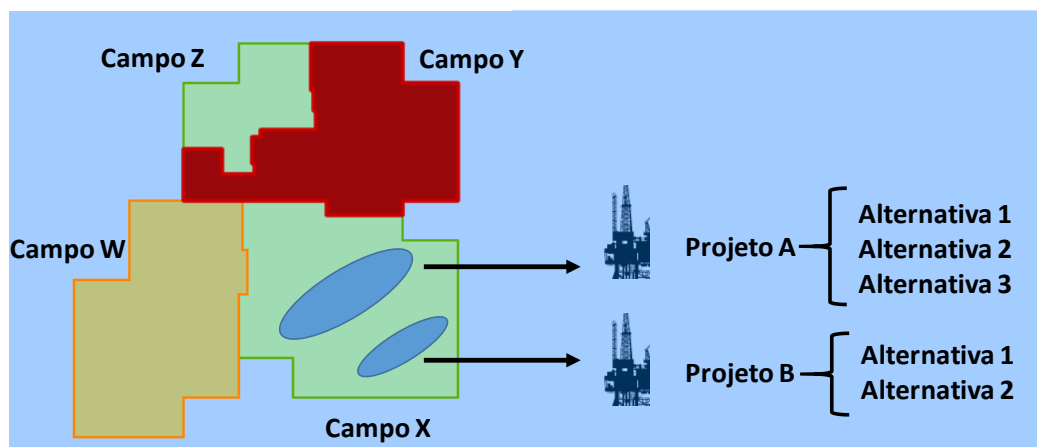


Figura 5: Relação campo x projeto x alternativa

Fonte: Autor (2018)

Para atender a diferentes estratégias de exploração é natural que existam diferentes concepções de projetos, todas mutuamente exclusivas, que diferem entre si pelo escopo ou início de produção. Para avaliação da seleção é importante ter em mente que em cada campo são previstos diferentes projetos, com diferentes alternativas.

Para caracterizar a análise econômica, considere a definição dos índices de campo de produção de petróleo e/ou gás natural (c), projeto de desenvolvimento ou produção (p) e suas respectivas alternativas (a), cenários técnico-econômicos (s) e ano (t). Na Tabela 1, verificam-se os índices e seus correspondentes domínios.

Índices	Index	Domínio
Campo	c	{1, ..., C}
Projeto	p	{1, ..., P}
Alternativa	a	{1, ..., A}
Cenários	s	{1, ..., S}
Ano	t	{1, ..., T}

Tabela 1: Índices e seus domínios

Conforme exemplo constante na Figura 6, o resultado econômico de um projeto de E&P é decorrente basicamente do valor da receita (R) líquida de investimentos (I), custos (C), contribuições governamentais / tributos (T) e abandono (AB), atualizado a valor presente, conforme taxa de desconto (r) e ano base (t_0) apropriados.

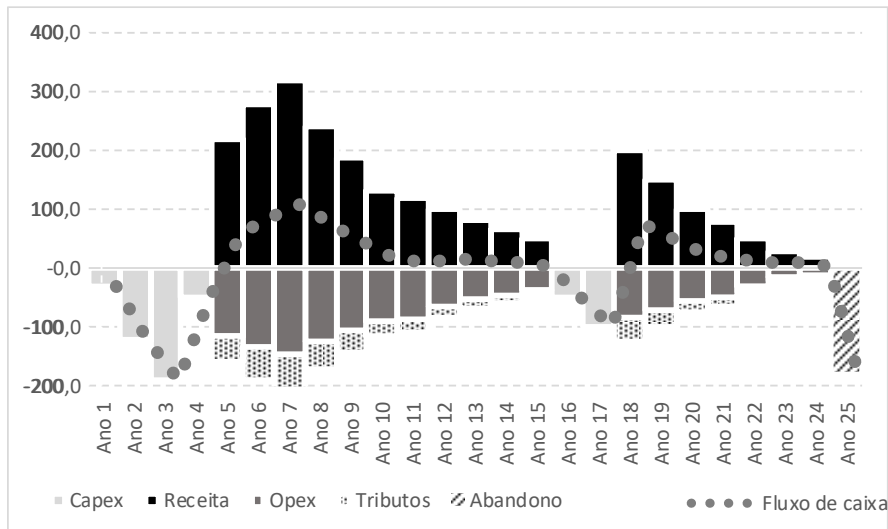


Figura 6: Fluxo de caixa

Fonte: Autor (2018)

A equação (4.1.1) descreve o cálculo do valor nominal (VN) em cada ano para os projetos-alternativas face a um cenário técnico e econômico. A equação (4.1.2) apresenta a fórmula para obter o valor presente líquido dos projetos (VP), já considerando o ano que maximiza o retorno do projeto-alternativa em cada cenário.

$$VN_{p,a,t,s} = R_{p,a,t,s} - I_{p,a,t,s} - C_{p,a,t,s} - T_{p,a,t,s} - AB_{p,a,t,s} \quad (4.1.1)$$

$$VP_{p,a,s} = \sum_{t=1}^T \frac{VN_{p,a,t,s}}{(1+r)^{(t-t_0)}} \quad (4.1.2)$$

Por ter comercialização no mercado internacional, para mitigar os efeitos de flutuações referente à valorização ou desvalorização da moeda corrente no país de origem da empresa, é comum atrelar as estimativas orçamentárias em dólares americanos (US\$). Todavia, é possível que parte das estimativas orçamentárias tenha expectativa de realização em moeda nacional. Ciente que os valores em moeda nacional estão referenciados a um cenário de taxa de câmbio que não necessariamente será o cenário de câmbio final, para preservar sua base monetária, as estimativas orçamentárias em moeda nacional são submetidas à equalização cambial. A equação (4.1.3) descreve o fator de equalização (F) anualizado em relação ao cenário de taxa de câmbio inicial (TCI) e final (TCF).

$$F_{t,s} = \frac{TCI_t}{TCF_{t,s}} \quad (4.1.3)$$

Como investimentos (I), são considerados os gastos necessários para permitir o início da operação do projeto, tais como custos em perfuração e completção de poços, instalações da infraestrutura de produção, coleta e escoamento. A depender do plano de exploração da área, é possível que o desenvolvimento ocorra em fases ou tenha reinvestimentos futuros. Na Figura 6, esses valores estão representados nos quatro primeiros anos, com a ocorrência de reinvestimentos nos anos 16 e 17. A equação (4.1.4) apresenta o cálculo do investimento em moeda nacional (IN) e estrangeira (IE), já com a equalização do câmbio.

$$I_{p,a,t,s} = IN_{p,a,t,s} * F_{t,s} + IE_{p,a,t,s} \quad (4.1.4)$$

Durante a operação do projeto, ocorrem os custos operacionais (C), fixos ou variáveis, decorrentes de custos administrativos, operação da produção, manutenção, energia, produtos químicos e outros. Os gastos equalizados em moeda nacional (CN) e estrangeira (CE) são obtidos pela equação (4.1.5).

$$C_{p,a,t,s} = CN_{p,a,t,s} * F_{t,s} + CE_{p,a,t,s} \quad (4.1.5)$$

Ao final do projeto (como no 25º ano da Figura 6, por exemplo), é necessário incorrer em gastos para o abandono e restauração da área (AB), composto por abandono de poços, equipamentos e recuperação ambiental. Se necessário, para atendimento à segurança operacional, obsolescência das instalações e outros, por exemplo, é possível que seja previsto abandono parciais ao longo do projeto. A equação (4.1.6) apresenta o abandono equalizado.

$$AB_{p,a,t,s} = ABN_{p,a,t,s} * F_{t,s} + ABE_{p,a,t,s} \quad (4.1.6)$$

A receita dos projetos (R), descrita na equação (4.1.7), é proveniente dos volumes de petróleo (RO) e gás natural (RG) disponíveis para a venda e outras receitas (RD) não associadas à produção de hidrocarbonetos, tais como serviços

prestados, venda de equipamentos, valor residual e outros. Por isso, seu valor é dependente do cenário de preços de petróleo, gás natural e taxa de câmbio. Para a adequação quanto a qualidade do petróleo e gás natural do projeto, é necessário realizar um ajuste no preço de referência internacional das *commodities* conhecido como *spread*.

$$R_{p,a,t,s} = RO_{p,a,t,s} + RG_{p,a,t,s} + RD_{p,a,t,s} \quad (4.1.7)$$

Os projetos da indústria de petróleo e gás natural são sujeitos a tributos específicos, incidentes na receita da venda dos volumes produzidos, como: *royalties*, pagamento de superficiário e outros, conforme definido no contrato do campo. A depender dos volumes de produção, também podem ocorrer participações especiais atrelados a performance do campo. Além desses tributos sobre a lavra, ocorrem também as contribuições governamentais em nível federal, estadual e municipal. A equação (4.1.8) apresenta a forma de cálculo dos tributos (T), já considerando uma alíquota (PG) que consolida as participações governamentais dos projetos em um mesmo campo de produção (PC).

$$T_{p,a,t,s} = R_{p,a,t,s} * PG_c * PC_{c,p} \quad (4.1.8)$$

Importante ressaltar que para eliminar a estocasticidade decorrente da inflação, em geral, trabalha-se com fluxos de caixa reais, já deflacionados. Os fluxos são atualizados a valor presente pela taxa livre de risco.

4.2. Modelo de otimização

O modelo visa definir quais projetos devem ser realizados e quando serão iniciados, bem como seu percentual de participação, visando maximizar o valor presente líquido (VP) do portfólio face a um nível de risco pré-definido.

Para caracterizar as incertezas, os cenários estão representados pelo par técnico (representado pela estimativa 1P, 2P ou 3P, em cada projeto-alternativa) e econômico (com as trajetórias para os futuros valores das *commodities* petróleo e gás natural, e taxa de câmbio). Os cenários são simulados de forma independente.

Para seleção dos projetos, o modelo considera as variáveis contínuas $\theta_{p,a}$ e WI_c para definir o percentual de participação nos projetos-alternativas e campo, variável binária $\beta_{p,a}$ para definir a realização ou não do projeto “p” com a alternativa “a”. Para o tratamento do risco, o modelo faz uso das variáveis Y_s , η e CVaR. O resultado da otimização é expresso pela variável dependente VP, que expressa o valor presente líquido médio do portfólio considerando os cenários $s \in \{1, \dots, S\}$ (VP_s).

Como parâmetros estocásticos, o modelo considera o valor presente líquido $VP_{p,a,s}$ e investimento anualizado $I_{p,a,t,s}$ dos projetos-alternativas, segundo a indicação do cenário técnico e econômico. Em relação a estocasticidade econômica, o valor presente líquido é dependente dos cenários de preço de petróleo, gás natural e taxa de câmbio, enquanto que o investimento anualizado é alterado apenas de acordo com o cenário de câmbio. Nas Tabelas 2 e 3, explicitam-se as variáveis e parâmetros utilizados no modelo apresentado em seguida.

Variáveis	Descrição	Domínio
\bar{V}	Valor presente líquido médio do portfólio	\mathbb{R}
V_s	Valor presente líquido do portfólio em cada cenário	\mathbb{R}
$\theta_{p,a}$	Percentual de participação no projeto-alternativa	%
$\beta_{p,a}$	Decisão de realizar o projeto-alternativa ou não	$\{0, 1\}$
WI_c	Percentual de participação no campo	%
Y_s	Variável auxiliar para o cálculo do CVaR	\mathbb{R}_+
CV	CVaR, valor médio do retorno quando ocorrer o evento com probabilidade $(1 - \alpha)$	\mathbb{R}
η	Valor limite de ocorrência de um retorno inferior com probabilidade $(1 - \alpha)$	\mathbb{R}

Tabela 2: Variáveis e suas descrições

Parâmetros	Descrição	Unidade
$VP_{p,a,s}$	Valor presente líquido do projeto-alternativa em cada cenário	US\$ milhões

$PC_{c,p}$	Parâmetro binário de alocação projeto-campo;	$\{0, 1\}$
α	Nível de significância do VaR;	%
δ	Limite máximo de exposição ao risco;	US\$ milhões
$I_{p,a,t,s}$	Investimento anualizado no projeto-alternativa;	US\$ milhões
IM_t	Limite de investimento total da organização;	US\$ milhões

Tabela 3: Parâmetros e suas descrições

Função objetivo:

$$\text{Max } \bar{V} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S V_s \quad (4.2.1)$$

Sujeito a

$$V_s = \sum_{p=1}^P \sum_{a=1}^A VP_{p,a,s} * \theta_{p,a} \quad , \forall s \in \{1, \dots, S\} \quad (4.2.2)$$

$$\sum_{a=1}^A \beta_{p,a} \leq 1, \forall p \in \{1, \dots, P\} \quad (4.2.3)$$

$$\theta_{p,a} \leq \beta_{p,a}, \forall p \in \{1, \dots, P\}, a \in \{1, \dots, A\} \quad (4.2.4)$$

$$\theta_{p,a} \geq \sum_{c=1}^C WI_c * PC_{c,p} + (\beta_{p,a} - 1), \quad (4.2.5)$$

$$\forall p \in \{1, \dots, P\}, a \in \{1, \dots, A\}$$

$$\theta_{p,a} \leq \sum_{c=1}^C WI_c * PC_{c,p}, \forall p \in \{1, \dots, P\}, a \in \{1, \dots, A\} \quad (4.2.6)$$

$$CV = \eta - \frac{1}{S * (1 - \alpha)} \sum_{s=1}^S Y_s \quad (4.2.7)$$

$$Y_s \geq \eta - VP_s, \forall s \in \{1, \dots, S\} \quad (4.2.8)$$

$$CV \geq \delta \quad (4.2.9)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{a=1}^A I_{p,a,t,s} * \theta_{p,a} \leq IM_t, \quad (4.2.10)$$

$$\forall s \in \{1, \dots, S\}, t \in \{1, \dots, T\}$$

$$\theta_{p,a} \geq 0, \forall p \in \{1, \dots, P\}, a \in \{1, \dots, A\} \quad (4.2.11)$$

$$\beta_{p,a} \in \{0, 1\}, \forall p \in \{1, \dots, P\}, a \in \{1, \dots, A\} \quad (4.2.12)$$

$$Y_s \geq 0, \forall s \in \{1, \dots, S\} \quad (4.2.13)$$

$$WI_c \in [0, 1], \forall c \in \{1, \dots, C\} \quad (4.2.14)$$

A equação (4.2.1) corresponde à função objetivo do modelo que maximiza o valor presente líquido médio do portfólio. O valor presente líquido de cada projeto-alternativa é decorrente da sua análise econômica na visão cheia ($WI = 100\%$), ou seja, não considerando a participação das empresas do consórcio.

Para representar o valor presente líquido do portfólio em cada combinação de cenário técnico e econômico, a equação (4.2.2) considera o produto entre o valor presente líquido de cada projeto-alternativa $VP_{p,a,s}$ e a participação $\theta_{p,a}$ sugerida pelo modelo. Apesar de simplificadora, esta hipótese representa bem a realidade e uma possível extensão seria representar o valor presente líquido como uma função não positiva-homogênea de participação no projeto.

A inequação (4.2.3) limita a indicação binária $\beta_{p,a}$ para a realização de no máximo uma única alternativa para cada projeto, enquanto que a inequação (4.2.4) garante que o percentual desejado para a participação no projeto-alternativa $\theta_{p,a}$ seja menor ou igual a 100%.

As inequações (4.2.5) e (4.2.6) relacionam as variáveis $\beta_{p,a}$ para indicação da realização ou não do projeto alternativa e as participações desejadas para o projeto $\theta_{p,a}$ e campo WI_c , e com isso, garantem que todos os projetos-alternativas selecionados de um mesmo campo tenham a mesma participação. A participação de cada empresa no campo é registrada em contrato, e independente de realizar um ou mais projetos no mesmo campo, todos precisam respeitar o mesmo valor de WI .

As inequações (4.2.7), (4.2.8) e (4.2.13) são necessárias para o cálculo do CVaR do portfólio (CV). Para uma abordagem de risco-retorno, o modelo considera a medida de risco como uma restrição do problema (4.2.9), de forma a garantir um limite máximo de exposição do portfólio, representado pelo parâmetro δ .

Para atender as perspectivas financeiras da empresa, a restrição (4.2.10) limita os investimentos em projetos $I_{p,a,t,s}$ ao total disponível pela organização IM_t em cada período $t \in \{1, \dots, T\}$. Por fim, as demais restrições (4.2.11) a (4.2.14) correspondem à definição dos domínios das variáveis de decisão.

5. Análise e mensuração das variáveis econômicas

Nesta seção será apresentado uma análise resumida da série histórica das variáveis econômicas, seguida da estimativa e validação dos parâmetros para descrever o processo estocástico. Por fim, é indicado o método de geração dos cenários.

5.1. Série histórica das variáveis econômicas

O mercado do preço do petróleo é conhecido pela significativa incerteza decorrente dos aspectos estratégicos e geopolíticos envolvidos (Silvério, 2012). Na Figura 7 (Bloomberg, 2017), apresenta-se a série histórica em US\$/bbl (dólar por barril de petróleo). Os valores nominais referem-se à cotação da época, enquanto que os valores reais correspondem aos valores nominais ajustados em relação à inflação, a partir do índice de preços CPI.

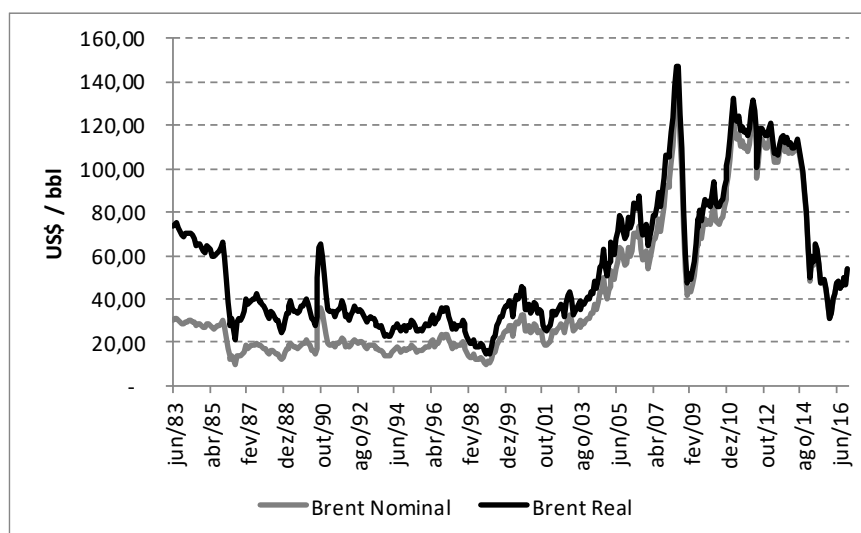


Figura 7: Histórico do preço de referência do óleo (Brent)

Fonte: Bloomberg (2017)

O início da série histórica já destaca os efeitos do 2º choque petrolífero ocorrido na década de 1980, motivado por guerras no oriente médio e uso do petróleo como uma arma política. Apesar de não constar na Figura 7, o 1º choque ocorreu na década de 1970. Os anos seguintes, na década de 1990, apresentam altos e baixos, período também em que houve fusões e aquisições das companhias petrolíferas internacionais (Silvério, 2012).

A partir de 2000, o preço apresentou vertiginosa tendência de aumento devido ao “boom” das *commodities* associada à grande demanda da China e crises políticas ou econômicas internacionais, tais como os atentados de 11 de setembro de 2001, guerras e instabilidade do oriente médio, e bolha no mercado financeiro. Com o estouro da bolha econômica, houve o período de grande recessão, com reflexo na brusca queda do seu preço (Gomes, 2013).

Em seguida, após as turbulências no Oriente Médio (Primavera Árabe), os preços retornaram ao patamar antes da recessão, com flutuações discretas. Todavia, a partir de 2014, houve nova queda acentuada nos preços motivados pelo aumento da produção no Oriente Médio, para inviabilizar os projetos nos EUA com a técnica de fraturamento hidráulico (*fracking*) em áreas não convencionais (petróleo em rochas como o xisto, por exemplo), embargo ao Irã (devido a seu programa nuclear) e redução da demanda da China (Gomes, 2013).

Em relação aos preços do gás natural, até 2008, seu valor esteve elevado devido à forte demanda pela *commodity*, a depender da sazonalidade. Com os estoques em níveis recordes, aumento da produção do *shale gas* e a previsão de inverno com temperaturas amenas, a partir de 2009, os preços apresentaram tendência de queda. Em 2016, com a previsão de um inverno mais rigoroso, com um vórtice polar atingindo regiões importantes para o consumo residencial / comercial no nordeste e centro-oeste dos EUA, houve queda nos estoques, o que alinhado a produção estagnada ou em ligeira queda, influenciou no início da recuperação dos preços (Salles e Campanate, 2017). A série histórica é apresentada na Figura 8 (Bloomberg, 2017), em US\$/MM Btu (dólar por milhões de Btu), em valores nominais e reais (corrigidos pelo índice de preços CPI).

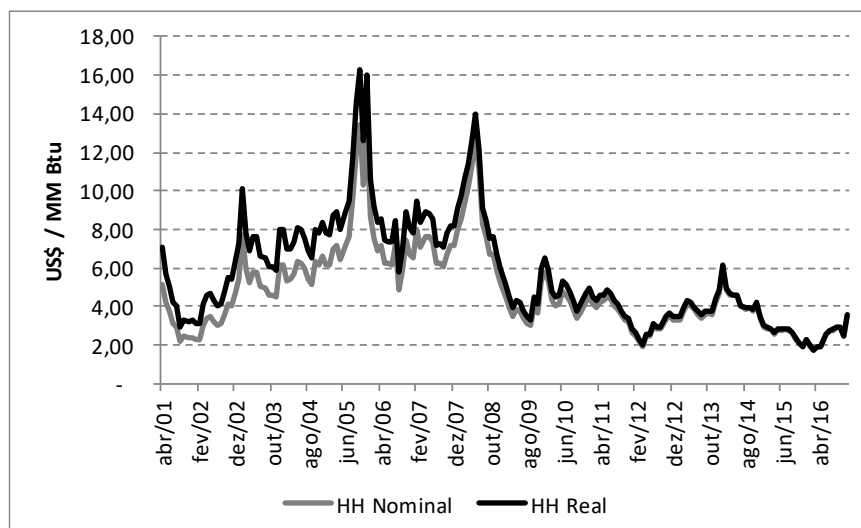


Figura 8: Histórico do preço de referência do gás (HH)

Fonte: Bloomberg (2017)

Com a adoção do regime cambial flutuante, a partir de 1999, a taxa de câmbio (R\$ / US\$) passa a ter seu valor atrelado ao mercado e por isso, sujeita a avaliação dos fundamentos econômicos. Além da interação entre as forças de oferta e demanda, a moeda está sujeita a valorização ou desvalorização, a depender da credibilidade do governo julgada pelo mercado (Prates, 2015). As séries históricas nominal e real (conforme índice de preço CPI) são apresentadas na Figura 9 (Bloomberg, 2017).

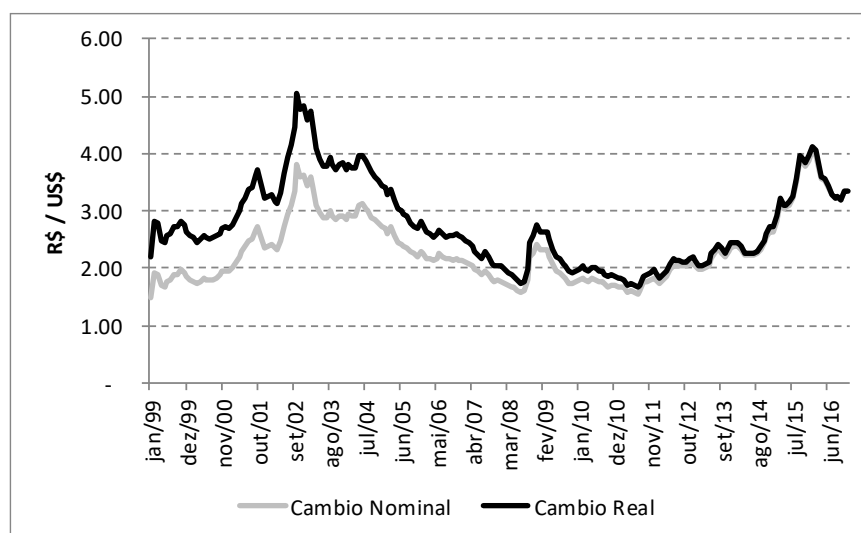


Figura 9: Histórico da taxa de câmbio

Fonte: Bloomberg (2017)

A acentuada desvalorização cambial do real no início da década de 2000 pode ser explicada principalmente pela recente adoção do câmbio flutuante e fuga de capitais do país, devido a desconfiança do mercado em relação ao futuro do país, com a possibilidade de eleição do Luiz Inácio Lula da Silva (Lula) e aumento do poder político do Partido dos Trabalhadores (PT). Todavia, com a nomeação de uma equipe econômica tida como ortodoxa e conservadora, o mercado reagiu de forma positiva, o que se traduziu na valorização da moeda após os desequilíbrios causados na eleição de 2002 (Prates, 2015).

Para não influenciar erroneamente a estimativa dos parâmetros do processo estocástico, o período da adoção do regime flutuante (1999) até o final do 1º mandato de Lula (2006) será desconsiderado.

A forte demanda por *commodities*, já relatada, também influenciou no período de valorização do real. A crise internacional em 2008 ainda produziu uma saída de capital, o que explica a desvalorização da moeda. A partir de 2010, houve acentuada desvalorização da moeda devido à perda de credibilidade do governo, associada a endividamento acentuado, baixa arrecadação, crise política (inclusive o *impeachment* da presidente Dilma Rousseff), escândalos de corrupção (em destaque para os casos envolvendo a Petrobras – Petróleo Brasileiro SA) e outros (Prates, 2015).

5.2. Estimativa e validação dos parâmetros

O processo estocástico movimento geométrico browniano pode ser descrito pela equação (5.2.1), na qual, a constante μ representa a tendência (*drift*), enquanto σ representa a volatilidade (Paddock et al., 1988). A figura 10 ilustra o comportamento esperado para a ocorrência dos preços.

$$P_t = P_{t-\Delta t} \text{Exp} \left(\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) \Delta t + \sigma N(0,1) \sqrt{\Delta t} \right) \quad (5.2.1)$$

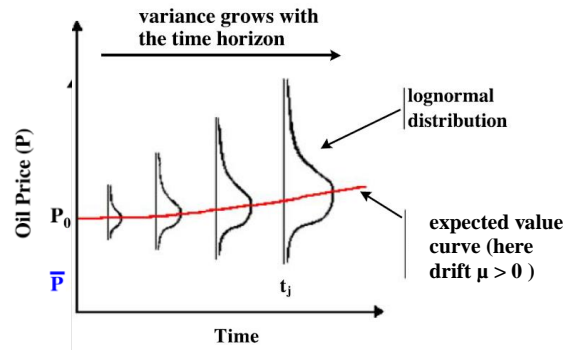


Figura 10: Intuição sobre o MGB

Fonte: Dias (2015)

Pela equação (5.2.1), observa-se que o retorno logaritmo do movimento geométrico browniano possui distribuição normal e, por isso, a regressão adequada para descrever o processo é a regressão linear (Paddock et al., 1988). A regressão linear do movimento geométrico browniano, com observações consecutivas ($\Delta t = 1$) é definida pela equação (5.2.2).

$$\ln(P_t) - \ln(P_{t-1}) = a + (b - 1) \ln(P_{t-1}) + \varepsilon_t \quad (5.2.2)$$

Onde $a = \left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)$, $b = 1$, $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$

A partir do cálculo do valor esperado para a equação (5.2.2), é possível estimar o parâmetro de tendência (μ), conforme equação (5.2.3). A volatilidade (σ), por sua vez, é obtida pelo cálculo da variância da equação (5.2.2), permitindo sua estimativa pela equação (5.2.4).

$$\mu = E[\ln(P_t) - \ln(P_{t-1})] + \frac{\sigma^2}{2} \quad (5.2.3)$$

$$\sigma^2 = \text{Var}[\ln(P_t) - \ln(P_{t-1})] \quad (5.2.4)$$

A Tabela 4 apresenta os parâmetros estimados para cada variável, obtidos a partir da aplicação das equações (5.2.3) e (5.2.4) na série histórica deflacionada (em valores reais).

	μ (% aa)	σ (% aa)
Brent	3,882	30,942
HH	6,021	45,508
Câmbio	3,797	14,496

Tabela 4: Parâmetros MGB

Para avaliar se as variáveis se comportam segundo processo estocástico movimento geométrico browniano foi realizado o teste padrão da raiz unitária, conforme proposto por Dickey-Fuller (1979). Para o teste, avalia-se a hipótese nula de inclinação zero, ou seja, $(b - 1) = 0$ ou $b = 1$, para a regressão linear que descreve o retorno logaritmo $[\ln(P_t) - \ln(P_{t-1})]$ versus o logaritmo do último preço $\ln(P_{t-1})$, conforme equação (5.2.2). A estatística de teste é a razão t^* da estimativa de b por mínimos quadrados, conforme equações (5.2.5), (5.2.6) e (5.2.7).

$$t^* = \frac{\hat{b} - 1}{\sqrt{\text{Var}(\hat{b})}} \quad (5.2.5)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{t=1}^N (p_{t-1} - \bar{p}_{t-1})(p_t - \bar{p}_t)}{\sum_{t=1}^N (p_{t-1} - \bar{p}_{t-1})^2} \quad (5.2.6)$$

$$\text{Var}(\hat{b}) = \frac{\sum_{t=1}^N \varepsilon_t^2}{(N - 2) \sum_{t=1}^N (p_{t-1} - \bar{p}_{t-1})^2} \quad (5.2.7)$$

Onde $p_t = \ln(P_t)$, \bar{p} e N representam a média e tamanho da série histórica, respectivamente.

A estatística de teste t^* de cada série foi comparada com a tabela de valores críticos, conforme tamanho da série histórica (N) e nível de significância de 5%. Como a estatística de teste t^* é maior que o valor crítico (Tabela 5), a hipótese nula de que as variáveis econômicas seguem o movimento geométrico browniano não pode ser rejeitada, indicando com isso que o movimento geométrico browniano é um modelo adequado para sua caracterização.

	\hat{b}	$Var(\hat{b})$	t^*	N	$t_{crítico, 5\%}$
Brent	0,985	0,901	- 0,016	402	-2,87
HH	0,963	0,732	- 0,044	188	-2,88
Câmbio	0,993	0,011	- 0,065	120	-2,89

Tabela 5: Teste da raiz unitária

Apesar do teste não rejeitar a hipótese de inclinação nula que a série segue um caminho aleatório, algo que ocorre apenas para séries bem longas, é possível que exista indicativos de reversão a média. Ao avaliar as Figuras 11, 12 e 13 com o comportamento da dispersão do retorno logaritmo ($\ln(P_t) - \ln(P_{t-1})$) versus o logaritmo do último preço $\ln(P_{t-1})$, pode-se observar uma ligeira inclinação negativa, o que poderia ser indício de reversão a média com baixa velocidade de reversão. Para o movimento de reversão à média, é esperada uma inclinação negativa, pois quando os preços estão acima do nível de equilíbrio, o retorno esperado é baixo (ou até negativo), enquanto que se os preços estiverem abaixo, é esperado um retorno alto (regressão à média).

Apesar estarem sujeitos aos mecanismos de mercado, por dependerem em sua maioria de empreendimentos de médio e longo prazos, os preços das *commodities* da indústria de E&P possuem resposta lenta aos choques estocásticos. Assim, decisões de hoje somente irão alterar as condições de oferta no médio ou longo prazo, o que justificaria a inclinação pouco acentuada nos gráficos ilustrados pelas Figuras 11, 12 e 13. A respeito da demanda, a busca por fontes alternativas também não é imediata, por depender do desenvolvimento de novas tecnologias ou estar associada a investimentos significativos.

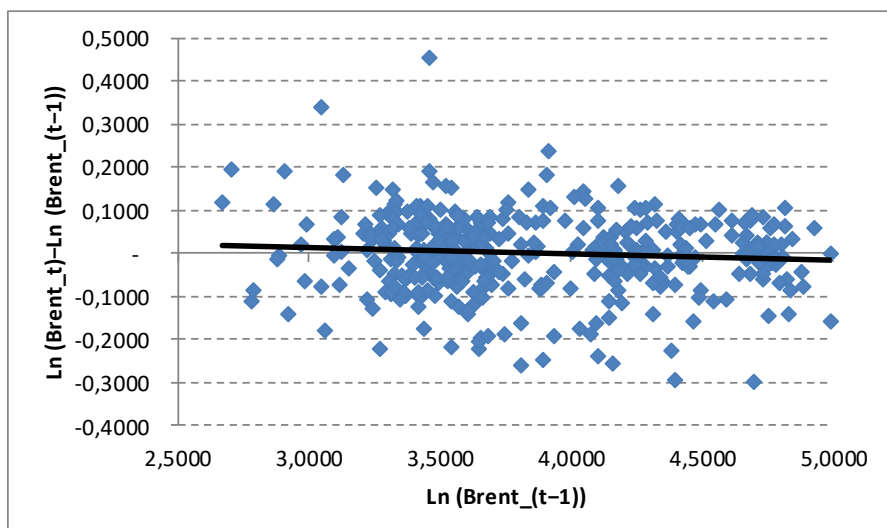


Figura 11: Brent – retorno logaritmo versus o logaritmo do último preço

Fonte: Autor (2018)

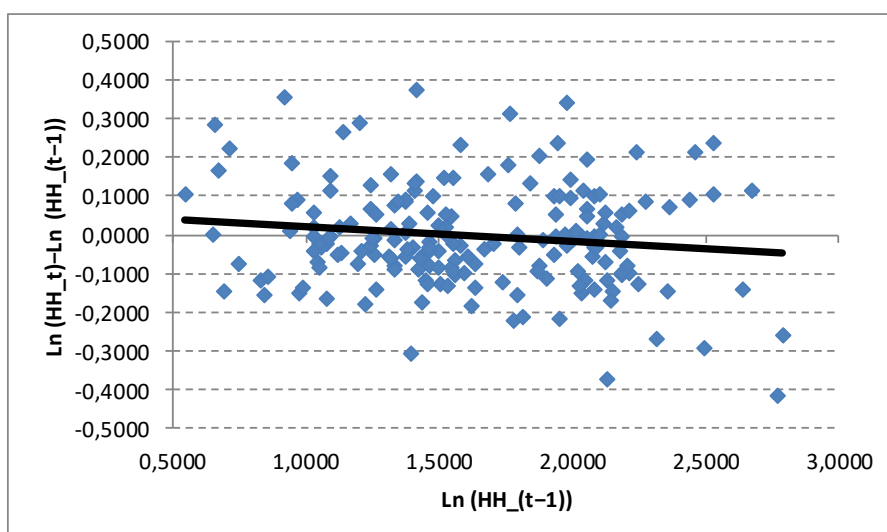


Figura 12: HH – retorno logaritmo versus o logaritmo do último preço

Fonte: Autor (2018)

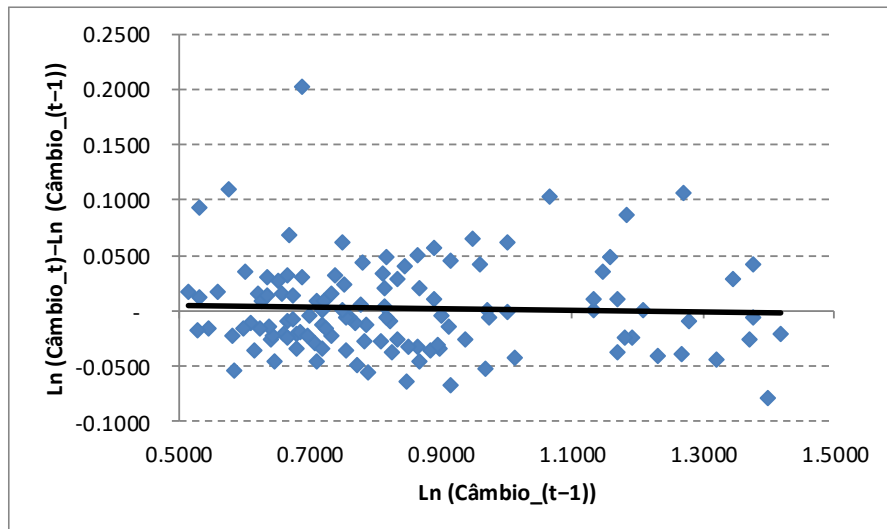


Figura 13: Câmbio – retorno logaritmo versus o logaritmo do último preço

Fonte: Autor (2018)

Pindyck (1999) apresenta o teste da taxa de variância para avaliar se a variável segue um caminho aleatório (MGB) ou reverte à média (MRM). O teste busca verificar se variação das diferenças de k-períodos descrita pela equação (5.2.8) cresce linearmente com o período k, o que caracterizaria o processo movimento geométrico browniano. Entretanto, ao seguir um processo estocástico de reversão à média, a variação das diferenças do período k atingirá um valor máximo e tenderá a zero, com o crescimento de k, indicando que os choques de preços não são permanentes.

$$R_k = \frac{Var (P_{t+k} - P_t)}{k Var (P_{t+1} - P_t)} \quad (5.2.8)$$

O teste da razão R_k foi aplicado para cada uma das variáveis econômicas, apresentando um crescimento inicial, seguido de tendência de queda após atingir um valor máximo, conforme consta na Figura 14.

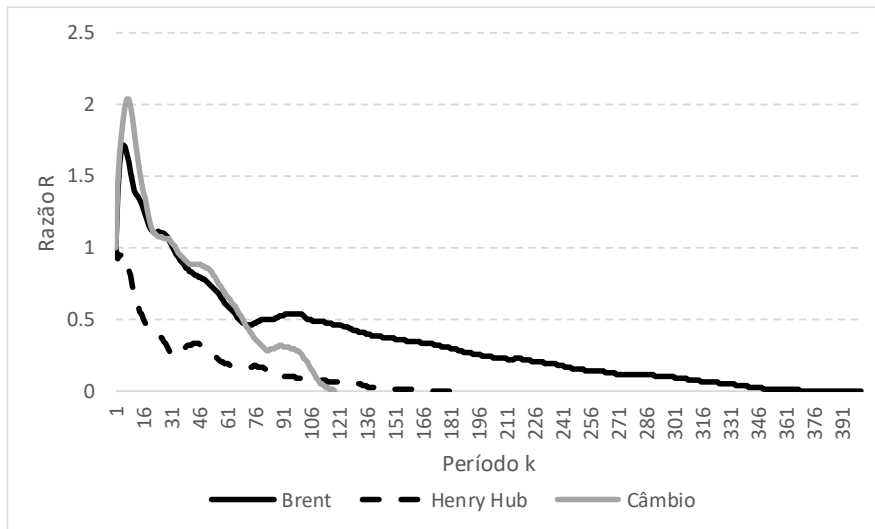


Figura 14: Teste da razão R_k

Fonte: Autor (2018)

Assim sendo, para uma comparação dos resultados do modelo de otimização face outra abordagem, também foram estimados os parâmetros para o movimento de reversão à média, seguindo a abordagem exponencial MRM de Uhlenbeck-Ornstein (1930), conforme consta na equação (5.2.9). A Figura 15 ilustra o comportamento esperado para a ocorrência dos preços.

$$P_t = \text{Exp}(\text{Ln}(P_{t-\Delta t}) * \text{Exp}(-\eta\Delta t) + \bar{x}(1 - \text{Exp}(-\eta\Delta t)) + \sigma \sqrt{\frac{(1 - \text{Exp}(-2\eta\Delta t))}{2\eta}} N(0,1)) \quad (5.2.9)$$

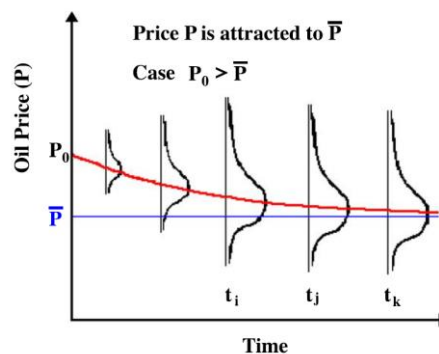


Figura 15: Intuição sobre o MRM

Fonte: Dias (2015)

Semelhante ao que ocorre para o movimento geométrico browniano, ao avaliar a equação (5.2.9), constata-se que o retorno logaritmo no processo estocástico movimento de reversão à média também possui distribuição normal, o que permite o uso da regressão linear para a estimativa dos seus parâmetros, conforme equação (5.2.10).

$$\text{Ln}(P_t) - \text{Ln}(P_{t-1}) = a + (b - 1) \text{Ln}(P_{t-1}) + \varepsilon_t \quad (5.2.10)$$

Onde $a = \bar{x}(1 - e^{-\eta})$, $b = e^{-\eta}$, $\varepsilon_t \sim N\left(0, \frac{\sigma^2}{2\eta}(1 - e^{-2\eta})\right)$

A partir das equações (5.2.11), (5.2.12) e (5.2.13) é possível estimar os parâmetros de velocidade de reversão (η), volatilidade (σ) e nível de equilíbrio (\bar{x}) para o modelo exponencial MRM de Uhlenbeck-Ornstein (1930). Os parâmetros N e σ_ε representam o tamanho da série histórica e desvio padrão do erro, respectivamente.

$$\eta = -\text{Ln}[b] N \quad (5.2.11)$$

$$\sigma = \sigma_\varepsilon \sqrt{\frac{N(2 \text{Ln}[b])}{b^2 - 1}} \quad (5.2.12)$$

$$\bar{x} = \frac{a}{(1 - b)} \quad (5.2.13)$$

A Tabela 6 apresenta os parâmetros estimados para cada variável, obtidos a partir da aplicação das equações (5.2.11), (5.2.12) e (5.2.13) na série histórica deflacionada (em valores reais).

	η	σ (% aa)	\bar{x}
Brent	0,180	31,090	3,810
HH	0,458	46,067	1,529
Câmbio	0,081	14,597	1,183

Tabela 6: Parâmetros movimento de reversão à média

5.3. Geração de cenários

Cada cenário é definido pelo par incerteza técnico-econômica. Para a indicação dos cenários de incerteza técnica em cada projeto alternativa foi considerada a ocorrência aleatória e equiprovável com a simulação de Monte Carlo para as estimativas 1P, 2P e 3P. A Figura 16 apresenta um exemplo de sorteio e indicação do cenário de incerteza técnica para os diferentes projetos P e alternativas A. Todos os cenários técnicos são independentes entre si.



Figura 16: Simulação de cenários técnicos

Fonte: Autor (2018)

Os cenários econômicos para os processos estocásticos movimento geométrico browniano e movimento de reversão à média foram gerados com a utilização dos parâmetros estimados, constantes nas Tabelas 4 e 6, e pela simulação de Monte Carlo para o termo estocástico, conforme as equações (5.2.1) e (5.2.9), respectivamente. Todos os cenários gerados são independentes e representam uma trajetória futura para os preços das variáveis econômicas.

Nas Figuras 17 e 18 apresentam-se alguns caminhos simulados para o Brent, pelos quais, pode-se observar que o principal fator que diferencia os processos estocásticos é o componente de tendência, que no movimento de reversão à média apresenta sentido e intensidade variando com o tempo conforme preço corrente.

Para o movimento de reversão à média, cada choque estocástico é apenas um desvio transitório do nível de equilíbrio, enquanto que no movimento geométrico browniano, todo choque estocástico é permanente na trajetória de longo prazo.

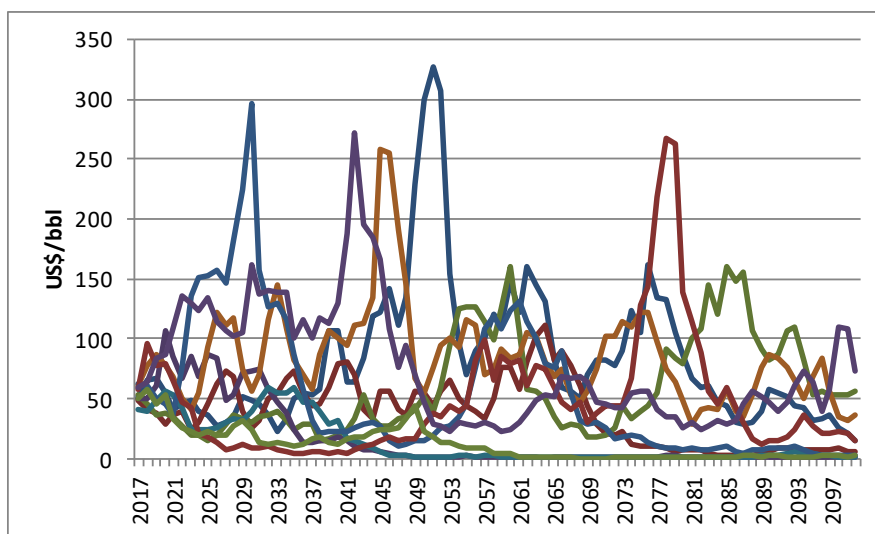


Figura 17: Brent – simulação de cenários por MGB

Fonte: Autor (2018)

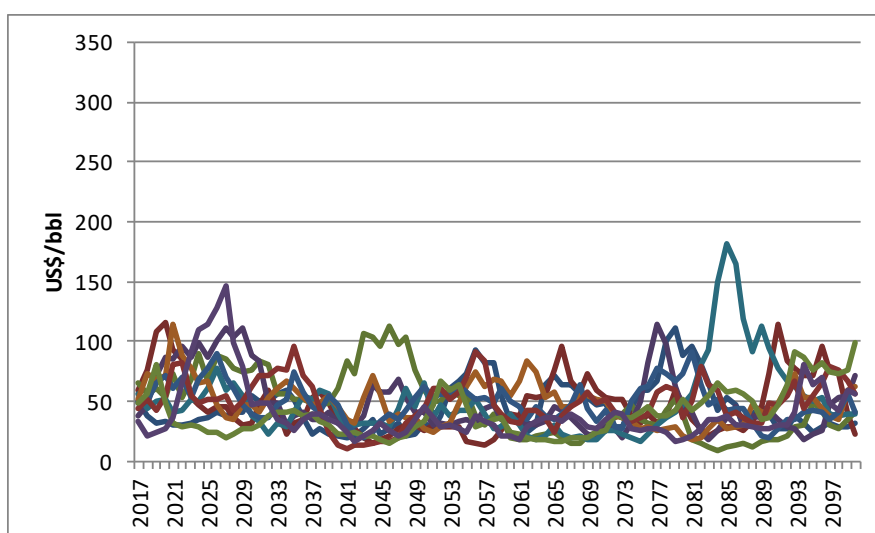


Figura 18: Brent – simulação de cenários por MRM

Fonte: Autor (2018)

6. Análise e discussão dos resultados da otimização

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na etapa geração de cenários, experimento piloto e otimização do modelo.

6.1. Experimento piloto

A partir da estimativa dos parâmetros, foi gerada uma amostra com 1.000 cenários independentes para movimento geométrico browniano e movimento de reversão à média, para a realização da otimização visando somente a maximização do valor presente líquido do portfólio de projetos, isto é, excluindo as restrições (4.2.7), (4.2.8), (4.2.9) e (4.2.13) referentes à restrição de risco.

Com os parâmetros estatísticos desse experimento piloto foi calculado o número mínimo de cenários para o movimento geométrico browniano e movimento de reversão à média, considerando desvio padrão amostral ($\hat{\sigma}$), erro máximo (e) de 5% em relação ao valor médio (γ) e grau de confiança ($1 - \alpha$) de 95%, seguindo a equação (6.1.1) para o cálculo amostral.

$$N = \left(\frac{Z_{\alpha/2} * \hat{\sigma}}{e * \gamma} \right)^2 \quad (6.1.1)$$

Na Tabela 7 são apresentadas as estatísticas de valor presente líquido médio e desvio padrão do experimento piloto (em US\$ milhões), o que, a partir da equação (6.1.1), permitiu o cálculo do número mínimo de cenários para a execução da otimização em cada processo estocástico (MGB e MRM).

	VPL médio	Desvio padrão	Número de cenários
MGB	138.963	130.412	1.353
MRM	93.677	40.373	285

Tabela 7: Experimento piloto

As Figuras 19 e 20 apresentam a dispersão da maximização do valor presente líquido do portfólio selecionado considerando os 1.000 cenários gerados para o movimento geométrico browniano e movimento de reversão à média, respectivamente. Como o movimento de reversão à média possui suas projeções em torno da média, não houve significativa variação do valor presente líquido, o que implicou na indicação de um menor número de cenários se comparado com o movimento geométrico browniano.

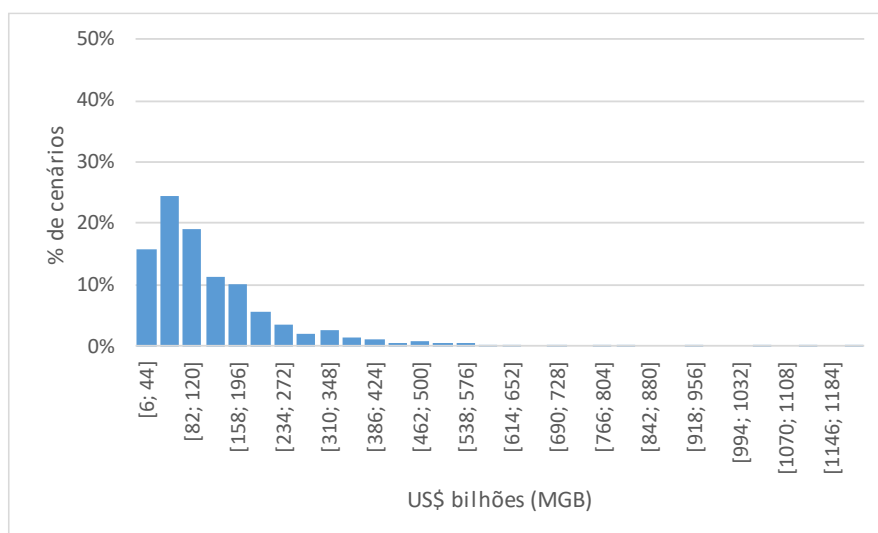


Figura 19: Dispersão do VPL - MGB

Fonte: Autor (2018)

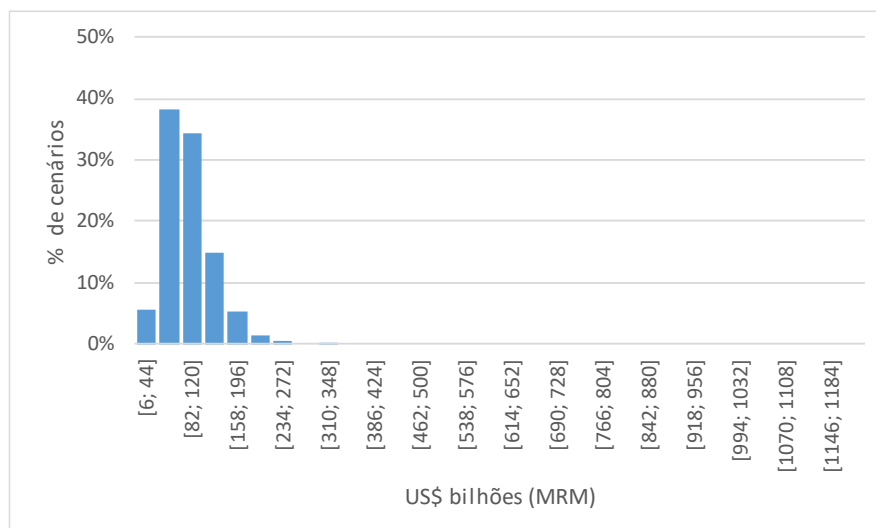


Figura 20: Dispersão do VPL – MRM

Fonte: Autor (2018)

6.2. Otimização com Movimento Geométrico Browniano

Para o movimento geométrico browniano, a otimização dos 40 projetos, e suas três alternativas para início do projeto, implicou em um total de 71.693 restrições e 2.889 variáveis (120 inteiras). O tempo de solução foi de 1.520,6 segundos, utilizando o total de 7.690,3 Mb de memória RAM. Esse tempo de processamento do modelo revela-se como uma oportunidade para facilitar o trabalho de análise de diferentes composições de portfólio e a interações das diversas alternativas de projetos, o que é bastante importante por tratar-se de decisões de vultuosos investimentos com retorno no médio e longo prazo.

Com o número de cenários indicados no experimento piloto inicialmente foi realizada a otimização do valor presente líquido médio do portfólio sem nenhuma restrição de risco para as projeções segundo movimento geométrico browniano. O modelo indicou o retorno médio de US\$ 157.257 milhões. A partir do resultado nos 1.353 diferentes cenários, foi possível calcular o menor valor de CVaR (US\$ 27.902 milhões) ao nível de confiança de 90%, ou seja, 10% dos piores cenários de retorno.

Em seguida, foi realizada a otimização visando a definição de um portfólio com o máximo valor de CVaR. Para valores acima desse limite, a execução da otimização implicará em inviabilidade. Como resultado, obteve-se US\$ 29.884 milhões de CVaR máximo.

Para representar os diferentes níveis de risco que o decisor poderia assumir foram realizadas diversas instâncias do problema de otimização, com a restrição de risco incluída, variando do menor até o maior valor de CVaR. Na Figura 21, apresenta-se a relação entre o retorno médio (VPL) e sua distância para a média dos $(1 - \alpha)$ piores cenários (VPL - CVaR), enquanto que na Figura 22 consta a relação entre o retorno médio (VPL) e a média dos $(1 - \alpha)$ piores cenários (CVaR). A Tabela 8 contém os valores (em US\$ milhões) segregados em faixas equidistantes do CVaR.

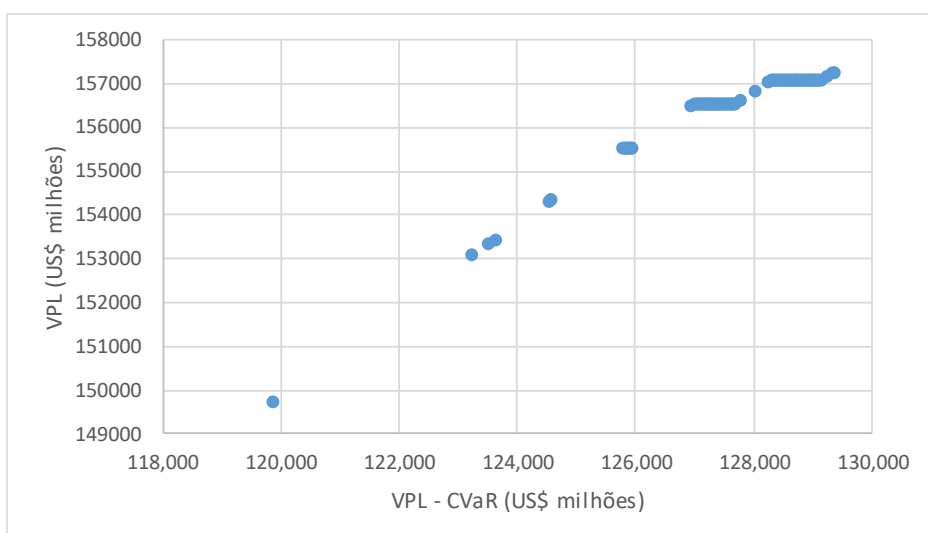


Figura 21: MGB – (VPL) x (VPL - CVaR)

Fonte: Autor (2018)

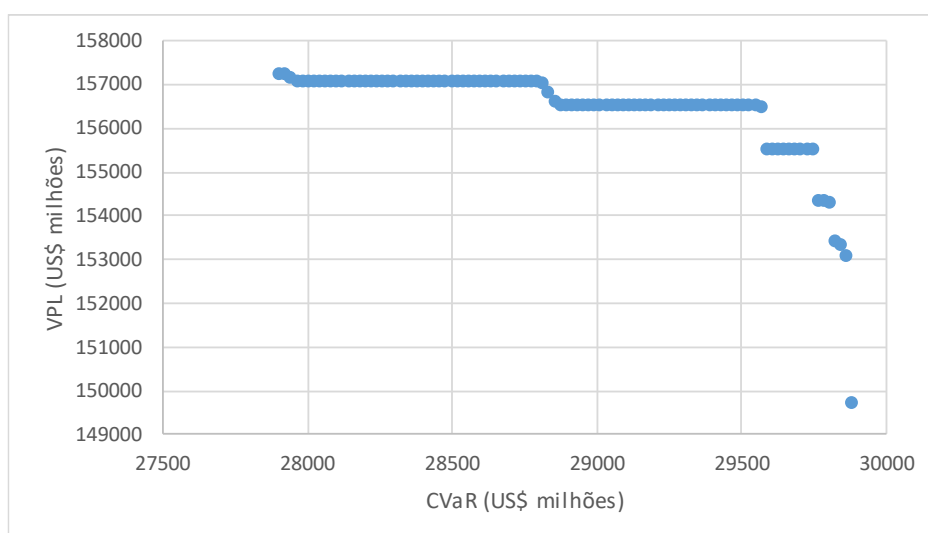


Figura 22: MGB – (VPL) x (CVaR)

Fonte: Autor (2018)

Faixa	VPL	CVaR	VPL – CVaR
0	157.257	27.902	129.356
1	157.078	28.100	128.978
2	157.078	28.298	128.780
3	157.078	28.497	128.582
4	157.078	28.695	128.383
5	156.544	28.893	127.651
6	156.544	29.091	127.453
7	156.544	29.289	127.255
8	156.544	29.488	127.057
9	155.524	29.686	125.838
10	149.726	29.884	119.842

Tabela 8: MGB - VPL médio para diferentes níveis de risco

Ao avaliar a indicação de participação nos projetos para diferentes níveis de risco houve variação apenas em cinco projetos. A Tabela 9 apresenta os percentuais de participação em três diferentes níveis de risco, na qual pode-se observar que há a indicação da redução da participação em três projetos, quanto maior for a aversão ao risco.

Projeto	Alternativa	CVaR = 23.784	CVaR = 29.825	CVaR = 30.848
(1)	(A)	11%	7%	-
	(B)	-	-	-
	(C)	-	-	-
(2)	(A)	-	-	-
	(B)	100%	-	-
	(C)	-	81%	72%
(3)	(A)	99%	88%	70%
	(B)	-	-	-
	(C)	-	-	-
(4)	(A)	-	-	-
	(B)	12%	23%	58%

	(C)	-	-	-
	(A)	36%	60%	-
(5)	(B)	-	-	100%
	(C)	-	-	-

Tabela 9: Percentuais de participação nos projetos

Cabe destacar que os projetos (1), (2) e (3) são empreendimentos de grande porte, em áreas com maior incerteza, o que refletiu em patamares bem distintos para as expectativas de investimentos, produção e custos nos cenários técnicos (1P, 2P e 3P). Essa característica alinhada as incertezas nas projeções de preço de petróleo, gás natural e taxa de câmbio, influenciou em uma maior sensibilidade do valor presente líquido dos projetos.

Devido a maior maturidade das áreas e maior conhecimento sobre as incertezas de reservatórios, os demais projetos não apresentam diferença relevante entre os cenários técnicos, e por isso, a otimização nos diferentes níveis de risco indicou um percentual de participação estável. Esse fato ressalta que a base inicial para seleção de portfólio já não apresenta opções de projetos que favoreça ao gerenciamento de risco.

Quando os resultados são analisados por sua variação percentual, a aplicação do modelo indicou resultados sem ganhos relevantes (em torno de 5%), o que poderia indicar uma menor importância para o gerenciamento do risco. Na indústria de petróleo, o retorno dos projetos muitas vezes é da ordem de grandeza de milhões ou bilhões, o que compromete a análise percentual. Em termos absolutos, apesar da baixa variação percentual, observa-se que a depender do perfil do decisor, o retorno médio apresenta resultados cuja variação atinge US\$ 7.531 milhões.

Como sensibilidade do problema, foi realizada a otimização com variações do nível de confiança do CVaR, com valores de 99, 90, 85 e 80%. Exceto para a condição de máximo CVaR, não houve alteração do valor presente líquido médio da otimização nos diferentes níveis de confiança. Em relação ao CVaR, seu valor era menor, quanto maior fosse o nível de confiança. Esse comportamento já era esperado, visto que o aumento do nível de confiança reflete em menos cenários com retornos melhores considerados no cálculo do CVaR.

No mais, por ter projetos apenas do segmento de *upstream*, apesar de considerar os diferentes cenários econômicos, a otimização somente consegue capturar o efeito de diversificação técnica. Mesmo considerando as especificidades de cada projeto, como a qualidade do óleo, poder calorífico do gás natural, percentual de orçamento em moeda nacional e outros, os cenários econômicos influenciam o resultado de todos os projetos na mesma direção. Assim, um cenário de preço das *commodities* favorável (por exemplo) reflete positivamente a todos os projetos. Sem projetos de outros segmentos, que teriam resultados contrários de acordo com o cenário econômico, a seleção de portfólio não apresenta os benefícios da diversificação de mercado, sendo essa uma limitação dos resultados indicados.

6.3.

Avaliação para o Movimento Geométrico Browniano

Conforme descrito no Capítulo 4, as estimativas orçamentárias são feitas em dólares americanos (US\$), podendo ter sua expectativa de realização em moeda nacional ou estrangeira. Para serem expressos em dólares americanos, os valores em moeda nacional são referenciados a uma taxa de câmbio.

Caso o cenário de realização da taxa de câmbio futura seja diferente da referência inicial, a parcela das estimativas orçamentárias referenciadas em moeda nacional sofrem uma equalização cambial, o que pode comprometer o limite orçamentário da companhia.

Como a otimização considerou projeções amostrais para as variáveis econômicas, foi realizada uma avaliação da robustez da viabilidade dos resultados a partir de novos cenários gerados. Nessa etapa de avaliação, foram considerados o dobro de cenários da otimização, no total de 2.706 cenários.

Nas diferentes faixas do CVaR, houve violação da restrição de investimento máximo (equação (4.2.10)) devido a equalização cambial em menos de 1,4% dos cenários avaliados, com valores médios de no máximo 3,6% acima do limite. Em relação ao limite orçamentário considerado na otimização, essa violação média seria de no máximo US\$ 93 milhões, o que é sem significância perante a magnitude dos investimentos.

6.4. Indicador de qualidade e valor da informação

Apesar dos estudos sobre otimização sob incerteza existirem desde a década de 50 (Dantzig, 1955; Beale, 1955) e essa prática ser bastante difundida na academia, muitas empresas ainda possuem seu processo de tomada de decisão referenciada a modelos determinísticos.

Para avaliar a qualidade da otimização estocástica frente a uma solução determinística foi realizada a otimização com a média entre os cenários. A otimização determinística indicou um valor presente líquido de US\$ 169.537 milhões, todavia, ao ser avaliada nos 2.706 cenários descritos na etapa anterior, essa solução foi inviável em 93% dos casos. A inviabilidade ocorreu com valores médios de até 20% acima do limite orçamentário, com valor máximo de US\$ 415 milhões, o que destaca a relevância da solução estocástica. Se comparado com a solução perfeita (WS = US\$ 190.473 milhões), caso as informações sobre o futuro estivessem disponíveis, a solução estocástica apresenta diferença de US\$ 33.216 milhões (EVPI).

6.5. Sensibilidade com o Movimento de Reversão à Média

Para uma sensibilidade do modelo de projeção movimento geométrico browniano também foi realizada a otimização e avaliação face ao movimento de reversão à média. Contudo, conforme ilustrado nas Figuras 23 e 24, para o movimento de reversão à média, as respostas do modelo revelaram-se pouco sensíveis ao gerenciamento do risco com variação do retorno praticamente nula. Como no movimento de reversão à média os valores projetados orbitam em torno do valor médio, não há ganho da consideração do risco para a seleção de portfólio. A Tabela 10 contém os valores em US\$ milhões segregados em faixas equidistantes do CVaR.

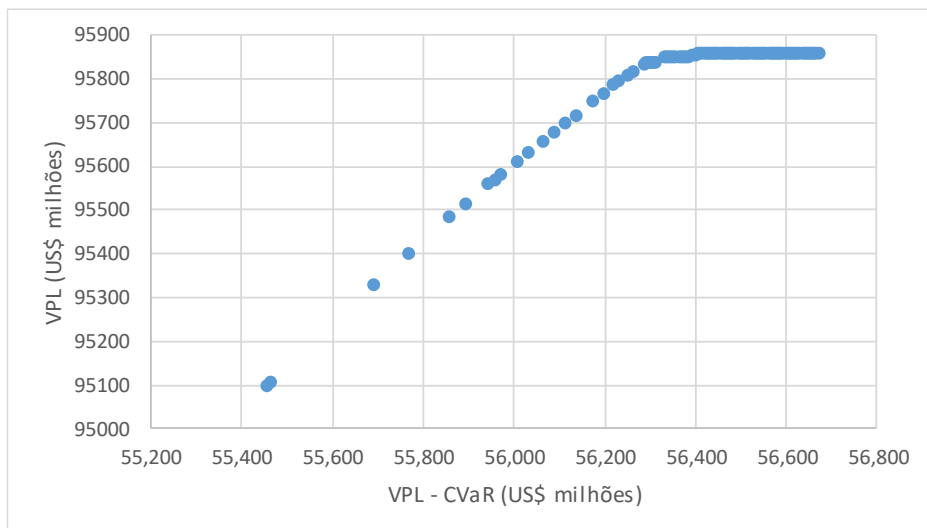


Figura 23: MRM – (VPL) x (VPL - CVaR)

Fonte: Autor (2018)

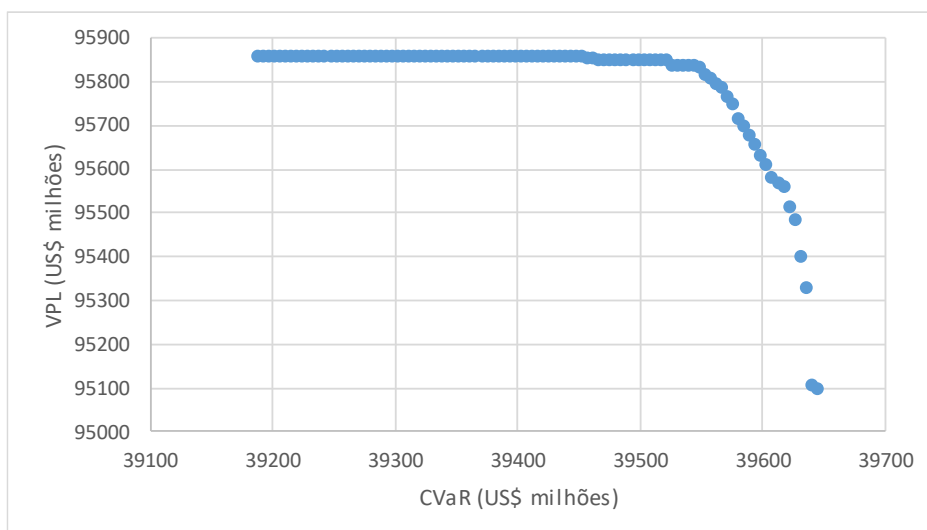


Figura 24: MRM – (VPL) x (CVaR)

Fonte: Autor (2018)

Faixa	VPL	CVaR	VPL - CVaR
0	95.858	39.187	56.671
1	95.858	39.233	56.625
2	95.858	39.279	56.579
3	95.858	39.325	56.534
4	95.858	39.370	56.488
5	95.858	39.416	56.442

6	95.856	39.462	56.395
7	95.852	39.507	56.344
8	95.815	39.553	56.262
9	95.631	39.599	56.033
10	95.099	39.645	55.454

Tabela 10: MRM - VPL médio em diferentes níveis de risco

Para avaliar a robustez da viabilidade dos resultados da otimização com o movimento de reversão à média foram considerados o dobro de cenários, no total de 570 cenários. Nas diferentes faixas do CVaR, a violação máxima da restrição orçamentária foi de 3,4%, com valores médios de no máximo 5,2% acima do limite. Em valores monetários, a violação média seria de no máximo US\$ 123 milhões.

6.6. Comparativo dos resultados entre os modelos

A Tabela 11 apresenta um comparativo entre os percentuais de participação indicados para os projetos (1) - (5) na otimização estocástica (conforme cenários econômicos segundo os processos movimento geométrico browniano e movimento de reversão à média) e determinística (a partir da média dos cenários do movimento geométrico browniano).

Projeto	Alternativa	MGB Máx VPL	MRM Máx VPL	DET Máx VPL
(1)	(A)	11%	-	-
	(B)	-	-	-
	(C)	-	-	58%
(2)	(A)	-	-	-
	(B)	100%	30%	100%
	(C)	-	-	-
(3)	(A)	99%	-	100%
	(B)	-	72%	-
	(C)	-	-	-
(4)	(A)	-	-	-
	(B)	12%	-	-

	(C)	-	59%	100%
	(A)	36%	-	-
(5)	(B)	-	-	5%
	(C)	-	-	-

Tabela 11: Comparativo dos percentuais de participação nos projetos

A Tabela 11 evidencia como as decisões indicadas pela otimização apresentaram valores muito diferentes a depender do método de projeção. Esse fato também ocorre para os demais projetos, o que destaca a necessidade de realizar estudos mais aprofundados para escolha do método de geração dos cenários econômicos.

7. Considerações finais

Nessa dissertação desenvolveu-se um modelo de programação estocástica linear dois estágios inteiro-misto para a seleção de portfólio de projetos, visando a maximização do retorno esperado (VPL) face uma medida de risco (CVaR). A aplicação considerou dados realistas do segmento de E&P de uma empresa da indústria do petróleo e gás.

Dado sua importância econômica, o tema alvo do trabalho já foi bastante debatido na literatura, entretanto, nem sempre o gerenciamento do risco é compreendido ou aplicado nas práticas organizacionais. Para a empresa, o trabalho oferece o uso de modelo matemático para realização de diferentes análises, com rápida atualização dos dados, sendo por isso, uma ferramenta para suporte à tomada de decisão.

Em termos de resultados, a utilização do CVaR revelou-se interessante para o gerenciamento do risco. Os resultados da otimização para variáveis econômicas projetadas pelo movimento geométrico browniano apresentaram maior sensibilidade ao gerenciamento do risco, enquanto que o modelo movimento de reversão à média não apresentou ganhos.

O fato de apenas cinco projetos relevarem-se sensíveis ao risco, destaca a importância de considerar outras alternativas de investimento para a diversificação do portfólio, em especial de diferentes segmentos. Em relação a abordagem determinística, a otimização estocástica oferece melhor preparação da empresa para lidar com essa incerteza típica da indústria, com menor risco de ocorrer casos de inviabilidade.

7.1. Sugestão para trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, sugere-se (i) inclusão de projetos de *downstream* na execução do modelo, com objetivo de capturar o efeito de diversificação técnica e de mercado, (ii) realizar uma análise da correlação dos projetos, de forma a identificar parâmetros para flexibilizar a premissa de independência dos projetos, (iii) agregar o planejamento físico como restrições para realização dos investimentos para melhor refletir a realidade da indústria, (iv) incorporar no modelo de geração dos cenários os fatos estilizados mais relevantes da série das variáveis econômicas e (v) a utilização da técnica de decomposição, para separar o problema principal em subproblemas e com isso proporcionar ganhos de performance com a otimização com muitos cenários.

8. Referências bibliográficas

AIUBE, F. A. L. **Modelos quantitativos em finanças, com enfoque em commodities**. Bookman Editora, Porto Alegre, 2013.

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. **Regulamento Técnico de Estimativa de Recursos e Reservas de Petróleo e Gás Natural (RTR)**. 2014. Resolução ANP Nº 47, de 03/09/2014. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=274460>. Acesso em: 10/03/2017.

APRIL, J.; GLOVER, F.; KELLY, J.; LAGUNA, M.; ERDOGAN, M.; MUDFORD, B.; STEGEMEIER, D. Advanced optimization methodology in the oil and gas industry: the theory of scatter search techniques with simple examples. In: **SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium**, Dallas, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2003.

ARTZNER, P. F. Thinking Coherently. **Risk**, v. 10. N. 11, p. 68-71, 1997.

BEALE, E. M. L. On minimizing a convex function subject to linear inequalities. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, v. 17, n. 2, p. 173-184, 1955.

BENATI, S.; RIZZI, R. A mixed integer linear programming formulation of the optimal mean/Value-at-Risk portfolio problem. **European Journal of Operational Research**, v. 176, n. 1, p. 423-434, 2007.

BIRGE, J. R.; LOUVEAUX, F. **Introduction to stochastic programming**. New York: Springer, 2011.

BLOOMBERG, Disponível na plataforma Bloomberg. Acesso em 10 de abril de 2017.

BORSANI, A. J. **Uma contribuição à logística da indústria do petróleo: modelo de regressão dinâmica para previsão dos preços dos óleos WTI e BRENT.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

BRASHEAR, J. P.; BECKER, A. B.; GABRIEL, S. A. Interdependencies among E&P projects and portfolio risk management. In: **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 1999.

BRENNAN, M. J.; SCHWARTZ, E. S. Evaluating natural resource investments. **The Journal of Business**, v. 58, n. 2, p. 135-157, 1985.

CAPOLEI, A.; FOSS, B.; JØRGENSEN, J. B. Profit and risk measures in oil production optimization. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 6, p. 214-220, 2015.

CARNEIRO, M. C. T. **Otimização sob incerteza de carteiras de investimentos: aplicação à cadeia integrada de petróleo e derivados.** 2008. 106f. Dissertação (Mestrado Profissional em Logística) – Departamento de Engenharia Industrial, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ. 2008.

CONDEIXA, L. D.; DELFINO, A. P.; SILVA, P. S. M.; THOME, A. M. T. Seleção de portfólio de projetos de uma empresa de exploração e produção de petróleo e gás natural através de modelo estocástico de programação linear inteira. In: **XXIII SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção**, São Paulo, SP: UNESP, 2016.

CPC - Comitê de Pronunciamentos Contábeis. **Pronunciamento Técnico CPC 01 (R1) – Redução ao Valor Recuperável de Ativos.** 2010. Disponível em: <http://www.cpc.org.br/CPC/DocumentosEmitidos/Pronunciamentos/Pronunciamento?Id=2>. Acesso em: 10/06/2017.

DANTZIG, G. B. Linear programming under uncertainty. **Management Science**, v. 1, n. 3 e 4, p. 197-206, 1955.

DA SILVA, P. S. M.; CONDEIXA, L. D.; DELFINO, A. P.; HAMACHER, S. Seleção e scheduling de portfólio de projetos com abordagem de risco na indústria de petróleo e gás natural. In: **XLIX SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Blumenau, SC: Sobrapo, 2017.

DEAN, J. **Capital budgeting**. New York: Columbia University Press, 1951.

DE SOUZA, J. S.; NETO, F. J. K.; FILOMENA, T. P. Definição de portfólio de projetos de investimentos em uma empresa usando análise multicriterial. **Revista Produção Online**, v. 10, n. 1, p. 166-197, 2010.

DIAS, M. A. G. **Análise de investimentos com opções reais** – Teoria e prática com aplicações em petróleo e em outros setores - Volume 1: Conceitos básicos e opções reais em tempo discreto. Editora Interciência, 2014. 322p.

DIAS, M. A. G. **Análise de investimentos com opções reais** – Teoria e prática com aplicações em petróleo e em outros setores - Volume 2: Processos estocásticos e opções reais em tempo contínuo. Editora Interciência, 2015. 496p.

DICKEY, M. A. G.; FULLER, W. A. **A distribution of the estimators for autoregressive times series with unit root**. Journal of the American Statistical Association, 74 (366): 427-431, 1979.

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

ESFAHANI, H. N.; SOBHIYAH, M. H.; YOUSEFI, V. R. Project portfolio selection via harmony search algorithm and modern portfolio theory. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 226, p. 51-58, 2016.

EVALUATE ENERGY. 2018. Disponível em: <http://www.evaluateenergy.com/>. Acesso em: 20/03/2018.

GIBSON, R.; SCHWARTZ, E. S. Stochastic convenience yield and the pricing of oil contingent claims. **The Journal of Finance**, v. 45, n. 3, p. 959-976, 1990.

GOMES, M. **Variação histórica dos preços e das reservas de petróleo brasileiras e internacionais no período 1992 – 2011**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Administração) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, São Paulo, 2013.

HASSANZADEH, F.; NEMATI, H.; SUN, M. Robust optimization for interactive multiobjective programming with imprecise information applied to R&D project portfolio selection. **European Journal of Operational Research**, v. 238, n. 1, p. 41-53, 2014.

KONNO, H.; YAMAZAKI, H. Mean-absolute deviation portfolio optimization model and its applications to Tokyo stock market. **Management Science**, v. 37, n. 5, p. 519-531, 1991.

LIESIÖ, J.; MILD, P.; SALO, A. Preference programming for robust portfolio modeling and project selection. **European Journal of Operational Research**, v. 181, n. 3, p. 1488-1505, 2007.

LUCIA, J. J.; SCHWARTZ, E. S. Electricity Prices and Power Derivatives: evidence from the Nordic Power Exchange. **Review of Derivatives Research**, 5(1):5–50, 2001.

MAFFRA, S. A. R. S. **Risco e seleção de portfólios com a medida CVaR e o modelo GO-GARCH**. 2013. Monografia - Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada, Rio de Janeiro, RJ. 2013.

MANOLIU, M.; TOMPAIDIS, S. **Energy futures prices: Term structure models with Kalman filter estimation**. 2000. Working paper - University of Texas, Austin, TX. 2000.

MANSINI, R.; SPERANZA, M. G. An exact approach for portfolio selection with transaction costs and rounds. **IIE Transactions**, v. 37, n. 10, p. 919-929, 2005.

MARKOWITZ, H. Portfolio selection. **The Journal of Finance**, v. 7, n. 1, p. 77-91, 1952.

MARKOWITZ, H. **Portfolio selection: efficient diversification of investment**. New York: John Wiley & Sons, 1959.

MESKENDAHL, S. The influence of business strategy on project portfolio management and its success — A conceptual framework. **International Journal of Project Management**, v. 28, n. 8, p. 807-817, 2010.

MODICA, J. E.; RABECHINI JR, R. Priorização de um portfólio de projetos usando a metodologia AHP. In: **1º Simpósio Brasileiro de Ciência de Serviços**, Brasília, DF, 2010.

PADDOCH, J. L.; SIEGEL, D. R.; SMITH, J. L. Option valuation of claims on real assets: The case of offshore petroleum leases. **Quarterly Journal of Economics**, v. 103, n. 3, p.p. 479-508, August, 1988.

PINDYCK, R.S.; The long-run evolution of energy prices. **The Energy Journal**, 20,2 ABI/INFORM Global, 1999.

PMI - Project Management Institute. **Um guia do conjunto de conhecimentos em gerenciamento de projetos (Guia PMBoK)**. 2004. Project Management Institute Inc., 2004.

PRATES, D. M. **O regime de câmbio flutuante no Brasil: 1999 - 2012: especificidades e dilemas**, IPEA, Brasília, 2015.

QIN, Z. Random fuzzy mean-absolute deviation models for portfolio optimization problem with hybrid uncertainty. **Applied Soft Computing**, v. 56, p. 597-603, 2017.

RIBAS, G. **Planejamento operacional de refinarias de petróleo sob incerteza**. 2012. 96f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia Industrial, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ. 2012.

ROCKAFELLAR, R., T., URYASEV, S. Conditional value-at-risk for general loss distributions. **Journal of Banking & Finance** 26 1443–1471, 2002.

ROMAN, D.; MITRA, G. Portfolio selection models: a review and new directions. **Wilmott Journal**, v. 1, n. 2, p. 69-85, 2009.

ROSE, P. R. Risk behavior in petroleum exploration. The business of petroleum exploration: AAPG Treatise of Petroleum Geology. **Handbook of Petroleum Geology**, 95-104, 1992.

ROSS, J. G. Risk and uncertainty in portfolio characterisation. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 44, n. 1-2, p. 41-53, 2004.

SALLES, A. A.; CAMPANATE, A. B. M. Expectativas de preços do gás natural e os preços do petróleo no mercado internacional: um estudo empírico baseado em um modelo dinâmico. In: **XLIX SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Blumenau, SC: Sobrapo, 2017.

SCHWARTZ, E. S. The stochastic behavior of commodity prices: Implications for valuation and hedging. **The Journal of Finance**, v. 52, n. 3, p. 923-973, 1997.

SCHWARTZ, E. S.; SMITH, J. E. Short term-variations and long-term dynamics in commodity prices. **Management Science**, v. 46, n. 7, p. 893-911, 2000.

SEFAIR J. A.; MÉNDEZ, C. Y.; BABAT, O.; MEDAGLIA, A. L.; ZULUAGA, L. F. Linear solution schemes for mean-semivariance project portfolio selection problems: an application in the oil and gas industry. **Omega**, v. 68, p. 39-48, 2017.

SILVÉRIO, R. P. **O papel da esfera financeira no processo de determinação dos preços do petróleo no mercado internacional: uma análise de price discovery dos mercados brent e WTI no período 1990-2011**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2012.

SOUZA, D. G. B. D. **Proposição de um modelo matemático baseado em programação linear para priorização e seleção de portfólio de projetos**. 2016. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG. 2016.

STREET, A. On the Conditional Value-at-Risk probability-dependent utility function. **Theory and Decision**, v. 68, p. 49-68, 2010.

UHLENBECK, G. E.; ORNSTEIN, L. S. On the theory of the brownian motion. **Physical Review**, v. 36, p. 823-841, 1930.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 1ª ed. São Paulo: Atlas, 1997. 90p.

ZHANG, W.; HILL, A. V.; SCHROEDER, R. G.; LINDERMAN, K. W. Project management infrastructure: the key to operational performance improvement. **Operations Management Research**, v. 1, p. 40-52, 2008.