



Carolina de Castro Lopes

**Avaliação de uma refinaria de petróleo no Brasil sob
abordagem da Teoria de opções Reais**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Davi Michel Valladão

Co-orientadora: Profa. Frances Fischberg Blank

Rio de Janeiro

Setembro de 2018



Carolina de Castro Lopes

**Avaliação de uma refinaria de petróleo no Brasil sob
abordagem da Teoria de opções Reais.**

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

Prof. Davi Michel Valladão

Presidente e Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Profa. Frances Fischberg Blank

Co-Orientadora

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Antônio Márcio Tavares Thomé

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Marco Antônio Guimarães Dias

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador (a) Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de setembro de 2018.

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

Carolina de Castro Lopes

Graduou-se em Administração de empresas pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 2010. Iniciou suas atividades na Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) em abril de 2012, na área de planejamento da rede logística. Em janeiro de 2017 mudou-se para área de reestruturação de negócios de refino, transporte e comercialização, onde continua até a presente data.

Ficha Catalográfica

Lopes, Carolina de Castro

Avaliação de uma refinaria de petróleo no Brasil sob abordagem da Teoria de opções Reais / Carolina de Castro Lopes; orientador: Davi Michel Valladão; co-orientadora: Frances Fischberg Blank. – 2018.

78 f. ; 30 cm

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Análise de investimentos. 3. Teoria de opções reais. 4. Processos estocásticos. 5. Refinaria. 5. *Crack spread*. I. Valladão, Davi Michel. II. Blank, Frances Fischberg. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de

CDD: 658.5

Agradecimentos

À professora Frances, cuja sabedoria e humildade são fonte da minha grande admiração, pela orientação, pela paciência com que me guiou ao longo do desenvolvimento deste trabalho e por sua disponibilidade irrestrita.

Ao professor Aiube, que com todo seu conhecimento e disponibilidade para compartilhá-lo, contribuiu com o desenvolvimento deste trabalho em um dos momentos que encontrei maior dificuldade.

À minha querida família por todo o amor, pelo apoio incondicional nesta jornada e por sempre acreditar em mim e me incentivar a enfrentar desafios cada vez maiores.

Ao Bruno, por toda sua paciência ao me acompanhar nesta empreitada, pela compreensão e incentivo.

À Petrobras, uma empresa que incentiva o aperfeiçoamento contínuo de seus funcionários, por ter acreditado e patrocinado este projeto.

Aos gerentes Eric Futino e Arlindo Moreira, por terem sido os primeiros na Petrobras a acreditarem neste projeto e me ajudarem a batalhar por ele.

Aos meus amigos da PRN, por compreenderem minhas ausências no escritório, pelo incentivo e pelo compartilhamento de ideias e discussões que me apoiaram no desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Lopes, Carolina de Castro; Valladão, Davi Michel (Orientador); Blank, Frances Fischberg (Co-orientadora). **Avaliação de uma refinaria de petróleo no Brasil sob abordagem da Teoria de opções Reais**. Rio de Janeiro, 2018. 78p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo deste trabalho é avaliar o investimento em uma refinaria de petróleo no Brasil, país importador de derivados de petróleo, através da Teoria de Opções Reais, abordagem de grande valor prático e acadêmico, que realiza uma valoração mais justa da refinaria, ao incluir a modelagem das incertezas e incorporar flexibilidades gerenciais, negligenciadas pela análise tradicional. As incertezas, modeladas através de processos estocásticos, são o câmbio e o *crack spread*, adaptando-se o *crack spread* para o refino brasileiro. São avaliadas as opções de postergação, de parada temporária e sua interação. É apresentada a melhor decisão para o investimento remanescente no projeto e como ela seria alterada se o projeto ainda fosse ser iniciado. Para o investimento remanescente, a melhor decisão é postergar o projeto se a opção for perpétua e investir imediatamente se expirar em até 5 anos. Sensibilidades alterando volatilidade e taxa de conveniência apresentam recomendações diferentes, reduzindo a robustez dos resultados. Quando se considera o valor completo do investimento, a postergação é recomendada em todos os cenários analisados. A opção de parada temporária aumenta o valor da refinaria e reduz o valor da opção de postergação. O modelo desenvolvido permitiu aperfeiçoar a análise de investimento da refinaria em questão e pode ser replicado para análise de investimento em outras refinarias pertencentes à mesma empresa ou a outras. Para trabalhos futuros, recomenda-se calcular a opção de troca *input-output*, aperfeiçoar a modelagem do *crack spread* e incorporar o preço do gás como incerteza.

Palavras-chave

Análise de investimentos; teoria de opções reais; processos estocásticos; refinaria; crack spread.

Abstract

Lopes, Carolina de Castro; Valladão, Davi Michel (Advisor); Blank, Frances Fischberg (Co-advisor). **Valuation of a crude oil refinery in Brazil under a real options approach**. Rio de Janeiro, 2018. 78p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The main objective of this study is to provide an investment analysis of a crude oil refinery in Brazil, an oil products importer country, under the real option theory, an approach with great academic and practical use, allowing a fairer refinery valuation by modeling uncertainty and including managerial flexibility, neglected in traditional analysis. The uncertainties considered, described by stochastic process, are the exchange rate and the crack spread, adapting the crack spread to the Brazilian refining. The options to defer, to shut down and their interaction are analyzed. It is shown the best decision considering the remaining investment and how this decision would be changed if the project hadn't been started.

Considering the remaining investment, the best decision is to defer the investment if it is an infinitely-lived option and invest immediately if the right to invest expires upon 5 years. The influence of volatility e convenience yield was also taken into account and shows different recommendations, reducing the results robustness. When the full investment is analyzed, postponement is recommended in all analyzed scenarios. The shutdown option increases the refinery value and reduces the option to defer value. The developed model allowed an improvement in the investment analysis of this refinery and can be replicated to other refineries investment analysis, owned by the same company or not. For further works, we propose to include the switch input-output option, improve the crack spread modeling and consider the gas price as uncertainty.

Keywords

Investment analysis; real options theory; stochastic process; refinery, crack spread.

Sumário

1	Introdução	11
2	Referencial Teórico	15
2.1.	A indústria de refino	15
2.2.	Teoria de opções reais aplicada à indústria de refino	18
2.2.1.	Principais incertezas	20
2.2.2.	Principais flexibilidades	23
2.2.2.1.	Opção de postergação do investimento	26
2.2.2.2.	Opção de parada temporária	27
3	Metodologia	29
3.1.	Fluxo de caixa	29
3.2.	Incertezas associadas ao projeto	31
3.2.1.	<i>Crack spread</i>	31
3.2.2.	Câmbio	36
3.2.3.	Simulação de Monte Carlo	38
3.3.	Flexibilidades associadas ao projeto	39
3.3.1.	Opção de postergação	39
3.3.1.1.	Contingent Claims	39
3.3.1.2.	<i>Market Asset Disclaimer</i>	44
3.3.1.3.	Investimento estocástico	46
3.3.1.4.	Taxa de conveniência do projeto (δ) e taxa livre de risco (r)	47
3.3.2.	Opção de parada temporária	47
4	Resultados	50
4.1.	Contexto do caso em análise	50
4.1.1.	Descrição do processo e capacidade de produção	50
4.1.2.	Custos de Produção	51
4.2.	Valor do projeto sem flexibilidade	53
4.3.	Estimação dos processos estocásticos	54
4.3.1.	<i>Crack spread</i>	54
4.3.2.	Câmbio	58
4.4.	Valor da opção de postergação do investimento	59
4.5.	Valor da opção de parada temporária	64
4.6.	Análise de sensibilidade	66
4.6.1.	Opção de postergação do investimento	66
4.6.2.	Opção de parada temporária	70
5	Conclusão	72
6	Referências bibliográficas	75

Lista de Figuras

Figura 1 - Demanda de derivados de petróleo nos Estados Unidos (em milhões de barris por dia). Fonte: Ministério de Minas e Energia (2018)	17
Figura 2 - Demanda de derivados de petróleo no Brasil (em milhões de barris por dia). Fonte: Ministério de Minas e Energia (2018)	17
Figura 3 - Configuração de refino. Fonte Petrobras (2018)	50
Figura 4 - Produção de derivados da refinaria. Fonte Petrobras (2018)	51
Figura 5 - Comparação dos contratos negociados de crack 321 com a série calculada de crack 321	54
Figura 6 - Resultado da regressão de retornos do crack com <i>dummies</i>	55
Figura 7 - Resultado da regressão da série dessazonalizada	56
Figura 8 - Gráfico de dispersão dos retornos de X (série do crack spread dessazonalizada)	56
Figura 9 - Resultado do teste de razão da variância	57
Figura 10 - Regressão de retornos do câmbio	58
Figura 11 - Gráfico de dispersão dos retornos logaritmos do câmbio	59
Figura 12 - Distribuição de probabilidade dos valores do projeto	60
Figura 13 – Valor do gatilho para o caso do investimento incremental	62
Figura 14 – Valor do gatilho para o caso investimento completo	62
Figura 15 - Distribuição de probabilidade do Fluxo de Caixa Ótimo (em milhões de dólares)	65
Figura 16 - Impacto da taxa de conveniência no valor crítico do projeto (em milhões de dólares)	67
Figura 17 - Impacto da volatilidade no valor crítico do projeto (em milhões de dólares)	68
Figura 18 - Impacto da redução do investimento no valor crítico do projeto de uma nova refinaria (em milhões de dólares)	69

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Histórico de importações de produtos refinados (milhões de barris por ano)	22
Tabela 2 - Estimativa de parâmetros	57
Tabela 3 - Estimativa de parâmetros - câmbio	59
Tabela 4 - Valor da opção de espera (em milhões de dólares)	61
Tabela 5 - Resultado da opção de espera considerando o investimento estocástico (em milhões de dólares)	63
Tabela 6 - Impacto da taxa de conveniência no valor crítico do projeto (em milhões de dólares)	66
Tabela 7 - Impacto da volatilidade no valor crítico do projeto (em milhões de dólares)	68
Tabela 8 - Impacto da redução do investimento no valor crítico do projeto de uma nova refinaria (em milhões de dólares)	69
Tabela 9 - Impacto da alteração da correlação entre V e I	70
Tabela 10 - Valor da opção de parada temporária para diferentes custos de hibernação	71

Siglas

CN – Capacidade nominal

CPI – Consumer index price

EDO – Equação diferencial ordinária

EDP – Equação diferencial parcial

EIA – Energy information administration

FCL – Fluxo de caixa livre

FCD – Fluxo de caixa descontado

GLP – Gás liquefeito de petróleo

GNA – Gerador de números aleatórios

IPCA – Índice nacional de preços ao consumidor amplo

LAJIR – Lucro antes de juros e imposto de renda

MAB – Movimento aritmético browniano

MAD – Market asset disclaimer

MGB – Movimento geométrico browniano

MRM – Movimento de reversão à média

MTBE – Éter metil terbutílico

NYMEX - New York mercantile exchange

P&D – Pesquisa e desenvolvimento

QAV – Querosene de aviação

VPL – Valor presente líquido

Introdução

A indústria de refino é responsável por processar o petróleo e produzir os derivados de petróleo que são demandados pela sociedade. O petróleo bruto não possui nenhuma utilidade e é o processo de refino que transforma o petróleo em diversos produtos como diesel e gasolina, utilizados para o transporte rodoviário, querosene de aviação para o abastecimento de aeronaves, bunker para o abastecimento navios, gás de cozinha (gás liquefeito de petróleo), entre outros.

Uma refinaria está sujeita a diversas incertezas, mas a maior fonte de incerteza no seu fluxo de caixa é a diferença entre o custo do suprimento (preço do petróleo) e valor dos produtos finais considerando os rendimentos gerados dos diferentes derivados (como, por exemplo, diesel, gasolina, nafta e óleo combustível) dado pelo preço de cada um deles no mercado (Kemma, 1993; Población e Serna, 2016). Essa diferença é conhecida na indústria de refino como *crack spread*.

Dentre outras incertezas que afetam uma refinaria estão a demanda pelos derivados de petróleo produzidos por ela, bem como o risco cambial, uma vez que os preços de petróleo e derivados são definidos em mercados internacionais e com cotação em dólar.

A operação de uma refinaria é sujeita a diversas flexibilidades gerenciais. Uma flexibilidade gerencial pode ser definida como uma oportunidade de revisar as ações futuras, que dependem do desenvolvimento de um futuro incerto. A flexibilidade gerencial é um conjunto de opções reais, como por exemplo, postergar, abandonar, expandir, contratar ou trocar o uso do ativo para uma forma alternativa (Trigeorgis, 1993).

No contexto da indústria de refino, torna-se relevante, principalmente, as opções de espera, de parada temporária e de troca de uso do ativo. Mas, também podem ser avaliadas opções de abandono, expansão, entre outras.

A opção de espera é relevante para a análise de investimento de uma refinaria dado o alto valor de investimento associado a construção de uma nova refinaria e a incerteza futura de retorno do investimento, que depende dos preços

de petróleo e derivados. Conforme Dixit e Pindyck (1994), as incertezas associadas aos projetos de investimento precisam ser corretamente avaliadas antes da decisão de investir, dada sua irreversibilidade. A irreversibilidade do investimento pode levar a decisão de postergação com objetivo de obter informações adicionais sobre a rentabilidade do projeto.

A opção de parada temporária, acontece em alguns momentos, devido à oscilação no preço do petróleo e dos derivados, que pode levar a redução do *crack spread* e fazer com que a escolha ótima da refinaria seja interromper sua operação e, conseqüentemente, a oferta de derivados no mercado. Esta flexibilidade ganha importância para análise de empresas verticalmente integradas que possuem produção de petróleo e refino e sempre estão sujeitas a opção de exportar petróleo ou refiná-lo.

A flexibilidade relacionada à troca de uso do ativo trata da flexibilidade da entrada de insumos e saída de produtos produzidos (*input* e *output*). Existem diversos petróleos com características diferentes que podem ser processados em uma refinaria e que geram diferentes rendimentos de derivados, além de rotas de produção que podem ser exploradas para aumentar ou diminuir a produção de um determinado derivado. Isto acontece, dentro de certos limites definidos pelo *hardware* da refinaria. A depender do preço das diferentes correntes de petróleo e dos diferentes derivados produzidos, a refinaria tem a flexibilidade de escolher entre diferentes correntes de petróleo e diferentes rotas de produção

Todas estas flexibilidades e incertezas inerentes a uma refinaria precisam ser consideradas na avaliação de viabilidade do investimento e os métodos de fluxos de caixa descontados e seu principal indicador, o valor presente líquido (VPL), apesar de amplamente utilizados há muito tempo como critérios para a tomada de decisões de investimento, não valoram as flexibilidades implícitas nos projetos de investimento.

Já a teoria de opções reais trata da análise de investimento em condições de incerteza e enfatiza o valor das flexibilidades do projeto. Esta metodologia, inspirada na teoria das opções financeiras, é utilizada para avaliar ativos reais e não financeiros, considerando as ações ótimas sob incertezas, que são modeladas como processos estocásticos (Dias, 2015).

Este trabalho contribui com a disseminação da aplicação da teoria de opções reais em ativos de refino de petróleo no Brasil e apresenta uma modelagem do

crack spread adaptada para a realidade do refino brasileiro, ao invés da modelagem dos preços de petróleo e derivado isoladamente.

Enquanto existe ampla literatura sobre a modelagem de preços de petróleo e derivados isoladamente ou mesmo sobre o *spread* de dois produtos (Dias e Rocha 1999; Pindyck, 1999; Pindyck, 2001; Dias, 2004; Dempster *et al.* 2008; Azevedo *et al.*, 2015), não se encontram muitas aplicações para modelagem diretamente do *crack spread* de uma refinaria (Yi, 1997; Población e Serna, 2016;).

Neste contexto, pretende-se responder as seguintes perguntas de pesquisa: (i) como flexibilidades gerenciais podem ser incorporadas à análise do investimento de uma refinaria de petróleo no Brasil?; (ii) a melhor decisão de investimento para o projeto em análise, no Brasil, é realizar o investimento imediatamente ou postergá-lo?; e (iii) a opção de parada temporária aumenta o valor do projeto?

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade de implantação do projeto de uma refinaria de petróleo no Brasil, com base no projeto do COMPERJ (Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro), tratando as principais incertezas e flexibilidades associadas ao projeto, utilizando, para isto, a teoria de opções reais.

Considerando que o Brasil é um país importador de produtos refinados, a análise de implantação de uma nova refinaria ganha importância, mas existem incertezas associadas ao *crack spread* e ao câmbio que tornam relevante a análise da opção de postergação do investimento. Além disso, a análise da opção de parada temporária é também relevante, dado que a refinaria pertence a uma empresa com uma operação verticalizada que, além de refinarias, possui campos de produção de petróleo e atua como exportadora de petróleo.

O projeto da refinaria encontra-se 85% concluído. Por isso, para as análises realizadas neste trabalho, considera-se sempre um caso com o investimento incremental para finalizar o projeto e outro com o valor total do investimento necessário para uma nova refinaria, com o objetivo de avaliar se a decisão de investimento seria alterada caso o projeto ainda não tivesse sido iniciado.

Desta forma, este trabalho pretende proporcionar uma visão prática da aplicação da teoria de opções reais na indústria de refino através da análise de viabilidade da implantação do projeto de uma refinaria de petróleo no Brasil em um ambiente de variação do *crack spread* e do câmbio, avaliando as opções de postergação do projeto e parada temporária da refinaria. Considerando a

modelagem de duas variáveis de incerteza, o uso da simulação de Monte Carlo facilita o tratamento do fluxo de caixa e possibilita a avaliação das opções propostas.

O capítulo 2 apresenta conceitos e informações sobre a indústria de refino, relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, bem como a revisão bibliográfica de aplicações da teoria de opções reais nesta indústria.

O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada para a modelagem das variáveis estocásticas e das opções de espera e parada temporária.

No capítulo 4 são apresentados os resultados da estimação dos processos estocásticos e o valor do projeto sem flexibilidade, comparando com o valor das opções de espera e parada temporária.

Por fim, o capítulo 5 traz as conclusões do estudo e as sugestões de trabalhos futuros.

2

Referencial Teórico

2.1

A indústria de refino

A indústria de refino contribui em diversos aspectos para diferentes setores da economia e da sociedade. Através do refino de petróleo, são produzidos os combustíveis necessários para aeronaves, carros, navios, locomotivas, maquinário agrícola e industrial, gás de cozinha, matéria-prima para indústria petroquímica, entre outros.

Uma refinaria de petróleo é um conjunto de unidades que processam petróleo e produzem uma cesta de derivados como gás liquefeito de petróleo, gasolina, querosene de aviação, diesel e óleo combustível (Imai e Nakajima, 2000; Clews, 2006). A transformação de petróleo em derivados é complexa, utilizando diversos processos químicos e físicos. Estes processos são integrados, formando um sistema industrial que também inclui armazenagem (petróleo, produtos em processo e produtos acabados) e utilidades (geração de energia, tratamento de água, entre outros), processos de tratamento ambiental e infraestrutura para recebimento de petróleo e escoamento de derivados (Clews, 2006).

O negócio de refino apresenta lucro a partir da margem bruta dos derivados sobre o petróleo que é processado, ou seja, através da diferença entre o preço de venda dos derivados e de compra do petróleo. Isso faz com que os refinadores direcionem sua atenção para a diferença entre estes preços, mais do que com o nível de preços em si (Yi, 1997; Clews, 2006). Segundo Kemma (1993), a maior fonte de incerteza no fluxo de caixa de uma refinaria é, de fato, a diferença entre o custo do suprimento (preço do petróleo) e valor dos produtos finais. Esta diferença de preços é comumente chamada na indústria de refino de *crack spread*. O *crack spread* representa, portanto, a margem bruta da refinaria, de modo que a rentabilidade da refinaria está diretamente ligada a este *spread* de preços. Enquanto outros custos podem ser mais facilmente previstos, os preços de

mercados do petróleo e dos derivados são incertos e sofrem constantes variações (Imai e Nakajima, 2000).

Uma refinaria conta com vários processos, sendo os principais (Clews, 2006):

(i) separação, no qual é realizada a separação física das diferentes frações de substâncias que compõem o petróleo, explorando os diferentes pontos de ebulição destas diferentes frações; (ii) conversão, que envolve a quebra das moléculas mais longas em cadeias menores, de maior valor comercial, normalmente utilizando processos químicos; e (iii) tratamento, cujos processos são utilizados para extração de contaminantes, como enxofre, nitrogênio e metais pesados.

O arranjo das várias unidades de processamento, que em conjunto formam uma refinaria, é conhecido como configuração de refino. A configuração determina o tipo de petróleo que ela pode processar e quais derivados ela vai produzir. Logo, a configuração de refino possui grande influência sobre a rentabilidade da refinaria e alterá-la envolve significativos investimentos, já que demanda investimento em novas unidades de processamento. A configuração de refino requerida para uma refinaria é direcionada pela qualidade do petróleo que é processado e pelas especificações e volumes requeridos pelo mercado para os derivados produzidos. Cada refinaria é particular e diferente das demais.

Apesar de a configuração ser particular para cada refinaria, existe uma medida que representa uma configuração típica de refino, dada pelo chamado *crack* 3:2:1. A razão 3:2:1 se refere à proporção dos derivados produzidos a partir do petróleo e significa que a partir do processamento de 3 barris de petróleo são produzidos, 2 barris de gasolina e 1 de diesel (O'Driscoll, 2016). O *crack spread* representa a margem bruta da refinaria e o petróleo responde por aproximadamente 85% dos custos operacionais de refino, enquanto a venda de diesel e gasolina representa cerca de 80% da receita total (Yi, 1997).

Contratos futuros de *crack spread* 3:2:1 para diferentes vencimentos são negociados na *New York Mercantile Exchange* (NYMEX). Além do *crack* 3:2:1, ainda existem contratos de *crack* 1:1:1 e 5:3:2, mas o mais negociado é o contrato do *crack* 3:2:1. Os contratos futuros de *crack* são utilizados para operação de *hedge* de refinarias. O *hedge* pode ser feito pelos refinadores operando na posição comprada (*long*) em petróleo e vendida (*short*) nos diferentes derivados, mas, ao

invés de operar com contratos de produtos diferentes, o gerenciamento do risco normalmente é feito através dos contratos de *crack*.

No mercado americano, o *crack* 3:2:1 é calculado considerando que 3 barris de petróleo produzem 2 barris de gasolina e 1 de diesel. Essa proporção é definida em virtude da configuração do refino americano. A configuração de refino é determinada de acordo com os derivados demandados pelo mercado. Como no mercado americano a demanda de gasolina é maior do que a de diesel, conforme pode ser visto Figura 1, a configuração de refino americano está adequada para produzir mais gasolina do que diesel.

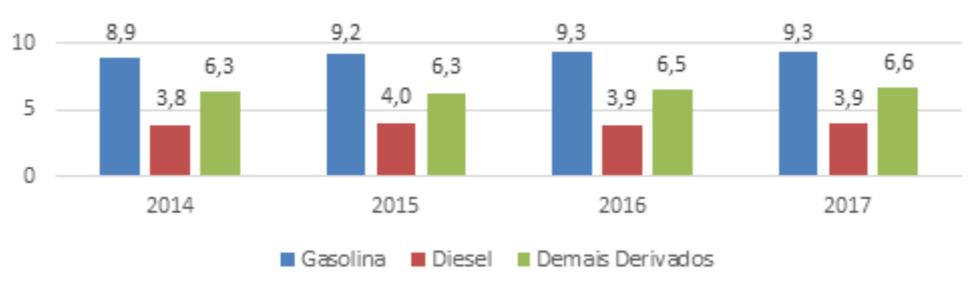


Figura 1 - Demanda de derivados de petróleo nos Estados Unidos (em milhões de barris por dia).

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2018).

No Brasil, a demanda de diesel é maior do que a de gasolina, conforme Figura 2, por isso o refino brasileiro possui uma configuração adequada para produzir mais diesel do que gasolina. Para uma maior adequação à configuração de refino no Brasil, uma adequação do *crack* 3:2:1 seria considerar que três barris de petróleo produzem 2 barris de diesel e 1 de gasolina.

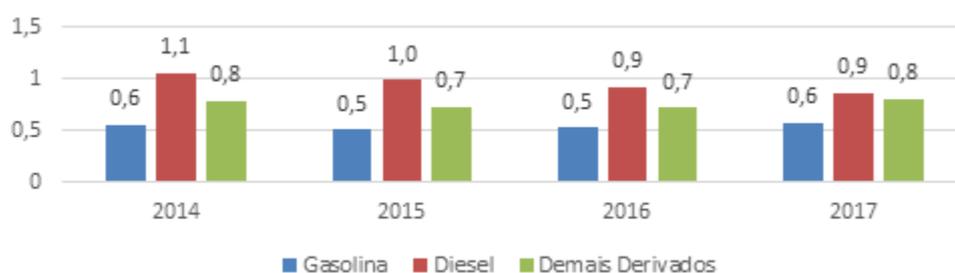


Figura 2 - Demanda de derivados de petróleo no Brasil (em milhões de barris por dia). Fonte:

Ministério de Minas e Energia (2018).

2.2

Teoria de opções reais aplicada à indústria de refino

O desenvolvimento da teoria de opções financeiras teve uma importante influência sobre como os projetos de investimento são avaliados, contribuindo para o desenvolvimento de abordagens mais recentes do que a análise tradicional através do fluxo de caixa descontado (FCD). Os conceitos que embasam a Teoria das Opções Reais têm sua origem no próprio estudo de opções financeiras, que ganha destaque a partir do modelo de Black e Scholes (1973).

O método tradicional do FCD não considera o grau de liberdade existente nas decisões gerenciais e sua interação com a incerteza. Como observa Minardi (2000), a Teoria das Opções Reais promove a integração entre finanças e estratégia de negócios, preenchendo lacunas deixadas pela teoria tradicional.

Opções estão embutidas por natureza nos projetos de investimento, podendo ser associadas a flexibilidades gerenciais. São chamadas de opções reais e existem em qualquer investimento sobre os quais os gerentes têm a possibilidade de tomar decisões. Sob a abordagem de opções reais, é possível determinar o valor que uma equipe gerencial ativa pode criar quando responde de maneira dinâmica a um ambiente em transformação. Os riscos são explicitamente modelados e é possível distinguir os cenários favoráveis dos não favoráveis e considerar a ação ótima em cada cenário distinto (Titman e Martin, 2010; Dias, 2015).

A aplicação da análise pela Teoria de Opções Reais na área de petróleo e para projetos que envolvam *commodities* em geral é bastante difundida. Preços de mercados do petróleo e dos seus derivados são incertos e sofrem constantes variações, de modo que uma abordagem de opções reais que considera o valor das flexibilidades de gestão é uma escolha melhor para avaliar as refinarias, que precisam revisar as decisões futuras para atender às condições inesperadas do mercado futuro (Yi, 1997).

Segundo Dixit e Pindyck (1994), a regra tradicional de FCD compara erroneamente a situação de investir hoje com a situação de nunca investir, além de assumir um cenário fixo nos seus cálculos. Os autores mostram que a aplicação da regra de valor presente líquido (VPL) leva a errada rejeição de projetos que criam novas oportunidades de investimento, como projetos de teste de mercado e de pesquisa e desenvolvimento. Segundo os autores, as principais características da

decisão de investimento são irreversibilidade, momento ótimo de investir e incertezas.

A irreversibilidade trata do comprometimento de recursos que é, em geral, irreversível, podendo ser total ou parcial. A irreversibilidade valoriza a espera antes de realizar algo irreversível, uma vez que a espera é reversível. No caso da indústria de refino, investimentos em novas refinarias normalmente estão associados elevados dispêndios de capital e investimentos em expansão de capacidade são altamente integrados à planta já existente. Além disso, Dunne e Mu (2010) observam que investimentos em ampliação de capacidade de refino não são frequentes e destacam que este tipo de comportamento é compatível com a importância da irreversibilidade do investimento nesta indústria.

O momento ótimo de investir discute um ponto importante que é o fato de raramente as oportunidades de investimentos serem do tipo “agora ou nunca”, como assume normalmente a análise por FCD. Frequentemente as opções reais são perpétuas (não expiram), mas em outros casos pode existir um tempo legal de expiração da opção, como o caso de patentes no Brasil que duram 20 anos antes de caírem em domínio público. No caso da indústria de refino, o mais comum é que não haja um tempo para expiração da opção de realizar o investimento, mas é possível encontrar, especialmente no Brasil, incentivos fiscais e tributários concedidos à instalação de um novo projeto que sejam válidos até uma data determinada.

Por fim, as incertezas associadas aos projetos podem ser: econômicas ou de mercado, técnicas ou privadas e econômicas. As incertezas econômicas ou de mercado são exógenas ao projeto e correlacionadas aos movimentos gerais da economia, já que os mercados recebem constantemente novas informações que fazer oscilar, por exemplo, preços de *commodities* e variáveis macroeconômicas. As incertezas técnicas ou privadas, que são específicas e endógenas ao projeto, normalmente, não são correlacionadas aos movimentos do mercado. Já as incertezas estratégicas, são relacionadas ao comportamento ou preferência de outros agentes que interagem num ambiente econômico.

2.2.1

Principais incertezas

No caso da indústria de refino, as incertezas econômicas ou de mercado se destacam e são dadas, por exemplo, por preços de *commodities* e variáveis macroeconômicas. Neste contexto, Dunne e Mu (2010) estudam qual o efeito da incerteza na decisão de investimento das refinarias nos Estados Unidos, analisando como a decisão de investir em expansão de capacidade de refino se relaciona com a volatilidade do *crack spread*, que é considerada a incerteza à que estão expostos os refinadores no momento de tomar decisões de investimento. Os autores concluem que quando a incerteza associada à margem de refino aumenta, os refinadores postergam suas decisões de investimento, corroborando a importância da irreversibilidade e da incerteza como peças fundamentais na análise de investimento nesta indústria.

O *crack spread* se destaca como a principal incerteza modelada na análise de fluxo de caixa de refinarias. Alguns autores modelam diretamente o *spread* entre os preços (Kemma, 1993; Yi, 1997), enquanto outros trabalham a modelagem dos preços separadamente (Imai e Nakajima, 2000).

O valor do *crack spread*, assim como de outras *commodities*, é regido por mecanismos de mercado, ou seja, mecanismos de oferta e demanda. Em momentos em que os preços estão elevados os produtores de *commodities* irão aumentar a oferta, de modo que este aumento na oferta irá reduzir o preço. Já em momentos em que o preço está baixo os produtores irão restringir a oferta e a escassez do produto provocará elevação do preço. Este comportamento é característico do processo de reversão à média (MRM) (Aiube, 2013).

O processo de reversão a média acontece quando os preços oscilam, mas em torno de um nível de equilíbrio, ou seja, se os preços estiverem elevados em relação ao nível de equilíbrio, tenderão a cair, enquanto tenderão a subir se estiverem abaixo do nível de equilíbrio. Nos movimentos de reversão à média, além do componente estocástico, existe um componente de tendência, cujo sentido e intensidade variam com o tempo, pois dependem do nível atual de preços (Dias, 2015).

Segundo Aiube (2013), os preços das *commodities*, em geral, exibem a propriedade de reversão à média de longo prazo, sendo este um fato bem estabelecido na literatura de finanças.

Este comportamento é mais evidenciado em algumas *commodities* do que em outras, por exemplo, séries de preços de *commodities* agrícolas geralmente exibem de forma bastante clara o comportamento de reversão à média (Dias 2015). Já o preço do petróleo, apesar de estar exposto a condições de mercado de oferta e demanda, apresenta baixa velocidade de reversão, conforme observado por Pindyck (1999) após estudar mais de cem anos de preços de fontes de energia, entre elas o petróleo.

Tanto o *spread* dos preços como os preços dos derivados de petróleo são usualmente modelados como movimento de reversão à média (Yi, 1997; Costa e Samanez 2009; Vianello e Teixeira, 2012; O’Driscoll, 2016) com exceção de Imai e Nakajima (2000) que modelam como movimento geométrico browniano (MGB).

Dempster *et al.* (2008) apresentam uma discussão sobre a modelagem de *spreads* de preço, a partir de um caso prático do diesel em relação ao petróleo. Os autores concluem que a modelagem do *spread* é mais adequada do que a modelagem dos preços individuais, porque o comportamento do *spread* é diferente do comportamento dos preços individuais e a modelagem diretamente do *spread* apresenta, pelo menos, duas vantagens: elimina a necessidade de modelar a correlação entre as variáveis e captura o equilíbrio de longo prazo entre as variáveis. Os autores ainda apresentam que o *spread* deve ser modelado como um movimento de reversão à média. É interessante pontuar que Población e Serna (2016) testam a aderência do *crack spread* ao MGB e não conseguem rejeitá-lo.

Población e Serna (2016) e Dempster *et al.* (2008) ao modelarem *spread* entre preço de petróleo e derivados tratam a sazonalidade da série, porque o diesel e a gasolina possuem demanda sazonal, o que influencia o comportamento dos preços destas *commodities*. Enquanto a gasolina é mais consumida no verão, o diesel é mais consumido no inverno. O verão é o período de férias no mercado americano, quando as famílias viajam, aumentando o consumo de gasolina. Já o diesel é mais consumido no inverno, devido à necessidade de diesel para aquecimento interno.

Os autores utilizam funções trigonométricas para incluir a sazonalidade no modelo, mas uma abordagem alternativa é a utilização de variáveis *dummies*, em que a partir de um modelo de regressão linear obtém-se a série dessazonalizada, que é o próprio resíduo da regressão (Gujarati e Porter 2011). A série dessazonalizada deve ser modelada conforme processo estocástico adequado e a escolha do processo estocástico depende tanto de considerações estatísticas quanto teóricas (Dixit e Pindyck, 1994; Dias, 2015).

Para indústrias com características similares, como a indústria petroquímica e refinarias de biocombustíveis, além da incerteza associada aos preços, alguns trabalhos propõem a modelagem de incerteza associadas a demanda, mais especificamente o tamanho do mercado (Sharma *et al.*, 2013; Vianello e Teixeira, 2012) e ao valor do investimento (Vianello e Teixeira, 2012; Vianello *et al.* 2014).

Vianello e Teixeira (2012) avaliam o fornecimento de petróleo e seus derivados como insumo para geração de produtos petroquímicos, de modo que a demanda considerada como incerta é a de produtos petroquímicos e não de derivados de petróleo. Já Sharma *et al.* (2013) avaliam uma refinaria de biomassa nos Estados Unidos que produz etanol e a incerteza modelada é a demanda de etanol.

No caso deste trabalho, a incerteza de demanda se torna menos relevante porque o Brasil é um país importador de derivados e a refinaria em análise tem capacidade de substituir importações. A Tabela 1 apresenta o histórico de importações do Brasil dos últimos 5 anos, em milhões de barris por ano:

Tabela 1 - Histórico de importações de produtos refinados (milhões de barris por ano).

Produtos	Anos				
	2013	2014	2015	2016	2017
Diesel	62	68	43	47	78
Gasolina	16	12	12	14	25
Nafta	44	43	44	55	65
GLP	11	13	11	14	21
QAV	12	9	9	8	3
Total	145	146	118	137	193

Fonte: Agência Nacional de Petróleo (2018).

Em 2015, houve o menor nível de importação dos últimos 5 anos, sendo de 118 milhões de barris, enquanto a capacidade de produção da refinaria em análise é de 60 milhões de barris. Logo, mesmo com a entrada em operação desta nova planta, o país permanecerá importador de derivados de petróleo.

Diante do exposto, é imprescindível considerar a incerteza associada aos preços, já que, como citado acima, todos os trabalhos encontrados sobre incertezas associadas ao refino, apontam o *spread* entre preços de petróleo e derivados como a principal incerteza associada a uma refinaria. À luz dos argumentos apresentados por Dempster *et. al* (2008), descritos neste capítulo, este trabalho irá modelar diretamente o *spread* entre os preços. Por se tratar de uma refinaria de petróleo no Brasil, será feita uma adequação no cálculo do *crack spread* de modo a torná-lo mais aderente à realidade do refino no Brasil. Uma vez que os preços de petróleo e derivados são formados em mercados internacionais, sendo o principal deles a NYMEX, para análise de um projeto no Brasil a incerteza associada ao câmbio também se torna relevante e será incluída neste trabalho. Mais detalhes sobre a modelagem destas incertezas são apresentados na subseção 2.2..

2.2.2

Principais flexibilidades

Segundo Titman e Martin (2010), as opções reais explicitam a possibilidade de os responsáveis pelo projeto tomarem decisões ao longo da vida útil do projeto, associadas a diferentes momentos do projeto. Dentre as principais, incluem-se a opção de investir gradualmente (em estágios), a opção do momento de realização do investimento (ou postergação), a opção de parada temporária ou abandono e opção de troca de entrada ou saída, conhecida como *switch input - output*. Na indústria de refino, é comum a avaliação de opções de *switch input - output* e opções de parada temporária.

Imai e Nakajima (2000) avaliaram uma opção de *switch input - output*, analisando o valor que é gerado pela flexibilidade de produção decorrente da inclusão de quatro novas unidades no projeto da refinaria. Estas unidades geram quatro derivados (GLP, gasolina, alquilado e MTBE) em diferentes proporções, dependendo da forma como são operadas, sendo possíveis cinco rotas diferentes de produção. Assim, de acordo com variações no preço de mercado, seria possível

decidir pela produção do produto com maior valor de mercado no momento. Imai e Nakajima (2000) não avaliam o projeto inteiro da refinaria, mas sim de um subprojeto referente ao complexo de craqueamento da refinaria.

Ainda considerando opções de *input-output*, Fonseca (2008) também avalia a implantação de um subconjunto de unidades no Brasil que realiza a separação do propano, transformando-o em propeno. O autor avalia a opção de postergação da implantação da unidade e as incertezas consideradas são o preço da matéria prima (propano) e do produto final (propeno).

Costa e Samanez (2009) também avaliam a flexibilidade de *input - output* no projeto de uma planta de processamento que utiliza a tecnologia *Gas-to-Liquid* (GTL), sendo esta uma alternativa ao refino para a produção de derivados. No trabalho, são consideradas duas entradas, ou *inputs* (gás natural ou petróleo), e quatro rotas de produção, que geram diferentes frações das saídas, ou *outputs* (GLP, nafta, diesel e parafina). Os autores consideraram a flexibilidade no plano estratégico, a fim de maximizar o *payoff* a cada trimestre. É apresentado o VPL considerando diversas possibilidades (combinações dos insumos com as rotas de produção) e, em cada trimestre, durante a vida útil do projeto, utilizando o *mix* de entradas e saídas que maximizaria o *payoff*.

O'Driscoll (2016) desenvolve um modelo para avaliar as diversas opções incluídas nas decisões de produção de uma refinaria, que tratam de qual o nível ótimo de processamento de petróleo e qual o *mix* ideal de derivados deve ser produzido, ou seja, o *mix* de *output* da refinaria. Dentro de determinados limites, a refinaria consegue deslocar sua produção para derivados que estejam mais bem precificados no mercado. Por exemplo, se o preço do querosene de aviação aumenta, dentro de determinados limites, a refinaria consegue reduzir parte da produção de outros derivados e aumentar a produção de querosene de aviação. O volume de petróleo que vai ser processado é outra decisão que carrega variável de decisão dentro da refinaria, porque, dependendo do *mix* de derivados produzidos, pode valer a pena processar o petróleo e produzir derivados ou pode ser mais rentável exportar o petróleo diretamente. Esta é a mesma proposta da abordagem de Imai e Nakajima (2000), mas ampliada para toda a refinaria e não para apenas um processo ou conjunto específico de unidades. O autor desenvolve um modelo de programação dinâmica multi-periodo para definir o planejamento de produção da refinaria, em que são incluídas todas as unidades de produção, restrições e

fluxos na refinaria em análise. A função objetivo do modelo é maximizar lucro, considerando como variáveis de incerteza o preço dos derivados e do petróleo. O autor propõe a modelagem do preço de cada um dos derivados e do petróleo isoladamente, ao invés de modelar diretamente o *crack spread*. Isso cria uma dificuldade associada ao tratamento da correlação entre os preços, principalmente porque são modelados preços de sete produtos diferentes. Os preços são modelados utilizando o processo estocástico de reversão à média.

Yi (1997) e Vianello e Teixeira (2012) propõem no contexto de refinarias a análise de uma opção de parada temporária. Yi (1997) avalia, através de um modelo de programação dinâmica, o valor de uma refinaria acrescentando a flexibilidade de parada temporária. Segundo o autor não considerar essa alternativa caracteriza uma estratégia ingênua de produção. O autor considera a existência de dois estados, um de operação e outro de parada, bem como os custos associados para a mudança de um estado para o outro.

Vianello e Teixeira (2012) valoram opções reais híbridas em um projeto modularizado, que trata da implantação de cinco unidades independentes de produção de produtos petroquímicos. A teoria de opções reais foi utilizada para analisar a parada temporária das unidades, a opções de adiar o investimento por cinco anos e a interação entre estas duas opções.

Outros trabalhos envolvem opções como de abandono e postergação do investimento.

Kemna (1993) avalia uma opção de abandono para uma torre de destilação de petróleo em uma refinaria nos Estados Unidos, considerando que, no período avaliado, a capacidade de produção de derivados de petróleo estava excedendo a demanda, gerando excesso de derivados no mercado e exercendo pressão sobre o preço dos derivados. Com a redução do preço dos derivados, a unidades com alto custo de operação começam a parar a produção e permanecem apenas as mais eficientes.

Sharma *et al.* (2013) avaliam a implantação do projeto de uma refinaria de biomassa analisando as opções de postergação, de investimento em P&D, a flexibilidade *input – output* e a opção de expansão, sendo as principais incertezas a demanda dos derivados produzidos pela refinaria e o preço do petróleo.

É interessante notar que, usualmente, os autores que trabalham com opções *switch input - output* modelam isoladamente cada um dos preços, enquanto os

autores que trabalham com opções de parada temporária optam por modelar diretamente o *spread* entre os preços.

Assim como Vianello e Teixeira (2012), este trabalho irá modelar a opção de postergação do investimento e, além disto, também será feita análise da opção de parada temporária, que também foi explorada por estes autores, além de Yi (1997). A modelagem destas opções está descrita na subseção 2.3..

Enquanto Vianello e Teixeira (2012), avaliam a opção de postergação do investimento e de parada temporária de uma planta petroquímica, este trabalho avalia esta opção de uma refinaria de petróleo. Para a opção de parada temporária Yi (1997) avalia uma refinaria de petróleo nos Estados Unidos, enquanto este trabalho avalia uma refinaria de petróleo no Brasil.

2.2.2.1

Opção de postergação do investimento

A habilidade de postergar um investimento irreversível pode alterar profundamente a decisão de investir. A empresa que tem uma oportunidade de investimento possui uma opção, análoga a uma opção de compra: é um direito, mas não uma obrigação de adquirir um determinado ativo em algum momento do futuro, conforme sua escolha. Quando a empresa faz o investimento ela extermine a opção de investir (Dixit e Pindyck, 1994).

Para a implantação de uma nova refinaria, pode-se considerar que investimento inicial (I), é conhecido, mas o fluxo de caixa decorrente deste investimento está sujeito às incertezas do valor do *crack spread* e do câmbio. A decisão de investimento pode ser sempre postergada se esta opção tiver valor.

De acordo com Dias (2014), a possibilidade de adiar uma decisão de investimento, permite que os tomadores de decisão tenham tempo para examinar o desenrolar dos futuros acontecimentos e dá a chance de evitar erros de custo elevado, caso ocorram cenários desfavoráveis. Por outro lado, caso os eventos futuros caminhem para um cenário mais favorável, a espera terá permitido realizar o projeto em condições mais vantajosas, com uma maior rentabilidade.

Considerando que o valor do projeto V é estocástico, é possível determinado um valor crítico, V^* , a partir do qual se torna ótimo realizar o investimento (Dixit e Pindyck, 1994).

2.2.2.2

Opção de parada temporária

A operação de uma refinaria envolve diversas flexibilidades, entre elas a opção de parada temporária, que significa interromper por um determinado período de tempo a operação da refinaria. Sendo uma empresa integrada de produção de petróleo e refino, exercer esta opção significa exportar o petróleo ao invés de refiná-lo.

A decisão de interromper a operação da planta acontece quando o valor da margem bruta, calculada a partir do *crack spread* é menor do que os custos variáveis.

McDonald e Siegel (1985) tratam da opção de parada temporária de uma planta genérica como similar a uma opção de compra. Utilizando o conceito desenvolvido pelos autores e aplicando-o para o caso da refinaria depreende-se que possuir a refinaria provê o direito de capturar o valor de venda dos derivados, descontados os custos de produção. No mercado financeiro, a opção de compra não será exercida se no vencimento o preço de exercício da opção for maior do que o preço da ação. De maneira análoga, o refinador pode evitar perdas se os custos de produção forem maiores do que a receita, realizando a parada temporária da planta.

Assumindo a flexibilidade gerencial de interromper a operação da planta para evitar o risco de obter um fluxo de caixa negativo, o valor da refinaria é a combinação entre o valor de seu fluxo de caixa descontado e o valor da flexibilidade associado ao valor ação gerencial da parada temporária (Yi, 1997).

Para haver valor associado à opção de parada temporária, as receitas ou os custos variáveis precisam ser incertos, ou já se saberia, antecipadamente quando operar a planta. Neste trabalho, o *crack spread* e o câmbio seguem processos estocásticos, conforme apresentado no item 2.2.

Kulatilaka e Trigeorgis (1994) pontuam que a maioria das opções reais podem ser valoradas como casos especiais de um modelo de *switching flexibility*, sendo os modos de operação definidos de maneira mais ampla, como variáveis de decisão. Segundo os autores, a opção de parada temporária representa a troca entre o modo de operação e modo de não operação, incluindo custos associados a parada e ao retorno da operação. Se não houver custo de troca entre os modos de

operação, então a empresa opera sempre que o resultado for positivo e o valor seria a soma de opções de compra para pagar o custo variável e adquirir o resultado positivo em cada ano, como desenvolvido por McDonald e Siegel (1985).

O valor do projeto com a flexibilidade precisa ser determinado simultaneamente com a escolha do modo ótimo de operação (Kulatilaka e Trigeorgis, 1994). A existência de um custo associado à mudança entre o modo de operação e o modo de parada reduz o valor que pode ser gerado pela flexibilidade associada a opção de parada temporária.

Segundo Minardi (2000), uma das vantagens da teoria de opções consiste em, estabelecendo uma política ótima operacional, conscientizar a empresa sobre qual seria o melhor momento de agir, por exemplo, fechar temporariamente para reabrir mais tarde, tornando a gerência da empresa mais perto da ótima. Yi (1997) define o fluxo de caixa de operação, sem considerar a flexibilidade de parada temporária, como uma estratégia ingênua de produção, uma vez que não incorpora nenhuma flexibilidade gerencial.

3

Metodologia

3.1

Fluxo de caixa

As projeções de fluxo de caixa são utilizadas para tomar decisões sobre investimentos, que conforme Dixit e Pindyck (1994), pode ser definido como o ato de se incorrer um custo imediato na expectativa de retornos futuros. As decisões sobre investimento são expressas na forma de aceitação ou rejeição de um projeto.

Para o cálculo do fluxo, calcula-se a receita, que no caso da refinaria é obtida partir da capacidade nominal (CN) por dia, ajustada por um fator de utilização (FUT) que reflete perdas naturais do processo. O volume produzido é multiplicado pelo *crack spread* unitário, em dólar por barril. A receita é então calculada para uma periodicidade anual e definida conforme equação (1):

$$Receita_t = CN_d \times FUT \times crack\ spread_t \times 365 \quad (1)$$

onde

CN_d = capacidade nominal diária

t = ano da receita

FUT = fator de utilização

A partir da receita são subtraídos os custos de gás natural (C_{gn}) e transporte marítimo (C_{tm}), que também são realizados em dólar. Os custos de operação da refinaria (C_{or}) e os custos associados à operação de dutos e terminais (C_{dt}) são incorridos em moeda doméstica. Logo, estes custos são convertidos para dólar, a partir do valor do câmbio para cada ano. Por fim, faz-se a apuração da depreciação (d).

Depois de subtraídos todos os custos incorridos, chega-se ao lucro operacional que será tributado, ou lucro antes de juros e imposto de renda (LAJIR):

$$LAJIR_t = Receita_t - C_{gn_t} - C_{tm_t} - [(C_{or} + C_{dt}) * câmbio_t] - d_t \quad (2)$$

onde

t = ano do *LAJIR*

Para o cálculo do fluxo de caixa livre (FCL), deve ser feita a reversão do valor da depreciação, uma vez que não representa uma saída de caixa, bem como a subtração do valor do investimento no ano correspondente (I_t):

$$FCL_t = LAJIR * (1 - ir) + d_t - I_t \quad (3)$$

onde:

ir = alíquota de tributação

t = ano do fluxo de caixa livre

A partir do fluxo de caixa livre calcula-se o VPL do projeto, conforme equação (4):

$$VPL = \sum_{t=1}^{25} \frac{FCL_t}{(1 + \mu)^t} \quad (4)$$

onde

t = ano do fluxo de caixa

μ = taxa de juros ajustada ao risco do projeto

Alternativamente é possível calcular o VPL através da medida neutra ao risco, inserindo o risco no fluxo de caixa livre e utilizando a taxa livre de risco para descontar o fluxo de caixa e calcular o VPL.

3.2

Incertezas associadas ao projeto

3.2.1

Crack spread

Como principal incerteza do projeto em análise, é proposta a modelagem do *crack* 321, ajustado para o mercado brasileiro.

O petróleo e seus derivados são *commodities* com referências de preço estabelecidos em mercados internacionais. Para o Brasil, o principal mercado de referência é o mercado americano. Desta forma, foram levantados dados de preço de petróleo, diesel e gasolina de contratos negociados na NYMEX.

A base de dados conta com dados diários de 03/10/2005 até 28/02/2018. Foram utilizados os seguintes contratos, com vencimento em um mês: *Cushing, OK Crude Oil, New York Harbor Regular Gasoline, New York Harbor Reformulated RBOB Regular Gasoline, New York Harbor No. 2 Heating*. Os dados foram extraídos dos preços negociados na NYMEX (Energy Information Administration, 2018) e atualizados para a mesma data a partir do *Consumer Price Index* (CPI) (Bureau of Labor Statistics, 2018).

Primeiro foi feito o cálculo do crack 321, conforme definido para o mercado americano, com 3 barris de petróleo produzindo 2 de gasolina e 1 de diesel, conforme equação (5):

$$\text{crack } 321 = \frac{2g + 1d - 3p}{3} \quad (5)$$

onde:

g = preço da gasolina

d = preço do diesel

p = preço do petróleo

A série calculada a partir da equação (5) foi comparada com série de contratos de *crack* 321, com vencimentos em um mês, negociados na NYMEX para avaliar se as séries se comportam de maneira semelhante, para que seja

possível utilizar a série calculada, que permite o ajuste para o mercado brasileiro, conforme equação (6):

$$crack\ 321\ ajustado = \frac{1g + 2d - 3p}{3} \quad (6)$$

O ajuste sazonal da série deve ser feito antes do cálculo dos parâmetros do modelo e para capturar a sazonalidade, adotou-se a modelagem proposta por Heydari e Siddiqui (2009), decompondo o valor do *crack spread* em dois fatores:

$$crack_t = x_t + f_t \quad (7)$$

sendo x_t a parcela estocástica do crack e f_t uma função determinística sazonal.

A modelagem da função f_t pode ser realizada a partir de funções trigonométricas ou com a utilização de *dummies*. Neste trabalho, a função é modelada através de variáveis *dummies*, com o apoio do *software E-views*, considerando sazonalidade trimestral. Para isto, estima-se a seguinte regressão:

$$crack_t = D_1I_1 + D_2I_2 + D_3I_3 + D_4I_4 + \varepsilon_t \quad (8)$$

onde:

$crack_t$ representa o valor do crack no dia t ;

D_j ($j = 1, 2, 3, 4$), é a variável *dummy* que representa uma determinada estação do ano, assumindo valor 1 ou 0 conforme o dia do ano, a depender da estação;

I_j ($j = 1, 2, 3, 4$) é a componente sazonal referente a cada estação do ano;

ε_t é o resíduo da regressão

Conforme descrito na seção 0, processos de reversão à média são comumente utilizados para a modelagem do *crack spread*. Além da indicação teórica de uso de reversão à média, a aderência dos dados a este processo

estocástico também será testada, através do teste de razão da variância, conforme descrito ainda nesta seção.

O modelo simples de reversão à média, conhecido como processo de Ornstein-Uhlenbeck, é definido pela seguinte equação:

$$dx = \eta(\bar{x} - x)dt + \sigma_x dz \quad (9)$$

que representa o modelo aritmético, uma vez *spreads* podem admitir valores negativos.

Na equação (9), η representa a velocidade de reversão e \bar{x} o nível “normal” de preços, ou seja, o nível de preços para o qual x tende a reverter. No caso de *commodities*, \bar{x} representa o custo marginal de produção no longo prazo (Dixit e Pindyck, 1994). A equação ainda apresenta a volatilidade σ_x e o incremento de Wiener dz .

O valor esperado e a variância são dados por (Dixit e Pindyck, 1994):

$$E[x_t] = x_0 e^{-\eta t} + \bar{x}(1 - e^{-\eta t}) \quad (10)$$

$$Var[x_t] = (1 - e^{-2\eta t}) \frac{\sigma_x^2}{2\eta} \quad (11)$$

Observa-se que o valor esperado é dado por uma ponderação entre o valor inicial x_0 e o valor de equilíbrio de longo prazo \bar{x} . A ponderação é feita considerando o tempo t e a velocidade de reversão η . Sobre a variância, observa-se que ela converge para $\frac{\sigma_x^2}{2\eta}$ quando o tempo tende a infinito.

A estimação dos parâmetros do MRM apresentado é feita a partir da regressão linear da série de x_t , no caso deste trabalho do crack spread, conforme apresentado na equação (12):

$$x_t - x_{t-1} = a + (b - 1)x_{t-1} + \epsilon_t \quad (12)$$

A partir da equação (12), os parâmetros são calculados da seguinte maneira:

$$\bar{x} = -\frac{a}{(b-1)} \quad (13)$$

$$\eta = -\ln(b)N \quad (14)$$

$$\sigma_x = \sigma_\epsilon \sqrt{N} \sqrt{\frac{2\ln(b)}{(b^2-1)}} \quad (15)$$

sendo σ_ϵ o erro padrão da regressão e N o número de períodos por ano da observação dos dados.

Com objetivo de simular a evolução temporal da variável estocástica, a equação de discretização do MRM acima apresentado é dada por (Dias, 2015):

$$x_t = x_{t-1}e^{-\eta\Delta t} + \bar{x}(1 - e^{-\eta\Delta t}) + \sigma_x \sqrt{\frac{1 - e^{-2\eta\Delta t}}{2\eta}} N(0,1) \quad (16)$$

Para fins de cálculo do valor de opções, é necessário trabalhar sob neutralidade ao risco, de modo que o processo estocástico neutro ao risco equivalente ao de reversão à média dado pela equação (17) é descrito pela seguinte equação:

$$dx = \eta \left(\bar{x} - \left(\frac{\mu - r}{\eta} \right) - x \right) dt + \sigma_x dz \quad (17)$$

A equação de discretização do processo neutro ao risco é:

$$x_t = x_{t-1}e^{-\eta\Delta t} + \left(\bar{x} - \left(\frac{\mu - r}{\eta} \right) \right) (1 - e^{-\eta\Delta t}) + \sigma_x \sqrt{\frac{1 - e^{-2\eta\Delta t}}{2\eta}} N(0,1) \quad (18)$$

No processo neutro ao risco, o nível de equilíbrio de longo prazo é penalizado pelo prêmio de risco normalizado pela velocidade de reversão

$((\mu - r)/\eta)$, de modo que no processo neutro ao risco os valores reverterem para um nível inferior ao do processo real.

Para testar a aderência dos dados ao modelo escolhido, o primeiro teste é o chamado de raiz unitária, ou teste de Dickey e Fuller (1979). Como o MGB é um caso de um processo chamado de raiz unitária, ou seja, uma série temporal altamente persistente na qual o valor corrente é igual ao valor do período anterior mais perturbação fracamente dependente, essa série pode ser testada para a presença de raiz unitária. A partir da regressão apresentada na equação (12), verifica a hipótese nula (H_0) de $b-1=0$, o que equivale a $b=1$. Se não é possível rejeitar esta hipótese nula, não é possível rejeitar a aderência dos dados ao conhecido movimento aritmético browniano. No entanto, ainda que não seja possível rejeitar H_0 , quando se obtêm valores de $b < 1$, pode-se dizer que há indícios de reversão à média.

Para testar a aderência dos dados ao modelo de reversão a média, pode ser efetuado ainda o teste de razão da variância, conforme proposto por Pindyck (1999). Conforme sugerido pelo autor, o teste é usado para avaliar até que nível os choques de preço são permanentes ou tendem a dissipar-se sob a permanente força de reversão. O teste de razão da variância mede o nível para o qual a variância de uma série cresce com o “retardo” ou *lag* do teste. São calculados os valores da seguinte razão dada pela equação (19) (Pindyck, 1999):

$$R_k = \frac{1 \text{Var}(P_{t+k} - P_t)}{k \text{Var}(P_{t+1} - P_t)} \quad (19)$$

Os termos de variância na equação representam a variância das séries de diferenças de preços, com *lag* (defasagem) de k períodos. Na presença de reversão à média, a variância é delimitada a um certo nível com o crescimento de k . Ou seja, para valores altos do lag de k , a razão da variância cai, indicando que os choques de preços não são permanentes e que os preços reverterem para um nível de equilíbrio. A reversão à média é evidenciada quando a razão da variância inicialmente aumenta, estabilizando-se posteriormente em patamar abaixo de 1.

3.2.2

Câmbio

A análise de uma refinaria no Brasil torna importante a incerteza associada ao câmbio, já que os preços de petróleo e derivados são formados no mercado americano.

A série de taxa de câmbio dólar-real utilizada envolve dados diários de 02/01/2002 e 28/02/2018 extraídos do IPEA data (2018). Os valores foram corrigidos para a mesma data a partir da inflação nos mercados americano e brasileiro, utilizando respectivamente o *Consumer Price Index* (CPI), obtido a partir do *Bureau of Labor Statistics* (2018), e o índice de preços ao consumidor (IPCA), extraído do IBGE (2018).

A modelagem da variável estocástica da taxa de câmbio é normalmente a partir do MGB (Teles, 2005; Oliveira, 2014).

O MGB é descrito pela equação (20):

$$dc = \alpha_c c dt + \sigma_c c dz \quad (20)$$

onde c é a taxa de câmbio, α_c é o parâmetro de tendência, σ_c representa a volatilidade e dz é o incremento de Wiener.

O valor esperado e a variância são definidos pelas equações (21) e (22):

$$E(c_t) = x_0 e^{\alpha_c t} \quad (21)$$

$$Var(c_t) = c_0^2 e^{2\alpha_c t} (e^{\sigma_c^2 t} - 1) \quad (22)$$

A estimação dos parâmetros é feita de maneira análoga à anteriormente apresentada, a partir da regressão linear baseada nos logaritmos das variáveis:

$$\ln(c_t) - \ln(c_{t-1}) = a + (b - 1)\ln(c_{t-1}) + \epsilon_t \quad (23)$$

A partir desta regressão, os parâmetros do MGB são estimados:

$$\alpha = N\{E[\ln(c_t) - \ln(c_{t-1})] + 0,5 \frac{\sigma^2}{N}\} \quad (24)$$

$$\sigma_c = \sqrt{N \text{Var}[\ln(c_t) - \ln(c_{t-1})]} \quad (25)$$

onde N é o número de períodos por ano da observação dos dados

Para testar a aderência dos dados ao MGB, realiza-se da mesma forma o teste da raiz unitária de Dickey-Fuller, que testa a hipótese do coeficiente b , na equação (23) ser igual a 1, de modo que a expressão $b-1$ deve ser estatisticamente igual a zero para que a hipótese do MGB não possa ser rejeitada.

Com o objetivo de simular a evolução temporal da variável estocástica neste caso, a equação de discretização do MGB é dada por:

$$c_t = c_{t-1} e^{\left(\alpha_c - \frac{\sigma_c^2}{2}\right)\Delta t + \sigma_c N(0,1)\sqrt{\Delta t}} \quad (26)$$

Para fins de cálculo do valor de opções, é necessário trabalhar sob neutralidade ao risco, de modo que o MGB neutro ao risco é dado pela seguinte correção na taxa de crescimento:

$$dc = (r - \delta_c)cdt + \sigma_c cdz \quad (27)$$

A equação de discretização do processo neutro ao risco é

$$c_t = c_{t-1} e^{\left((r - \delta_c) - \frac{\sigma_c^2}{2}\right)\Delta t + \sigma_c N(0,1)\sqrt{\Delta t}} \quad (28)$$

A taxa de conveniência (δ_c) adotada é a taxa livre de risco do mercado americano.

3.2.3

Simulação de Monte Carlo

Desde que foi criado, durante a Segunda Guerra Mundial, o método de Monte Carlo tem sido aplicado nas mais diversas áreas. A popularização e o desenvolvimento tecnológico dos computadores propiciaram a disseminação deste método, que pode ser descrito como método de simulação estatística que utiliza sequências de números aleatórios para desenvolver simulações. Em outras palavras, é visto como método numérico universal para resolver problemas por meio de amostragem aleatória.

Na área de opções reais, a aplicação da simulação de Monte Carlo permite a simulação direta dos processos estocásticos de várias fontes de incerteza simultaneamente, o que se torna ainda mais útil em problemas de maior complexidade.

Atualmente um dos softwares mais utilizados para simulação de Monte Carlo é o @Risk da Palisade Corporation, que será utilizado ao longo do trabalho na realização das simulações e análises.

O método de amostragem utilizado pela simulação de Monte Carlo na geração de variáveis aleatórias para quaisquer distribuições de probabilidade é descrito a seguir.

Supondo que o objetivo é gerar n amostras de uma determinada variável aleatória x , descrita pela função densidade de probabilidade $f(x)$. De uma forma geral, os softwares de análise de risco procedem da seguinte forma:

1. Calcula-se a distribuição acumulada $F(X) = \Pr(x \leq X)$;
2. Calcula-se a função inversa de $F(X)$: $X = G(F(X))$;
3. Geram-se n números aleatórios com distribuição de probabilidade Uniforme $(0,1)$;
4. Para cada número aleatório, calcula-se $X = G(F(X))$.

É utilizado um algoritmo Gerador de Números Aleatórios (GNA) de valores de igual probabilidade (uniforme) de ocorrência no intervalo entre zero e 1. No entanto, mesmo com os avanços da informática, ainda não foi possível gerar números genuinamente randômicos. Porém, é possível gerar números

pseudoaleatórios ou números quase-aleatórios, suficientes para estudos tradicionais de análise de risco com a simulação de Monte Carlo.

Para a construção de um modelo do fluxo de caixa, fazendo uso da simulação de Monte Carlo, deve-se construir um modelo básico das variações dos fluxos de caixa futuros, provocados pela variação das variáveis aleatórias (no caso deste trabalho o *crack spread* e o câmbio). A partir da definição da distribuição de probabilidade cumulativa de cada variável aleatória e da definição de como estas variáveis se relacionam como o valor do projeto é possível gerar a distribuição de probabilidade de V . Os valores das variáveis estocásticas são gerados aleatoriamente n vezes, conforme sua probabilidade de ocorrência, gerando n valores de V .

3.3

Flexibilidades associadas ao projeto

3.3.1

Opção de postergação

O problema de investimento sob incerteza pode ser visto como um problema de maximização da riqueza sujeito a uma ou mais incertezas. Os dois métodos mais utilizados para resolver este problema são programação dinâmica e *contingent claims*. Este trabalho utilizará o método de *contingent claims*.

3.3.1.1

Contingent Claims

O método de *contingent claims*, utilizado neste trabalho, assume que o valor da opção pode ser obtido através de uma carteira dinâmica, neutra ao risco, que replica o valor do ativo real. Este procedimento permite que a única taxa requerida para a análise seja a taxa livre de risco, evitando a necessidade de se trabalhar com uma taxa de desconto ajustada ao risco da opção.

Seja F uma opção americana de compra escrita sobre um ativo básico V que segue um MGB. Essa carteira sem risco (Φ) é composta de uma posição longa (comprada) da opção de investimento (F) e em uma posição curta (vendida) de n

unidades do ativo de risco negociado no mercado e correlacionado com o projeto (V), conforme equação (29):

$$\Phi = F - nV \quad (29)$$

O valor de n é escolhido de forma a tornar essa carteira sem risco, sendo assim uma carteira dinâmica, porque o valor de n se ajusta continuamente para manter a carteira livre de risco, mesmo com oscilações no valor de V . Em um intervalo infinitesimal de tempo dt o retorno exigido pela carteira será:

$$r\Phi dt = r(F - nV)dt \quad (30)$$

O retorno de V num intervalo dt , pode ser decomposto em uma parcela referente ao retorno do capital dV e outra relativa aos dividendos pagos pelo projeto $\delta V dt$. Como a opção não paga dividendos, seu retorno é decorrente apenas do ganho de capital dF . Sendo assim, o retorno do portfólio livre de risco pode ser também escrito da seguinte maneira:

$$r\Phi dt = dF - n(dV + \delta V dt) \quad (31)$$

Aplicando-se o Lema de Itô para expandir dF , a partir da equação (32) e considerando que o quadrado de dV é dado pela equação (33)

$$dF = F_V dV + \frac{1}{2} F_{VV} (dV)^2 + F_t dt \quad (32)$$

$$(dV)^2 = \sigma^2 V^2 dt \quad (33)$$

a equação (31) pode ser reescrita como:

$$r\Phi dt = F_V dV + \frac{1}{2} \sigma^2 V^2 F_{VV} dt + F_t dt - n(dV + \delta V dt) \quad (34)$$

$$\text{onde } F_V = \frac{\partial F}{\partial V}, F_{VV} = \frac{\partial^2 F}{\partial V^2}, F_t = \frac{\partial F}{\partial t}.$$

Ao igualar as equações de retorno do portfólio (30) e (34) e eliminando o termo estocástico dV é possível deduzir a equação diferencial parcial da opção (EDP). A eliminação do termo estocástico dV acontece através da adequada definição de n para que o portfólio seja sem risco, de modo que $F_V - n = 0$, assim sendo $n = F_V$.

A equação diferencial parcial encontrada e apresentada na equação (35) é conhecida como EDP de Black & Scholes & Merton:

$$\frac{1}{2} \sigma^2 V^2 F_{VV} + (r - \delta) V F_V - rF = -F_t \quad (35)$$

Esta EDP é válida para opções europeias ou americanas, de compra ou de venda. Para resolvê-la são necessárias condições que contornem (c.c.), que definem a condição de ótimo, as condições de decisão gerencial racional e os limites do modelo.

Para uma opção de espera na decisão de realização do investimento, as condições de contorno são:

$$F(0, t) = 0 \quad (36)$$

$$F(V^*, t) = V^* - I \quad (37)$$

$$F(V^*, t) = 1 \quad (38)$$

$$F(V, T) = \max(V - I; 0) = \max(VPL; 0) \quad (39)$$

sendo $V^*(t)$ o gatilho, que representa o valor a partir do qual é ótimo investir e T a data de expiração do valor da opção.

A condição da equação (36) diz que se o valor do projeto cair para zero então a opção de investimento também nada vale.

A equação (37), é conhecida como condição de fronteira é diz que no ponto ótimo é indiferente o exercício ou não da opção. É uma condição necessária, mas não suficiente para encontrar o resultado ótimo.

A equação (38) é a condição de suavidade, que representa condição suficiente para o ótimo, sendo que no ponto ótimo, a primeira derivada da função valor da opção deve ter o mesmo valor, antes e depois que a opção for exercida.

Por fim, a equação (39) indica que no momento expiração dos direitos da opção, se tem a situação de investimento “agora ou nunca”, devendo investir se o valor do projeto for maior que o custo atualizado de investimento. No momento da expiração vale a regra do $VPL > 0$ para investir.

Se a componente tempo for retirada da equação (35) e (37), ou seja, se não houver tempo de expiração, a opção pode ser vista como perpétua e a equação diferencial apresenta solução analítica, já que a equação se transforma em uma equação diferencial ordinária (EDO) dado por:

$$\frac{1}{2} \sigma^2 V^2 F_{VV} + (r - \delta) V F_V - r F = 0 \quad (40)$$

Resolvendo-se pelas mesmas condições de contorno já definidas, com exceção da última (39), já que não há mais data de expiração da opção, encontra-se a seguinte solução para $F(V)$ e V^* :

$$F(V) = AV^\beta \quad (41)$$

$$V^* = \left(\frac{\beta}{\beta - 1} \right) I \quad (42)$$

Sendo β a raiz positiva da equação característica da EDO e A uma constante determinada pelas condições de contorno. Os valores de β e A são calculados conforme segue:

$$\beta = \frac{1}{2} - \frac{r - \delta}{\sigma^2} + \sqrt{\left[\frac{(r - \delta)}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right]^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} \quad (43)$$

$$A = \frac{V^* - I}{V^* \beta} \quad (44)$$

Já para o caso de opção americana com prazo de expiração não existe solução analítica e será utilizada a aproximação analítica proposta por Bjerksund e Stensland (1993).

Considerando que a partir da curva de gatilhos é possível obter o valor da opção americana (Kim, 1990), Bjerksund e Stensland (1993) apresentam uma aproximação analítica da curva de gatilhos no instante $t < T$, sendo T a data de expiração da opção. Dias (2015) destaca que a aproximação é dada por uma média ponderada entre o gatilho da opção perpétua (aqui denotado por V_∞^*), apresentada na equação (42), e o gatilho da opção em T (aqui denotado por V_0^*) e dado por

$$\lim_{t \rightarrow T} V^*(t) = \text{Máx} \left[I; \frac{r}{\delta} I \right] \quad (45)$$

A aproximação proposta por Bjerksund e Stensland (1993) leva em consideração que a curva de gatilho é descontínua na expiração no caso em que $r < \delta$. Conforme Dias (2015), a aproximação é dada por:

$$V^*(t = 0; T) = V_0^* e^{h(T)} + \{V_\infty^* [1 - e^{h(T)}]\} \quad (46)$$

$$h(t) = -[(r - \delta)T + 2\sigma\sqrt{T}] \left(\frac{V_0^*}{V_\infty^* - V_0^*} \right) \quad (47)$$

onde $h(T)$ deve ser menor do que 0. Para isto, a seguinte condição é necessária para que a aproximação seja razoável:

$$(r - \delta)T + 2\sigma\sqrt{T} > 0 \Rightarrow \sigma > \frac{-(r - \delta)\sqrt{T}}{2} \quad (48)$$

Logo, se $r < \delta$ a volatilidade não pode ser muito baixa para que aproximação funcione. Já para $r > \delta$ não há nenhum problema.

A partir da aproximação da curva de gatilhos é possível obter o valor da opção americana de compra, dado por:

$$F(V, 0; T) = \alpha V^\beta - \alpha \phi(V, T, \beta, V^*, V^*) + \phi(V, T, 1, V^*, V^*) - \phi(V, T, 1, V^*) - I\phi(V, T, 0, V^*, V^*) + I\phi(V, T, 0, I, V^*) \quad (49)$$

onde

$$\alpha = \frac{V^* - I}{V^{*\beta}}$$

ϕ é uma função que representa a distribuição de probabilidade normal gerada pela diferença entre duas normas-padrão acumuladas.

O cálculo da aproximação analítica de Bjerksund e Stansland (1993) foi feito utilizando uma planilha, com um código VBA para cálculo da aproximação, desenvolvida por Dias (2018) e disponibilizada em seu site.

O valor da opção (F) deve ser maior que o VPL do projeto sem flexibilidade para que haja valor na espera, de modo que, se isso não acontecer, a indicação é de investir imediatamente. A decisão de investimento deve ser tomada a partir de um valor crítico do projeto dado pelo gatilho V^* . A decisão ótima de investimento acontece quando o valor presente dos fluxos de caixa gerados pelo projeto V em $t=0$ for maior do que o valor crítico V^* . Neste caso, é ótimo exercício imediato da opção e se obtém o VPL. Ou seja, se $V(t=0) \geq V^*$, então $F = VPL = V - I$ e o projeto deve ser feito imediatamente (Dixit e Pindyck, 1994).

3.3.1.2

Market Asset Disclaimer

O método de *contingent claims* assume que para a formação da carteira livre de risco é possível encontrar um ativo negociado no mercado com valor perfeitamente correlacionado ao valor do projeto, o que é bastante difícil.

Diante disso, adota-se a premissa do *Market Asset Disclaimer* (MAD), método defendido Copeland e Antikarov (2002), que diz que a melhor estimativa

não-tendenciosa para o valor de um ativo não negociado no mercado é o valor presente dos fluxos de caixa operacionais desse ativo sem flexibilidade, considerando uma taxa de desconto ajustada ao risco.

A outra premissa de Copeland e Antikarov (2002), se baseia no teorema de Samuelson (1965) e é útil para reduzir a dimensionalidade do problema quando existem múltiplas fontes de incerteza associadas ao projeto.

Ao invés de escrever a EDP do valor da opção real em função de várias variáveis estocásticas, pode-se calcular uma volatilidade agregada do valor do projeto V que incorpore as incertezas dos componentes do valor do projeto, dadas pela taxa de câmbio e o *crack spread* neste trabalho.

Para calcular a volatilidade agregada de V , assume-se que V é aproximadamente distribuído como uma log-normal e pode ser aproximado como um MGB, de acordo com a equação (50), independentemente dos processos estocásticos presentes nas variáveis estocásticas que definem o seu valor serem ou não modelados como MGB.

$$dV = \alpha V dt + \sigma V dz \quad (50)$$

A partir disto, é possível utilizar a técnica de simulação de Monte Carlo para simular os componentes estocásticos do projeto e gerar uma distribuição de probabilidade do projeto e extrair desta distribuição a volatilidade agregada de V .

O modelo de Copeland e Antikarov (2002) simula os processos estocásticos para todos os anos do fluxo de caixa, o que resulta em volatilidades demasiadamente altas (Brandão *et al.*, 2005a; Brandão *et al.*, 2005b; Smith, 2005; Dias, 2006). Diante disto, será utilizado o MAD-Modificado proposto por Dias (2006), que propõe que a simulação dos processos estocásticos deve ser feita apenas no instante $t=1$. Para os outros instantes de tempo é calculado o valor esperado dos processos estocásticos, a partir do valor simulado em $t=1$.

Neste caso, calcula-se o valor do projeto no instante $t=1$, assumindo uma postergação de um ano na realização do projeto. A partir da simulação dos componentes estocásticos em $t=1$, é possível gerar uma distribuição de probabilidade do valor do projeto de modo a extrair desta distribuição a média e a variância do valor do projeto naquele instante ($t=1$).

Assumindo que o projeto segue um MGB, a partir do valor do projeto no instante $t=0$, do valor esperado para o projeto e seu desvio padrão em $t=1$ e utilizando as equações de valor esperado e variância do MGB, análogas às apresentadas nas equações (21) e (22), é possível gerar a estimativa dos parâmetros do MGB do projeto, α e σ .

3.3.1.3

Investimento estocástico

Ao considerar o valor do investimento definido em reais e considerando a taxa de câmbio tratada como uma variável estocástica, pode-se considerar o tratamento do valor da opção de espera considerando o investimento também como estocástico. McDonald e Siegel (1986) apresentam uma metodologia para avaliação da opção perpétua de investir, considerando que o investimento (I) e o valor do projeto (V), seguem dois MGBs correlacionados. Neste caso, para reduzir a dimensionalidade do problema trabalha-se com a razão $v = V/I$.

A EDO pode ser escrita conforme equação

$$\frac{1}{2} \sigma^2 v^2 F_{vv} + (\delta_I - \delta_v) v F_{vv} - \delta_I f = 0 \quad (51)$$

onde:

δ_I e δ_v correspondem a taxa de dividendos do investimento e do projeto
 σ^2 é a volatilidade total, dada por:

$$\sigma^2 = \sigma_V^2 - 2\rho\sigma_V\sigma_I + \sigma_I^2 \quad (52)$$

onde ρ é coeficiente de correlação entre V e I

Para resolver a EDO definida na equação (51) são definidas as seguintes condições de contorno:

$$f(v^*) = v^* - 1 \quad (53)$$

$$f'(v^*) = 1 \quad (54)$$

Assim, existem duas equações para duas incógnitas e a solução analítica é dado por:

$$f(v) = \left(\frac{v}{v^*}\right)^{\beta_1} (v^* - 1), \quad \text{se } v \leq v^* \quad (55)$$

$$f(v) = (v^* - 1), \quad \text{se } v \geq v^* \quad (56)$$

$$v^* = \left(\frac{\beta_1}{\beta_1 - 1}\right) \quad (57)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{2} - \frac{(\delta_I - \delta_V)}{\sigma^2} + \sqrt{\left[\frac{(\delta_I - \delta_V)}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right]^2 + \frac{2\delta_I}{\sigma^2}} \quad (58)$$

onde v^* é o gatilho que define a relação entre V e I .

3.3.1.4

Taxa de conveniência do projeto (δ) e taxa livre de risco (r)

A taxa de conveniência do projeto (δ), que representa a taxa de pagamento dos dividendos gerados pelo ativo, pode ser calculada a partir da simulação neutra ao risco, de modo que a taxa de crescimento estimada para o projeto a partir das premissas do MAD é dada por $r - \alpha$. Considerando a taxa livre de risco adotada é possível calcular δ .

3.3.2

Opção de parada temporária

Conforme descrito no item Opção de parada temporária 1.1.1.2, a opção de parada temporária é decorrente da decisão entre operar ou não a refinaria e o modo ótimo de operação será determinado a depender do valor que as variáveis estocásticas, *crack spread* e câmbio, assumirem em cada instante de tempo. Conforme estas variáveis sofrem alterações, o modo ótimo de operação também pode mudar. A decisão de parar a operação da refinaria incorre em custos associados à mudança de estado entre operação e parada, representado pelo custo de hibernação das unidades, que trata do custo com a conservação das unidades enquanto não estão operando. Sendo assim a decisão ótima acontece pela

comparação entre o modo de operação e de não operação. O modo de operação significa receber o resultado gerado pela operação da planta e o modo de não operação implica incorrer no custo de hibernação das unidades.

A escolha de parada da unidade irá acontecer quando o resultado obtido com a operação da refinaria sem considerar nenhuma flexibilidade, que será chamado fluxo de caixa da operação, for menor do que o gasto com a hibernação das unidades somado ao custo fixo da refinaria, que será identificado como fluxo de caixa de hibernação. O custo fixo é indiferente para a decisão de operar ou não a refinaria, por isso ele é considerado nos dois casos, tanto no fluxo de caixa da operação como no fluxo de caixa de hibernação. Incorre-se neste custo independente da refinaria operar ou não.

Assim, mesmo com fluxo de caixa da operação negativo, em alguns momentos, pode ser melhor manter a refinaria operando, ao invés de incorrer no custo de hibernação.

De modo análogo ao cálculo da opção de espera, para opção de parada temporária pode ser utilizada a simulação de Monte Carlo neutra ao risco para tratar as variáveis estocásticas no fluxo de caixa. A partir da simulação dos processos estocásticos é gerado um fluxo de caixa sem flexibilidade, calculado pela subtração dos custos variáveis da receita, denominado de fluxo de caixa da operação, e outro incorporando a flexibilidade de parada temporária.

O fluxo de caixa que incorpora a opção de parada temporária, tratado como fluxo de caixa ótimo, é definido como o máximo entre o fluxo de caixa da operação e o fluxo de caixa da hibernação (que representa o custo de hibernar as unidades da planta em que cada instante de tempo mais o custo fixo). Assim, a cada instante de tempo, incorre-se na escolha ótima entre operar ou não, sendo que a decisão de não operar incorre no custo de hibernação:

$$FC_{ótimo}(t) = \text{Max}(FC_{operação}(t); FC_{hibernação}(t)) \quad (59)$$

onde $FC_i(t)$ é o fluxo de caixa a cada instante de tempo para os casos em que $i =$ *operação* ou *hibernação*.

O valor da opção de parada temporária é dado pela diferença entre o valor presente esperado do fluxo de caixa ótimo menos o valor presente do fluxo de caixa da operação.

Por fim pode ser analisada a interação entre a opção de parada temporária e a opção de postergação do investimento, uma vez que o valor conjunto de todas as opções não é simplesmente a soma delas. A presença de uma opção influencia no valor da outra (Trigeorgis, 1993), de forma que a opção de postergação pode perder valor quando se incorpora opção de parada temporária, porque a opção de parada temporária reduz a geração de fluxos de caixa negativos. A partir da inclusão da flexibilidade de parada temporária os parâmetros do MGB do projeto serão novamente estimados, assumindo premissas do MAD, apresentado no item 2.3.1.2 e o valor da opção de espera será recalculado.

Esta configuração de refino apresenta alta capacidade de conversão, o que quer dizer que concentra sua produção em diesel e querosene de aviação, derivados com maior valor de mercado. Devido à sua configuração, esta refinaria é capaz de processar um petróleo com componentes pesados e baixo valor de mercado e convertê-lo em grandes frações de diesel e QAV, conforme Figura 4 com as respectivas quantidades diárias de cada produto final.

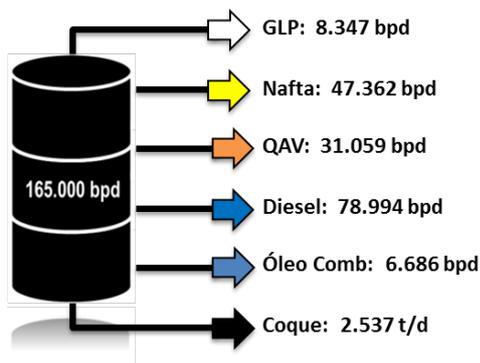


Figura 4 - Produção de derivados da refinaria. Fonte Petrobras (2018).

O projeto da refinaria já está 85% concluído, sendo relevante para a decisão de investimento apenas os 15% remanescentes do investimento, uma vez que o valor já investido deve ser considerado como custo afundado, não sendo relevante para a decisão de continuar ou não o projeto. No entanto, este trabalho também analisa o caso que considera 100% do investimento necessário para uma nova refinaria, para avaliar como a decisão de investimento seria alterada se o projeto ainda não tivesse sido iniciado.

O pressuposto adotado neste trabalho é de que a refinaria irá operar sempre em sua capacidade máxima e a produção é absorvida pelo mercado doméstico.

4.1.2

Custos de Produção

Os custos de produção podem ser divididos em custos associados à operação da refinaria e custos de logística.

Os custos de operação da refinaria incluem gastos com pessoal, insumos químicos, entre outros, estimados em R\$ 518 milhões/ano. Além disso, nos custos de operação há também o custo com gás natural utilizado para geração de

hidrogênio para os processos de hidrotratamento da refinaria e para geração de energia. O gás natural é uma *commodity* com preço formado no mercado internacional e sua cotação é em dólar. Os gastos com gás natural são de aproximadamente US\$ 200 milhões/ano. As características de formação do preço do gás natural são diferentes das características do petróleo e seus derivados. Como o *crack spread* é mais relevante para a análise de investimento de uma refinaria, este trabalho optou por não tratar o preço do gás como uma incerteza, assim como feito na literatura pesquisada.

Os gastos de logística são necessários para garantir o suprimento de petróleo e o escoamento de dos derivados produzidos. O suprimento de petróleo é realizado através de navios que descarregam o petróleo em um terminal marítimo, que se conecta com a refinaria a partir de um duto de aproximadamente 60 km.

A refinaria em análise está localizada no estado do Rio de Janeiro, mas afastada da área metropolitana da cidade do Rio de Janeiro, onde se concentra a maior demanda de derivados de petróleo do estado. A refinaria se conecta com este principal mercado através de dois dutos que realizam o escoamento dos derivados produzidos.

A produção da refinaria é maior do que a demanda do estado do Rio de Janeiro, por isso há uma conexão dutoviária com um terminal marítimo, a partir de onde os derivados são cabotados para outros mercados no Brasil com déficit de derivados de petróleo, com destaque para as regiões norte e nordeste do país.

Diante disto, a logística possui grande relevância para a refinaria em análise. Os gastos com logística se dividem em gastos associados a operação de dutos e terminais e gastos com transporte marítimo.

Os gastos com dutos e terminais somam R\$ 142 milhões/ano, enquanto os gastos com transporte marítimo somam aproximadamente US\$ 180 milhões/ano. O custo de transporte marítimo é indexado em dólar, sendo mais uma variável que reforça a importância de modelar a incerteza do câmbio na análise do projeto.

O custo com gás natural e com transporte marítimo são variáveis. O gás natural é consumido conforme o nível de utilização da refinaria, enquanto o transporte marítimo representa a contratação de navios para internação de petróleo e escoamento de derivados, sendo associado ao nível de utilização da refinaria. Ou seja, quanto maior a utilização, maior a necessidade de contratação de navios.

Já os custos de operação de refinaria e os custos de operação dutos e terminais são custos fixos. Desta forma, observa-se que os custos variáveis são incorridos em dólar, enquanto os custos fixos em reais.

4.2

Valor do projeto sem flexibilidade

O cálculo do valor do projeto sem flexibilidade considera a aplicação da técnica do fluxo de caixa descontado e o cálculo do VPL, conforme equação (4), considerando a taxa ajustada ao risco do projeto. Alternativamente, é possível trabalhar com a versão neutra ao risco, que ajusta os processos estocásticos para suas versões neutras ao risco (equações (17) e (28)) e utilizar a taxa livre de risco como taxa de desconto na equação (4).

O fluxo de caixa do projeto é considerado em dólar, em termos reais, ou seja, a valores constante, para um horizonte de tempo de 25 anos. A produção se inicia no segundo ano do fluxo de caixa, considerando que nos anos iniciais está sendo realizado o desembolso necessário, relativo ao investimento, para início da produção.

Para cálculo da receita, o fator de utilização considerado é de 96%, o que quer dizer que a indisponibilidade representa 4% da capacidade nominal. Desta forma a capacidade de produção para efeitos de cálculo da receita da refinaria é 158,4 mil barris por dia (165 mil x 0,96), que equivale a uma produção de 57,81 milhões de barris por ano, conforme equação (1).

O custo com gás natural é calculado a partir do volume de gás consumido multiplicado pelo preço do gás natural. Já o custo com transporte marítimo é calculado a partir do volume transportado e do frete estimado para cada uma das rotas.

Os custos de operação da refinaria e de operação de dutos e terminais assumem valores fixos, em reais, ao longo dos anos, sendo convertidos em dólar, conforme equação (2).

A alíquota de tributação considerada (ir) na equação (3) é de 34%, referente a imposto de renda e contribuição social sobre lucro líquido, a partir da qual calcula-se o lucro / prejuízo auferido pela refinaria ano a ano.

O valor do investimento, em valor presente é US\$ 1.708 milhões para o investimento remanescente de 15% e US\$ 4.950 milhões para uma nova refinaria.

Desta forma, o valor presente encontrado para os fluxos de caixa é de US\$ 2.575 milhões, de modo que subtraindo o valor do investimento remanescente, o VPL sem flexibilidade é de US\$ 867 milhões. Já para o caso em que se considera todo o investimento necessário para uma nova refinaria, o VPL é negativo em US\$ 2.375 milhões.

4.3

Estimação dos processos estocásticos

4.3.1

Crack spread

A série de *crack spread* utilizada envolve dados diários de 03/10/2005 até 28/02/2018 extraídos da NYMEX, deflacionados a partir do *Consumer Price Index* (CPI), conforme descrito no item 2.2.1.

A série calculada a partir da equação (5) foi comparada com série de contratos de *crack* 321, com vencimentos em um mês, negociados na NYMEX, que começou a ser negociada na NYMEX em 19/06/2009. A Figura 5 apresenta o histórico das duas séries e mostra que elas se comportam de forma semelhante, comprovado através da correlação de 0,96 entre as duas séries:

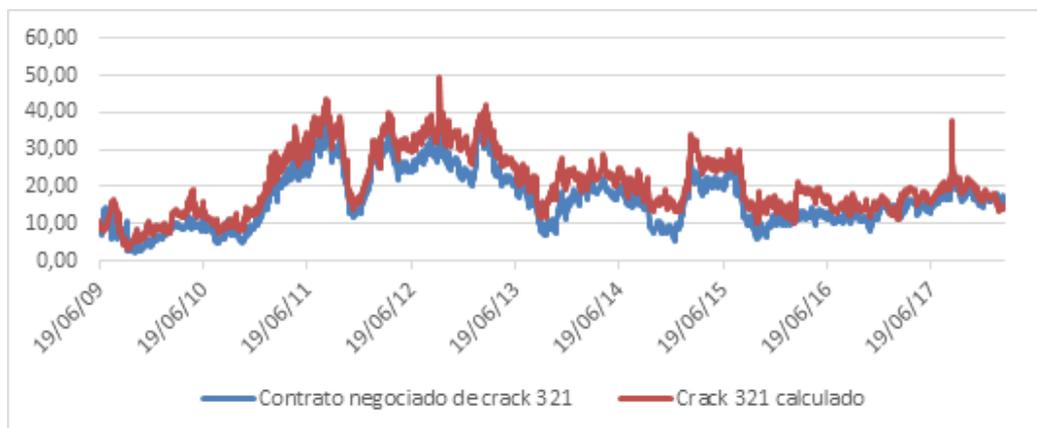


Figura 5 - Comparação dos contratos negociados de crack 321 com a série calculada de crack 321.

Sendo assim, optou-se por utilizar a série calculada e realizando o ajuste para o mercado brasileiro, conforme equação (6). A partir desta série foram estimadas as parcelas determinística (f_t) e estocástica (x_t) do *crack spread*. A partir desta regressão definida pela equação (8), foram incluídas variáveis *dummies* na regressão, para avaliar a necessidade do tratamento de sazonalidade na série. Os resultados obtidos a partir do *E-views* encontram-se na Figura 6:

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D1	21.36665	0.297723	71.76687	0.0000
D2	20.12383	0.294465	68.34034	0.0000
D3	18.73494	0.291861	64.19139	0.0000
D4	19.40815	0.296947	65.35905	0.0000
R-squared	0.013828	Mean dependent var		19.89722
Adjusted R-squared	0.012875	S.D. dependent var		8.282720
S.E. of regression	8.229228	Akaike info criterion		7.054548
Sum squared resid	210203.5	Schwarz criterion		7.062323
Log likelihood	-10958.77	Hannan-Quinn criter.		7.057340
Durbin-Watson stat	0.019403			

Figura 6 - Resultado da regressão de retornos do crack com *dummies*.

Como pode ser observado, considerando um nível de significância de 5%, todas as *dummies* são significantes. A partir deste resultado, julgou-se adequado realizar a dessazonalização da série.

A equação (8) pode ser escrita como segue:

$$crack_t = 21,36665D_1 + 20,12382D_2 + 18,73494D_3 + 19,40815D_4 \quad (60)$$

Os coeficientes encontrados para as variáveis *dummy* (I_1, I_2, I_3, I_4), representam a parcela determinística (f_t) do *crack spread*. Como a análise do projeto é anual, foi feita a média dos coeficientes das variáveis *dummies*, para se obter o valor de f_t , que é 19,91.

A partir da série dessazonalizada, representada pelos resíduos encontrados na regressão definida pela equação (8), foi estimada a parcela estocástica do *crack spread* (x_t), de acordo com o modelo aritmético de reversão à média de Ornstein-Uhlenbeck, conforme equação (9).

Estimou-se a regressão de acordo com a equação (12), encontrando-se o seguinte resultado:

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
a	-0.002618	0.020674	-0.126646	0.8992
x(t-1)	-0.009906	0.002514	-3.940973	0.0001
R-squared	0.004977	Mean dependent var		-0.002627
Adjusted R-squared	0.004657	S.D. dependent var		1.155093
S.E. of regression	1.152401	Akaike info criterion		3.122215
Sum squared resid	4123.526	Schwarz criterion		3.126104
Log likelihood	-4848.362	Hannan-Quinn criter.		3.123612
F-statistic	15.53126	Durbin-Watson stat		2.072799
Prob(F-statistic)	0.000083			

Figura 7 - Resultado da regressão da série dessazonalizada.

A série, se submetida ao teste da raiz unitária de Dickey-Fuller, não permite a aceitação da aderência dos dados ao MAB, apesar do valor do estimador de b ser próximo de 1, em valores absolutos. O coeficiente b na equação (12) encontrado foi de 0,990094 ($b - 1 = -0,009906$, logo $b = 0,9900094$).

A análise do gráfico de dispersão, apresentado na Figura 8, apresenta a reta com uma inclinação ligeiramente negativa, o que sugere a existência de reversão à média:

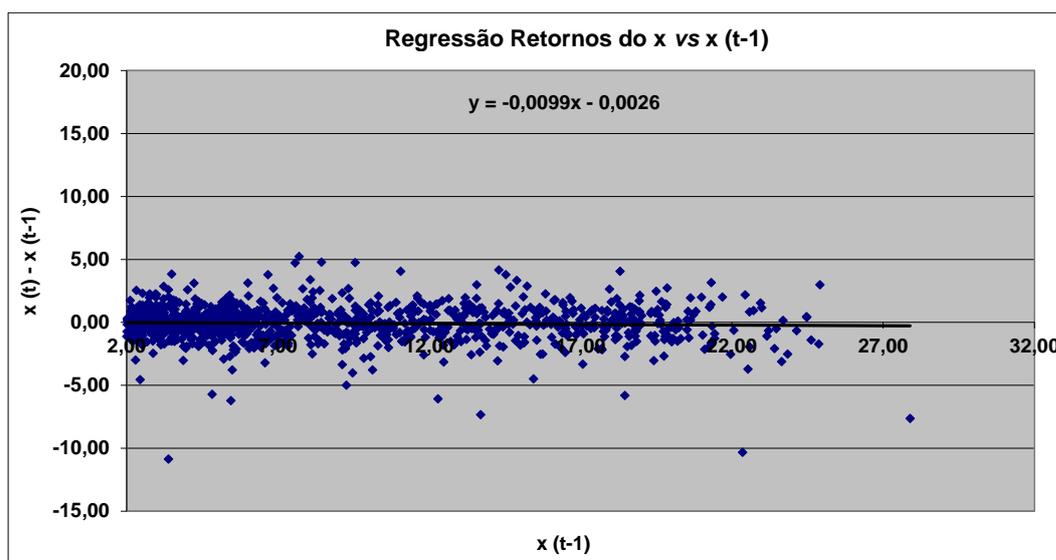


Figura 8 - Gráfico de dispersão dos retornos de X (série do crack spread dessazonalizada)

Além disso, a pesquisa bibliográfica realizada indica ampla utilização de modelos de reversão à média para modelagem do *crack spread*. Diante disto, verificou-se a existência de reversão à média na série, através do teste de razão da variância. Seu resultado é apresentado na Figura 9:

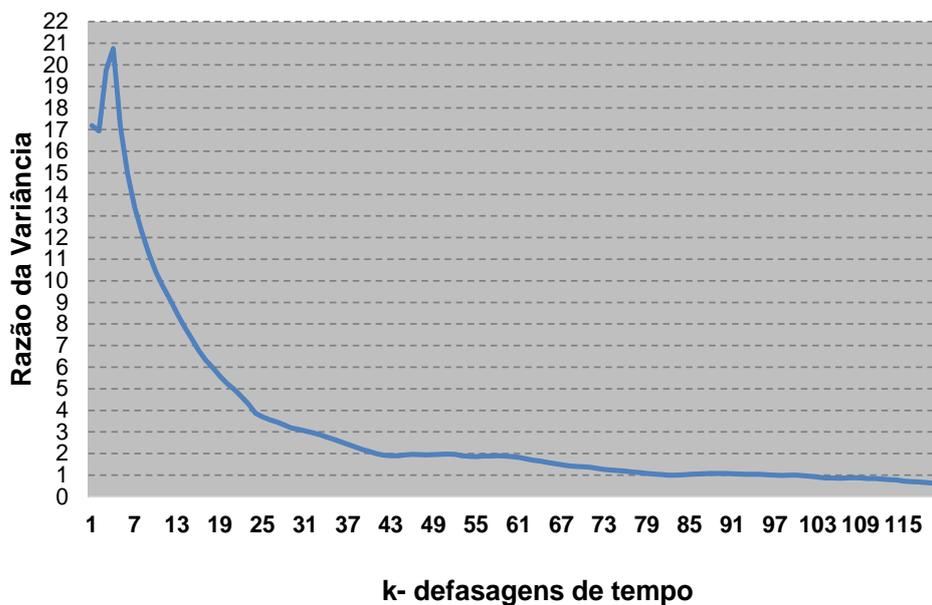


Figura 9 - Resultado do teste de razão da variância.

À medida que a defasagem no tempo (*lag k*) cresce, num primeiro momento a razão da variância cresce e na sequência se reduz, indicando que os choques de preço não são permanentes e que os preços tendem a reverter para um valor de equilíbrio. Trata-se de uma indicação de existência de reversão à média nos dados analisados e este será o modelo utilizado para o *crack spread*.

A partir dos coeficientes da regressão apresentados na Figura 7, foram estimados os parâmetros do modelo de reversão à média, conforme equações (14) e (15). Os parâmetros são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 2 - Estimativa de parâmetros.

Velocidade de reversão (η)	2,51
Volatilidade (σ)	18,38 a.a.

Conforme esperado o valor do estimador de a não é significativo (Figura 7), devido à escolha do ajuste sazonal sem intercepto, o que implica em $\hat{\alpha}=0$. A série apresenta valores altos para volatilidade e velocidade de reversão, resultado também encontrado em outros trabalhos que modelaram *spreads* de preços de derivados e petróleo. Dempster *et al.* (2008) modelam o *spread* de preços entre o diesel e o petróleo utilizando o modelo de dois fatores de Schwartz (1997) e encontram uma velocidade de reversão igual 3,39, volatilidade de 5,32 a.a. e o preço de equilíbrio de 3,58 US\$/bbl.

No caso do MRM da medida neutra ao risco, o nível de equilíbrio de longo prazo é penalizado por um prêmio de risco normalizado. Neste trabalho adotou-se $\mu = 10\%$ a.a., que é uma estimativa da taxa de desconto ajustada a risco para projetos de refino, sendo a principal incerteza dada pelo *crack spread*

4.3.2

Câmbio

Considerando a base de dados descrita no item 2.2.2, realiza-se a regressão dada pela equação (23) e encontra-se o resultado apresentado na Figura 10:

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
a	0.000926	0.000706	1.311429	0.1898
ln(c(t-1))	-0.000847	0.000581	-1.458020	0.1449
R-squared	0.000525	Mean dependent var		-7.81E-05
Adjusted R-squared	0.000278	S.D. dependent var		0.009912
S.E. of regression	0.009911	Akaike info criterion		-6.389876
Sum squared resid	0.397714	Schwarz criterion		-6.386762
Log likelihood	12944.69	Hannan-Quinn criter.		-6.388773
F-statistic	2.125823	Durbin-Watson stat		1.894249
Prob(F-statistic)	0.144913			

Figura 10 - Regressão de retornos do câmbio.

O gráfico com a dispersão dos retornos do câmbio pode ser visto na Figura 11.

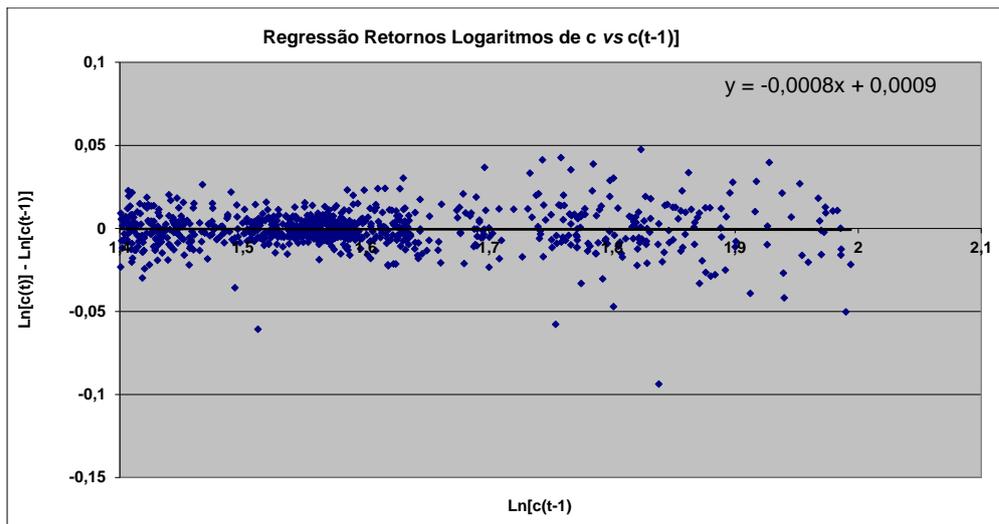


Figura 11 - Gráfico de dispersão dos retornos logarítmicos do câmbio.

Dos resultados do teste da raiz unitária de Dickey-Fuller, conclui-se que o modelo de MGB mostra-se adequado para simular o processo estocástico câmbio.

A partir dos coeficientes da regressão apresentados na Figura 10, foram estimados os parâmetros do MGB, conforme equações (24) e (25). Os parâmetros são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 3 - Estimativa de parâmetros – câmbio.

σ	15,74% a.a.
α	-0,73% a.a.

4.4

Valor da opção de postergação do investimento

Para calcular o valor da opção de espera são necessárias a volatilidade e a taxa de conveniência do projeto, bem como a estimativa da taxa livre de risco. Para a definição da taxa livre de risco, considerando que o fluxo de caixa é em dólar, é utilizada a taxa livre de risco do mercado americano, em termos reais, somada ao prêmio de risco Brasil.

A referência utilizada para a taxa livre de risco do mercado americano é a taxa real de retorno de letras do Tesouro Americano com vencimento em 10 anos, que é de 0,77% a.a. (Treasury, 2018). Para efeito das análises deste trabalho, é utilizada a estimativa de 1% a.a.

Para o risco Brasil, extraiu-se do IPEA Data (2018), os dados do EMBI + Risco Brasil (*Emerging Markets Bond Index Plus*) e a média dos últimos cinco anos (entre 2014 e 2018) foi de 2,97% a.a., sendo adotado o valor de 3% a.a. como estimativa. Diante disto, a taxa livre de risco adotada é 4% a.a.

Para o cálculo da volatilidade do projeto, a partir da simulação neutra ao risco dos processos estocásticos foi gerada uma distribuição de probabilidade do valor do projeto para o primeiro ano, apresentada na Figura 12.

A simulação neutra ao risco dos processos estocásticos foi feita através das equações de discretização dos processos estocásticos (equações (18) e (28)). A partir da simulação de Monte Carlo, foram geradas 10.000.

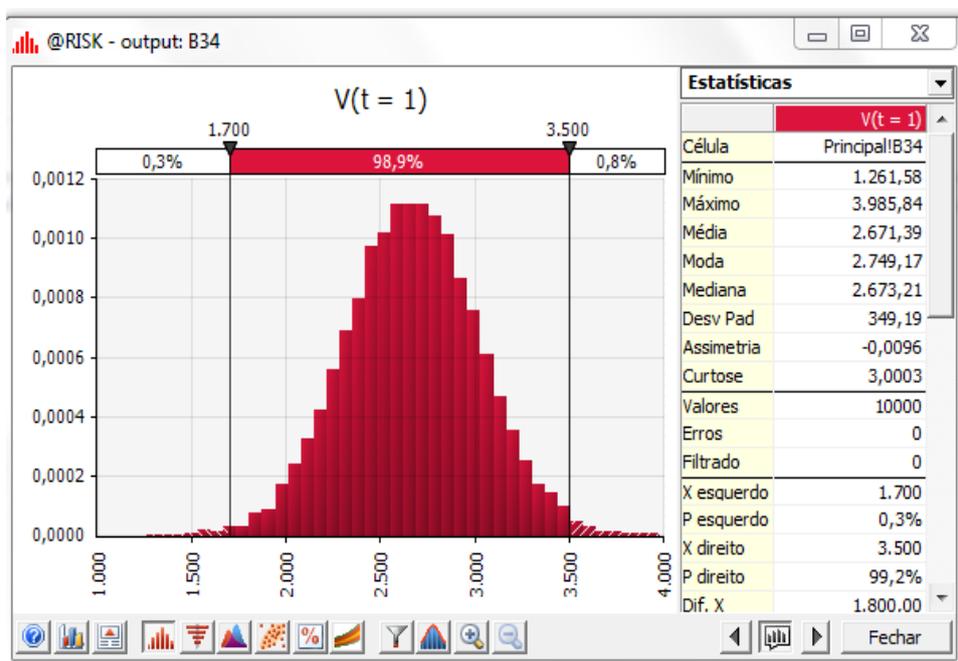


Figura 12 - Distribuição de probabilidade dos valores do projeto.

A análise da Figura 12 indica que o investimento necessário para completar os 15% restantes do projeto apresenta VPL negativo em apenas 0,3% dos casos. Isto é esperado, uma vez que tal investimento é referente a apenas 15% do projeto e sem esse investimento remanescente não é possível auferir nenhum resultado.

Já para o investimento completo, o projeto da refinaria nunca apresenta VPL positivo, pois não existe a ocorrência de valores superiores a US\$ 4.950 milhões.

Conhecendo o valor do projeto em $t=0$, a média e a variância da distribuição de probabilidade do projeto considerando a postergação do projeto em 1 ano, é

possível estimar os parâmetros de tendência neutra ao risco ($r-\delta$) e volatilidade (σ), assumindo que o valor do projeto segue um MGB, conforme equações (21) e (22), respectivamente. Os resultados encontrados foram: $r-\delta = -0,24\%$ a.a. e $\sigma = 13,02\%$ a.a.

A partir da tendência neutra ao risco estimada do projeto ($r-\delta$) e conhecendo a taxa a livre de risco (r) calcula-se a taxa de conveniência, estimada em $4,24\%$ a.a.

Com estes resultados é possível calcular o valor da opção de espera perpétua e com prazo de expiração. Para a opção com prazo de expiração, a restrição apresentada na equação (48) é atendida. Este trabalho propõe a análise do valor desta opção sem prazo de expiração e com expiração variando de 1 a 5 anos.

Os resultados encontrados, são apresentados na tabela abaixo. Para análise da tabela, é importante lembrar que o valor presente encontrado para o fluxo de caixa da refinaria (V) foi de US\$ 2.575 milhões. O VPL clássico do projeto é positivo em US\$ 867 milhões subtraindo o valor do investimento incremental e negativo em US\$ 2.375 subtraindo o valor do investimento completo. A Tabela 4 apresenta, para diferentes prazos de expiração da opção de postergação, o valor do gatilho V^* , o valor da opção de investimento F e o valor líquido da espera (dado pelo valor da opção F subtraído do VPL do caso clássico):

Tabela 4 - Valor da opção de espera (em milhões de dólares).

Prazo da opção (em anos)	Investimento incremental			Investimento completo		
	V^*	F	F-VPL	V^*	F	F-VPL
	(em milhões de dólares)			(em milhões de dólares)		
1	2.056	867,0	0,0	5.959	0,0 ¹	2.375
2	2.156	867,0	0,0	6.248	0,0 ¹	2.375
3	2.219	867,0	0,0	6.432	0,3	2.375
4	2.266	867,0	0,0	6.567	1,4	2.376
5	2.302	867,0	0,0	6.671	3,2	2.378
Perpétua	2.604	867,3	0,3	7.546	114,0	2.489

¹valores ligeiramente maiores do que zero.

A análise da tabela indica que se o investimento ainda não tivesse sido iniciado, ou seja, tivesse que ser realizado no seu valor total de forma completa, a melhor decisão seria postergar a aplicação de capital independente do prazo de expiração da opção. Já para o investimento incremental, a recomendação é investir imediatamente se a opção expirar em até 5 anos, porém postergar a aplicação de capital caso seja a opção de espera seja perpétua.

As Figura 13 e Figura 14 consolidam graficamente os resultados:

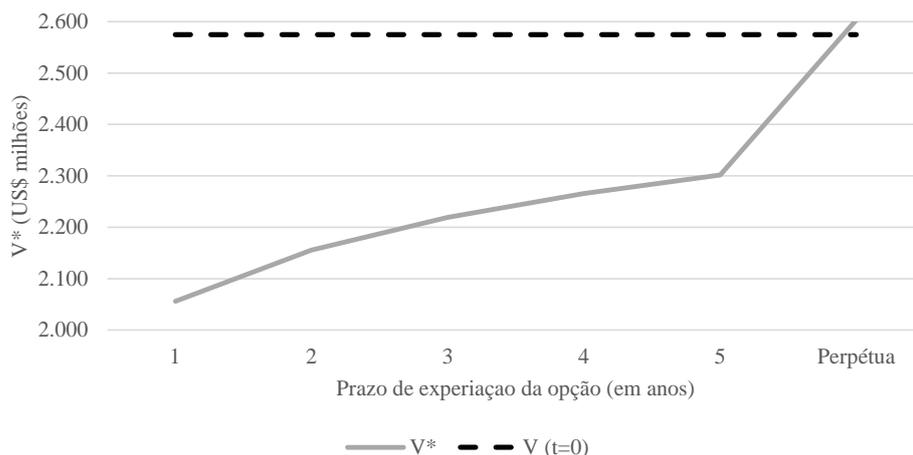


Figura 13 – Valor do gatilho para o caso do investimento incremental.

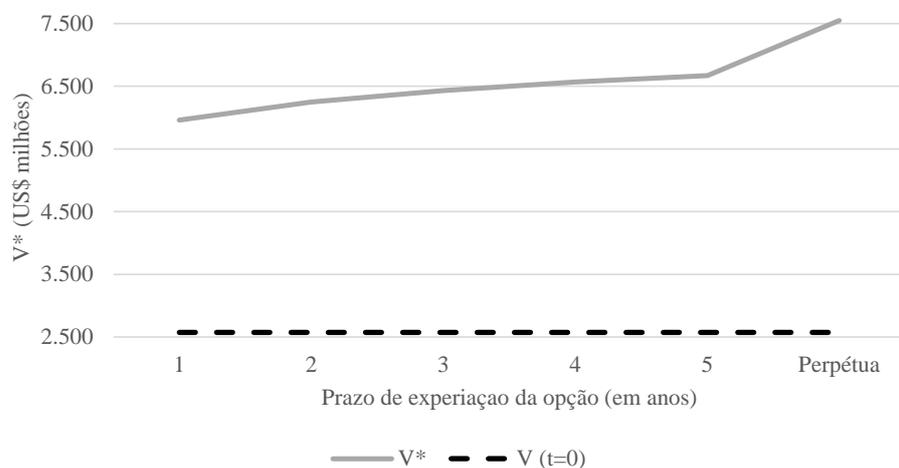


Figura 14 – Valor do gatilho para o caso investimento completo.

Quando se considera o investimento incremental, o valor gerado pelo projeto é aproximadamente 1,5 vezes o valor do investimento, o que reduz a probabilidade de perda em cenários adversos. A taxa de conveniência do projeto ($\delta = 4,24\% a.a.$), que representa o valor obtido ao se fazer o investimento e receber o fluxo de caixa do projeto é maior do que a taxa livre de risco ($r = 4\%$

a.a.), que representa o rendimento que seria recebido se o projeto não fosse feito. Por fim, a volatilidade do projeto não é muito alta ($\sigma = 13,02\% a.a.$), o que reduz o nível de incerteza associada ao fluxo de caixa do investimento. Sendo assim, estes três fatores podem ser entendidos como a razão para não haver valor na espera se a opção de investir expirar em até 5 anos. No caso da opção perpétua, apesar dos fatores destacados anteriormente quanto maior o prazo até a expiração, maior a possibilidade de variação no valor do projeto, por tanto maior o valor da opção e do gatilho.

Para o caso em que o investimento também é considerado estocástico, a proporção V/I do projeto em $t = 0$ é igual a 1,5 se considerado apenas o investimento remanescente para conclusão do projeto e 0,5 se considerado o investimento total para uma nova refinaria.

Neste trabalho, como aproximação do valor da correlação entre V e I é utilizada a correlação entre o preço das ações de uma empresa de refino nos Estados Unidos (NASDAQ, 2018), como *proxi* dos valores de V , e os dados da taxa de câmbio real/dólar, como *proxi* do valor de I . A correlação entre V e I foi estimada em -0,67.

Neste caso, se considerado apenas o investimento incremental, a melhor decisão é postergar o investimento se o prazo de expiração da opção for superior a 2 anos, considerando que para prazos de expiração acima de três anos o valor crítico v^* é superior a 1,50, valor correspondente à razão V/I calculada para $t=0$. A recomendação de postergar o investimento se mantém quando considerado o investimento completo, independente do prazo de expiração da opção, como pode ser visto na Tabela 5:

Tabela 5 - Resultado da opção de espera considerando o investimento estocástico (em milhões de dólares).

Prazo de expiração da opção (em anos)	Valor crítico – v^*
1	1,37
2	1,47
3	1,53
4	1,57
5	1,60
Perpétua	1,90

A correlação negativa encontrada entre V e I aumenta a volatilidade total do projeto, fazendo com que seja melhor postergar a aplicação de capital em casos que era indicado investir imediatamente, quando desconsiderada a característica estocástica de I .

4.5

Valor da opção de parada temporária

Para cálculo do valor da opção de parada temporária foi calculado o valor presente esperado do fluxo de caixa de operação da refinaria e o valor esperado do fluxo de caixa ótimo, conforme definido na seção 3.4.2. Foi considerado um fluxo de caixa trimestral com 100 períodos, com a opção de parada podendo ser exercida a cada trimestre.

O valor presente do fluxo de caixa da operação é o valor presente dos fluxos de caixa do projeto sem flexibilidade, que é de US\$ 2.575 milhões de dólares.

A mudança do estado de operação para o estado de parada, implica incorrer no custo com hibernação das unidades, que é que é igual a 22 milhões de reais/ano. Para o cálculo do fluxo de caixa de hibernação somam-se ainda os custos fixos, que totalizam R\$ 660 milhões por ano. Assim, sempre que o fluxo de caixa da operação for menor do que R\$ 682 milhões negativos por ano, será exercida a opção de parada temporária. No entanto, se o fluxo de caixa da operação for negativo, mas maior do que R\$ 682 milhões negativos por ano, é melhor manter a planta operando, mesmo que com resultado negativo.

Considerando este custo de hibernação, é calculado o fluxo de caixa ótimo, derivado da escolha entre operar ou hibernar a unidade. Assim como para o cálculo do fluxo de caixa da operação, o fluxo de caixa ótimo também foi gerado partir da simulação dos processos estocásticos (*crack spread* e câmbio) em todos os anos, através da equação de discretização do processo estocástico (equações (18) e (28)), com apoio da simulação de Monte Carlo. Foram geradas 10.000 iterações utilizando o software @Risk. O resultado pode ser visto na Figura 15:

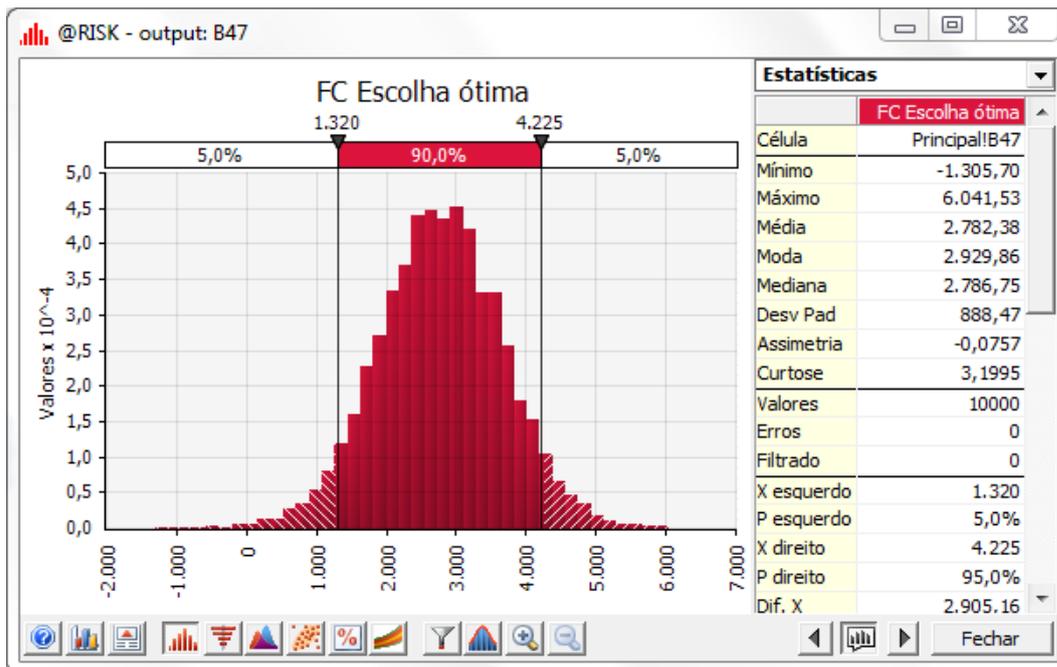


Figura 15 - Distribuição de probabilidade do Fluxo de Caixa Ótimo (em milhões de dólares).

O valor presente esperado para o fluxo de caixa ótimo é de US\$ 2.782, como pode ser visto na Figura 15, o que quer dizer que a opção de parada acrescenta 207 milhões de dólares de valor, conforme equação (61):

$$E(FC_{\text{ótimo}}) - E(FC_{\text{operação}}) = 2.782 - 2.575 = 207 \quad (61)$$

Apesar de em alguns anos o fluxo de caixa da operação ser negativo, o que faz com que a opção de parada temporária acrescente valor, acontecem poucos cenários (0,3%) em que o valor presente dos 25 anos seja negativo, com pode ser visto na Figura 12. Em consequência, o valor gerado pela opção de parada temporária não é alto, aproximadamente 8% do valor do fluxo de caixa da operação.

Por fim, analisa-se como a opção de parada temporária impacta a opção de postergação do projeto. Os novos parâmetros estimados para o projeto, considerando a opção de parada temporária foram $\delta = 3,99\%$ a.a. e $\sigma = 6,13\%$ a.a., ou seja, a opção de parada temporária reduz a volatilidade do projeto.

Com estes novos parâmetros, a opção de espera, para o caso do investimento incremental, não tem mais valor. Conforme apresentado no item 3.4,

para o caso do investimento incremental, a opção de espera só tinha valor quando perpétua e ao incorporar a flexibilidade de parada temporária é recomendado investir imediatamente, independente do prazo de expiração da opção. Já para o caso da realização do investimento completo para uma nova refinaria, apesar da opção de postergação ter seu valor reduzido, a decisão ainda é de postergar a aplicação de capital. Neste caso, a opção perpétua valia 114 milhões de dólares e ao incluir a opção de parada temporária, o valor reduz para 14 milhões de dólares.

4.6

Análise de sensibilidade

4.6.1

Opção de postergação do investimento

Para a análise de postergação do investimento é interessante sensibilizar os parâmetros de taxa de conveniência do projeto (δ) e volatilidade (σ). Estes parâmetros serão sensibilizados para o caso que se analisa o investimento incremental. Para o caso que se analisa o investimento completo o valor do investimento é sensibilizado.

A taxa de conveniência é sensibilizada para os valores de 2%, 3% e 5% com todo o resto mantido constante. Os valores foram escolhidos com objetivo de apresentar resultados com valores superiores e inferiores ao apresentado no caso base, exposto no item 3.4. O resultado do valor crítico V^* para cada cenário de taxa de conveniência e para diferentes prazos de expiração pode ser visto na Tabela 6:

Tabela 6 - Impacto da taxa de conveniência no valor crítico do projeto (em milhões de dólares).

Prazo de expiração da opção (em anos)	Taxa de conveniência (a.a.)		
	2%	3%	5%
1	3.632	2.570	2.025
2	3.717	2.670	2.104
3	3.779	2.738	2.151
4	3.830	2.791	2.184
5	3.874	2.834	2.209
Perpétua	4.572	3.283	2.386

A Figura 16, consolida graficamente os resultados, comparando com os resultados do valor do projeto sem flexibilidade ($V(t=0)$):

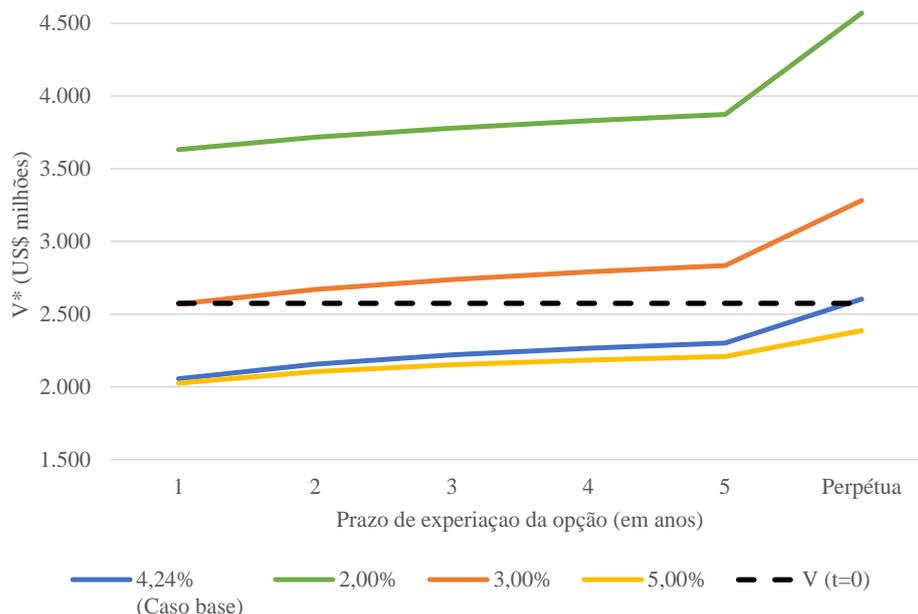


Figura 16 - Impacto da taxa de conveniência no valor crítico do projeto (em milhões de dólares).

Independente do prazo de expiração da opção, o aumento da taxa de conveniência para 5% a.a. faz com que a melhor decisão seja investir imediatamente e a redução para 2% a.a. indica a postergação da aplicação de capital.

Quando a taxa de conveniência é reduzida para 3% a.a., se a opção expirar em 1 ano a melhor decisão é investir imediatamente e para os outros prazos de expiração a recomendação é postergar o investimento.

A volatilidade também é sensibilizada para valores maiores e menores do que o caso base apresentado no item 3.4, assumindo $\sigma = 8\%$, 20% e 35% , com todo o resto mantido constante. O resultado do valor crítico V^* do projeto para os diferentes cenários de volatilidade é apresentado na Tabela 7:

Tabela 7 - Impacto da volatilidade no valor crítico do projeto (em milhões de dólares).

Prazo de expiração da opção (em anos)	Volatilidade (a.a.)		
	8,0%	20,0%	35,0%
1	1.915	2.260	2.720
2	1.971	2.426	3.049
3	2.006	2.535	3.271
4	2.031	2.616	3.440
5	2.050	2.679	3.578
Perpétua	2.194	3.288	5.264

A Figura 17, consolida graficamente os resultados:

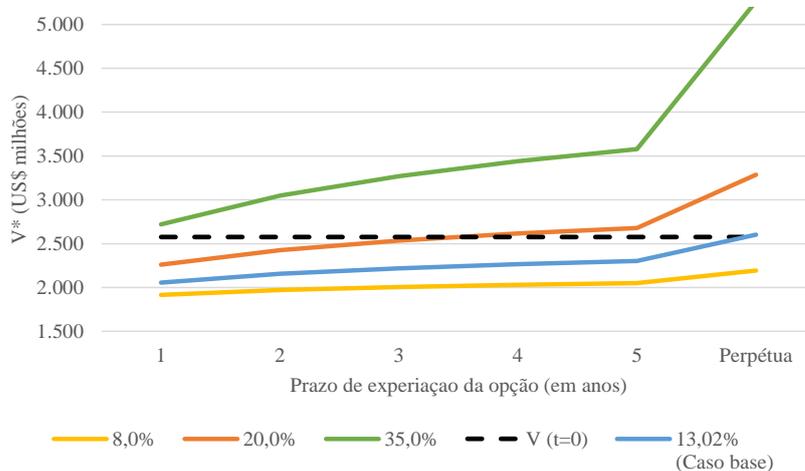


Figura 17 - Impacto da volatilidade no valor crítico do projeto (em milhões de dólares).

Independente do prazo de expiração, quando a volatilidade é reduzida para 8% a.a. a melhor decisão é investir imediatamente e quando ela é ampliada para 35% a.a. é recomendada a postergação da decisão de investimento. Quando a volatilidade é de 20% a.a., se o prazo de expiração for até 3 anos recomenda-se investir imediatamente e se o prazo da opção for superior deve-se postergar o investimento.

Para o caso de uma nova refinaria, incluindo todo o investimento necessário e não apenas o investimento remanescente, a melhor escolha é postergar a aplicação de capital independente do prazo de expiração da opção, conforme apresentado no item 3.4. O valor do gatilho é entre duas e três vezes maior do que valor gerado pelo projeto, por isso o que será sensibilizado é o valor do

investimento. Além disso, o investimento de 4.950 milhões de dólares não apresenta VPL positivo em nenhum caso simulado. É proposta a análise de $I = 3.500$, 3.000 e 2.500 milhões de dólares, sendo que para o último caso, VPL do projeto se torna positivo, sendo recomendada a realização do projeto pela análise tradicional do fluxo de caixa descontado. Os resultados podem ser vistos na tabela abaixo:

Tabela 8 - Impacto da redução do investimento no valor crítico do projeto de uma nova refinaria (em milhões de dólares).

Prazo de expiração da opção (em anos)	Investimento (em milhões de dólares)		
	3.500	3.000	2.500
1	4.213	3.611	3.009
2	4.418	3.787	3.155
3	4.548	3.898	3.249
4	4.643	3.980	3.316
5	4.717	4.043	3.369
Perpétua	5.336	4.573	3.811

A Figura 18, consolida graficamente os resultados:

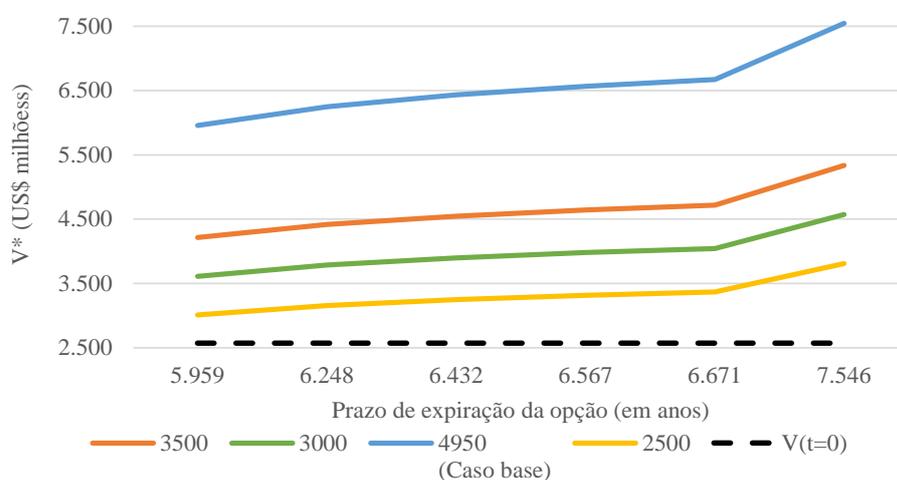


Figura 18 - Impacto da redução do investimento no valor crítico do projeto de uma nova refinaria (em milhões de dólares).

A análise da Figura 18 indica que a melhor decisão é postergar a realização do investimento, em todos os casos analisados. Quando se considera o investimento igual a 2.500 milhões de dólares, pela análise tradicional do fluxo de

caixa descontado, a indicação é realizar o investimento ($VPL = 2.575 - 2.500 = +75$), já a teoria de opções reais recomenda a postergação do projeto.

Para o caso em que o investimento também é considerado estocástico, foi sensibilizado o valor da correlação entre V e I , testando valores de $\rho = -30\%$ e -80% . Os resultados encontrados alteram a decisão de investimento, conforme o prazo de expiração da opção, para o investimento remanescente ($V/I = 1,5$), mas mantém a decisão de postergação do projeto no caso do investimento completo ($V/I = 0,5$), independente do cenário analisado. Os resultados podem ser vistos na Tabela 9 a seguir:

Tabela 9 - Impacto da alteração da correlação entre V e I .

Prazo de expiração da opção (em anos)	Valor crítico - v^*	
	$\rho = -30\%$	$\rho = -80\%$
1	1,32	1,40
2	1,40	1,50
3	1,45	1,56
4	1,48	1,60
5	1,50	1,64
Perpétua	1,70	2,00

4.6.2

Opção de parada temporária

A decisão de operar ou não a refinaria é influenciada pelo custo de hibernação das unidades, por isso foram geradas sensibilidades para este custo, alterando-o de 22 milhões de reais por ano para 5, 11 e 44 milhões de reais por ano. Seguindo o mesmo racional para o caso do custo de hibernação de 22 milhões reais por ano, calcula-se o resultado do fluxo de caixa ótimo para os outros valores do custo de hibernação. O resultado pode ser visto na Tabela 10:

Tabela 10 - Valor da opção de parada temporária para diferentes custos de hibernação.

	Custo de hibernação (em milhões de dólares)		
	5	11	44
FC _{ótimo} (em milhões de dólares)	2.789	2.788	2.769
Valor da opção (em milhões de dólares)	214	213	194

A análise da tabela indica que, quanto maior o custo de hibernação, menor o valor da opção, o que é esperado. Quanto maior o custo para alternar entre o estado de operação e o estado de parada, menor o valor da opção.

É interessante notar que a variação do custo de hibernação gera ganhos modestos no resultado do fluxo de caixa ótimo e, conseqüentemente, no valor da opção. Isto acontece porque apesar de em alguns anos o fluxo de caixa da operação ser negativo acontecem poucos cenários em que o valor presente dos 25 anos seja negativo (ver Figura 12).

5

Conclusão

Este trabalho apresentou uma aplicação prática da teoria de opções reais, analisando a implantação de uma refinaria no Brasil. Para isto, utilizou-se como referência o preço do petróleo e dos derivados no mercado americano (mercado de referência para formação de preços no Brasil), ajustando o cálculo do *crack spread*, como forma de melhor adequá-lo à realidade do refino no Brasil.

A análise de investimento de uma refinaria de petróleo precisa levar em consideração as principais incertezas e flexibilidades associadas ao projeto. Dentre as possíveis flexibilidades, a opção de postergação do investimento é de grande relevância no Brasil, tendo em vista projetos de refino atualmente em estado de paralização de obras. Além disso, a opção de parada temporária também pode ser incorporada considerando a alternativa de exportação de petróleo.

O *crack spread* é a principal incerteza do fluxo de caixa de uma refinaria, tendo sido melhor ajustado por um modelo de reversão à média em comparação com o movimento aritmético browniano. Para a análise de uma refinaria no Brasil, é importante considerar o câmbio como incerteza, sendo que o movimento geométrico browniano apresenta bom ajuste para sua modelagem.

A opção de postergação foi avaliada através do método dos ativos contingentes utilizando a proposição de Copeland e Antikarov (2002) modificado para estimar os parâmetros do processo estocástico do valor do projeto. Foi utilizado o método clássico para valorar uma opção real de espera perpétua a partir da EDP clássica de Black e Scholes (1973). Para a opção com prazo de expiração, utilizou-se a aproximação desenvolvida por Bjerksund e Stensland (1993). A análise considerou o investimento remanescente necessário para completar a refinaria, mas também o investimento total que seria necessário caso o projeto ainda não tivesse sido iniciado.

O valor presente encontrado para os fluxos de caixa é de US\$ 2.575 milhões, de modo que subtraindo o valor do investimento remanescente, o VPL sem flexibilidade é de US\$ 867 milhões. Já para o caso que se considera todo o

investimento necessário para uma nova refinaria o VPL é negativo em US\$ 2.375 milhões.

Considerando apenas o investimento remanescente para completar 15% do projeto da refinaria, a melhor decisão é investir imediatamente se a opção expirar em até 5 anos e postergar o investimento, caso a opção seja perpétua, indicação que contrasta com a indicação da análise tradicional do VPL. Vale destacar que apesar da indicação se postergação do projeto, o valor da opção é baixo (0,3 milhões de dólares).

Para uma taxa de conveniência do projeto de 2% a.a., a postergação passa a ser recomendada independente do prazo de expiração da opção. Por outro lado, ao aumentá-la para 5% a.a., a melhor decisão é investir imediatamente, independente do prazo de expiração da opção. Já a volatilidade, quando reduzida para 8% a.a. faz com que a melhor escolha seja investir imediatamente, independe do prazo de expiração da opção. Por outro lado, quando se sensibiliza valores maiores para a volatilidade, da ordem de $\sigma = 35\%$, recomenda-se a postergação do investimento independente do prazo de expiração da opção.

Quando se considera que o investimento também é estocástico, a volatilidade do projeto aumenta e a decisão de aplicação de capital, para o caso que se considera o investimento incremental de 15% é alterada. É indicada a postergação do projeto caso o prazo de expiração da opção seja superior a 2 anos.

Sendo assim, para o investimento remanescente, considerando todas as análises e sensibilidades realizadas é indicada a postergação do projeto, caso a opção de investimento seja perpétua, uma vez que esta opção apresentou valor, ainda que pequeno, na maioria dos casos analisados. Por outro lado, se a opção expirar em um ano, a maioria dos casos analisados recomendam que o investimento seja feito imediatamente.

Para o caso em que se considera o investimento completo para uma nova refinaria, a melhor decisão é postergar o investimento independente do cenário analisado. Neste caso, sensibilizou-se a redução do valor do investimento e em todos os casos analisados, a melhor decisão é postergar a aplicação do capital.

A opção de parada temporária também foi analisada, considerando a mudança de estado entre operar e não operar a refinaria e um custo associado a mudança de estado, representado pelo custo de hibernação das unidades. Em todos os cenários analisados a opção de parada temporária acrescenta valor ao resultado

da refinaria. A interação entre a opção de parada temporária e de espera também foi calculada, sendo que a espera perde valor quando a flexibilidade de parada é incluída no fluxo de caixa da refinaria.

Como trabalhos futuros sugere-se a modelagem de dados de preço do próprio mercado brasileiro. Além disso, existem outras extensões que podem ser aplicadas, destacando-se o cálculo da opção de *switch input – output*, em especial no que se refere a possibilidade de diferentes tipos de petróleo como *inputs*. Em relação a incertezas nos custos, o tratamento do preço do gás natural como uma variável estocástica pode impactar no cálculo do valor das opções do projeto. Em relação à modelagem do *crack spread*, um possível aperfeiçoamento é utilizar modelos de reversão à média de dois ou três fatores ou incluir saltos no modelo.

Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. **Seminário de Avaliação de Combustíveis**. 2018. Disponível em: http://www.anp.gov.br/images/Palestras/seminario_avaliacao_2018.pdf. Acessado em 3/6/2018.

AIUBE, F.A.L. **Modelos quantitativos em finanças: com enfoque em commodities**. Porto Alegre: Bookman, 438 p, 2013.

AZEVEDO, T.C.; AIUBE, F.L.; SAMANEZ, C.P.; BISSO, C.S.; COSTA, L.A. **The behavior of West Texas Intermediate crude-oil and refined products prices volatility before and after 2008 financial crises: an approach through analysis of future contracts**. Revista Chilena de Ingeniería, v. 23, n. 3, p. 395-405, 2015.

BJERKSUND, P.; STENSLAND, G. **Closed form approximation of american options**. Scandinavian Journal of Management, v. 9, p. 87-89, 1993.

BLACK, F.; SCHOLES, M. **The pricing of options and corporate liabilities**. Journal of Political Economy, v. 81, n. 3, p. 637-654, mai/jun 1973.

BRANDAO, L.E.; DYER, J.S.; HAHN, W.J. **Using Binomial Decision Trees to Solve Real-Option Valuation Problems**. Decision Analysis, vol. 2, n. 2, p. 69-88, jun 2005.

_____. **Response to Comments on Brandão et. al. 2005**. Decision Analysis, v. 2, n. 2, 103-109, jun 2005.

BUREAU OF LABOR STATISTICS. 2018. Disponível em <https://www.bls.gov/cpi/tables/supplemental-files/historical-cpi-u-201802.pdf>. Acessado em 20/02/2018.

CLEWS, R. **Project finance for the international petroleum industry**. San Diego: Elsevier, 416p, 2016.

COPELAND, T.; ANTIKAROV, V. **Opções reais: um novo paradigma para reinventar a avaliação de investimentos**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 368p, 2002.

COSTA L.A.A.; SAMANEZ C.P. **Análise e avaliação de flexibilidades input output em projetos de plantas na indústria do petróleo: uma aplicação da teoria das opções reais e da simulação estocástica**. GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas, n. 2, p. 63-78, abr/jun 2009.

DIAS, M.A.G; ROCHA, K.M.C. **Petroleum concessions with extendible options using mean reversion with jumps to model oil prices**. 3ª Internacional

Conference on Real Options, Holanda, jun/1999. Disponível em: <http://realoptions.org/papers1999/MarcoKatia.pdf>. Acessado em 30/06/2018.

DIAS, M.A.G. **Valuation of exploration and production assets: an overview of real options models**. Journal of Petroleum Science and Engineering, n. 44, p. 93-114, 2004.

_____. **Notas de Aula**, disponível em http://marcoagd.usuarios.rdc.puc-rio.br/pdf/or_ind2072_parte_5.pdf. Pontifícia Universidade Católica Rio de Janeiro, 2006. Acessado em: 26/06/2018.

_____. **Timing**. Disponível em: <http://marcoagd.usuarios.rdc.puc-rio.br/timing.html>. Acessado em 17/06/2018.

_____. **Análise de investimento com opções reais: teoria e prática com aplicações em petróleo e outros setores**. Rio de Janeiro: Interciência, v. 1, 358p, 2014.

_____. **Análise de investimento com opções reais: teoria e prática com aplicações em petróleo e outros setores**. Rio de Janeiro: Interciência, v. 2, 478p, 2015.

DEMPSTER, M.A.H.; MEDOVA, E.; TANG, K. **Long term spread option valuation and hedging**. Journal of banking & finance, n. 32, p. 2350-2540, 2008.

DICKEY, D.A.; FULLER, W. **Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root**. Journal of the American Statistical Association, n. 74, p. 427-431, 1979.

DIXIT, A.K.; PINDYCK, R.S. **Investment under uncertainty**. Princeton: Princeton University Press, 468p, 1994.

DUNNE, T.; MU, X. **Investment spikes under uncertainty in the petroleum refining industry**. The journal of industrial economics, n. 1, v. LVIII, p. 190-213, mar/2010.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). **Petroleum supply annual**. 2017. v. 1. Disponível em: <https://www.eia.gov/petroleum/supply/annual/volume1/>. Acessado em: 3/6/2018.

_____. 2018. Disponível em: http://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_fut_s1_d.htm. Acessado em: 20/03/2018

FONSECA, D.A.D. **Avaliação de projetos de investimento com opções reais: cálculo de valor de opção de espera de uma unidade separadora de propeno**. Tese de Mestrado. Escola de pós-graduação em economia empresarial, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 86p, 2008.

GUJARATI, D.N; PORTER, D.C. **Econometria básica**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 920p, 2011.

HEYDARI, S.; SIDDIQUI, A. **Valuing a gas-fired power plant: A comparison of ordinary linear models, regime-switching approaches, and models with stochastic volatility**. Energy Economics, n. 32, p. 709-725, 2010.

IMAI, J.; NAKAJIMA, M. **A Real options analysis of an oil refinery project.** Financial Practice and Education, Fall/ Winter, p. 78-91, 2000.

IPEA DATA. **Taxa de câmbio dólar-real.** 2018. Disponível em: <http://ipeadata.gov.br/Default.aspx>. Acessado em 06/04/2018.

_____. **Emerging Markets Bond Index Plus.** 2018. Disponível em: <http://ipeadata.gov.br/Default.aspx>. Acessado em 11/07/2018.

IBGE. **Índice de preços ao consumidor.** 2018. Disponível em https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/inpc_ipca/defaultseriesHist.shtm Acessado em 06/04/2018.

KEMNA, A.G.Z. **Case Studies on real options.** Financial Management, p. 259-270, Autumn/1993.

KIM, J.M.A. **The analytic valuation of american options.** Review of financial studies, vol. 3, n. 4, p. 547-572, 1990.

KULATILAKA, N.; TRIGEORGIS, L. **The general flexibility to switch: real option revisited.** The international journal of finance, v. 6, n. 2, p. 778-798, Winter/1994.

MCDONALD, R.L.; SIGEL, D.R. **Investment and the valuation of firms when there is an option to shut down.** International Economics Review, v. 26, n. 2, p. 331-349, jun/1985.

_____. **The value of waiting to invest.** The Quarterly Journal of Economics, v. 101, n. 4, p. 707-727, 1986.

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

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Relatório Mensal do Mercado de Derivados de Petróleo.** 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveis-renovaveis/publicacoes/relatorio-mensal-do-mercado-de-derivados-de-petroleo/2018>. Acessado em: 05/06/2018.

NASDAQ. **Preço das ações da Valero.** 2018. Disponível em <https://www.nasdaq.com/symbol/vlo/historical>. Acessado em 25/07/2018.

O'DRISCOLL, P. **A study in the financial valuation of a topping oil refinery.** Tese PhD. Birkbeck College, University of London, Londres, 323p, 2016.

OLIVEIRA, C.A. **Investment and exchange rate uncertainty under different regimes.** Estudos Econômicos, v. 44, n. 3, p. 553-577, jul – set/2014.

PINDYCK, R.S. **The long-run evolution of energy prices.** The Energy Journal, v. 20, n. 2, p. 1-27, 1999.

_____. **The dynamics of commodities spot and future markets: a primer.** The Energy Journal, vol. 22, n. 3, p. 1-29, 2001.

POBLACIÓN, J.; SERNA, G. **Is the refining margin stationary?.** International Review of Economics and Finance, v. 44, p. 169-186, 2016.

SAMUELSON, P.A. **Proof that properly anticipated prices fluctuate randomly.** Industrial Management Review, p. 41-49, Spring/1965.

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

SHARMA P.; ROMAGNOLIA J.A.; VLOSKYB R. **Options analysis for long-term capacity design and operation of a lignocellulosic biomass refinery.** Computers and Chemical Engineering, v. 58, p. 178-202, 2013.

SMITH, J.E. **Alternative Approaches for Solving Real Options Problems: A Comment on Brandao et. al.** Decision Analysis, v. 2, n. 2, p. 89-102, 2005.

TELES, V.K. **Choques cambiais, política monetária e equilíbrio externo da economia brasileira em um ambiente de *hysteresis*.** Economia Aplicada, v. 9, p. 415-426, jul – set/2005.

TITMAN, S.; MARTIN, J.D. **Avaliação de projetos e investimentos: valuation.** Porto Alegre: Bookam, 584p, 2010.

TREASURY. **Daily treasury real yield curve rates.** 2018. Disponível em <https://www.treasury.gov/resource-center/data-chart-center/interest-rates/Pages/TextView.aspx?data=realyieldYear&year=2018>. Acessado em 19/06/2018.

TRIGEORGIS, L. **The nature of option interactions and the valuation of investments with multiple real options.** Journal of Finance and Quantitive Analysis, v. 28, n. 1, p. 1-20, mar/1993.

VIANELLO, J.M.; TEIXEIRA J.P. **Valoração de opções reais híbridas em projetos modularizados: uma metodologia robusta para investimentos governamentais e privados.** Revista Pensamento Contemporâneo em Administração, v. 6, n. 2, p. 103-129, abr-jun/2012.

VIANELLO, J.M.; COSTA, L.; TEIXEIRA, J.P. **Dynamic modeling of uncertainty in the planned values of investments in petrochemical and refining projects.** Energy Economics, v. 45, p. 10-18, 2014.

YI, C. **Real and contractual hedge in the refinery industry.** Tese de Doutorado. School of Management, Boston University, Boston, 122p, 1997.