**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

IGOR GIMENES CESCA

**TOMADA DE DECISÃO NO SETOR SUCROENERGÉTICO: UMA ABORDAGEM
BASEADA EM OPÇÕES REAIS**

**SÃO PAULO
2019**

IGOR GIMENES CESCA

**TOMADA DE DECISÃO NO SETOR SUCROENERGÉTICO: UMA
ABORDAGEM BASEADA EM OPÇÕES REAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia
do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Energia

Orientadora: Profa. Dra. Virginia Parente

Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Antonio Slaibe Postali

Versão corrigida

São Paulo
2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Cesca, Igor Gimenes.

Tomada de decisão no setor sucroenergético: uma abordagem baseada em opções reais. / Igor Gimenes Cesca; orientadora: Virginia Parente; co-orientador: Fernando Antonio Slaibe Postali. – São Paulo, 2019.

143 f.: il; 30 cm.

Tese (Doutorado em Ciência) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Etanol. 2. Cana-de-açúcar. 3. Método de Monte Carlo. 4. Biocombustível. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

FOLHA DE AVALIAÇÃO

NOME: CESCA, Igor Gimenes

TÍTULO: Tomada de decisão no setor sucroenergético: uma abordagem baseada em opções reais

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo apoio constante.

Em especial, agradeço a minha esposa Mariana que dividiu comigo todos os momentos durante essa jornada.

Aos meus orientadores Virginia Parente e Fernando Antonio Slaibe Postali. Sem os ensinamentos, disponibilidade e ajuda prestada por vocês, nada disso teria sido possível.

Aos professores e colegas do IEE/USP, por todas as aulas e conversas sobre energia, as quais trouxeram muito aprendizado e ideias para esta tese.

E a todos que me ajudaram ao longo desses quatro anos como aluno de doutorado. Afinal, por mais que seja de minha autoria, essa tese é o somatório de todas as contribuições que tive nesse período.

RESUMO

CESCA, Igor Gimenes. **Tomada de decisão no setor sucroenergético: uma abordagem baseada em opções reais**. 2019. 149 p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

O objetivo desta tese de doutorado foi investigar o efeito da flexibilidade na tomada de decisão em uma usina sucroenergética, sob a abordagem da teoria de Opções Reais com simulação de Monte Carlo. Para isso, partiu-se de uma análise econométrica das séries de tempo dos preços do etanol hidratado, da gasolina veicular e do açúcar VHP (*Very High Polarized*). Dessa análise foi possível verificar que as séries de preços do etanol e do açúcar são modeladas pelo movimento de reversão à média. Além disso, constatou-se que no curto prazo ocorreu uma transmissão de preços do açúcar e da gasolina para o preço do etanol. Por outro lado, a série de preços do açúcar não foi influenciada pelas demais e a da gasolina não foi influenciada pela do açúcar e muito pouco pela do etanol. Nesse sentido, percebe-se que não houve uma interdependência simultânea entre os preços desses três produtos. Adicionalmente, para o restante da análise, foi considerada uma usina fictícia com a hipótese de contar com a flexibilidade para escolher a proporção a ser produzida entre açúcar e etanol, definida como opção de conversão e também com a opção de parada temporária, com a qual é possível interromper a produção na usina, a fim de reduzir perdas caso os custos de produção ultrapassassem os preços do produto a ser vendido. Sob tais hipóteses, buscou-se quantificar o efeito marginal das contribuições das flexibilidades gerenciais na tomada de decisão em investimentos sucroenergéticos. Pelos resultados encontrados, a tomada de decisão que leva em conta as flexibilidades identificadas consegue aumentar em até 88,14% o valor esperado do VPL de uma usina sucroenergética e reduzir o risco de o VPL ser negativo. Assim, esse trabalho propõe que as flexibilidades gerenciais trazem maiores retornos para usinas sucroenergéticas. Não só, mas também, essas flexibilidades mitigam os efeitos de crises no setor.

Palavras-chaves: Cana-de-açúcar. Etanol. Método de Monte Carlo. Opções Reais.

ABSTRACT

CESCA, Igor Gimenes. **Decision-making in the sugar-energy sector: an approach based on real options**. 2019. 149 p. PhD Thesis, Energy Graduate Program at Institute of Energy and Environment, University of São Paulo, São Paulo, 2019.

The goal of this PhD Thesis was to investigate the effect of flexibility in decision making in a sugar cane plant under the Real Options theory with Monte Carlo simulation approach. For this, we started with an econometric analysis of the time series of the prices of hydrous ethanol, vehicular gasoline and VHP (Very High Polarized) sugar. From this analysis it was possible to verify that the ethanol and sugar price series are modeled by the mean reversion movement. In addition, it was found that in the short-term sugar and gasoline prices were transmitted to the price of ethanol. On the other hand, the series of sugar prices was not influenced by the others and that of gasoline was not influenced by sugar and very little by ethanol. In this sense, it can be seen that there was no simultaneous interdependence between the prices of these three products. In addition, for the rest of the analysis, it was considered a fictitious plant with the hypothesis of switch output option and also with the temporary shutdown option. Under these hypotheses, we sought to quantify the marginal effect of the contributions of managerial flexibilities in decision-making on sugar cane investments. Based on the results obtained, decision-making that considers flexibilities can increase the expected value of NPV of a sugar cane plant by up to 88.14% and reduce the risk of NPV being negative. Thus, this work proposes that managerial flexibilities bring greater returns to sugarcane plants. Not only that, but also, these flexibilities mitigate the effects of crises in the sector.

Key-words: Ethanol. Monte Carlo Method. Real Options. Sugar cane.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PRODUÇÃO DE ETANOL ENTRE 1970 E 2000.....	33
FIGURA 2 – PORCENTAGEM NAS VENDAS DE VEÍCULOS.....	34
FIGURA 3 – COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	35
FIGURA 4 – PREÇO REAL DE COMBUSTÍVEIS VEICULARES AJUSTADO COM IPCA.....	37
FIGURA 5 – CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS VEICULARES	38
FIGURA 6 – PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL NO SÉCULO XXI.....	39
FIGURA 7 – POTENCIAL DE COMPLEMENTARIEDADE DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO EM RELAÇÃO À HIDRELETRICIDADE PARA A SAFRA DE 2015/2016 E 2016/2017.....	46
FIGURA 8 – MÉTODOS DE SOLUÇÃO PARA OPÇÕES REAIS.....	52
FIGURA 9 – ÁRVORE BINOMIAL COM DOIS PERÍODOS	53
FIGURA 10 – SÉRIES TEMPORAIS DE ETANOL, GASOLINA E AÇÚCAR.	62
FIGURA 11 – COMPARAÇÃO DAS EQUAÇÕES (4.6) E (4.10).....	69
FIGURA 12 – REGRESSÃO DE $\ln P_t - \ln P_{t-1}$ POR $\ln P_{t-1}$ PARA SÉRIE DO ETANOL	71
FIGURA 13 – REGRESSÃO DE $\ln P_t - \ln P_{t-1}$ POR $\ln P_{t-1}$ PARA SÉRIE DO AÇÚCAR.....	71
FIGURA 14 – FUNÇÃO IMPULSO-RESPOSTA PARA A SÉRIE DE PREÇOS DA GASOLINA	79
FIGURA 15 – FUNÇÃO IMPULSO-RESPOSTA PARA A SÉRIE DE PREÇOS DO AÇÚCAR.....	81
FIGURA 16 – FUNÇÃO IMPULSO-RESPOSTA PARA A SÉRIE DE PREÇOS DO ETANOL	82
FIGURA 17 – SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO EM ETAPAS NO SIMULADOR	96
FIGURA 18 – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE NO CASO INICIAL.....	99
FIGURA 19 – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DAS <i>OPÇÕES DE CONVERSÃO E PARADA</i> <i>TEMPORÁRIA</i> CONJUNTAS.....	101
FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE SEM E COM OPÇÕES REAIS	102

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CONSUMO FINAL ENERGÉTICO POR FONTE EM 2017	29
TABELA 2 – RESUMOS DAS PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES DE OR NO SUCROENERGÉTICO	60
TABELA 3 – RESUMO ESTATÍSTICO DAS SÉRIES TEMPORAIS	63
TABELA 4 – RESULTADOS DO TESTE DE NG-PERRON PARA AS SÉRIES TEMPORAIS	67
TABELA 5 – RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS POR MRM.....	72
TABELA 6 – VALORES DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO DAS SÉRIES DE PREÇO.....	72
TABELA 7 – RESULTADO DOS CRITÉRIOS DE INFORMAÇÃO	77
TABELA 8 – ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DO MODELO VAR	78
TABELA 9 – DECOMPOSIÇÃO DA VARIÂNCIA DA SÉRIE DE PREÇOS DA GASOLINA	79
TABELA 10 – DECOMPOSIÇÃO DA VARIÂNCIA DA SÉRIE DE PREÇOS DO AÇÚCAR	81
TABELA 11 – DECOMPOSIÇÃO DA VARIÂNCIA DA SÉRIE DE PREÇOS DO ETANOL.....	83
TABELA 12 – RESUMO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS NA AVALIAÇÃO POR OR	103
TABELA 13 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO <i>MIX</i> DE PRODUÇÃO NO CASO INICIAL.....	104
TABELA 14 – FATOR MULTIPLICATIVO NA <i>OPÇÃO DE PARADA TEMPORÁRIA</i>	105
TABELA 15 – FATOR MULTIPLICATIVO NA <i>OPÇÃO DE CONVERSÃO COM PARADA TEMPORÁRIA</i> .	105
TABELA 16 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO CUSTO FIXO PARA O CASO INICIAL	106
TABELA 17 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO CUSTO FIXO PARA A <i>OPÇÃO DE CONVERSÃO</i>	106
TABELA 18 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO CUSTO FIXO PARA A <i>OPÇÃO DE PARADA TEMPORÁRIA</i>	106
TABELA 19 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO CUSTO FIXO PARA A <i>OPÇÃO DE PARADA TEMPORÁRIA</i> <i>E CONVERSÃO</i>	107
TABELA 20 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO CUSTO POR TONELADA DE CANA-DE-AÇÚCAR PROCESSADA PARA O CASO INICIAL	107
TABELA 21 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO CUSTO POR TONELADA DE CANA-DE-AÇÚCAR PROCESSADA PARA A <i>OPÇÃO DE CONVERSÃO</i>	108

TABELA 22 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO CUSTO POR TONELADA DE CANA-DE-AÇÚCAR PROCESSADA PARA A <i>OPÇÃO DE PARADA TEMPORÁRIA</i>	108
TABELA 23 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO CUSTO POR TONELADA DE CANA-DE-AÇÚCAR PROCESSADA PARA A <i>OPÇÃO DE CONVERSÃO COM PARADA TEMPORÁRIA</i>	108
TABELA 24 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO FATOR DE CONVERSÃO PARA PRODUÇÃO DE ETANOL NO CASO INICIAL.....	109
TABELA 25 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO FATOR DE CONVERSÃO PARA PRODUÇÃO DE ETANOL NA <i>OPÇÃO DE CONVERSÃO</i>	109
TABELA 26 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO FATOR DE CONVERSÃO PARA PRODUÇÃO DE ETANOL NA <i>OPÇÃO DE PARADA TEMPORÁRIA</i>	110
TABELA 27 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO FATOR DE CONVERSÃO PARA PRODUÇÃO DE ETANOL NA <i>OPÇÃO DE CONVERSÃO COM PARADA TEMPORÁRIA</i>	110
TABELA 28 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO FATOR DE CONVERSÃO PARA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR NO CASO INICIAL.....	110
TABELA 29 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO FATOR DE CONVERSÃO PARA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR NA <i>OPÇÃO DE CONVERSÃO</i>	111
TABELA 30 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO FATOR DE CONVERSÃO PARA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR NA <i>OPÇÃO DE PARADA TEMPORÁRIA</i>	111
TABELA 31 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO FATOR DE CONVERSÃO PARA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR NA <i>OPÇÃO DE PARADA TEMPORÁRIA COM CONVERSÃO</i>	111
TABELA 32 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA TRIBUTAÇÃO PARA O CASO INICIAL	112
TABELA 33 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA TRIBUTAÇÃO PARA A <i>OPÇÃO DE CONVERSÃO</i>	112
TABELA 34 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA TRIBUTAÇÃO PARA A <i>OPÇÃO DE PARADA TEMPORÁRIA</i>	112
TABELA 35 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA TRIBUTAÇÃO PARA A <i>OPÇÃO DE CONVERSÃO COM PARADA TEMPORÁRIA</i>	113
TABELA 36 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA CORRELAÇÃO (ρ) PARA O CASO INICIAL.....	114
TABELA 37 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA CORRELAÇÃO (ρ) PARA A <i>OPÇÃO DE CONVERSÃO</i> .	114
TABELA 38 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA CORRELAÇÃO (ρ) PARA A <i>OPÇÃO DE PARADA TEMPORÁRIA</i>	115

TABELA 39 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA CORRELAÇÃO (ρ) PARA A <i>OPÇÃO DE CONVERSÃO COM PARADA TEMPORÁRIA</i>	115
TABELA 40 – TESTE ADF PARA SÉRIE DO AÇÚCAR.....	139
TABELA 41 – TESTE ADF COM INTERCEPTO PARA SÉRIE DO AÇÚCAR	139
TABELA 42 – TESTE ADF COM INTERCEPTO E TENDÊNCIA PARA SÉRIE DO AÇÚCAR	140
TABELA 43 – TESTE NG-PERRON COM INTERCEPTO PARA SÉRIE DO AÇÚCAR	140
TABELA 44 – TESTE NG-PERRON COM INTERCEPTO E TENDÊNCIA PARA SÉRIE DO AÇÚCAR.....	140
TABELA 46 – TESTE ADF PARA SÉRIE DO ETANOL	141
TABELA 47 – TESTE ADF COM INTERCEPTO PARA SÉRIE DO ETANOL.....	142
TABELA 48 – TESTE ADF COM INTERCEPTO E TENDÊNCIA PARA SÉRIE DO ETANOL.....	142
TABELA 49 – TESTE NG-PERRON PARA SÉRIE DO ETANOL.....	143
TABELA 50 – TESTE NG-PERRON COM TENDÊNCIA PARA SÉRIE DO ETANOL.....	143
TABELA 51 – TESTE ADF PARA SÉRIE DA GASOLINA.....	143
TABELA 52 – TESTE ADF COM INTERCEPTO PARA SÉRIE DA GASOLINA.....	144
TABELA 53 – TESTE ADF COM INTERCEPTO E TENDÊNCIA PARA SÉRIE DA GASOLINA	144
TABELA 54 – TESTE NG-PERRON PARA SÉRIE DA GASOLINA	145
TABELA 55 – TESTE NG-PERRON COM TENDÊNCIA PARA SÉRIE DA GASOLINA.....	145
TABELA 56 – TESTE ADF PARA SÉRIE DA GASOLINA DIFERENCIADA	145
TABELA 57 – TESTE ADF PARA SÉRIE DA GASOLINA DIFERENCIADA COM INTERCEPTO	146
TABELA 58 - TESTE ADF PARA SÉRIE DA GASOLINA DIFERENCIADA COM INTERCEPTO E TENDÊNCIA	146
TABELA 59 – TESTE NG-PERRON PARA GASOLINA DIFERENCIADA COM INTERCEPTO	147
TABELA 60 – TESTE NG-PERRON PARA GASOLINA DIFERENCIADA COM INTERCEPTO E CONSTANTE	147
TABELA 61 – ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DA REGRESSÃO PARA SÉRIE DO ETANOL	147
TABELA 62 – ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DA REGRESSÃO PARA SÉRIE DO AÇÚCAR.....	148
TABELA 63 – ESTIMATIVA DO PRÊMIO DE RISCO PARA SÉRIE DO AÇÚCAR.....	148

TABELA 64 – ESTIMATIVA DO PRÊMIO DE RISCO PARA SÉRIE DO ETANOL	148
TABELA 65 – ESCOLHA DA DEFASAGEM NO MODELO VAR.....	149
TABELA 66 – ESTIMATIVA DO MODELO VAR	149

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADF – *Augmented Dickey-Fuller*

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis

AR (1) – Autorregressivo de ordem 1

Bbl – Barril de petróleo

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CAPM – *Capital Assets Price Model*

CBios – Certificados de redução de emissões

CDPA – Comissão de Defesa da Produção de Açúcar

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada da Escola

CIDE – Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

COP-21 – 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas

CSLL – Contribuição sobre Lucro Líquido e Social

EDP – Equação diferencial parcial

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

Esalq – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

FCD – Fluxo de caixa descontado

GLP – Gás liquefeito de petróleo

GNV – Gás natural veicular

GWh – GigaWatt-hora

IAA – Instituto de Alcool e Açúcar

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA – *International Energy Agency*

IPCA – Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo

IRPJ – Imposto de Renda Pessoa Jurídica

KPSS – Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin

l/t – Litros por tonelada

MGB – Movimento Geométrico Browniano

MME – Ministério de Minas e Energia

MRM – Movimento de Reversão à Média

Mtep – Milhões de toneladas equivalentes de petróleo

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo

OR – Opções Reais

PDE – Plano Decenal de Energia

PECEGE – Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas

Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A.

Proálcool – Programa Nacional do Alcool

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas

RFA – *Renewable Fuels Association*

SMC – Simulação de Monte Carlo

SNIPC – Sistema Nacional de Índices de Preços ao Consumidor

STN – Secretaria do Tesouro Nacional

Tep – Tonelada equivalente de petróleo

TLP – Taxa de longo prazo

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

TW – Terawatt

t/ha – Tonelada por hectare

Unica – União da Indústria de Cana-de-Açúcar

USP – Universidade de São Paulo

US\$/bbl – Dólar por barril de petróleo

VAR – Vetor autorregressivo

VECM – *Vector Error Correction Model*

VHP – *Very High Polarized*

VPL – Valor presente líquido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	23
2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO	27
2.1. A BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR BRASILEIRA.....	28
2.2. O ETANOL NO BRASIL.....	30
2.2.1. Fase I: Início da produção do etanol veicular (1931 – 1974).....	30
2.2.2. Fase II: O Proálcool (1975 – 1990).....	31
2.2.3. Fase III: Fim do Proálcool e liberação de preços (1991 – 2002)	31
2.2.4. Fase IV: Veículos flex-fuel e a retomada de investimentos (2003 – 2010).....	33
2.2.5. Fase V: Crise no etanol (2011 – 2014)	36
2.2.6. Fase VI: Nova política para preços de combustíveis e perspectivas de novos investimentos para o setor (2015 – 2018).....	40
2.3. BIOELETRICIDADE A PARTIR BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	43
2.3.1. Complementariedade à hidroeletricidade	45
3. AVALIAÇÃO DE PROJETOS POR OPÇÕES REAIS.....	47
3.1. INTRODUÇÃO ÀS OPÇÕES REAIS	47
3.2. HISTÓRICO DE OPÇÕES REAIS	50
3.3. METODOLOGIAS PARA USO DA AVALIAÇÃO POR OPÇÕES REAIS	52
3.4. OPÇÕES REAIS NO SETOR SUCROENERGÉTICO	55
4. TRAJETÓRIA DAS SÉRIES DE PREÇOS	61
4.1. BASE DE DADOS	61
4.2. PROCESSOS ESTOCÁSTICOS PARA AS SÉRIES DE TEMPO	63
4.2.1. Testes de raiz unitária e estimativa de parâmetros nos processos estocásticos .	66
4.3. MODELAGEM DAS SÉRIES DE PREÇOS PARA O MODELO VAR	72
4.3.1. Revisão de literatura sobre dinâmica de preços no setor sucroenergético.....	74
4.3.2. Resultados do modelo por vetores autorregressivos	77
5. MODELAGEM.....	85
5.1. DESCRIÇÃO DO CASO INICIAL A SER ANALISADO	85
5.2. MODELAGEM POR OPÇÕES REAIS COM SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO	91

5.2.1. Simulação de Monte Carlo para processos estocásticos	93
6. PRINCIPAIS RESULTADOS	99
6.1. RESULTADO DA AVALIAÇÃO POR OPÇÕES REAIS E SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO	99
6.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	103
7. CONCLUSÕES	117
REFERÊNCIAS	123
ANEXO – TABELAS ECONÔMICAS	139

1. INTRODUÇÃO

As usinas sucroenergéticas no Brasil, em sua maioria, possuem uma estrutura com destilarias anexas, as quais permitem produzir tanto etanol, quanto açúcar, a partir do mesmo insumo energético, isto é, a cana-de-açúcar. Dessa forma, é possível tomar a decisão de qual fração da colheita de cana-de-açúcar será destinada para cada produto final, isto é, o *mix* de produção, respeitando os limites técnicos de produção.

Entre as safras de 2011/2012 e 2014/2015, por exemplo, as usinas optaram majoritariamente pela produção do açúcar, enquanto que na de 2015/2016 houve maior empenho na produção do combustível veicular (UNICA, 2019). Em geral, tal decisão é feita de acordo com os preços de cada produto no mercado. Ainda assim, há muitas incertezas em relação aos preços do etanol e do açúcar.

Em relação ao etanol, este produto é majoritariamente destinado ao setor de transportes. Neste setor, os principais combustíveis são o etanol hidratado e a gasolina C (popularmente chamada de gasolina comum). O primeiro combustível se trata do álcool produzido nas usinas sucroenergéticas; já o segundo, uma mistura entre etanol anidro (produzido após a etapa de desidratação do álcool) e da gasolina A (gasolina pura, sem mistura com produtos não derivados de petróleo). Dessa forma, o fato de a gasolina veicular possuir etanol em sua composição torna esses bens complementares sob a ótica da produção.

Acrescenta-se que desde 2003, no Brasil, com a inserção dos veículos *flex-fuel* no mercado automobilístico doméstico, mudou-se a relação entre os combustíveis veiculares. Esse novo tipo de veículo funciona ou com gasolina, ou com etanol, ou ainda com qualquer mistura de ambos os combustíveis. Por conta disso, o aumento de preço de um combustível passou a implicar no aumento da demanda pelo outro. Assim, passou a existir um caráter substitutivo entre a gasolina e o etanol desde o advento dos automóveis *flex-fuel* (NAPPO, 2007; CARDOSO, BITTENCOURT, 2013; SANTOS, 2013; ORELLANO *et al.*, 2013; ANNA; BASTOS, 2014). Logo, no Brasil, é possível dizer que a gasolina e o etanol são simultaneamente bens complementares e substitutos um do outro. Portanto, as incertezas de mercado do preço do etanol dependem do preço da gasolina e do açúcar também.

Já em relação ao açúcar, por se tratar de uma *commodity* internacional, seu preço oscila conforme a oferta e a demanda mundial por seu produto. Não só, mas também há também papéis

de preços futuros negociados nas principais bolsas de valores do mundo influenciando seu preço de mercado. Portanto, as incertezas de mercado do preço do açúcar para o produtor brasileiro dependem da oferta e demanda de outros países produtores e consumidores de açúcar. O Brasil é um dos países com a maior produção de açúcar, mas há outros países como Índia, Tailândia e China, por exemplo, que também se destacam.

É importante também destacar que outros fatores influenciam na formação dos preços. No período entre 2006 e 2014, houve uma política intervencionista, na qual o governo – por meio da Petrobras – não transmitiu os aumentos do preço internacional do barril de petróleo para a gasolina nos postos por meio de uma redução de tributos. Nesse sentido, como a gasolina é um bem substituto do etanol, logo o setor sucroenergético não pôde transmitir o aumento de custos para o preço deste combustível. Esta política implicou uma grande crise no setor sucroalcooleiro (BUSCARINI *et al.*, 2012; MOREIRA *et al.*, 2014), levando ao fechamento de mais de 90 usinas no período entre 2008 e 2015 (EPE/MME, 2018). Dessa maneira, percebe-se que os retornos das usinas são influenciados não só por incertezas de mercado nos preços, mas também por políticas governamentais que podem até prejudicá-las.

Em um cenário com incertezas de preço e mercado, bem como flexibilidades gerenciais de conversão de produção, há modelos para tomadas de decisão indicados para tais conjecturas, entre os quais, destaca-se a metodologia de Opções Reais (OR). Por meio dessa, é possível quantificar o valor de flexibilidades gerenciais, conforme foi descrito anteriormente, em relação ao *mix* de produção das usinas; não só, mas também outras flexibilidades como, por exemplo, expansão e contração de produção (DIXIT; PINDYCK, 1994; TRIGEORGIS, 1996; AMRAM; KULTILAKA, 1999; COPELAND; ANTIKAROV, 2001; MUN, 2006; DIAS, 2014; LAMBRECHT, 2017). Portanto, com a metodologia de OR é feita uma otimização dos retornos, considerando as incertezas e as possíveis flexibilidades gerenciais.

Considera-se a análise de tomada de decisão de investimento no setor sucroenergético, com as volatilidades nos preços do etanol e do açúcar, os quais são influenciados pela concorrência com a gasolina em um contexto constituído por interferências governamentais – no caso do etanol – e por alterações no mercado internacional – no caso do açúcar. Tudo isso em um setor que passou por uma séria crise entre os anos de 2010 a 2015. Uma breve reflexão de tal conjuntura acima pode levar às seguintes questões: a metodologia de Opções Reais ser aplicada ao setor sucroenergético para oferecer melhores resultados na tomada de decisão? Como as

flexibilidades de usinas sucroenergético poderiam ser valorizar os investimentos no setor? Tais flexibilidades conseguiriam mitigar os efeitos de uma crise para as usinas sucroenergéticas?

De tais questionamentos, decorre que o objetivo desta tese de doutorado é avaliar o impacto da flexibilidade na tomada de decisão em usinas do setor sucroenergético, à luz da metodologia de Opções Reais. Busca-se nesse sentido analisar quantitativamente as flexibilidades da opção de conversão, isto é, a tomada de decisão da proporção de produção entre etanol e açúcar em usinas do setor sucroenergético, ou seja, o *mix* de produção, a opção de parada temporária e também ambas as opções (parada temporária e conversão) atuando em conjunto.

Assim, a partir dos resultados encontrados, essa tese de doutorado entrega a proposição de que investir em flexibilidades gerenciais traz maiores retornos para usinas sucroenergéticas. Não só, mas também, tais flexibilidades mitigam os efeitos de crises no setor.

Além desta Introdução, que se dedicou à apresentação do tema, bem como a explicar as questões que motivaram essa pesquisa, os objetivos e proposição, esta tese está dividida em mais cinco capítulos. No capítulo dois é apresentada uma contextualização do setor sucroenergético. Essa contextualização parte de um levantamento histórico setorial, no qual também é descrita toda a energia que é gerada a partir do setor sucroenergético no Brasil, caracterizando a oferta e demanda de energia no setor e sua relevância para energia brasileira. Por mais que o foco seja o etanol, dado que esse é o produto energético das usinas de interesse para essa tese de doutorado, a cana-de-açúcar, o açúcar e a bioeletricidade também são descritas nesse capítulo.

Na sequência, o capítulo três, cujo título é Avaliação de projetos por Opções Reais. Nesse é feita uma introdução da avaliação de investimentos por OR. No entanto, não estão elencados os detalhes metodológicos, mas sim uma apresentação de OR, apontando como tal método foi proposto para complementar a avaliação por fluxo de caixa descontado. Outrossim, são descritos os principais métodos de OR para avaliar projetos com flexibilidades gerenciais e incertezas, bem como suas aplicações no setor sucroenergético, acompanhado de uma revisão de literatura.

No quarto capítulo, Trajetória das séries de preços, verifica-se quais processos estocásticos são utilizados para modelar as séries temporais dos preços da gasolina, do etanol e do açúcar, bem como também se investigou a relação entre essas três séries de preços. Depois, no capítulo cinco, Modelagem, é feita a descrição do caso a ser estudado, isto é, da usina a ser avaliada

economicamente. Nesse sentido, é detalhado o passo-a-passo do método de Opções Reais com simulação de Monte Carlo empregado para testar a hipótese de pesquisa e cumprir os objetivos da tese.

Já no capítulo seis, intitulado Principais Resultados, são apresentados os resultados da metodologia empregada no capítulo quatro, acompanhados de uma análise dos mesmos. Em seguida, no capítulo sete, Conclusões, são feitas as conclusões finais deste estudo e sugestões de estudos futuros. Por último, são apresentadas as referências e anexos deste trabalho.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO

De acordo com a definição da Agência Internacional de Energia (IEA, 2018), biomassa é toda a matéria orgânica derivada de animais ou plantas, disponível em uma base renovável. Este grupo inclui madeira, culturas agrícolas, florestas energéticas, resíduos orgânicos municipais e industriais. Até a revolução industrial, a biomassa era a energia mais amplamente aproveitada no mundo. Isso ocorreu quando havia apenas energia eólica para o uso de navegação, animais na agricultura, e biomassa (GOLDEMBERG, 2009).

Para o setor sucroenergético, mais especificamente, o uso da energia se dá através da biomassa da cana-de-açúcar. Esta biomassa possui alto teor de materiais lignocelulósicos, que podem ser utilizados como matéria-prima capaz de fornecer energia (DIAS *et al.*, 2009). Como Kitayama (2008) também aponta, essa energia é distribuída entre sacarose, bagaço e palha na proporção de um terço para cada uma dessas partes. Nesse sentido, a biomassa da cana-de-açúcar pode ser convertida em energia por meio de (1) processos bioquímicos, por exemplo, a fermentação de biomassa para a produção de etanol (C_2H_6O) e (2) combustão direta, por exemplo, quando a biomassa é queimada para produzir calor nas caldeiras das usinas sucroenergéticas (HINRICH *et al.*, 2015).

Assim, nas usinas de cana-de-açúcar, a biomassa pode ser utilizada para produzir etanol hidratado e anidro, açúcar e também pode servir como insumo para as caldeiras. Para o último caso, também é possível aproveitar o calor da queima de bagaço (biomassa após a etapa de moagem) nas caldeiras para cogear eletricidade. Assim, com essa eletricidade, as usinas de cana-de-açúcar são autossuficientes em energia.

O uso de biomassa de cana-de-açúcar para fins energéticos tem muitas vantagens. Segundo Marcovitch (2006), houve benefícios ambientais favoráveis à reinserção da cana-de-açúcar na matriz energética brasileira. Além disso, com o uso de resíduos de biomassa, como palha e vinhaça, há maior sustentabilidade e eficiência com esse insumo (SOUSA *et al.*, 2010). Ademais, dentre as vantagens socioeconômicas, em um estudo de Moraes *et al.* (2010), os autores enfatizaram que a indústria sucroenergética tem grande influência na geração de empregos.

Dessa forma, neste capítulo, é apresentada a contextualização do setor sucroenergético. Com isso, se pretende realizar um levantamento histórico do setor, bem como apresentar um

panorama atual, descrevendo suas características econômicas de oferta e demanda e sua relevância no setor energético brasileiro.

2.1. A biomassa de cana-de-açúcar brasileira

De origem asiática, a cana-de-açúcar, cujo nome científico é *Saccharum spp.*, é uma planta herbácea de finalidades que se estendem desde o setor de energia até o de alimentação. As primeiras plantações de cana-de-açúcar no Brasil ocorreram em 1532. Na época o território era colônia de Portugal, que tinha o objetivo de ocupá-lo e desenvolvê-lo, a fim de abastecer a metrópole. Para isso, foi introduzida a cultura da cana-de-açúcar. O auge da economia canavieira no Brasil foi nos séculos XVI e XVII, quando era comercializado o açúcar proveniente da biomassa de cana-de-açúcar (CORTEZ *et al.*, 2016).

Mais tarde, ao longo do século XIX, o açúcar de beterraba, produzido na França, se tornou um concorrente. Assim, para que o setor no Brasil ganhasse escala e maiores rendimentos, iniciou-se uma modernização, com a construção de fábricas para a produção de açúcar, substituindo os antigos engenhos e unindo as atividades de cultivo de cana-de-açúcar e produção de açúcar em uma única indústria (RAMOS, 1991; RAMOS, 2007). Além disso, no mesmo período iniciava o processo de industrialização no Brasil, com o querosene como insumo energético, o qual era importado. Logo, surgiu a oportunidade de produção de etanol como um substituto (CORTEZ *et al.*, 2016). Assim, a biomassa de cana-de-açúcar no Brasil deixou de ser um produto agrícola e passou a ser o insumo de uma indústria com fins alimentícios, agrícolas e, principalmente, energéticos. Este último é o foco desta tese de doutorado.

No Brasil, atualmente a biomassa de cana-de-açúcar é o segundo insumo energético mais utilizado no Brasil, responsável por 17% da oferta de energia interna, o que equivale a 49,8 Mtep (milhões toneladas equivalentes de petróleo), atrás apenas do petróleo e seus derivados, que representam 36,4% de toda a oferta de energia (sem incluir o gás natural). Em relação às renováveis, a biomassa de cana-de-açúcar fica à frente de todas as outras fontes, inclusive da energia hidráulica, que representa 12% da oferta interna (EPE/MME, 2018). Já em relação ao consumo final de energia, o etanol e o bagaço de cana também possuem posição de destaque (Tabela 1). Considerando o etanol e o bagaço de cana juntos, esses foram responsáveis por 17,3% do consumo final de energia brasileiro. É possível ver abaixo na Tabela 1, o consumo energético por fonte para o ano de 2017.

Tabela 1 – Consumo Final Energético por Fonte em 2017

Fonte	Consumo Final¹
Óleo Diesel e Biodiesel	46,7
Eletricidade	45,2
Biomassa de cana-de-açúcar	29,1
Gasolina ²	24,8
Gás Natural	18,4
Lenha	16,7
Etanol	13,9
GLP	8,3
Lixívia	6,5
Óleo Combustível	2,8
Querosene	3,3
Demais Fontes ³	27,8
Total	243,60

¹ Unidade de medida 10⁶ toneladas equivalentes de petróleo

² Inclui gasolina A e gasolina de aviação

³ Inclui gás de refinaria, coque de carvão mineral e carvão vegetal, entre outros

Fonte: Elaboração própria com dados de EPE/MME (2018).

A principal finalidade energética da biomassa de cana-de-açúcar no Brasil está no setor de transportes por meio do etanol. Atualmente, o setor de transportes utiliza 32,7% de toda a energia produzida no Brasil (EPE/MME, 2018). Enquanto no Brasil, a cana-de-açúcar é o principal insumo para produção de etanol – matéria prima em 97,1% das plantas autorizadas pela ANP (ANP, 2017) –, em outros países são utilizados outros tipos de biomassa, conforme o favorecimento das condições climáticas. Os EUA utilizam principalmente o milho; a França, trigo e beterraba; e a Alemanha, centeio (HINRICHS *et al.*, 2015).

Para a produção de etanol, o Brasil conta atualmente com 371 plantas autorizadas pela ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gasolina e Biocombustíveis) (ANP, 2019). Hoje o Brasil ocupa o segundo lugar nos maiores produtores de etanol no mundo, com 26% da produção mundial de etanol no mundo. Atualmente, a produção mundial de etanol está em 102 milhões de m³ por ano, com 2017 como referência. Os EUA são os principais produtores e responsáveis por 58% da oferta mundial de etanol, com uma produção que cresce 3% ao ano (RFA, 2018). Já o

restante da produção é pulverizado em diversos países, como China, Canadá, Argentina, Tailândia e Índia (RFA, 2018).

2.2. O etanol no Brasil

Nas usinas sucroenergéticas no Brasil são produzidos dois tipos de etanol: o hidratado e o anidro. A diferença entre os tipos é a quantidade de água em cada um deles. O primeiro possui água em sua formação em 5% e o restante, 95%, de etanol. Já o segundo trata-se de um etanol mais puro com 99,6% de etanol e apenas 0,4% de água. É importante destacar que a terminologia utilizada para ambos os produtos enfatiza a questão da diferença da quantidade de água, uma vez que a palavra *hidro* significa água e o prefixo *a* significa não. Assim, anidro remete a “não água” e hidratado à água (NARDINI, 2017).

Cada etanol produzido possui um destino distinto no setor de transporte. O etanol hidratado é vendido nos postos de combustíveis no Brasil, tal que este é colocado diretamente nos veículos¹. Por outro lado, o etanol anidro é misturado com a gasolina, mistura essa que conta com 27,5% do etanol anidro e o restante da gasolina, a fim de formar a gasolina C (popularmente chamada de gasolina comum no Brasil), a qual é vendida nos postos.

Esta seção continua com um breve histórico do etanol brasileiro ao longo das décadas. Posteriormente, há detalhes dos atuais níveis de produção e preço do etanol, bem como do atual contexto econômico deste combustível.

2.2.1. Fase I: Início da produção do etanol veicular (1931 – 1974)

O uso do álcool derivado de cana-de-açúcar como combustível veicular no Brasil começou no início do século XX, quando passou a ser exigida a adição mínima de 5% de etanol à gasolina por iniciativa da Comissão de Defesa da Produção de Açúcar (CDPA) – posteriormente transformada no Instituto de Álcool e Açúcar (IAA) – com o Decreto nº 19.717, de 20 de fevereiro de 1931 (GILIO, CASTRO, 2017). Conforme destaca Ramos (2007), a intenção inicial era de produzir etanol, a fim de evitar excedentes da produção de açúcar, uma vez que o açúcar recém começara a ser vendido para o mercado externo e era importante controlar os preços. Esta fração de etanol teve modificações, principalmente em momentos de falta de

¹ Por esse motivo, sempre que for mencionado etanol sem distinção entre hidratado e anidro ao longo deste texto, a referência será para o primeiro produto.

gasolina importada, como por exemplo, durante a Segunda Guerra Mundial, quando a adição de etanol atingiu 42% (SZMRECSÁNYI, MOREIRA, 1991; MOREIRA; GOLDEMBERG, 1999). Assim, por um longo período o etanol veicular foi utilizado apenas como um bem complementar à gasolina e para melhorar as margens de rendimento do açúcar.

2.2.2. Fase II: O Proálcool (1975 – 1990)

Para o etanol atuar como bem substituto à gasolina foi necessário um grande aumento de preços do barril de petróleo com os dois choques em 1973 e 1979 causados pela restrição de oferta de petróleo dos países da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo). O preço (em valores nominais) variou de 2,98 US\$/bbl para 38 US\$/bbl (BRET-ROUZAUT, FAVENNEC, 2007; INDEXMUNDI, 2018). Assim, em uma iniciativa do governo com a finalidade de substituir o uso dos derivados do petróleo no Brasil, nasceu o Programa Nacional do Álcool (Proalcool). Ainda assim, o aumento no preço do petróleo não foi suficiente para garantir a substituição pelo álcool combustível. O setor sucroalcooleiro precisou de incentivos como juros subsidiados, além de linhas de créditos de bancos públicos (PUGLIERI, 2013).

Houve estímulos para a demanda também. Dessa forma foram fabricados veículos movidos 100% a etanol, os quais também receberam incentivos com alíquotas de impostos reduzidas (BASTIN *et al.*, 2010). No final da década 1980, os automóveis a etanol representavam 95% das vendas de veículos novos. Assim, o consumo de etanol atingiu a marca de 11 milhões m³ naquela década (MICHELLON *et al.*, 2008; NEVES, CONEJERO, 2010).

No entanto, com o contrachoque do petróleo, o preço do barril de petróleo no mercado internacional foi de 35 US\$/bbl para 15 US\$/bbl em 1985 (BRET-ROUZAUT; FAVENNEC, 2007). Acrescenta-se a este fato a crise econômica brasileira, com taxas inflacionárias altíssimas. Logo, foi necessária uma nova política energética, a qual reestabeleceu a gasolina como principal insumo para os veículos leves.

2.2.3. Fase III: Fim do Proálcool e liberação de preços (1991 – 2002)

Na década de 1990, a produção de etanol perdeu definitivamente o apoio dos subsídios governamentais (MOREIRA, GOLDEMBERG, 1999; HIRA, DE OLIVEIRA, 2009). Assim, foi o fim do Proálcool e o etanol perdeu definitivamente o apoio dos subsídios governamentais, ocorrendo a volta ao modelo energético automotivo anterior, movido à gasolina. Houve também outras medidas do governo, em um cenário de liberação econômica, que alteraram os mercados

de combustíveis. Sendo assim, o mercado de combustíveis foi liberado em todas as suas fases de produção, distribuição e revenda, com preços determinados pelas condições de oferta e demanda do mercado (NAPPO, 2008).

O setor sucroalcooleiro teve que se adequar ao novo cenário. As vendas de açúcar foram liberadas e o preço pago por litro de etanol foi reduzido gradativamente (PUGLIERI, 2013). Além disso, as condições do setor pioraram, com sua dívida chegando a R\$ 1 bilhão e com custos de produção (R\$ 0,28/litro) maiores que os preços de revenda (R\$ 0,12/litro). Com isso, o açúcar novamente se estabeleceu em posição de destaque, com seus volumes de exportação crescentes de um milhão de toneladas em 1990 para 10 milhões de toneladas em 1999. Assim, o Brasil assumiu a liderança na exportação do açúcar no cenário mundial (LEÃO, 2002). Ainda nessa década, os carros movidos a etanol, que representavam aproximadamente 95% dos veículos novos vendidos no Brasil em 1986, passaram a representar apenas 3% em 2000, apesar de o preço do etanol ter atingido neste ano metade do da gasolina (NEVES; CONEJERO, 2010).

Apesar do retrocesso, com a Lei Federal nº 8.732/1993, passou a ser obrigatório o uso do etanol anidro como aditivo da gasolina, numa faixa entre 20% e 25% de mistura, a qual foi posteriormente alterada em 1998 para entre 22 a 24% de mistura. Dessa forma, a complementariedade do etanol anidro na gasolina garantiu vendas de etanol entre 10 e 15 milhões de m³, mesmo após o fim do Proálcool, durante a década de 1990 (EPE/MME, 2007a), valores próximos do auge no Proálcool, conforme é possível visualizar na Figura 1 abaixo.

Figura 1 – Produção de etanol entre 1970 e 2000

Fonte: Elaboração própria com dados de EPE/MME (2007b).

Pela Figura 1 é possível verificar a evolução da produção de etanol dos anos que antecederam o Proálcool até depois de seu fim, nos anos 1990. Percebe-se que, no início da década de 1970, a produção de etanol no Brasil era abaixo de 1 milhão de m³. Depois, no início do Proálcool a produção chegou a marca de 3 milhões de m³, para então, durante o auge do programa, superar a marca de 10 milhões de m³. Conforme descrito anteriormente, mesmo com o fim do Proálcool foi possível manter a produção de mais de 10 milhões de m³ por conta da obrigatoriedade da inserção do etanol anidro na gasolina veicular. Em um período de liberação econômica, essa medida trouxe alívio ao setor.

2.2.4. Fase IV: Veículos *flex-fuel* e a retomada de investimentos (2003 – 2010)

A partir dos 2000, houve uma elevação considerável do preço internacional do barril de petróleo. Entre janeiro de 2002 e junho de 2008, o preço do barril de petróleo (em valores nominais) foi de 19,15 US\$/bbl para 132,55 US\$/bbl (INDEXMUNDI, 2018). As primeiras variações começaram em 2000 com (1) as greves de produção na Venezuela, (2) aumento do crescimento econômico – principalmente da China e de outros países emergentes – e (3) a ocupação estadunidense no Iraque, em 2003. Além desses, outro fator (4) foi que a capacidade produtiva dos produtores de petróleo estava no limite, de tal maneira que não havia mais oferta excedente. Consequentemente, os preços aumentaram muito nesse período, ocasionando um

aumento dos preços dos derivados também (BRET-ROUZAUT, FAVENNEC, 2007; PINDYCK, RUBINFELD, 2009).

Nesse contexto de aumento do preço do barril de petróleo, ocorreram investimentos e concessões em forma de incentivos para a retomada da produção de etanol no Brasil, principalmente aproveitando que os custos de produção do etanol eram menores que o de outros países² (AVÓ, 2008). Entre os investimentos, destaca-se, por meio de iniciativa das montadoras automotivas, a introdução do veículo *flex-fuel* na frota brasileira, o qual funciona tanto à gasolina, quanto a etanol, ou com uma mistura de ambos. Assim, o etanol passaria a atuar simultaneamente como bem complementar e substituto. Portanto, surgiram mais alternativas para o motorista. Em pouco tempo, as vendas dos veículos *flex-fuel* passaram a ser mais de 80% da frota nacional (ANFAVEA, 2015), conforme a Figura 2 abaixo.

Figura 2 – Porcentagem nas vendas de veículos.

Fonte: Elaboração própria com dados de ANFAVEA (2015).

Com o sucesso da frota, a elasticidade da demanda-preço dos combustíveis veiculares aumentou (NAPPO, 2007; CARDOSO, BITTENCOURT, 2013; SANTOS, 2013; ORELLANO *et al.*, 2013). Não só, mas também a elasticidade da demanda-preço por gasolina passou de inelástica – antes da entrada dos veículos *flex-fuel* – para elástica, conforme Anna e Bastos (2014).

² O custo de produção de etanol de cana-de-açúcar brasileiro na época, em valores nominais, eram aproximadamente US\$ 0,25/l, enquanto o etanol do milho nos EUA era de US\$ 0,40/l e o etanol de beterraba na Europa era de US\$ 0,65/l (AVÓ, 2008).

Já as concessões foram feitas por meio de incentivos tributários, sendo que a tributação diferenciada entre a gasolina e o etanol foi um fator determinante para o produtor e também para o motorista na tomada de decisão na aquisição do tipo de veículo (SCHÜNEMANN, 2007; CAVALCANTI, 2011; MING, 2015). Outro fator a favor da tributação diferenciada entre etanol e gasolina está no fato de que o primeiro é menos poluente, isto é, apresenta menos externalidades negativas. Assim, é coerente que o etanol passasse a ter uma carga tributária menor também (CAZEIRO, 2010; CAVALCANTI, 2011). Para isso foi criada a Contribuição de Intervenção para Domínio Econômico (CIDE). Ela foi criada por meio da Emenda Constitucional nº 33, de 11 de dezembro de 2001 e regulamentada pela Lei nº 10.336, de 19 de dezembro de 2001 (STN, 2013). Nesse sentido, conforme o preço do barril de petróleo oscilava, a CIDE era corrigida para regular o mercado de combustíveis.

Com o cenário favorável para a produção do biocombustível, ocorreu no Brasil uma nova expansão dos canaviais, que eram tradicionalmente cultivados no interior paulista e na zona da mata no Nordeste, chegaram até o cerrado no centro-oeste brasileiro (NAPPO, 2007; PUGLIERI, 2013; GARCIA *et al.*, 2015). Na Figura 3 abaixo, é possível ver o aumento da colheita ao longo desse período de retomada de investimentos.

Figura 3 – Colheita de cana-de-açúcar.

Fonte: Elaboração própria com dados de UNICA (2019).

Em um cenário de sucesso da expansão e colheita de cana-de-açúcar somados a fatores como câmbio valorizado, elevação da remuneração no setor sucroenergético e investimentos do BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico Nacional), muitas empresas, inclusive internacionais, foram atraídas para o setor (SAUER; LEITE, 2012; SILVA, J. H., 2012; MORAES; ZILBERMAN, 2014). Assim, o país se consolidou como maior produtor mundial de cana-de-açúcar e a produção do etanol (anidro e hidratado), que havia se estabilizado próximo de 10 bilhões de litros durante o período entre as safras de 1990/1991 a 2003/2004, atingiu patamares recordes de 28 bilhões de litros entre 2008 e 2010 (UNICA, 2019).

2.2.5. Fase V: Crise no etanol (2011 – 2014)

Se o setor etanol foi beneficiado no início dos anos 2000, depois, na década seguinte, esse combustível passou a enfrentar maus resultados. As principais causas foram (1) interferência governamental nos preços dos combustíveis para cumprir objetivos de uma política econômica anti-inflacionária, (2) condições climáticas adversas e baixa renovação dos canaviais, (3) crise econômica mundial de 2008, (4) concorrência com o açúcar (BUSCARINI *et al.*, 2012; CALDEIRA FILHO, 2012; NYKO *et al.*, 2013).

Mais especificamente, sobre as interferências governamentais, elas são uma característica histórica no setor de combustíveis, tanto para os derivados de petróleo, quanto para o sucroenergético (MARJOTTA-MAISTRO; BARROS, 2003). Apesar de o livre mercado ser estabelecido no setor, a interferência persistiu por meio do controle de preços na Petrobras, uma vez que o governo federal é o acionista majoritário, embora a empresa seja de capital aberto. Assim, houve uma interferência nos preços dos derivados de petróleo, isto é, gasolina e diesel, entre 2006 e 2014, a fim de conter a inflação, dadas as elevações positivas no preço do barril de petróleo. Para isso, a parcela incidente da CIDE foi reduzida gradativamente. Dessa forma, quando o preço do barril subia nas refinarias, o governo simplesmente reduzia sua alíquota. Logo, os consumidores não sentiam o efeito dos elevados preços do barril de petróleo e a inflação ficava dentro da meta governamental (CAZEIRO, 2010; CAVALCANTI, 2011).

No entanto, em 2012, apesar da incidência da CIDE já ter sido reduzida a zero por cento, o preço da gasolina veicular não foi alterado, mesmo com aumentos no preço do barril de petróleo. Logo, a Petrobras passou a incorrer os custos de tais elevações. Não só, mas devido aos limites das refinarias, o Brasil não conseguia mais produzir gasolina suficiente, então a

Petrobras teve que importar o derivado e vendê-lo mais barato no mercado interno, uma vez que estava mais caro no mercado internacional (ACCIOLI; MONTEIRO, 2013).

Em consequência disso, as usinas sucroenergéticas não puderam repassar o aumento de custos do etanol para os preços, dado o caráter substitutivo dos combustíveis. Assim, as usinas passaram a ter prejuízos durante essa política anti-inflacionária no período de 2006 a 2014. Na Figura 4 é possível ver como se comportaram os preços reais (considerando dezembro/2017 como valor base) dos combustíveis gasolina e etanol entre 2001 e 2017. É notável que a partir de 2006 a gasolina passou a ficar mais barata, enquanto que a partir de 2009 é possível perceber choques positivos no preço do etanol, encarecendo este combustível.

Figura 4 – Preço Real de Combustíveis Veiculares ajustado com IPCA.

Fonte: Elaboração própria com dados de ANP (2018) e IBGE/SNIPC (2018).

Portanto, a demanda de etanol diminuiu consideravelmente, enquanto que a de gasolina cresceu muito. Logo, devido aos gargalos do refino, se iniciou a importação deste combustível para preencher a demanda. Além disso, para garantir o fornecimento de etanol anidro, também se passou a importar etanol (TONIN; MATHEUS TONIN, 2014). Mais ainda, segundo Tenkorang *et al.* (2015), entre 2011 e 2015, aumentou-se o papel complementar do etanol na gasolina, isto é, passou-se a produzir mais etanol anidro e menos hidratado no Brasil. Na Figura 5 abaixo é possível conferir como variou o consumo de combustíveis ao longo dos últimos anos.

Figura 5 – Consumo de combustíveis veiculares

Fonte: Elaboração própria com dados de ANP (2018).

Pela Figura 5, é possível ver que no início dos anos 2000 a demanda por etanol aumentou, como resultado nos investimentos no setor, inserção do veículo *flex-fuel*, preços baixos e maior produção de etanol. No entanto, a partir de 2010, houve um aumento na demanda de gasolina e uma queda na demanda por etanol, como consequência da política intervencionista de preços que deixou a gasolina artificialmente mais barata. Assim, com melhores preços para a gasolina, a demanda deste combustível cresceu, enquanto a de etanol diminuiu.

Em relação às condições climáticas adversas, em 2010 e 2011, as chuvas foram reduzidas, prejudicando as safras e a colheita (CALDEIRA FILHO, 2012). Já em relação à renovação inadequada dos canaviais, segundo Nyko *et al.* (2013) e Moraes e Bacchi (2014), não houve renovação adequada dos canaviais, tal que a produtividade dos mesmos caiu de 115 t/ha para 55 t/ha. Assim, houve uma grande perda de produtividade agrícola. Ademais, com a crise de 2008, o crédito diminuiu com a chegada da crise econômica mundial, uma vez que a maior parte do financiamento advinha de bancos internacionais. Como consequência uma série de usinas já endividadas enfrentaram sérias dificuldades de rolar suas dívidas (MOREIRA *et al.*, 2014).

Há ainda a concorrência entre açúcar e etanol. Nas usinas, por razões técnicas, é possível definir o *mix* de produção, isto é, a proporção da colheita que é destinada para produção de açúcar e etanol. Por isso, é possível alterar esse *mix* em pequenas variações, a fim de produzir mais um

insumo ou outro, conforme os preços de mercado. Nesse sentido, com o aumento do preço do açúcar no mercado internacional e as baixas remunerações do etanol, as usinas optaram pela maximização da produção do adoçante, em detrimento da produção do biocombustível. Como consequência, a produção de açúcar atingiu em 2011 o equivalente a 38 milhões de toneladas (134% maior que a quantidade no início da década anterior), reduzindo o volume de cana-de-açúcar destinada à produção de etanol. Depois, em 2014, mesmo com a queda de 25% nos preços, o volume de açúcar produzido praticamente não se alterou (UNICA, 2019). Na Figura 6 abaixo é possível ver a produção de ambos os produtos ao longo do século XXI.

Figura 6 – Produção de açúcar e etanol no século XXI.

Fonte: Elaboração própria com dados de UNICA (2019).

Percebe-se na Figura 6 que até a safra 08/09, a produção de ambos os produtos foi crescente de modo semelhante. Por outro lado, após 08/09, percebe-se que os níveis de produção apresentam sentidos opostos. Se for medida a correlação de Pearson entre da safra 00/01 a 07/08, o valor encontrado é de 92,73%, enquanto que se for medido da safra 12/13 a 16/17, o valor do coeficiente de correlação de Pearson é de -75,67%. Portanto é possível concluir que no período de investimentos do setor sucroalcooleiro, ambos os produtos foram beneficiados, crescendo juntos. No entanto, durante a crise, o etanol regrediu, mas o açúcar progrediu.

A principal consequência da crise para o setor foi o fechamento de 96 usinas sucroalcooleiras até o final de 2015 (EPE/MME, 2018) devidos aos fatores acima descritos. As que conseguiram se manter foram apenas aquelas que entraram em processos de fusão com grupos internacionais

– como a Raízen, por exemplo, que é uma *joint-venture* entre a Cosan e a Shell – que se consolidaram e superaram a crise (PINTO, 2011).

2.2.6. Fase VI: Nova política para preços de combustíveis e perspectivas de novos investimentos para o setor (2015 – 2018)

Em 2015, o governo brasileiro mudou sua política econômica, colocando um fim na política anti-inflacionária por meio da gasolina e decidiu utilizá-la como um instrumento fiscal com a finalidade de arrecadação para corrigir o déficit fiscal. Ocorre que, dada a inelasticidade deste combustível no curto prazo, foi possível aumentar o seu preço, sem que houvesse alterações significativas na demanda. Por isso, a CIDE voltou com uma alíquota de R\$ 0,10/litro sobre o preço da gasolina vendida pelas refinarias no Brasil.

Outra motivação para o aumento do preço da gasolina foi melhorar as finanças da Petrobras, a qual se endividou dada a diferença do preço elevado do barril de petróleo e o menor preço dos combustíveis vendidos. Dessa forma, como a Petrobras passou a vender gasolina mais cara que o derivado importado foi possível recompor o caixa da empresa (COSTA, BURNQUIST, 2016).

Os impactos de tais políticas foram transmitidos para o etanol. Com a elevação do preço da gasolina, aumentou-se a demanda pelo etanol. Assim, com o fim da política anti-inflacionária que controlava o preço da gasolina, a demanda voltou a crescer. Além disso, também houve aumento da margem de etanol anidro na gasolina, que foi elevada para entre 25% e 27,5%. De acordo com dados da ANP (2018), o consumo de etanol hidratado aumentou em 37,5%, enquanto o de gasolina diminuiu em 7,3% naquele ano.

Por conta disso, com maior demanda para o etanol, os preços também conseguiram subir. Em comparação entre o início (abril) e o final da colheita (novembro), o preço médio do etanol nos postos subiu 17,5% (em valores nominais) ao longo da safra. Nesse período o açúcar também apresentava preços 22% menores, em comparação ao ano de 2012 (CEPEA/Esalq, 2018). Logo, as usinas dedicaram essa safra à produção do combustível. Esta foi a primeira safra em anos, na qual a maior parte da colheita foi para o combustível.

Depois, em 2016, houve maior impacto da crise econômica brasileira sobre o setor de combustíveis. De tal forma, houve queda no consumo de combustíveis como um todo. Após um período crescente de consumo de combustíveis que durou por mais de 12 anos, em 2016,

houve redução no consumo total de combustíveis em 2,5% (ANP, 2018). Por outro lado, o preço do açúcar recuperou os patamares anteriores e valorizou em quase 30%. Dessa forma, o interesse das usinas voltou a ser o de priorizar a produção do açúcar e não a de etanol como no ano anterior. Ainda assim, as principais novidades para o setor no ano de 2016 foi o anúncio do programa de Política Nacional de Combustíveis (chamado de RenovaBio 2030, sancionada posteriormente na Lei nº 13.576, em 26 de dezembro de 2017) e a nova política de preços para a gasolina pela Petrobras, a qual afetou todo o setor sucroenergético.

Acrescenta-se que com o comprometimento do Brasil com os acordos traçados na 21ª Conferência das Partes (COP-21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas, em 2015, em Paris, o Brasil precisava de uma estratégia para atingir as metas estabelecidas de redução de emissões de gases de efeito estufa de 43% até 2030, considerando como parâmetro os níveis registrados em 2005. Nesse contexto, foi elaborada uma nova proposta regulatória para estimular a produção dos biocombustíveis (etanol, biodiesel, biogás e bioquerosene para aviação) no Brasil. Assim, foi criado o programa RenovaBio 2030.

O RenovaBio consiste em um sistema de títulos de carbono negociados na bolsa de valores, no qual produtores e importadores poderão emitir Certificados de Redução de Emissões, chamados de CBios, que serão comprados pelas distribuidoras. Dessa maneira, dado o objetivo de descarbonização da matriz energética brasileira, os distribuidores passarão a ter que adquirir tais certificados para cumprir as cotas exigidas pelo programa e os produtores e importadores possuirão maiores retornos com as vendas dos títulos e também maior previsibilidade de demanda até 2030. Consequentemente, há uma expectativa da oferta de etanol no Brasil crescer para 54,3 bilhões de litros até 2030 (EPE/MME, 2017). Isso significa aumentar a oferta em mais de 25 bilhões de litros.

Não só, mas também os produtores serão incentivados a produzirem com maiores eficiências e também a investirem em maiores tecnologias. Uma vez que as usinas sucroenergéticas podem aproveitar subprodutos como vinhaça para gerar biogás e também o bagaço de cana para cogerar bioeletricidade ou produzir etanol de segunda geração, tais produtos podem ser revertidos em CBios também (GRASSI; PEREIRA, 2019).

De acordo com Farina e Rodrigues (2018), a falta de planejamento para o setor de combustíveis levou ao fechamento de diversas usinas, à deterioração da situação financeira da Petrobras e ao retorno da dependência de importação de combustíveis. Assim, ainda conforme os autores, a

aprovação do RenovaBio 2030 foi o primeiro passo para reverter esse cenário. Faltava para o setor um planejamento e estratégia de longo prazo. Essa tem sido uma constante reclamação dos profissionais do setor (RODRIGUES, 2015). Por fim, não só o Brasil atende as metas estabelecidas na COP-21, mas também consegue atrair investimentos para o setor.

Além do RenovaBio 2030, foi lançado em fevereiro de 2017, o programa Combustível Brasil, com a finalidade de aumentar a produção de derivados do petróleo. De acordo com estudos da EPE, em 2030, o Brasil deverá consumir 3,1 milhões de barris/dia de derivados de petróleo, enquanto em 2016 esse consumo era de 2,3 barris/dia. Assim, os objetivos desse programa são buscar a autossuficiência na produção de derivados, por meio do aumento da capacidade de refino no Brasil com a construção de novas unidades e ampliação das atuais. Além de investimentos em infraestrutura na logística do setor, portos, dutos e estoques (CADERNOS FGV ENERGIA, 2017).

Mais ainda, em outubro de 2016, a Petrobras anunciou uma nova política de precificação de derivados, a qual consistiu em paridade com os praticados nos mercados internacionais. Dessa forma, a companhia deixou claro suas intenções de que o preço interno dos derivados acompanhasse as flutuações das taxas de câmbio e as cotações do barril de petróleo (PETROBRAS, 2016). Inicialmente, essa política previa revisão dos preços praticados mensalmente. No entanto, de acordo com a própria Petrobras (2017), as mudanças iniciadas em outubro de 2016 não foram suficientes. Por causa disso, em julho de 2017, a companhia revisou a frequência de ajustes, permitindo que passassem a ocorrer inclusive diariamente, considerando um limite de até 7% de variações no preço para cima ou para baixo no acumulado do mês vigente.

Em 2017, em um cenário de crise brasileira, a União aumentou as tarifas dos combustíveis etanol, gasolina e diesel. Uma vez que se tratam de bens inelásticos no curto prazo, houve a expectativa da União de recuperar as receitas por meio desses combustíveis. O aumento foi de R\$ 0,41 para a gasolina, R\$ 0,21 para o diesel e R\$ 0,12 para o etanol.

No ano anterior, em 2018, após 16 anos, o Brasil deixou de ser o principal produtor mundial de açúcar, cedendo o lugar à Índia, a qual não é só o maior produtor mundial de açúcar, mas também o maior consumidor. Ainda assim, o Brasil continua como maior exportador de açúcar (USDA, 2018). Em consequência do aumento da produção de açúcar de Índia e também da Tailândia e da União Europeia, o preço do açúcar diminuiu. Embora os baixos preços já foram

sentidos em 2017, a produção continuou a aumentar, pois, alguns países aplicam política de subsídios. Com tal política, as usinas da Índia conseguem vender açúcar mesmo com preços abaixo do custo de produção (CARVALHO, 2018). Desde 2015, o governo da Índia começou com uma política de incentivos às usinas de 4.000 rúpias – equivalentes à US\$ 64 – por tonelada para as exportações (LIANG, 2018).

Essa desvalorização do açúcar afetou o Brasil, tal que, durante a safra de 2018/2019, o preço do açúcar VHP (*Very High Polarized*) para exportação diminuiu em média 22% (CEPEA-Esalq, 2018). Logo as usinas optaram pela produção do etanol. Assim, o *mix* de produção nas usinas ficou em 64,4% para a produção de etanol e 35,5% para a produção do açúcar. Em comparação com a safra anterior, a produção de etanol, embora maior, teve o direcionamento de 53% da colheita destinada a sua produção, na região Centro-Sul do Brasil (UNICA, 2018). Sendo assim, a safra 2018/2019 entregou uma produção recorde de etanol. Na região Centro-Sul, a produção aumentou em 22% (UNICA, 2019), chegando a 33 bilhões de litros³ de etanol total (etanol anidro e hidratado somados) (ANP, 2018). Por outro lado, a produção de açúcar ficou em 31,7 milhões de toneladas⁴ (CONAB, 2018). Portanto, enquanto a produção do combustível aumentou em 18%, a produção do adoçante foi reduzida no mesmo percentual.

Por último, na comparação entre os combustíveis veiculares etanol hidratado e gasolina C, o primeiro também foi recordista. As vendas aumentaram em 42%, enquanto que, as vendas da gasolina C diminuíram em 13% (ANP, 2018). Na análise das vendas totais de ambos os combustíveis juntos, percebe-se que elas praticamente não se alteraram em relação ao ano anterior de 2017. Ademais, o preço do barril de petróleo aumentou, chegando a marca de US\$ 80 o barril do tipo *Brent* em outubro, como resultado, o preço da gasolina aumentou e perdeu mais competitividade ainda em relação ao etanol.

2.3. Bioeletricidade a partir biomassa de cana-de-açúcar

Durante o século XX para atender a crescente demanda por energia elétrica no Brasil, houve investimentos em construções de grandes hidrelétricas no Brasil, de tal forma que hoje a matriz elétrica no Brasil é predominante proveniente de energia hidráulica. Dados de 2018 indicam uma participação dessa fonte em 60% da oferta total de energia elétrica brasileira (incluindo a

³ Até a finalização desse trabalho, no início de janeiro de 2019, ainda não se tinha o valor da produção no mês de dezembro. Sendo assim, foi atribuída uma estimativa para esse mês. De qualquer forma, com os dados de ANP (2018) até novembro de 2018, a produção já tinha sido recorde, conforme afirma o texto nesse parágrafo.

⁴ Dados de Conab (2018) antes do fim de 2018, logo as fontes realizaram estimativas para o mês de dezembro.

eletricidade importada), com uma capacidade instalada de 94,7 TW (EPE/MME, 2018). No entanto, a participação dessa fonte já foi muito maior. Na década de 1990, a energia elétrica proveniente de hidrelétricas chegou a representar 93% de toda oferta de eletricidade no Brasil (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2014).

Ocorreu que, no início dos de 2001, houve uma crise no setor elétrico que começou em um ano de falta de chuvas no Brasil⁵. Por causa disso, a fim de diminuir a dependência de usinas hidrelétricas, passou-se a investir em usinas termoelétricas a gás próximas aos grandes centros. Assim, o modelo do setor elétrico foi deixando de ser centralizado, para um novo fundamentado em geração distribuída. Por isso, começaram também investimentos na geração de energia elétrica nas usinas de cana-de-açúcar (BAJAY, 2005; SOUZA; AZEVEDO, 2006; CASTRO; DANTAS, 2008a). Nesse sentido, no início dos anos 2000, não houve só os investimentos no setor sucroenergético por meio de aumentos no preço do barril de petróleo, inserção dos veículos *flex-fuel* e outros investimentos (conforme descritos anteriormente nesta tese), mas também houve interesse em aproveitar a energia elétrica que poderia ser cogenerada das usinas⁶.

Assim, houve investimentos na cogeração de eletricidade pelo aproveitamento da palha e do bagaço, a fim de estimular a produção de energia elétrica não hidráulica renovável, não apenas para autossuficiência energética, mas também para comercialização do excedente. Isso decorreu principalmente da vantagem das usinas sucroenergéticas se localizarem próximas às áreas de consumo, reduzindo a necessidade de investimento em infraestrutura com transmissão e distribuição. Logo, a possibilidade de utilização de biomassa para cogeração aumentou (NYKO *et al.*, 2011). Inclusive, de acordo com Souza e Azevedo (2006), apenas a produção de excedente de energia por parte das usinas no estado de São Paulo teria sido capaz de suprir o déficit de toda a Região Sudeste do Brasil durante a crise.

A primeira iniciativa foi por meio do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas, PROINFA, que foi criado por meio da lei Nº 10.438/2002 (BRASIL, 2002). Ainda com as intenções de diminuir a dependência das hidrelétricas e, portanto, incentivar novas fontes e, assim, uma

⁵ De acordo com o ex-ministro de Minas e Energia, Francisco Gomide, a falta de energia elétrica que levou à crise também foi causada pela gestão inadequada dos reservatórios, resultando em metade da energia armazenada, a qual foi consumida nos anos anteriores, e também por falta de investimento no setor energia ao longo dos anos anteriores. Ele ressaltou ainda que, apesar do início da privatização em 1995, as pressões ambientais haviam barrado os investimentos em reservatórios de hidrelétricas e, portanto, não havia mais linhas de crédito para esse tipo de usinas de investimento (GOMIDE, 2014).

⁶ O processo de cogeração de energia elétrica em usinas de cana-de-açúcar consiste no uso de insumos de caldeiras, como bagaço e palha, para gerar energia térmica na produção de etanol e açúcar. Nesse estágio, o calor gerado pode ser aproveitado para gerar energia mecânica, a qual é transformada em eletricidade por meio de um gerador. Assim, a cogeração, isto é, a geração simultânea de energia térmica e elétrica, é obtida a partir do mesmo insumo energético (SOUZA; AZEVEDO, 2006).

diversificação, estabeleceu a promoção e implantação de 3.300 MW de capacidade energética dividida igualmente entre três fontes, a saber, biomassa, pequenas centrais hidrelétricas e eólica, até o final de 2006. No entanto, a expectativa de utilizar o setor sucroenergético para aumentar a oferta de energia elétrica não foi concretizada. Com a crise no setor, a colheita ficou estacionada no patamar de 600 milhões de toneladas durante quase toda a década de 2010. Assim, os rumos da política energética no Brasil se pautaram em utilizar o gás natural como principal insumo das térmicas (EPE/MME, 2014).

Apesar da crise no setor, a cogeração continuou relevante. É importante ressaltar que, durante a crise, a cogeração ocorrida nas usinas de cana-de-açúcar não só resultou em um produto adicional, mas também foi determinante no financiamento da cana-de-açúcar. Desta forma, sua ausência tornou-se um fator limitante para a permanência no mercado (DEFILIPPI FILHO, 2013; TORQUATO; RAMOS, 2013). De qualquer forma, em 2015, os indicadores de produção retornaram aos patamares pré-crise, ou seja, aos índices da safra 2009/2010 (CEPEA-Esalq, 2018). Portanto, uma quantidade significativa de biomassa de cana-de-açúcar tornou-se disponível e pode ser usada para gerar eletricidade.

Ademais, considerando aspectos ambientais e econômicos, especialmente quando comparados a usinas termoeletricas movidas a combustíveis fósseis, e a proximidade do principal centro consumidor no Brasil, a biomassa da cana-de-açúcar possui muitas vantagens. Logo, por meio deste insumo, há a possibilidade de aumentar a oferta de energia elétrica no Brasil.

2.3.1. Complementariedade à hidroeletricidade

Considera-se para as usinas hidrelétricas um fator de carga de 55%. Logo, a potência instalada nessas usinas no período seco no centro sul do Brasil – período que vai de abril a setembro, com baixos índices de pluviosidade – é reduzida a ponto de ser insuficiente para atender a demanda de ponta. Partindo dessa premissa, faz-se necessário o uso de fontes complementares, a fim de garantir uma demanda de ponta e uma oferta adequada de eletricidade ao Sistema Interligado Nacional (CASTRO; DANTAS, 2008b; CASTRO *et al.*, 2013).

Uma alternativa para complementar às usinas hidrelétricas seria o uso da biomassa de cana-de-açúcar. De acordo com dados de 2016, se, conforme Khatiwada *et al.* (2012), for considerado que para cada tonelada de cana-de-açúcar é possível cogear pelo menos 100 kWh de eletricidade, essa energia elétrica cogorada complementar poderia resultar em uma oferta

adicional de eletricidade em torno de 25% superior do que a oferta de oriundas de usinas hidrelétricas entre os meses de julho a outubro. Na Figura 7 a seguir é possível observar os seguintes dados de 2016: (1) de energia elétrica gerada pelas usinas hidrelétricas no Brasil; (2) da quantidade de cana-de-açúcar colhida; e, (3) da energia elétrica que poderia ter sido gerada se a biomassa de cana-de-açúcar colhida fosse empregada na cogeração.

Figura 7 – Potencial de complementariedade dos resíduos do setor sucroenergético em relação à hidreletricidade para a safra de 2015/2016 e 2016/2017.

Fonte: Elaboração própria com dados de ONS (2017) e UNICA (2019).

Pela Figura 7, é possível ver que a utilização de energia elétrica cogerada nas usinas de cana-de-açúcar consegue complementar a oferta de hidroeletricidade durante a colheita de cana-de-açúcar, isto é, entre os meses de abril a novembro. Assim, a complementariedade pelo setor sucroenergético vai ao encontro com o modelo do setor elétrico que preza pela geração distribuída.

3. AVALIAÇÃO DE PROJETOS POR OPÇÕES REAIS

Neste capítulo é apresentada a avaliação de investimentos e projetos pela metodologia de Opções Reais (OR). Na primeira seção é feita uma breve introdução, que contempla os pressupostos e condições para o uso desta metodologia, acompanhada de uma revisão de literatura. Depois, na segunda seção, é feito um breve histórico do surgimento e dos primeiros usos desta técnica no mundo e no Brasil. Já na terceira seção são descritos brevemente as principais metodologias para aplicação das opções reais.

Na sequência, na quarta seção, é feito um panorama das OR no setor sucroenergético. Sendo assim, os pressupostos e condições mencionados na primeira seção são comentados em mais detalhes sobre como eles são aplicados no setor. Além disso, as possíveis flexibilidades gerenciais e as incertezas do setor encontrados na literatura são comentadas. Por último, são apresentados também quais os métodos utilizados nos principais trabalhos localizados durante essa pesquisa.

3.1. Introdução às opções reais

A metodologia de Opções Reais (OR) surgiu como uma complementação à teoria de avaliação de investimentos por fluxo de caixa descontado (FCD). Nesta técnica é tomada apenas a decisão de investir ou não em um projeto. Dessa maneira, considerando-se o indicador de FCD valor presente líquido (VPL), dada uma série de entradas e saídas de caixa $D_1, D_2, D_3, \dots, D_N$, tal que N representa períodos em uma unidade de tempo e i a taxa mínima de atratividade (TMA), que representa o custo de oportunidade. Assim, o cálculo do VPL é feito conforme a equação (3.1) abaixo.

$$VPL(n) = \frac{D_0}{(i+1)^0} + \frac{D_1}{(i+1)^1} + \frac{D_2}{(i+1)^2} + \dots + \frac{D_n}{(i+1)^n} \quad (3.1)$$

Pela equação (3.1), se $VPL(n) > 0$, então a empresa deve investir nesse projeto. Caso $VPL(n) < 0$, deve-se rejeitar o projeto. Por último, se $VPL(n) = 0$, a empresa é indiferente entre investir ou não no projeto.

Percebe-se que, pelo exemplo acima, os indicadores de FCD são de fácil compreensão, logo são bem acessíveis. Inclusive, Lambrecht (2017) aponta que essa é a principal vantagem do FCD sobre as OR. Entretanto, esses indicadores são na verdade insuficientes para modelar a

tomada de decisão em projetos (SANTOS *et al.*, 2014). Entre as razões disso, destaca-se em primeiro lugar que as incertezas referentes aos fluxos de caixa são medidas apenas pela TMA, ou seja, todas as possíveis incertezas, como por exemplo, preço, oferta e demanda são quantificadas por um único fator, o que é feito inadequadamente. Em segundo lugar, ocorre que qualquer flexibilidade que mude o momento de investimento, isto é, qualquer oportunidade de realizar alterações nos investimentos durante o projeto, é ignorada. E, finalmente, as técnicas de FCD consideram as decisões de investimentos como reversíveis, excluindo qualquer flexibilidade de espera (DIXIT, PINDYCK, 1994; TRIGEORGIS, 1996; DIAS, 2014).

Mais especificamente sobre a questão da flexibilidade, esta não é incorporada no processo de tomada de decisão com base na metodologia de FCD, pois os seus procedimentos envolvem fluxo de caixa esperado e assume um papel passivo e estático do tomador de decisão (TRIGEORGIS, 1996). Assim, conforme Dixit e Pindyck (1994) apontam, o custo de oportunidade de qualquer mudança de decisão de investimentos ao longo do tempo nos projetos é ignorado, levando a decisões erradas. Dias (2014) acrescenta que as OR “ênfatizam o valor da flexibilidade do tomador de decisão em alterar os rumos de um projeto ou a operação de um ativo real especialmente em condições de incerteza”. Logo, as alternativas de investimento são explicitamente modeladas nas OR, diferenciando os possíveis cenários claramente, ao contrário do FCD (HO *et al.*, 2004). Portanto, as OR conseguem complementar o FCD por meio da quantificação das flexibilidades nos projetos.

Quanto ao aspecto de modelagem de incertezas, como já mencionado anteriormente, no FCD as incertezas nos projetos são quantificadas insuficientemente pela TMA, isto é, a taxa de desconto (DIXIT; PINDYCK, 1994). Além disso, de acordo com Dixit e Pindyck (1995), o ambiente econômico quando as técnicas de FCD foram criadas não era tão incerto quanto no final do século XX, quando as OR se popularizaram. Sendo assim, é necessário maior aprofundamento sobre tal aspecto. Ocorre que elas podem ser divididas em dois grupos: (a) incertezas econômicas e (b) incertezas técnicas. O primeiro tipo refere-se às oscilações de mercado, que são variáveis exógenas ao projeto a ser avaliado, como por exemplo, preços, demanda, taxa de juros, etc. Já o segundo tipo são incertezas endógenas ao projeto, como por exemplo, para o setor sucroenergético, qualidade da cana-de-açúcar, quantidade de etanol processado na destilaria (DIAS, 2014). Portanto, uma única taxa de desconto é inadequada para quantificar tal complexidade de incertezas econômicas e técnicas descritas em tomada de decisão.

Ocorre que em situações de incerteza de preço de venda, para um produtor, um aumento em tais preços, aliado a uma flexibilidade de uma *opção de expansão* de sua produção, agrega valor. De maneira semelhante, uma queda nos preços de venda, com uma outra flexibilidade de uma *opção da redução* da produção, ou ainda, uma *opção de parada temporária* e, em um último caso, uma *opção de abandono*, também agregam valor ao projeto. Nesse sentido, as incertezas e as flexibilidades agregam valor ao projeto.

Já sobre a irreversibilidade de investimentos, que também agrega valor para a tomada de decisão (DIXIT; PINDYCK, 1994; DIAS, 2014), ocorre que as decisões de investimento possuem irreversibilidade total ou parcial, como por exemplo, uma firma pode definir um contrato de produção com quantidade e preço fixos, tal que para reverter esta decisão haveria um custo de quebra de contrato.

Percebe-se que há uma irreversibilidade na tomada de decisão da produção a contrato, ainda que parcial, pois a quebra desse contrato implica custos para a firma. Logo, há uma flexibilidade da usina esperar para ter mais informações de mercado, as quais podem diminuir as incertezas e indicar com mais clareza se de fato tal contrato deve ou não ser fechado. Assim, a irreversibilidade de uma decisão envolve valor, pois, uma vez que uma decisão é feita, não é possível desfazê-la por completo sem custos, mas também outras decisões futuras não podem mais ser feitas.

Portanto, a análise de OR pode ser interpretada como um problema de otimização, o qual quantifica a flexibilidade do tomador de decisão em alterar os rumos pré-estabelecidos do projeto a qualquer momento, sob incertezas econômicas e técnicas, complementando uma decisão irreversível de investimento. Assim, o valor da decisão ótima de investimento pelas técnicas tradicionais de FCD, ou seja, a “regra do VPL”, é complementado com o valor das flexibilidades e suas incertezas, o qual é acrescido ao valor da decisão ótima inicial. Nesse sentido, as OR conseguem complementar o cálculo de FCD por meio da incorporação do valor das flexibilidades e incertezas. Portanto, por essa linha de raciocínio, pode-se formalizar a equação (3.2) abaixo, conforme baseado em Trigeorgis (1993).

$$VPL_{\text{expandido}} = VPL_{\text{tradicional}} + \text{Valor das opções reais} \quad (3.2)$$

3.2. Histórico de opções reais

No final da década de 60, os pesquisadores Fischer Black e Myron Scholes começaram a trabalhar em um modelo matemático para quantificar opções europeias financeiras por meio de uma equação diferencial parcial. Assim, em 1973, eles publicaram o seminal artigo "*The Pricing of Options and Corporate Liabilities*" com a formalização do modelo. Naquele mesmo ano, Robert C. Merton publicou também sua análise sobre este modelo, contribuindo para o mesmo. Assim, surgiu o modelo de Black-Scholes-Merton cuja principal contribuição é a quantificação do valor de opções financeiras por meio valorização das incertezas e flexibilidades inerentes das opções. Mais tarde, em 1997, os autores⁷ foram laureados com o Nobel da economia por sua contribuição.

Com isso, na década de 1970, começaram as primeiras tentativas de adaptar a modelagem de Black-Scholes-Merton para ativos reais, isto é, para ativos não financeiros apenas, ou seja, projetos, indústrias, equipamentos, ativos intangíveis (MYERS, 1977). Assim, Stephen Myers foi o primeiro a utilizar a expressão *Real Options* (em português, Opções Reais). Ainda assim, o primeiro modelo de OR foi formulado em 1979 pelo brasileiro Octavio Tourinho, o qual utilizou o modelo para quantificar a flexibilidade da opção de espera na exploração de petróleo (TOURINHO, 1979). Depois, surgiram as primeiras iniciativas e análises sobre irreversibilidade e OR, oriundas de pesquisas na área de economia ambiental, nas quais se discutiu sobre a irreversibilidade na decisão de não preservação de florestas e parques ambientais (DIAS, 2014).

Com o passar dos anos, na década de 80, outros trabalhos relevantes sobre a modelagem de incertezas em investimentos foram escritos. Em relação à opção de espera e irreversibilidade de investimentos, Bernanke (1983) definiu o “princípio das más notícias”, que indica que a preferência pela espera é definida pela possibilidade de um benefício no futuro; Pindyck (1988), definiu que há um nível (*threshold*, em inglês) de retorno para que o tomador de decisão seja indiferente entre investir imediatamente (mesmo que irreversível) ou exercer a opção de espera; McDonald e Siegel (1986), modelaram o momento ótimo de investir em um projeto irreversível.

Nesse período, outros trabalhos relevantes também foram escritos, como por exemplo, com Paddock *et al.* (1988), que modelaram a decisão de investimento em reservas petrolíferas; e

⁷ Dado que na data desta premiação Robert C. Merton já tinha falecido, apenas Fischer Black e Myron Scholes receberam o prêmio.

Brennan e Schwatz (1985), que modelaram a gestão de uma mina de cobre, determinando o momento ótimo de investir e abandoná-la também. Além disso, entre as dissertações e teses de mestrado no Brasil, de acordo com Costa (2014), houve a primeira defendida sobre o tema de OR, por Cardoso (1989), que pesquisou avaliação de projetos com a opção de abandono.

Depois, na década de 1990, surgiram os primeiros livros dedicados inteiramente às OR. Destacam-se os livros de Dixit e Pindyck (1994), Trigeorgis (1996), Amram e Kulatilaka (1999), os quais contribuíram para a área e estabeleceram a metodologia de OR como uma das principais metodologias de avaliação de investimentos. Mais tarde, nos anos 2000, surgiram mais livros sobre o tema, entre eles, em 2001, o primeiro livro traduzido para língua portuguesa, de Copeland e Antikarov (2001) e os primeiros livros de autores brasileiros, os quais ocorreram com Minardi (2004), Brasil *et al.* (2007) e depois com Souza Neto *et al.* (2008). Ademais, aumentou-se muito o número de dissertações e teses de doutorado defendidas sobre essa temática (COSTA, 2014).

Entre os fatores para o sucesso e popularização das OR, Lambrecht (2017) aponta que as OR são mais realistas, dado que são fundamentas em modelos dinâmicos, com os quais é possível quantificar previsões e volatilidades das incertezas. Além disso, o autor destaca que com esses modelos é possível aplicar dados e realizar inferências sobre os mesmos, ao contrário dos modelos estáticos baseados em FCD. Acrescenta-se que, de acordo com Copeland e Antikarov (2001), em setores de energia e mineração, nos quais os ativos contingentes são comercializados em mercados financeiros, há mais dados para serem modelados e assim, é possível quantificar a volatilidade de tais ativos e, finalmente, quantificar também as flexibilidades geradas em projetos nesses setores.

É possível também destacar a área de pesquisa acadêmica brasileira sobre OR e suas aplicações. Para as usinas sucroalcooleiras, como por exemplo, em trabalhos de Gonçalves *et al.* (2006), Pessoa (2011) e Tatoni (2012). No setor petrolífero, com Suslick e Schiozer (2004), Postali (2004), Dias (2005), Silva (2010) e Fonseca *et al.* (2017); na geração de energia elétrica, com Marreco (2007), Batista *et al.* (2011) e Souza (2017); na avaliação de investimentos em energia fotovoltaica, com Mello (2015) e Bacelar *et al.* (2018); e, na exploração de minérios, com Pessoa (2006), Melin (2008), Raphael (2010) e Freitas *et al.* (2018).

3.3. Metodologias para uso da avaliação por opções reais

Há diversos métodos para solucionar problemas de tomada de decisão para opções reais. Nesta seção, os principais métodos serão brevemente apresentados aqui. Na Figura 8 abaixo, selecionada do livro texto de Dias (2014), há uma representação dos diferentes métodos.

Figura 8 – Métodos de solução para Opções Reais

Fonte: Dias (2014).

Pela Figura 8 é possível observar que a modelagem por OR pode ser feita em dois grupos principais, os quais são (1) portfólio sem risco (não-arbitragem); e (2) medida neutra ao risco Q (método de *martingale*). Cada uma das duas abordagens pode ser aplicada tanto em tempo discreto ou em contínuo. Abaixo segue um resumo desses principais métodos.

Método binomial (lattice): Método proposto por Cox *et al.* (1979) inicialmente para avaliar opções financeiras. Nesse método considera-se um ativo V_t , o qual pode ter seu valor pode ser alterado para apenas uma das duas opções a seguir: $V^+ = uV$, ou $V^- = dV$, tal que $u > 1 > d$, em um período a frente com probabilidades p e $1 - p$, respectivamente. Na sequência, abaixo, na Figura 9, há uma representação das possíveis recombinações de subidas e descidas do ativo V_t em uma árvore de dois períodos.

Figura 9 – Árvore binomial com dois períodos

Fonte: Elaboração do autor.

Com essa metodologia é possível ter maior intuição do que acontece com os ativos ao longo do tempo. Desse modo, é possível prolongar os crescimentos e decrescimentos do ativo e obter uma árvore de decisão com os possíveis valores do ativo e suas probabilidades de ocorrência (AMRAM; KULATILAKA, 1999). Além do binomial, é possível também usar essa abordagem para um número maior de cenários, como trinomial, ou até o quadrinomial.

Já em relação às probabilidades, estas podem ser calculadas pelo método do portfólio sem risco, ou ainda pelo método da medida neutra ao risco Q . Os valores de subida e descida, respectivamente, u e d são em geral mais facilmente modelados pelo movimento geométrico browniano (MGB)⁸. Por isso, Copeland e Antikarov (2001) atribuem que, com este formato e com o advento da computação e dos *softwares* de planilha eletrônica, esse método passou a ser mais utilizado e conseguiu popularizar as Opções Reais.

Ainda segundo esses autores, antes da computação, as OR eram um campo exclusivo dos acadêmicos que utilizavam metodologias de compreensão muito difíceis, pelas equações diferenciais estocásticas de Itô. Ademais, esse método é mais adequado para opções finitas com

⁸ No Capítulo 4 – Metodologia serão explicados os processos estocásticos MGB e MRM.

expiração, com uma variável estocástica com uma ou duas opções no máximo, cujas soluções são calculadas por métodos numéricos (DIAS, 2014).

Equação diferencial parcial (EDP): Seja um portfólio Φ sem risco, tal que $\Phi = F - nV$, que descreve uma relação de livre arbitragem entre a opção F e seu ativo subjacente (variável independente da opção) V , a ser modelado por um processo estocástico. Assim, por meio da expansão de Itô-Doeblin é possível obter a equação diferencial parcial da opção F , a qual segue abaixo na equação (3.3).

$$\frac{1}{2} \sigma^2 V^2 \frac{\partial^2 F}{\partial V^2} + (r - \delta) V \frac{\partial F}{\partial V} - rF + \frac{\partial F}{\partial t} = 0 \quad (3.3)$$

No caso da equação (3.3), assume-se que F é uma opção que depende do tempo t e de seu ativo básico V , o qual foi modelado aqui por um movimento geométrico browniano. Caso o ativo V fosse modelado por um movimento de reversão à média, a equação seria reescrita na equação (3.4) abaixo.

$$\frac{1}{2} \sigma^2 V^2 \frac{\partial^2 F}{\partial V^2} + (r - \mu + \eta(\bar{V} - V)) V \frac{\partial F}{\partial V} - rF + \frac{\partial F}{\partial t} = 0 \quad (3.4)$$

Além da abordagem por portfólio sem risco, é possível também usar uma abordagem pela medida neutra ao risco Q , com a qual as soluções podem ser encontradas por métodos numéricos e para as opções sem expirações é possível aplicar encontrar soluções analíticas.

Para encontrar sua solução é possível aplicar métodos numéricos, nos quais algoritmos computacionais procuram a solução mais próxima da ótima. Embora seja possível resolver as EDPs por métodos numéricos mesmo com maior número de incertezas, há maior nível de complexidade envolvida, sendo inclusive tema de pesquisa na área de matemática aplicada, tal que, para o caso de duas ou mais variáveis estocásticas, por esse método há problemas de dimensionalidade, os quais podem dificultar sua utilidade. (AMRAM; KULATILAKA, 1999; DIAS, 2014).

Simulação de Monte Carlo⁹: O método de simulação de Monte Carlo consiste na geração de números aleatórios, de tal forma que se prevê possíveis resultados que as incertezas poderiam

⁹ Uma vez que se usará a simulação de Monte Carlo como método de solução para o objetivo principal deste trabalho, esta metodologia será descrita com maior profundidade no Capítulo 4 – Modelagem.

assumir. Para isso, escolhe-se as distribuições de probabilidade das variáveis aleatórias do modelo, representando os dados de entrada. Para as opções reais, os dados de entrada representam as incertezas referentes aos ativos subjacentes do modelo. Assim, ferramentas computacionais geram números aleatórios, com os quais é possível visualizar o comportamento da variável de saída, as quais são geralmente o VPL ou o lucro do projeto.

Trata-se de um método útil para o caso de duas ou mais variáveis estocásticas, principalmente para evitar problemas de dimensionalidade que pode ocorrer em outros métodos, como o da EDP. Nesse método, o valor da opção é estimado sem a necessidade de formalizar uma equação com todos os “algebrismos”. Novamente, para esse método, será utilizado a medida neutra ao risco Q , para que se possa modelar as opções reais (AMRAM; KULATILAKA, 1999; MUN, 2006; DIAS, 2014).

3.4. Opções reais no setor sucroenergético

No setor sucroenergético, a metodologia de avaliação econômica por OR já vem sendo usada há alguns anos. Com o fim do protecionismo ao setor, as usinas sucroenergéticas foram forçadas a buscarem novas práticas de gestão para se manterem no mercado. Nesse mesmo período, houve também valorização das *commodities* agrícolas, com muitas passando a serem negociadas em mercado financeiro. Logo, passou-se a ter novos dados de preço e demanda, de tal forma que as incertezas – isto é, as incertezas de mercado referentes aos movimentos de preços, oferta e demanda, bem como incertezas regulatórias, referentes às mudanças de regras de órgãos regulatórios – puderam ser modeladas pelas metodologias já empregas anteriormente em ativos financeiros.

Em relação ao pressuposto de irreversibilidade na tomada de decisão para o setor sucroenergético, ocorre que o custo fixo inicial do investimento é ao menos parcialmente irrecuperável. Sabe-se que ativos físicos, como por exemplo, equipamentos industriais, caminhões, tratores, etc., se desvalorizam ao longo do tempo e não é possível recuperá-los inteiramente. Além disso, mesmo após tais investimentos fixos iniciais, a tomada de decisão para os períodos seguintes também envolve outras decisões sobre investimentos irre recuperáveis, como por exemplo, na produção de açúcar e etanol, na qual não é possível desfazer os investimentos para produção dos mesmos.

Ocorre que na produção de açúcar e etanol nas usinas há uma alternativa de estabelecer contratos de produção com cooperativas, as quais comprarão quantidades de ambos os produtos a preços pré-estabelecidos durante toda a safra. Por um lado, tais contratos protegem o produtor de eventuais preços baixos de mercado, trazendo maior segurança. Além disso, há maior previsibilidade para toda a cadeia de produção (SANT'ANNA *et al.*, 2015). Portanto, percebe-se que há mais uma irreversibilidade na tomada de decisão de investimentos, por meio da qual se a usina decidir vender seus produtos a contratos estabelecidos antes do início, logo não será possível desfazer tal decisão em sua totalidade.

Já por outro lado, com o contrato de produção, o produtor fica preso a um contrato e não consegue explorar as possíveis flexibilidades que poderiam existir dadas as incertezas nos preços. Assim, uma alternativa aos contratos estabelecidos no início da safra seria a usina decida por atuar no mercado *spot*, ou seja, no mercado à vista. De tal forma que seria possível vender seus produtos aos preços de mercado. Nesse sentido é possível explorar as flexibilidades de produção e as incertezas de preço.

Em relação às flexibilidades das usinas sucroalcooleiras, de acordo com a literatura encontrada, a teoria de OR pode modelar a *opção de expansão* da produção por meio do simples aumento da produção, conforme ainda existir excesso de capacidade produtiva (PEDERSON; ZOU, 2009). Ainda em relação a esta flexibilidade, tal expansão pode ocorrer também por meio da comercialização do excedente de energia elétrica cogerada. Assim, conforme Vollert (2012) e Dias (2014), em situações favoráveis de mercado, há OR *agressivas*, que podem aumentar os ganhos. Na literatura há trabalhos que avaliaram esta alternativa de expansão (DIAS *et al.*, 2011; SILVA, R. I., 2012; TATONI, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2014; SAMANEZ *et al.*, 2017). Por outro lado, de maneira equivalente, é possível também realizar a *opção de contração/redução* da produção. Esta é o exemplo de uma OR *defensiva*, pois protege o investimento em situações desfavoráveis de mercado.

Outra flexibilidade defensiva, a qual é pesquisada neste trabalho é a escolha da produção final, isto é, a escolha da proporção a ser produzida entre etanol e de açúcar. Este é o caso do *switch-output option* (KULATILAKA, 1993; KULATILAKA; TRIGEORGIS, 2004; DIAS, 2014), também chamada de *opção de conversão* na literatura brasileira em Opções Reais para o setor sucroenergético. Ocorre que as usinas de cana-de-açúcar, que possuem destilarias anexas, podem escolher o *mix* de produção, isto é, a proporção a ser produzida entre etanol e açúcar. Assim, conforme há maior valorização no mercado por um dos produtos, as usinas conseguem

aumentar a proporção deste no *mix* (GONÇALVES *et al.*, 2006, BASTIAN-PINTO *et al.*, 2007; BASTIAN-PINTO *et al.*, 2009, DIAS *et al.*, 2011; PESSOA, 2011; PANTOJA *et al.*, 2016).

Mais especificamente, conforme Bastian-Pinto *et al.* (2009), um modelo matemático que valoriza a flexibilidade da escolha de produção entre etanol e açúcar incorpora 19% a mais valor do que um modelo que considera um único produto final. Dessa forma, o tomador de decisão em uma usina sucroenergética pode escolher uma nova proporção da produção de usina, diferente de meio a meio, a fim de maximizar suas receitas e garantir melhores indicadores financeiros (DIAS *et al.*, 2011).

Houve também outras flexibilidades que já foram objeto de estudo na literatura. Há a flexibilidade por meio da *opção de conversão por rotação de culturas*, a qual consiste realizar o plantio de outra cultura nos locais de reforma do canavial (FARINELLI, 2017). Nessa pesquisa, Farinelli (2017), encontrou resultados indicando que a rotação de culturas entre soja e cana-de-açúcar era mais rentável que usar apenas a cana-de-açúcar. O modelo da autora também incorporou a avaliação de entrada, isto é, a análise da *opção de entrada* em investimentos no setor, na qual são considerados todos os aportes de investimentos fixos, conforme feito também por Zilio e Lima (2015), para avaliar a atratividade de canaviais no interior paulista.

Além da opção de entrada avulsa, também foi encontrado o caso de interação entre opções, as quais são as opções de entrada, parada temporária, reativação e saída, que são os modelos de *histerese* (DIXIT, 1992), encontrados no trabalho de Schmit *et al.* (2009). Neste artigo, os autores modelaram o investimento em uma usina exclusiva de etanol a milho. Nisso, os autores encontraram os valores do preço do etanol de milho, para os quais se deveria investir na usina de milho, e, caso o preço diminuísse, seria definido qual seria o valor para parar temporariamente a produção, bem como o valor para a produção ser retomada e, por último, o valor que a produção deveria parar definitivamente.

Alguns desses trabalhos, como em Pereira (2008) e Schmit *et al.* (2009), por exemplo, inclusive compararam as vantagens e desvantagens entre ambas as técnicas de FCD e OR na metodologia de seus trabalhos. Segundo os autores, quando ambas as técnicas são comparadas é possível perceber como os resultados são diferentes, tal que as incertezas em relação à margem de preços do etanol não conseguem ser quantificadas por FCD. Essas flexibilidades, que teriam sido ignoradas pelas tradicionais técnicas de gestão e avaliação econômico-financeira, como o FCD,

acrescenta valor aos projetos sucroenergéticos na tomada de decisão (GONÇALVES *et al.*, 2006; PENEDO, 2008; BASTIAN-PINTO *et al.*, 2009; PESSOA, 2011). Acrescenta-se que, conforme estudo de Zilio e Lima (2015), para avaliação de investimentos em duas usinas no interior do estado de São Paulo, o retorno do investimento era de 42% maior quando se utilizou as OR para complementar a avaliação das mesmas.

Há também outras flexibilidades que podem trazer valor à avaliação econômica em usinas sucroenergética, as quais não foram encontradas na literatura. Elas são a *opção de parada temporária* (a qual é objeto de estudo nesta pesquisa) e também a *opção de abandono*. Ocorre que, em situações de quedas nos preços do etanol e açúcar, as usinas operam em prejuízo. Logo, surge a flexibilidade de realizar uma parada temporária na operação da usina até que os preços retornem ao patamar anterior. Nesta situação, a usina não teria que incorrer os custos variáveis de produção, mas apenas as despesas fixas. Há ainda também mais uma alternativa, em caso de prolongamento do período de preços baixos, a qual se trata da opção de abandono, na qual as usinas parariam definitivamente a produção e não incorreriam nem custos variáveis, nem custos fixos.

Assim, as metodologias utilizadas nos trabalhos do setor sucroenergético, foram listadas em dois grupos: (1) metodologias para modelar a tomada de decisão frente às flexibilidades; (2) metodologias para modelar as de fontes de incertezas, isto é, as variáveis aleatórias preço do açúcar, do etanol, ou até preço de energia elétrica.

Para modelar as flexibilidades, temos as metodologias listadas na seção 3.3 anterior. Pelo levantamento da literatura, a mais utilizada foi a binomial (*lattice*). Ocorre que, uma vez que tal metodologia requer um arcabouço teórico matemático mais simples, já se esperava o maior uso de tal metodologia.

Já o uso das EDPs, que foi encontrada apenas no trabalho de Schmit *et al.* (2009), é conveniente para o uso de uma única incerteza, ou ainda com o máximo de duas incertezas, se for possível manter a homogeneidade para a opção. Como em Schmit *et al.* (2009) foi utilizada apenas uma incerteza – no caso, o preço do etanol de milho –, a abordagem de OR por EDP é bem viável. Já nos demais trabalhos encontrados, principalmente nos que trabalharam com uma incerteza para o preço do açúcar e outra para o do etanol, a dificuldade da modelagem é mais elevada.

Também foram encontrados alguns trabalhos com a metodologia de simulação de Monte Carlo (PESSOA, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2014). De acordo com Dias (2014), para o uso de várias

fontes de incerteza, essa é de longe a metodologia mais indicada. Logo, como na pesquisa houve trabalhos (já citados nesse parágrafo) que optaram por trabalhar com mais de uma incerteza simultaneamente, esta metodologia foi bem indicada em tais situações.

Já para modelar as fontes de incerteza, uma vez que se trata de modelagem de *commodities*, há uma expectativa maior para o uso de MRM¹⁰ para as variáveis séries de preço. Ainda assim, é possível modelar *commodities* pelo MGB, como Gonçalves *et al.* (2006), Zilio e Lima (2015) e Farinelli (2017), para o preço do etanol e do açúcar; Tatoni (2012), para o preço da energia elétrica; e Schmit *et al.* (2009), para o etanol de milho, ou ainda, como na modelagem de outras *commodities*, por exemplo, o preço do petróleo, por Postali e Picchetti (2006).

A preferência da utilização de um MGB para modelagem das séries de preço decorre do fato que a modelagem das flexibilidades fica mais fácil com esse modelo para incertezas. Conforme destaca Dias (2014), na metodologia binomial (*lattice*) e também por EDP, o MGB é mais fácil para aplicar tais métodos, quando comparado com o MRM. Mais ainda, é possível chegar a resultados por soluções analíticas, enquanto que por MRM, as soluções são encontradas por métodos numéricos mais difíceis. Ainda assim, houve trabalhos que optaram por utilizar o método binomial (*lattice*) com o MRM, como por exemplo, Dias *et al.* (2011), Silva (2012), Pantoja *et al.* (2016) e Samanez *et al.* (2017). Além desta metodologia, por meio de simulação de Monte Carlo, com Pessoa (2011) e Oliveira *et al.* (2014) também foi utilizado o MRM para as incertezas.

Para finalizar esta seção, na Tabela 2 abaixo segue um resumo, identificando o ano de publicação do trabalho, o(s) autor(es), os métodos de OR utilizado, a modelagem estocástica para as incertezas, e as flexibilidades avaliadas.

¹⁰ As razões de tal expectativa são explicadas no Capítulo 4 – Modelagem.

Tabela 2 – Resumos das principais publicações de OR no sucroenergético

Ano	Autor(es)	Método de OR	Modelagem Estocástica	Flexibilidades Avaliadas
2006	Gonçalves <i>et al.</i>	Quadrinomial (<i>lattice</i>)	MGB	Opção de conversão
2009	Bastian-Pinto <i>et al.</i>	Binomial (<i>lattice</i>)	MRM	Opção de conversão
2009	Schmit <i>et al.</i>	EDP	MGB (etanol de milho)	Opção de entrada, parada temporária, reativação e saída
2011	Pessoa	Simulação de Monte Carlo	MRM com saltos de Poisson	Opção de conversão
2011	Dias <i>et al.</i>	Binomial (<i>lattice</i>)	MRM	Opção de expansão (para cogeração e aumento de produção de etanol e açúcar)
2012	Tatoni	Binomial (<i>lattice</i>)	MGB (preço da energia elétrica)	Opção de expansão (para cogeração)
2012	Silva	Binomial (<i>lattice</i>)	MRM (preço da energia elétrica)	Opção de expansão (para cogeração)
2014	Oliveira <i>et al.</i>	Simulação de Monte Carlo	MRM com saltos (preço da energia elétrica)	Opção de expansão (para cogeração)
2015	Zilio e Lima	Binomial (<i>lattice</i>)	MGB	Opção de entrada
2016	Pantoja <i>et al.</i>	Binomial (<i>lattice</i>)	MRM	Opção de conversão
2017	Farinelli	Binomial (<i>lattice</i>)	MGB	Opção de conversão (por rotação de culturas)
2017	Samanez <i>et al.</i>	Quadrinomial (<i>lattice</i>)	MRM	Opção de expansão (para cogeração)

Fonte: Elaboração do autor com informações dos autores citados na tabela.

4. TRAJETÓRIA DAS SÉRIES DE PREÇOS

Este Capítulo quatro apresenta a modelagem das séries de preços. Na primeira seção é descrita as bases de dados que serão utilizadas ao longo desta tese de doutorado, isto é, as séries de preço do etanol, do açúcar e da gasolina.

Na sequência, na segunda seção, são descritos os processos estocásticos que podem ser utilizados para essas séries, isto é, conforme o título deste capítulo, são descritas as trajetórias das séries de preços. Para isso, são feitos testes de raiz unitária, bem como estimativa dos parâmetros dos processos estocásticos.

Por último, discorre-se sobre a transmissão de preços entre as séries de etanol, açúcar e gasolina, dado que choques exógenos em uma série podem ser transmitidos para as demais. Nesse sentido, essas três séries são analisadas conjuntamente em um modelo de vetor autorregressivo (VAR).

4.1. Base de dados

Neste trabalho são modeladas as séries mensais de preço do etanol veicular hidratado, em R\$/l (ANP, 2018), da gasolina veicular (tipo C, comum), em R\$/l, (ANP, 2018) e da saca de açúcar VHP (*Very High Polarized*), em R\$/saca (CEPEA-Esalq, 2018). As duas primeiras de julho de 2001 a dezembro de 2017, enquanto a última a partir de maio de 2002 até dezembro de 2017 também. Todas as séries foram corrigidas pelo índice IPCA (IBGE/SNIPC, 2018), considerando dezembro/2017 como valor base.

As séries de preços de combustíveis disponibilizadas pela ANP consistem em um cálculo de preço médio entre postos de combustíveis em todo território brasileiro. Para isso, de acordo com ANP (2018), os preços são pesquisados em mais de 15.000 postos. Apesar de haver diferenças de preços entre os estados, para dezembro/2017, por exemplo, o coeficiente de variação neste mês foi de 6,2% e 11,9% para gasolina e etanol, respectivamente (ANP, 2018). Logo, percebe-se que a dispersão é baixa, principalmente para gasolina. Mais ainda, uma vez que se considera uma usina fictícia, a qual poderia estar localizada ou na Região Sudeste, ou na Centro-Oeste, ou até na Nordeste, optou-se por uma série de preços que considera todo o território nacional.

Para a série de preços do açúcar, há diversas séries de preços, como por exemplo, preço do açúcar cristal, refinado, branco, entre outros. Ainda assim, é importante relevar que a maior parte da produção brasileira de açúcar é destinada ao mercado externo. Na safra 2017/2018, em uma produção de 38,5 milhões de toneladas de açúcar, a exportação foi de 27,8 milhões de toneladas (UNICA, 2019). Assim, nessa safra, 72,2% de todo açúcar produzido foi exportado. Por isso, decidiu-se por utilizar uma série de preços para o mercado externo. Assim, a série de preços do açúcar VHP (*very high polarized*) foi escolhida, pois este é produzido para ser vendido no mercado internacional. Na Figura 10 abaixo é possível visualizar tais séries, já corrigidas, portanto, em preços reais.

Figura 10 – Séries temporais de etanol, gasolina e açúcar.

Fonte: Elaboração própria com dados de ANP (2018), CEPEA-Esalq (2018) e IBGE/SNIPC (2018).

Além da visualização das séries temporais na Figura 10. Abaixo, na Tabela 3, segue o resumo das principais medidas estatísticas descritivas dos dados, já deflacionados.

Tabela 3 – Resumo estatístico das séries temporais

	Etanol	Gasolina	Açúcar
<i>Média</i>	2,732	4,221	50,123
<i>Mediana</i>	2,672	4,157	48,813
<i>Desvio padrão</i>	0,281	0,405	10,476
<i>Coeficiente de variação</i>	10,31%	9,61%	20,90%
<i>Mínimo</i>	2,226	3,606	29,504
<i>Máximo</i>	3,790	5,159	74,606
<i>Contagem</i>	198	198	188

Fonte: Elaboração do autor com dados de ANP (2018), CEPEA-Esalq (2018) e IBGE/SNIPC (2018).

Por último para a modelagem de tais séries, serão considerados os retornos logarítmicos das mesmas. Assim, para cada observação de uma série P_t foi calculado $\ln\left(\frac{P_t}{P_{t-1}}\right)$.

4.2. Processos estocásticos para as séries de tempo

Na sequência, é testado se as séries de etanol e açúcar seguem um movimento geométrico browniano (MGB) ou um movimento de reversão à média (MRM). Ambos os processos estocásticos são formados por um fator de tendência e um de aleatoriedade. Enquanto o primeiro fator é diferente em cada processo, o último é o mesmo, o qual se trata do processo de Wiener. Ocorre que sempre que a aleatoriedade é formada por um processo de Wiener, também dizemos que temos um processo estocástico de Itô.

O processo de Wiener, também conhecido como movimento browniano, é definido por um processo estocástico contínuo $dz_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sqrt{\Delta t} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{T}{n}}$, com $z(0) = 0$, distribuição normal com $E(z) = 0$ e $Var(z) = dt$. Além disso, este processo possui as propriedades de Markov, isto é, sem memória, logo a distribuição de probabilidade depende apenas de seu valor corrente, tal que $P(z_{t+1} | z_t, z_{t-1}, \dots, z_{t-m}) = P(z_{t+1} | z_t)$ e também possui a propriedade de martingale, isto é, trata-se de um processo sem tendência, ou seja, centrado em seu valor corrente, uma vez que $E[z_s | z_0 = 0] = E[z_0]$.

No MGB, o processo de Wiener é multiplicado por um fator σ (desvio-padrão) e seu termo de tendência ao longo do tempo é multiplicado por um fator α (valor esperado). Assim, a equação (4.1) define o MGB.

$$\frac{dX_t}{X_t} = \alpha dt + \sigma dz_t \quad (4.1)$$

Na equação (4.1) é importante destacar que ambos os fatores α e σ representam valores percentuais ao longo de um ano. Além disso, $\frac{dX_t}{X_t}$ segue uma distribuição normal, tal que $N(\alpha dt, \sigma^2 dt)$. Nesse sentido, convém ressaltar que, considerando que o MGB é utilizado para preços, logo a variável X_t possui apenas valores positivos e pode ser modelada por uma distribuição lognormal. Nesse caso, se forem utilizados logaritmos dos preços, temos uma nova variável, digamos V_t , tal que $V_t = \ln X_t \leftrightarrow X_t = e^{V_t}$. Assim, pela expansão de Itô-Doeblin, podemos definir um processo estocástico para V_t pela equação (4.2)¹¹ abaixo.

$$dV_t = d(\ln X_t) = \left(\alpha - \frac{\sigma^2}{2} \right) dt + \sigma dz_t \quad (4.2)$$

Acrescenta-se que, $V_t = \ln X_t$ segue uma distribuição normal com $N\left[\left(\alpha - \frac{\sigma^2}{2}\right) dt, \sigma^2 dt\right]$. Por último, em relação ao movimento geométrico browniano, dada a simplicidade de seu modelo consistir de dois parâmetros apenas e sua propriedade matemática de distribuição normal para logaritmos dos preços, este modelo passou a ser muito utilizado em economia e finanças.

Já os movimentos de reversão à média são processos estocásticos fundamentados em microeconomia. Este modelo é comum em séries de preços de *commodities*. Sendo assim, considera-se que a formação de preços de bens de consumo depende da sua demanda, bem como a demanda também depende do seu preço. Nesse sentido, na ocorrência de um choque positivo exógeno de preço, a demanda diminui. Por sua vez, se tal choque implicar queda nos preços, a demanda também aumenta. Assim, embora haja choques de preços, é observável o comportamento de retorno à média de preços.

Embora o MGB é mais fácil de ser utilizado para a modelagem de opções reais, o MRM é considerado mais adequado, principalmente por conta de seu movimento seguir as leis de oferta e demanda, como as *commodities* em geral. Assim, para a modelagem das séries de preço por

¹¹ Na equação, o MGB para $V_t = \ln X_t$ é transformado em um novo processo estocástico de Itô, o qual recebe o nome de movimento aritmético browniano.

reversão à média utilizou-se o processo Ornstein-Uhlenbeck simples (O-U) de um fator, dado pela equação (4.3) abaixo.

$$dX_t = \eta(\bar{X} - X_t)dt + \sigma dz_t \quad (4.3)$$

Na equação acima, o termo dz_t é o incremento de Wiener. Mais ainda, há o desvio-padrão do processo com o parâmetro σ , tal que σdz_t , representa o termo aleatório do processo estocástico.

Já o termo η representa a intensidade (ou a velocidade) de reversão à média. Logo, quanto maior o valor de η , mais rápido os preços voltarão para à média. Por outro lado, conforme for menor o valor de η , há uma expectativa de maior lentidão de reestabelecimento da média. Além disso, se $\eta \rightarrow 0$, o processo se aproxima de um movimento aritmético browniano sem tendência. Dessa maneira, $\eta(\bar{X} - X_t)$ representa o componente de tendência do processo estocástico.

O termo $\bar{X}$ representa a média do processo estocástico. Dessa maneira, dado que o processo estocástico segue um comportamento microeconômico, se $X_t > \bar{X}$, isto é, $\bar{X} - X_t < 0$, então há uma expectativa de queda nos preços pelo termo de tendência. Por outro lado, se $X_t < \bar{X}$, isto é, $\bar{X} - X_t > 0$, há uma expectativa de aumento nos preços. Contudo, deve-se levar em conta o termo aleatório do processo estocástico e o parâmetro η , tal que mesmo que, por exemplo, em uma situação de $X_t > \bar{X}$, é possível ocorrer um novo aumento de preços para X_{t+1} por conta de choques aleatórios serem maiores que a intensidade do termo η .

Dado X_0 como valor inicial, o valor esperado e a variância são calculadas abaixo respectivamente pelas equações (4.4) e (4.5) abaixo.

$$E(X_t) = \mu = X_0 e^{-\eta t} + \bar{X}(1 - e^{-\eta t}) \quad (4.4)$$

$$Var(X_t) = \sigma_\varepsilon^2 = (1 - e^{-2\eta t}) \frac{\sigma^2}{2\eta} \quad (4.5)$$

Uma vez que serão utilizados dados discretos convém trabalhar com o processo O-U discretizado. Para isso, utiliza-se o modelo autorregressivo de ordem 1, AR (1), o qual é dado pela equação (4.6) abaixo.

$$X_t - X_{t-1} = X_{t-1}(e^{-\eta\Delta t} - 1) + \bar{X}(1 - e^{-\eta\Delta t}) + \sigma \sqrt{\frac{(1 - e^{-2\eta\Delta t})}{2\eta}} N(0,1) \quad (4.6)$$

Por último, este processo admite valores negativos. Para evitar tal problema, utiliza-se o modelo exponencial de O-U. Neste, utiliza-se o logaritmo dos preços. Assim, tem-se que $X = \ln P \leftrightarrow P = e^X$. Dessa maneira, uma vez que os preços são sempre positivos e com distribuição lognormal, o logaritmo neperiano de tais preços seguem uma distribuição normal. Assim, do modelo de O-U simples, na equação (4.3), pela expansão de Itô-Doeblin, é possível chegar no modelo exponencial de O-U definido na equação (4.7) abaixo, da mesma maneira que foi feita anteriormente para o MGB na equação (4.2):

$$\frac{dP}{P_t} = \eta \left(\bar{X} + \frac{\sigma^2}{2\eta} - \ln P_t \right) dt + \sigma dz \quad (4.7)$$

Dado P_0 como valor inicial, o valor esperado e a variância são calculadas abaixo respectivamente pelas equações (4.8) e (4.9).

$$E(X_t) = \text{Exp}[\ln P_0 e^{-\eta t} + \bar{X}(1 - e^{-\eta t})] \quad (4.8)$$

$$\text{Var}(X_t) = \sigma_\varepsilon^2 = (1 - e^{-2\eta t}) \frac{\sigma^2}{2\eta} \quad (4.9)$$

4.2.1. Testes de raiz unitária e estimativa de parâmetros nos processos estocásticos

Para verificar a hipótese de uma série temporal ser modelada por um MGB ou por um MRM, utiliza-se o teste de raiz unitária. Isso decorre do fato de que, se uma série temporal não possui um processo estocástico com média e variância constantes, ou seja, uma hipótese de não estacionariedade, tais quais indicam presença de raiz unitária, este pode ser modelado por um MGB. Por outro lado, caso a hipótese de não estacionariedade for rejeitada, pode-se atribuir à série temporal a modelagem por MRM.

Na sequência, para verificar a estacionariedade há diversos testes. Os principais testes utilizados na literatura são o teste de Augmented Dickey Fuller (ADF) (DICKY; FULLER, 1979), teste

de Phillips-Perron (PHILLIPS; PERRON, 1988), teste de estacionariedade KPSS (KWIATKOWSKI *et al.*, 1992) e teste de raiz unitária de Ng-Perron (PERRON, NG, 1996; NG, PERRON, 2001). Assim, foi utilizado primeiramente o teste de Ng-Perron e para confirmar tais resultados, os testes de ADF e o de KPSS. Além disso, todos os testes foram feitos utilizando tendência e interceptos.

Dessa maneira, calculou-se o logaritmo neperiano das séries temporais e estimou se os parâmetros a e b da regressão linear na equação (4.10) abaixo:

$$\ln\left(\frac{P_t}{P_{t-1}}\right) = a + (b - 1) \ln P_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4.10)$$

Uma vez que os preços seguem uma distribuição lognormal, o logaritmo de tais séries de preços segue uma distribuição normal. Com isso, é possível trabalhar com a regressão linear como a regressão ótima. Assim, testou-se a hipótese nula de $b - 1 = 0$. Se tal hipótese não é rejeitada, nesse caso, os choques exógenos são inteiramente incorporados ao modelo, indicando presença de raiz unitária. Logo, utilizaríamos o MGB para a série de preço. Por outro lado, se a hipótese nula for rejeitada, tais choques não seriam inteiramente incorporados, a ponto de desaparecerem com o passar do tempo, tal que o valor esperado é o mesmo ao longo de todo o processo. Nesse caso, utilizaríamos o MRM para a série de preço. Assim, a seguir na Tabela 4 encontra-se um dos resultados do teste Ng-Perron para as séries de preço.

Tabela 4 – Resultados do teste de Ng-Perron para as séries temporais

<i>Séries de Preços</i>	<i>Variáveis Determinísticas</i>	<i>Lags¹</i>	<i>Estatísticas</i>			
			<i>MZa</i>	<i>MZt</i>	<i>MSB</i>	<i>MPT</i>
Gasolina	Tendência e intercepto	1	-13,402	-2,486	0,185	7,389
D(Gasolina)	Tendência e intercepto	0	-88,536*	-6,647*	0,075*	1,051*
Etanol	Tendência e intercepto	1	-39,884*	-4,4580*	0,1117*	2,3261*
Açúcar	Tendência e intercepto	1	-22,069**	-3,2852**	0,1488**	4,3547**

¹ Cálculo dos *lags* (defasagem) por meio do critério de informação de Schwarz;

Valores com * indicam rejeição da hipótese nula (presença de raiz unitária) a 1%;

Valores com ** indicam rejeição da hipótese nula (presença de raiz unitária) a 5%;

Testes realizados com o *software* econométrico *EViews 10*;

Fonte: Elaboração do autor.

Os resultados indicaram que a hipótese nula, isto é, se a série de preços possui raiz unitária, foi rejeitada ao nível de 1% para o etanol e 5% para o açúcar. Portanto, rejeitam-se as hipóteses de que as séries não são estacionárias. Por outro lado, para a série de preços da gasolina não foi possível rejeitar essa hipótese nula. Logo, não foi rejeitada a hipótese de não estacionariedade. Sendo assim, diferenciou-se esta série uma vez e novamente aplicou-se os testes de estacionariedade. Após a diferenciação, os testes indicaram a ausência da raiz unitária. Portanto, conclui-se que as séries de preço do açúcar e do etanol são do tipo estacionárias e serão modeladas por um MRM para a modelagem de simulação de Monte Carlo por opções reais. Além disso, a série de preços da gasolina é integrada em ordem 1.

Para estimar os parâmetros do MGB, tomamos a equação (4.2) em forma discreta. Para isso, aplica-se a integral estocástica de Itô e obtém-se a equação (4.11) abaixo.

$$\ln X_t - \ln X_{t-1} = \left(\alpha - \frac{\sigma^2}{2} \right) \Delta t + \sigma N(0,1) \sqrt{\Delta t} \quad (4.11)$$

Agora, para estimativa de tais parâmetros, considerando observações em um intervalo $\Delta t = 1$, compara-se as equações (4.10) e (4.11), tem-se a equação abaixo.

$$\ln X_t - \ln X_{t-1} = a + \varepsilon_t \quad (4.12)$$

Assim, é possível estimar os parâmetros α e σ do MGB. Primeiro, a volatilidade (σ) do MGB é estimada por meio do erro-padrão da regressão linear ($\sigma_{\bar{x}}$) multiplicado por $\sqrt{N}$, tal que $N = 12$, uma vez que representa o número de observações em um ano, conforme a equação (4.13)¹² abaixo.

$$\sigma = \sigma_{\bar{x}} \sqrt{N} \quad (4.13)$$

Em seguida, para estimativa do parâmetro α , que representa a tendência no MGB, é possível ver que, na comparação das equações (4.11) e (4.12), $a = \left(\alpha - \frac{\sigma^2}{2} \right)$, tal que o parâmetro a na

¹² Uma vez que σ é uma medida de volatilidade, uma outra maneira de calculá-la é por meio da variância amostral dos valores observados na regressão, ou seja por $\sigma^2 = N\{Var[\ln X_t - \ln X_{t-1}]\}$.

regressão é calculado pelo valor esperado da regressão, ou seja, $E(\ln X_t - \ln X_{t-1})$. Assim, temos que a estimativa de α é dada pela equação:

$$\alpha = N\{E(\ln X_t - \ln X_{t-1})\} + \frac{\sigma^2}{2} \quad (4.14)$$

Agora, para a estimativa dos parâmetros no MRM, com os dados já em logaritmos neperianos, conforme a equação (4.10), estima-se por mínimos quadrados os valores de a e $b - 1$. Com as equações (4.6) e (4.10) em comparação, temos a seguinte relação abaixo na Figura 11:

Figura 11 – Comparação das equações (4.6) e (4.10)

$$X_t - X_{t-1} = \underbrace{\bar{X}(1 - e^{-\eta\Delta t})}_a + \underbrace{X_{t-1}(e^{-\eta\Delta t} - 1)}_{b-1} + \underbrace{\sigma \sqrt{\frac{(1 - e^{-2\eta t})}{2\eta}} N(0,1)}_{\epsilon_t}$$

Fonte: Elaboração do autor.

Dessa maneira, conforme a Figura 11, na estimativa de parâmetros, podemos estabelecer as seguintes equações:

Como $b - 1 = e^{-\eta\Delta t} - 1$, então $-\ln b = \eta$, para $\Delta t = 1$. Dessa forma a estimativa do parâmetro η é dada pela equação (4.15) abaixo:

$$\eta = -N \ln b \quad (4.15)$$

Uma vez que os parâmetros nos processos estocásticos MRM e MGB são para base anual, então N representa a quantidade de dados em um ano. Neste trabalho, como as séries de tempo utilizadas são todas mensais, então $N = 12$.

Mais ainda, como $a = \bar{X}(1 - e^{-\eta\Delta t})$ e $\eta = -\ln b$, então é possível estimar o parâmetro σ do modelo O-U pela equação (4.16) abaixo:

$$\sigma = \sigma_{\varepsilon}^2 \sqrt{N} \sqrt{\frac{2 \ln b}{b^2 - 1}} \quad (4.16)$$

Por último, o parâmetro $\bar{X}$ – o preço de equilíbrio no MRM – é estimado ao comparar novamente as equações (4.6) e (4.10), tal que ao se calcular o valor esperado da equação (4.6), obtém-se $E(\ln P_t) = \mu = a + b\mu$. Então, tem-se que $\mu = \frac{a}{1-b}$. Portanto, uma vez que $\bar{X}$ representa a média, ou seja, temos sua estimativa na equação (4.17) abaixo.

$$\bar{X} = \mu = \frac{a}{1-b} \quad (4.17)$$

Assim, com os parâmetros α e σ do MGB e com os parâmetros η , σ e $\bar{X}$ do MRM é possível modelar as séries de tempo e suas simulações de Monte Carlo. Este é o tema do próximo subtópico deste trabalho.

Na sequência, para a estimativa de parâmetros dos modelos de reversão à média das séries de etanol e açúcar, temos os seguintes resultados. Primeiramente, começamos com a estimativa dos parâmetros a e $b - 1$ na regressão de $\ln\left(\frac{P_t}{P_{t-1}}\right)$ por $\ln(P_{t-1})$, conforme a equação (4.10). As saídas das estimativas pelo *software* econométrico para as séries de etanol e açúcar no anexo desta tese, e a plotagem dos dados e da linha de tendência podem ser vistas na Figura 12 e na Figura 13 abaixo, respectivamente.

Figura 12 – Regressão de $\ln P_t - \ln P_{t-1}$ por $\ln P_{t-1}$ para série do etanol

Fonte: Elaboração do autor.

Figura 13 – Regressão de $\ln P_t - \ln P_{t-1}$ por $\ln P_{t-1}$ para série do açúcar

Fonte: Elaboração do autor.

Em ambos os gráficos, na Figura 12 e na Figura 13, é possível ver a equação, isto é, as estimativas para os parâmetros a e $b - 1$. Além disso, percebe-se que o ajuste de reta ficou com

inclinação negativa. Dado que $b - 1 < 0$, então $b < 1$, indicando que o retorno logarítimo $\ln(P_t) - \ln(P_{t-1})$ depende do nível de preço. Portanto, os dados sugerem um MRM. Por outro lado, caso não dependesse do nível de preços, ou seja, $b - 1 = 0$, os dados sugeririam um MGB.

Na sequência, por meio das equações (4.15), (4.16) e (4.17) estimam-se os parâmetros η , σ e $\bar{X}$, respectivamente, para cada série de dados. Os resultados encontram-se a seguir na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados das estimativas de parâmetros por MRM

<i>Parâmetros</i>	<i>Etanol</i>	<i>Açúcar</i>
σ	19,361%	23,028%
η	1,820	0,621
$\bar{X}$	1,002	3,916

Fonte: Elaboração do autor.

Além dos valores estimados na Tabela 5 acima, também é necessário definir o preço inicial P_0 – para esse valor será utilizado o último da série histórica, ou seja, o valor encontrado para dezembro de 2017 –, bem como os seus valores em logaritmos, ou seja, X_0 , para cada série. Todos esses valores seguem abaixo na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de entrada para simulação das séries de preço

<i>Valores</i>	<i>Etanol</i>	<i>Açúcar</i>
P_0	2,879	46,830
X_0	1,057	3,847

Fonte: Elaboração do autor.

4.3. Modelagem das séries de preços para o modelo VAR

No objetivo de investigar o efeito das flexibilidades na tomada de decisão em investimentos em usinas sucroenergéticas por Opções Reais, as séries temporais de preços do etanol e do açúcar são variáveis de entradas. Dessa maneira, tais séries de preços são variáveis exógenas. Logo, o modelo não analisa as razões das mudanças em tais séries de preços. Entretanto, agora busca-se avaliar tais séries como variáveis endógenas, de tal forma a analisar como os preços dessas variáveis são afetados entre si, isto é, como é a dinâmica entre essas séries de preços.

Uma vez que o açúcar e o etanol são produzidos a partir do mesmo insumo nas usinas sucroenergéticas e no setor automobilístico há os veículos *flex-fuel* que são movidos ou por gasolina, ou etanol, ou ambos, então conjectura-se que há uma transmissão de preços entre esses três produtos. De tal maneira que, na ocorrência de um choque exógeno em uma das variáveis, esse é transmitido para as demais. Assim, para verificar a dinâmica de preços das variáveis é necessário um modelo econométrico para isso.

Este modelo quantifica a relação entre as variáveis de preço, isto é, irá quantificar a transmissão de preços entre as séries temporais de preços da gasolina C, etanol hidratado e açúcar no Brasil durante o período de 2002 a 2017. Além dessas, também foi incorporada uma variável binária exógena, a fim de para captar a intermitência da produção sucroalcooleira, tal que nos meses de dezembro a março foi atribuído 1 e nos demais, o valor 0 (zero).

Para isso, considera-se que todas as variáveis são endógenas ao modelo, isto é, uma série z_t é influenciada pelas demais séries do modelo, assim como também z_t as influencia. Assim, dado um choque exógeno, o seu valor final será consequência de uma reação ao movimento conjunto de todas as variáveis do modelo. Logo, é necessário quantificar a transmissão de preços de uma variável para as outras do modelo. Para tanto, é necessário isolar os choques exógenos da variável de interesse para rastrear seu efeito dinâmico no modelo. A metodologia usada para isso é por meio da modelagem de vetores autorregressivos (VAR) (ENDERS, 2008).

Neste modelo, todas as variáveis endógenas estão em um vetor X_t . Para isso ocorrer, as séries de tempo são conectadas por uma matriz A que equivale ao somatório de uma matriz B_i conectada a um vetor autorregressivo X_{t-i} de ordem p e uma matriz diagonal de desvios-padrão B multiplicada por um vetor de perturbações aleatórias ε_t (choques estruturais), conforme a equação (4.18) subsequente.

$$AX_t = \sum_i^p B_i X_{t-i} + B \varepsilon_t \quad (4.18)$$

Esse modelo é estimado em sua forma reduzida, conforme a equação (4.19) abaixo.

$$X_t = \sum_i^p \varphi_i X_{t-i} + e_t \quad (4.19)$$

Em que $B\varepsilon_t = Ae_t$, $\varphi_i = A^{-1}B_i$, $i = 0, 1, \dots, p$

Diferente de outros modelos econométricos que têm como principal objetivo realizar previsões, o VAR procura responder questões sobre como as variáveis se relacionam e como a série é alterada dada um choque estrutural. Estes ocorrem por meio da aleatoriedade de ε_t e são captados pela matriz A . Assim, com os valores da matriz A identificados, é possível obter a resposta da transmissão de uma série de tempo em outra.

Os pressupostos deste modelo são: (1) as séries são contemporaneamente correlacionadas, (2) os termos aleatórios são ruídos brancos com covariância nula e (3) as variáveis têm que ser estacionárias (ENDERS, 2008). A estacionariedade das pode ser verificado por meio de testes de raiz unitária. Ainda assim, caso o pressuposto de estacionariedade não seja confirmado, se as séries forem cointegradas, é possível modelar por meio do modelo de correção de erros. Este modelo consiste em VAR com um vetor de cointegração, o conhecido *vector error correction model* (VECM). Para a determinação deste vetor utiliza-se o teste de Johansen (JOHANSEN, 1988; JOHANSEN; JUSELIUS, 1990).

Assim, foram realizados primeiramente o teste de Ng-Perron e para confirmar o resultado também foi utilizado os testes de ADF e o KPSS. Além disso, considerando a tendência das séries de tempo, todos os testes foram feitos utilizando tendência e interceptos. Na sequência, foi estimada a defasagem do modelo, isto é, a ordem p do vetor. Neste trabalho, foi utilizado o critério de informação de Akaike (1998), de Schwarz (1978) e Hannan-Quinn (1979).

Depois, verifica-se a significância dos coeficientes estimados no modelo VAR e, se significativos, traça-se as análises sobre a interdependência das séries temporais. Para complementar a análise dos resultados são traçadas funções impulso-resposta das variáveis endógenas e também é feita a decomposição da variância das mesmas.

4.3.1. Revisão de literatura sobre dinâmica de preços no setor sucroenergético

Na revisão de literatura foi possível perceber que a pesquisa da dinâmica e transmissão de preços entre combustíveis e produtos agrícolas é recente. Isso foi notável pelos poucos trabalhos

encontrados e principalmente por nenhum deles ter sido desenvolvido antes dos anos 2000. As possíveis causas disso, conforme Serra e Zilberman (2013), estão no fato de que com o aumento do uso de biocombustíveis no início da década de 2000, as instabilidades de preços nos insumos energéticos foram transferidas para os produtos agrícolas.

Além disso, em relação às séries de preços, a maioria da pesquisa na relação de açúcar, gasolina e etanol está associada ao consumo desses produtos. Logo, trata-se de trabalhos que analisam as curvas de elasticidade. Dessa forma, as variáveis de preço são modeladas como variáveis independentes, diferente da proposta nesta tese de doutorado. Assim, pela revisão de literatura na modelagem de séries de preços, como variáveis endógenas, é possível destacar os seguintes trabalhos abaixo.

De acordo com Gamarra (2009), em uma pesquisa feita com dados de preço da gasolina e etanol entre março de 2003 até julho de 2008, com uma metodologia de vetor de cointegração e modelo de correção de erros, foi possível constatar uma transmissão de preços entre as duas variáveis. Para o autor, quando o preço da gasolina sobe um 1% o preço de etanol sobe 2,74%.

Block *et al.* (2012) utilizaram séries de preços de cana-de-açúcar, etanol hidratado e açúcar com dados obtidos para o estado de São Paulo, durante o período de fevereiro de 1999 até setembro de 2010. Os autores optaram por modelar as variáveis por meio de uma metodologia de vetor autorregressivo. Os resultados obtidos indicaram que o preço do etanol hidratado é transmitido para o preço da cana-de-açúcar e do açúcar. Entretanto, a primeira série de tempo não sofre qualquer influência das oscilações de preço das demais variáveis.

Serra e Zilberman (2013), em seu artigo, fizeram uma pesquisa bibliográfica acerca da influência de preços entre insumos energéticos e produtos agrícolas para alimentação. Os resultados indicaram que os preços das *commodities* agrícolas subiram nos últimos anos, inclusive aumentando a renda rural nos países produtores.

Fernandes (2013) realizou uma pesquisa com dados dos combustíveis, gasolina C, etanol hidratado e gás natural veicular (GNV) no mercado nacional entre 2002 e 2008. Os resultados encontrados pela autora indicaram que as alterações no preço da gasolina são explicadas pelos seus próprios desvios e que o preço do etanol hidratado é influenciado pelo de gasolina. Além disso, com o passar dos períodos, essa influência aumenta.

Moura (2014) realizou uma pesquisa para quantificar a influência da gasolina C e do açúcar cristal na precificação do etanol hidratado para o produtor, com dados para o estado de São Paulo entre janeiro de 2003 e junho de 2013. A metodologia escolhida pelo autor foram os modelos de Box-Jenkins, diferente da utilizada nesta tese de doutorado. Os resultados encontrados pelo autor foram que (1) para 1% de aumento no preço da gasolina C, o etanol hidratado aumenta 0,8% e (2) para aumento de 1% no preço do açúcar, o etanol aumenta 0,23%.

Zhang *et al.* (2014) realizaram um estudo a fim de quantificar a transferência de preços entre o etanol produzido internamente nos EUA e o importado pelo país com outros produtos (milho, gasolina e petróleo). Para isso, os autores utilizaram a metodologia de vetor de cointegração e modelo de correção de erros com dados de preço entre 1996 e 2008. Os resultados indicaram a elasticidade de 1,96% para o preço do etanol doméstico, dado um aumento de 1% no da gasolina no curto prazo, enquanto no longo prazo o etanol tem uma resposta de 6,51%.

Bini *et al.* (2015) pesquisaram a transmissão de preços entre *commodities* agrícolas (cana-de-açúcar, milho e soja) e *commodities* energéticas (petróleo e etanol) por meio de um modelo de vetor de cointegração com correção de erros. Os resultados confirmaram que há dependência de mercados entre os dois tipos de *commodities*.

Melo e Sampaio (2016) modelaram o impacto do preço do açúcar, do etanol e da gasolina na produção sucroalcooleira. Para isso, utilizaram os preços das três primeiras variáveis e dados de produção de açúcar e etanol também entre 2001 e 2012, além de uma variável binária para os veículos *flex-fuel*. Para tal modelagem, os autores utilizaram a metodologia de vetor autorregressivo. Os resultados indicaram que para um choque de 1% no preço de etanol, a alteração na produção de açúcar e de etanol é de -0,28% e 0,43%, respectivamente. Para o choque de 1% no preço do açúcar, as produções agrícolas respondem em até 0,32%.

Souza (2018) pesquisou a influência que os preços de etanol e açúcar no estado de São Paulo exercem sobre os preços desses mesmos produtos no estado de Pernambuco. Para isso, o autor fez uso da metodologia VAR. Os resultados do autor indicam que os preços do açúcar de São Paulo têm relação de causalidade com os de Pernambuco, enquanto que o preço do etanol de São Paulo não tem causalidade com o de Pernambuco.

4.3.2. Resultados do modelo por vetores autorregressivos

Na seção 4.2.1 verificou-se a estacionariedade das séries de preço do etanol, açúcar e gasolina. Os resultados indicaram que apenas a série de preços da gasolina não é estacionária. Logo, a série da gasolina é integrada de ordem 1, enquanto a do etanol e açúcar é de ordem 0. Sendo assim, como há apenas uma única série integrada de ordem 1, é possível utilizar um modelo VAR, com esta série diferenciada, dispensando a necessidade de se aplicar o modelo VECM (ENDERS, 2008).

Na sequência, antes de estimar o modelo VAR, deve-se determinar a significância da última defasagem do modelo, isto é, a ordem p do vetor pelo critério de Schwartz (1978) e Hannan-Quinn (1979). Os resultados de podem ser vistos na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 – Resultado dos Critérios de Informação

<i>Defasagem</i>	<i>Schwarz</i>	<i>Hannan-Quinn</i>
0	-7,700842	-7,764359
1	-11,87287*	-12,03166*
2	-11,75393	-12,00799
3	-11,57424	-11,92358
4	-11,35880	-11,80342
5	-11,12564	-11,6654
6	-10,95784	-11,59301
7	-10,75204	-11,48249
8	-10,53889	-11,36462

Teste realizado com o *software* econométrico EViews 10¹³;

Valor com * indica a defasagem a ser escolhida.

Fonte: Elaboração do autor.

Na Tabela 7 é possível ver os resultados das estatísticas dos critérios de informação de Schwartz e Hannan-Quinn. Conforme indicado com asterisco na Tabela 7, foi escolhida uma defasagem de um período no modelo VAR. Já a dinâmica entre as variáveis, ou seja, os resultados da estimativa dos coeficientes do modelo VAR podem ser verificados abaixo na Tabela 8.

¹³ A saída do teste, pelo *software* Eviews 10, está no Anexo deste trabalho.

Tabela 8 – Estimativa dos coeficientes do modelo VAR

Variável	D(Gasolina)	Açúcar	Etanol
D(gasolina (-1))	0,195638*	0,409553	0,494134**
Açúcar (-1)	0,010139***	0,956990*	0,032385***
Etanol (-1)	-0,056069*	-0,050079	0,790488*
Binária	0,003303	0,025848*	0,029350*
Intercepto	0,015050	0,209974**	0,074421

Valores com * indicam rejeição da hipótese nula a 1%.

Valores com ** indicam rejeição da hipótese nula a 5%.

Valores com *** indicam rejeição da hipótese nula a 10%.

Estimativa realizada com o software econométrico EViews 10¹⁴.

Fonte: Elaboração do autor.

Pelos resultados na Tabela 8 verifica-se que as variações da série de preços da gasolina é influenciada pela do etanol e da gasolina propriamente – ambas significativas a 1% – e também ao açúcar – significativo a 10% –, enquanto que a variável binária para a interferência de preços não se mostrou significativa. Já para a série de preços do açúcar, esta se mostrou influenciada apenas por sua própria série do açúcar e pela variável binária. Por último, a série de preços do etanol se mostrou influenciada por sua própria série de preços do etanol, pela da gasolina e pela variável binária – todas significativas a 1% – e pela série do açúcar – significativa a 10%.

Além da análise da estimativa dos coeficientes, foi feita uma análise da função impulso-resposta das variáveis endógenas do modelo a choques exógenos, tais resultados podem ser vistos abaixo na Figura 14, Figura 15 e Figura 16. Também foram feitas decomposições das variâncias das variáveis, os quais também seguem abaixo, na Tabela 9, na Tabela 10 e na Tabela 11.

¹⁴ A saída do teste, pelo software Eviews 10, está no Anexo deste trabalho.

Figura 14 – Função impulso-resposta para a série de preços da gasolina

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 9 – Decomposição da variância da série de preços da gasolina

<i>Período</i>	<i>Gasolina</i>	<i>Açúcar</i>	<i>Etanol</i>
1	100,00000	0,00000	0,00000
2	98,26700	0,01813	1,71486
3	96,63876	0,03301	3,32823
4	95,62975	0,04043	4,32982
5	95,05360	0,04342	4,90297
6	94,72873	0,04435	5,22692
7	94,54551	0,04447	5,41002
8	94,44204	0,04438	5,51358
9	93,83580	0,04433	5,57209
10	94,35054	0,04441	5,60506
20	94,30550	0,04877	5,64573
30	94,30291	0,05147	5,64562
40	94,30196	0,05242	5,64562
50	94,30165	0,05274	5,64562
60	94,30154	0,05284	5,64562

Fonte: Elaboração do autor.

Pela Figura 14 e pela Tabela 9, percebe-se que os choques exógenos transmitidos para a série de preços da gasolina são provenientes da própria série da gasolina e do etanol. Ainda assim, a influência do etanol é muito baixa, não ultrapassando os 5% pela variação dos preços da gasolina. Acrescenta-se que, embora na Tabela 8, a estimativa da influência do preço do açúcar tenha sido significativa a 10%, pela função impulso resposta e pela decomposição da variância se verifica que a série do açúcar não influencia a da gasolina. Logo, não se rejeita a hipótese nula de que o coeficiente estimado é zero e; portanto, descarta-se a influência da variável do açúcar sobre a gasolina.

Outrossim, como na gasolina veicular tipo C há etanol em sua composição era de se esperar que os seus preços exercessem influência. No entanto, a influência foi muito baixa, não ultrapassando 5%, a ponto de o preço da gasolina ser influenciado majoritariamente por suas próprias alterações. Assim, pode-se conjecturar que como na maior parte do período de estudo – 2002 a 2017 –, os preços da gasolina foram modificados por meio de outras políticas de preços, logo as variações no preço da gasolina não foram causadas de maneira relevante pelas outras variáveis.

Mais especificamente, o controle de preços ocorreu por meio da Petrobras sobre a gasolina A nas refinarias. Já a gasolina C, a qual é vendida nos postos de combustível, foi vendida com preço livre, assim como os demais combustíveis. Logo, em decorrência dos choques do preço do etanol anidro, como por exemplo, em 2011, quando a oferta de etanol foi escassa, houve aumentos de preços não só do etanol, mas também da gasolina C, apesar política de controle de preços intervencionista. Dessa maneira, a transmissão de preços do etanol para gasolina foi feita pelos choques no preço do etanol anidro.

Figura 15 – Função impulso-resposta para a série de preços do açúcar

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 10 – Decomposição da variância da série de preços do açúcar

<i>Período</i>	<i>Gasolina</i>	<i>Açúcar</i>	<i>Etanol</i>
1	0,00074	99,99926	0,00000
2	0,34506	99,60869	0,04625
3	0,37802	99,43259	0,18939
4	0,31977	99,27807	0,40216
5	0,26749	99,08387	0,64865
6	0,24229	98,85484	0,90287
7	0,24174	98,60915	1,14911
8	0,25855	98,36252	1,37893
9	0,28597	98,12549	1,58854
10	0,31896	97,90415	1,77690
20	0,59020	96,62494	2,78485
30	0,68369	96,25037	3,06594
40	0,71262	96,13627	3,15111
50	0,72190	96,09974	3,17837
60	0,72493	96,08779	3,18728

Fonte: Elaboração do autor.

Pela Figura 15 e pela Tabela 10 confirma-se que a variável açúcar não é influenciada pela gasolina, nem pelo etanol. Portanto, o açúcar é influenciado por si próprio e pela intermitência do setor sucroalcooleiro com o fator entressafra.

Além disso, no período de estudo houve uma valorização no preço do açúcar no mundo todo, esse fator impulsionou o aumento de seu preço. Embora o açúcar e o etanol sejam produzidos a partir do mesmo insumo, não houve transmissão de preços do segundo para o primeiro. Portanto, os fatores de oferta e demanda mundial por açúcar foram decisivos na determinação do seu preço, sem sobrar espaço para as variações no etanol e na gasolina serem transmitidas.

Figura 16 – Função impulso-resposta para a série de preços do etanol

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 11 – Decomposição da variância da série de preços do etanol

<i>Período</i>	<i>Gasolina</i>	<i>Açúcar</i>	<i>Etanol</i>
1	38,99942	2,38438	58,61620
2	44,89791	2,78389	52,31821
3	47,06148	3,41657	49,52195
4	47,85981	4,17240	47,96779
5	48,06756	4,99001	46,94243
6	47,99261	5,82630	46,18109
7	47,77760	6,64977	45,57264
8	47,49637	7,43853	45,06510
9	47,18986	8,17872	44,63142
10	46,88131	8,86291	44,25579
20	44,80527	12,92231	42,27242
30	44,09248	14,23835	41,66917
40	43,86011	14,66523	41,47466
50	43,78379	14,80536	41,41085
60	43,75861	14,85158	41,38981

Fonte: Elaboração do autor.

Pela Figura 16 e por meio da Tabela 11 percebe-se que as variáveis do açúcar e gasolina exercem influência sobre a do etanol. Sendo assim, a hipótese nula, de que os coeficientes estimados na Tabela 8 são nulos, é rejeitada. Portanto, a série de preços do etanol é influenciada pela da gasolina, pela do açúcar e também pelo fator entressafra.

No período de estudo, a política intervencionista de precificação sobre a gasolina influenciou por consequência os preços do etanol, conforme os resultados comprovam. Não só, mas o preço do açúcar influenciou também o preço do etanol, dada a valorização do primeiro, houve desestímulos para a produção do segundo. Assim, alterações no preço da gasolina e no preço do açúcar foram transmitidas para o preço do etanol.

Por fim, pelos resultados obtidos, conclui-se que o preço do etanol é influenciado pelos preços das demais variáveis. Por outro lado, embora o preço do etanol influencie a gasolina, seu efeito é muito baixo, destacando que a política de preços neste combustível é o principal fator. Ademais, o preço do açúcar não é influenciado pelas outras variáveis.

5. MODELAGEM

Neste capítulo é descrita a metodologia de pesquisa desta tese de doutorado. Para isso, ele está estruturado em duas seções. Na primeira delas é feita a descrição do caso inicial, isto é, qual a estrutura de produção da usina sucroenergética, suas alternativas de flexibilização de produção, os parâmetros iniciais de produção, econômicos e técnicos.

Já na segunda seção elabora-se o arcabouço teórico da metodologia de Opções Reais por simulação de Monte Carlo (SMC). Nesse sentido, explica-se o porquê do uso desta metodologia específica e não de outras para avaliação de flexibilidades em usinas sucroenergéticas. Mais ainda, explica-se como tal metodologia é aplicada para simulação de processos estocásticos e também para a avaliação das flexibilidades gerenciais no modelo de Opções Reais.

5.1. Descrição do caso inicial a ser analisado

O caso inicial a ser analisado nesta pesquisa é uma usina sucroenergética com destilaria anexa localizada no Brasil. Logo, considera-se que essa usina pode produzir açúcar e etanol. Não só, mas também que esta unidade já está construída e com todas as despesas de investimentos amortizadas. No entanto, trata-se de uma planta hipotética. Apesar disso, esta é uma usina verossímil.

Acrescenta-se que esta usina possui uma decisão parcialmente irreversível de fechar um contrato de venda de seus produtos – etanol e açúcar – com quantidades de produção já estabelecidas nesse contrato. Logo, a irreversibilidade decorre do fato de que há muitas indenizatórias caso a usina desista ou não cumpra os termos desse contrato. Para isso, a usina define previamente o *mix* de produção a ser utilizado ao longo de toda a safra, os quais a usina não poderá mais alterar. Caso contrário, não conseguirá entregar a quantidade pré-estabelecida em contrato. Neste trabalho será utilizado para a produção de contrato o *mix* de produção de 60% para o etanol e 40% para o açúcar, dado que na mais recente safra, 2018/2019, a maior parte da cana-de-açúcar foi alocada para o etanol (UNICA, 2018) e, além do mais, na modelagem, essa proporção se mostrou mais rentável.

Por outro lado, há a alternativa de a usina atuar no mercado à vista, isto é, no mercado *spot*. Logo, dada a volatilidade dos preços, a usina adquire flexibilidade de alterar o *mix* de produção, a fim de produzir maior quantidade do bem mais rentável. Além disso, a usina também pode interromper temporariamente a produção, caso as margens dos produtos não sejam atrativas

para pagar as despesas variáveis de produção. Assim, uma vez que não há reversibilidade na decisão de fechar um contrato de produção ao longo de uma safra, as flexibilidades de poder alterar o *mix* de produção e parar temporariamente a produção agregam valor para a usina.

Dessa maneira, serão comparados os valores presentes de a usina trabalhar com diferentes *mixes* de produção. Para as alternativas de escolha do *mix* de produção, considera-se que a usina possui a capacidade técnica de escolher alocar entre 40% a 60% da cana-de-açúcar colhida para produção entre etanol e açúcar. Assim, as porcentagens utilizadas nas simulações são as seguintes porcentagens entre etanol e açúcar: 40% X 60%, 45% X 55%, 50% X 50%, 55% X 45%, 60% X 40%. Portanto, há cinco possíveis alternativas de produção a serem avaliadas.

Na literatura, as estratégias de produção em relação ao *mix* de produção foi tema de outros trabalhos, ainda que não utilizaram a metodologia de OR, como no estudo de Sosnoski e Ribeiro (2012). Nesse, os autores afirmam que:

As incertezas nos preços dos produtos do setor sucroenergético brasileiro requerem estratégias financeiras e de produção complexas por parte das usinas, as quais devem ter uma política clara referente às decisões acerca do seu *mix* de produção.

Além desse, também em Volpe *et al.* (2016), no qual os autores concluem que há oportunidades de aumento de renda a partir de mudanças no *mix* de produção.

Com tais alternativas de *mix* de produção simulados, poderá ser considerada a *opção de conversão*, ou seja, flexibilidade de escolher o *mix* que implica maior lucro, isto é, a quantidade a se produzir de etanol e açúcar que maximizará o lucro da firma entre as cinco alternativas descritas. Isto decorre de que a cada mês a usina pode alterar o *mix* de produção e priorizar o produto com maior preço de mercado, tal que não há custos de troca de produção.

Mais ainda, acrescenta-se a *opção de parada temporária*, a qual é caracterizada pela alternativa de não produzir nem etanol, nem açúcar em um determinado período (mês). Isso decorre de baixos preços de mercado a ponto de a receita proveniente das vendas serem menores que os custos variáveis de produção. Portanto, a firma prefere incorrer apenas os custos fixos e nada produzir. Para tal situação foi considerado que não há custo de reativação.

Além disso, também será analisada a flexibilidade de ambas as opções descritas atuarem juntas no mesmo horizonte de planejamento, isto é, em determinado mês a usina pode exercer a opção

de conversão, enquanto que em outro mês, se não obtiver lucro, ela pode exercer a opção de parada temporária, ou seja, trata-se da *opção de conversão com parada temporária*. Assim, a cada período (mês) expira-se uma decisão operacional e a firma exerce a alternativa de maior lucro, considerando as opções do *mix* de produção entre etanol e açúcar e de não produzir. Na terminologia de OR, trata-se da modelagem por simulação *forward* de opções europeias.

Acrescenta-se que a operação da usina será avaliada ao longo de um horizonte de planejamento de 54 meses, que equivale a quatro anos e meio – valor escolhido com base em que os canaviais duram em média entre três e seis safras (SANTIAGO; ROSSETO, 2018). Após esse período, para continuar a produção teria que se incorrer novos custos para renovação do canavial, os quais não serão incluídos nesse estudo. Portanto, considerou-se um período para se trabalhar com um canavial antes de sua renovação.

Para os cálculos das funções de receita e lucro tem-se, em primeiro lugar, os seguintes parâmetros abaixo.

m_x : *mix* de produção entre etanol e açúcar, tal que m_x indica a porcentagem da colheita destinada à produção de etanol. Neste trabalho, considera-se as possíveis porcentagens: 40%, 45%, 50%, 55% e 60%, tal que x assume os mesmos valores de porcentagem. De maneira semelhante, a porcentagem do *mix* destinada ao açúcar é $1 - m_x$.

Q : quantidade de cana-de-açúcar colhida para cada mês. Neste trabalho considera-se a quantidade fixa de 175.000 toneladas de cana-de-açúcar para esse parâmetro. A escolha desse parâmetro deu-se, pois no Brasil há atualmente 307 usinas autorizadas a produzir etanol (ANP, 2019) e na safra 2017/2018 foram colhidas 641 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Assim, em média, cada usina colheu próximo de 175.000 toneladas de cana-de-açúcar por mês.

C_e : fator de conversão em litros/tonelada para produção de etanol. Nesse trabalho, considera-se que para cada tonelada de cana-de-açúcar é possível produzir 40 litros de etanol. Em alguns trabalhos, como por exemplo, em Albarelli (2013) e Junqueira (2015), por meio de uma análise técnica de produção, as autoras chegaram em valores de 43,4 l/t e 41 l/t, respectivamente, os quais, segundo as autoras, foram um pouco maiores que o esperado. Ainda assim, em pesquisa com profissionais do setor, na última safra, 2018/2019, foi informado o valor de 35 litros de etanol são produzidos para uma tonelada de cana-de-açúcar. Portanto, para escolher um valor próximo do encontrado na literatura e com os profissionais, optou-se pelo valor de 40 litros de etanol por tonelada de cana-de-açúcar.

C_a : fator de conversão, em sacas/tonelada, para produção de saca de açúcar por tonelada de cana-de-açúcar. Na literatura, Albarelli (2013) encontrou o valor de 130 kg/t, o qual corresponde a 2,6 sacas de açúcar. Ainda segundo a autora, em outros trabalhos¹⁵ foi encontrado valores entre 140 kg/t e 145 kg/t. Já em outros trabalhos, como em Cavalett *et al.* (2012) e Mendes *et al.* (2017), os valores encontrados foram próximos de 50 kg/t. Percebe-se que, as diferenças da quantidade de produção encontradas na literatura deve-se principalmente aos aspectos técnicos de produção de açúcar e etanol, os quais não serão detalhados aqui neste trabalho, uma vez que não é o foco desta pesquisa. Por fim, será utilizado o valor de duas sacas (100 kg), que foi indicado por profissionais do setor e está próximo da média, entre os valores da literatura de produção técnica.

Em outros trabalhos, como Albarelli (2013), Dantas *et al.* (2013), Junqueira (2015), Milanez *et al.* (2015), Cavalett *et al.* (2015), Mendes *et al.* (2017) e Taylor-de-Lima *et al.* (2018) foram feitas simulações de produção de açúcar e etanol. Nesses, como o foco era um estudo técnico de produção na área de engenharia química – diferente deste presente trabalho, cujo foco está nas flexibilidades gerenciais e incertezas – houve especificações detalhadas sobre: (1) composição da cana-de-açúcar, quanto à quantidade de água e açúcares contida; (2) limpeza, extração e tratamento do caldo; (3) evaporação; (4) fermentação; (5) destilação; (6) temperatura; entre outras. Como nesses trabalhos, o objetivo era simular a produção de etanol e açúcar, além de possuírem maior especificação técnica de tais etapas é possível medir com precisão o fator de conversão. Ainda assim, pela análise de sensibilidade é possível testar os valores encontrados nos trabalhos citados neste parágrafo.

CPT : custo de produção por tonelada de cana-de-açúcar. Para esse parâmetro foi utilizado o valor de R\$ 91,17 (FERNANDES, 2017), no qual está incluído o custo de arrendamento. Além disso, nesse valor estão incluídas as despesas para a produção da cana-de-açúcar, isto é, as despesas de preparo de solo, plantio, corte, carregamento, transporte, irrigação, mecanização, insumos (fertilizantes, inseticidas, entre outros) e colheita (FARIA, 2014; TREVISAN *et al.*, 2017). Em resumo, todas as despesas do plantio à colheita. Ademais, esse parâmetro representará o custo variável. Embora haja outros custos variáveis, para poder simular o impacto dos custos agrícolas separadamente, nessa tese se considera esse parâmetro para o cálculo do custo variável.

¹⁵ Fonte não revelada pela autora.

CF: custo mensal de operação e produção na usina e também despesas administrativas, isto é, para esse parâmetro serão consideradas todas as despesas que não são agrícolas. Assim, para exemplificar, nesse parâmetro estarão as despesas de moagem da cana-de-açúcar, geração de energia elétrica, mão de obra, manutenções – as quais podem ser preditivas, preventivas e corretivas – aproveitamento de subprodutos (bagaço, torta de filtro, vinhaça, óleo fusel), limpezas de equipamentos, insumos industriais, financiamento de capital de giro e despesas administrativas em geral (BRUNSTEIN; TOMIYA, 1995; WATANABE, 2001; ESBERARD *et al.*, 2009; MENDRONE; SOUZA, 2012; FARIA, 2014; TREVISAN *et al.*, 2017).

Considera-se que a usina possui um custo fixo mensal de R\$ 2.000.000,00. Conforme Pantoja *et al.* (2016), os custos fixos nas usinas sucroenergéticas correspondem em média a 10% de sua receita bruta. Dessa maneira, como, a receita calculada neste trabalho encontrou-se em torno de R\$ 20 milhões, utilizou-se esse valor para estimar despesas de custos fixos mensais.

CT: custo total, calculado por $CT = CPT(Q) + CF$.

Trib: porcentagem de tributação a ser cobrada sobre o lucro. Nas usinas de cana-de-açúcar a carga tributária incidente é referente ao Imposto de Renda Pessoa Jurídica (IRPJ) e a Contribuição sobre Lucro Líquido e Social (CSLL), tal que ambos os tributos totalizam uma cobrança de 34% sobre o lucro (JUNQUEIRA, 2015; MILANEZ *et al.*, 2015).

Além desses parâmetros, há também as séries de preços E_t e A_t , as quais representam, respectivamente, os processos estocásticos do preço do etanol e do açúcar, que serão descritos mais detalhadamente na próxima seção deste trabalho. Dessa maneira, ambos os processos são simulados ao longo dos meses t .

Com esses parâmetros, enfim, calcula-se a receita e o lucro em cada mês conforme as equações (5.1) e (5.2) abaixo.

$$R_x = m_x QC_e E_t + (1 - m_x) QC_a A_t \quad (5.1)$$

$$L_x = (R_x - CT)(1 - Trib) \quad (5.2)$$

Assim, pelas equações (5.1) e (5.2) calcula-se, respectivamente, R_x e L_x , que representam a receita o lucro gerado pelas vendas de etanol e açúcar, tal que x indica a porcentagem que foi alocada para produção de etanol do *mix* de produção. Logo, são calculados R_{40} , R_{45} , R_{50} , R_{55} , R_{60} , bem como L_{40} , L_{45} , L_{50} , L_{55} , L_{60} .

Feito isso, calcula-se as seguintes flexibilidades de produção. Em primeiro lugar, há a *opção de conversão*, ou ainda, podemos chamá-la em opção de alteração (do *mix* de produção). A usina analisada neste trabalho pode destinar parte da produção para etanol e o restante para o açúcar, formando assim o *mix* de produção, conforme já explicado acima. Assim, tem-se a opção $F(t)$, na equação (5.3), a qual indica a produção que implica maior lucro entre as diferentes alternativas de alocação de produção mensalmente, isto é, para cada valor t .

$$F(t) = \text{Max}[L_{40}, L_{45}, L_{50}, L_{55}, L_{60}] \quad (5.3)$$

Em segundo lugar, há a *opção de parada temporária*. Nesta opção, se a usina não possuir lucro com o *mix* de produzir 60% etanol e 40% açúcar, a usina pode parar a produção. No entanto, ainda assim serão considerados 30% dos custos fixos, enquanto a produção estiver parada.

Assim, temos a opção $G(t)$ na equação

$$G(t) = \text{Max}[L_{60}, -(0,30)CF] \quad (5.4)$$

A razão de existir despesas mesmo com a produção interrompida decorre do fato de que, embora a produção não ocorra, outras atividades ocorrem. Em um momento de parada são feitas manutenções preventivas, como por exemplo, limpezas nos evaporadores (MENDRONE, SOUZA, 2012). Além disso, há despesas não operacionais, como arrendamentos, salários, aproveitamento de subprodutos (WATANABE, 2001). De acordo com um estudo de caso de Esberard *et al.* (2009), as despesas que ocorrem independente da produção da usina representam o valor de 25% de toda a despesa total. No entanto, para esses mesmos autores, este valor foi considerado baixo. Assim, foi considerado o fator de 30% de toda a despesa quando a usina não está em produção. Ademais, outros valores são testados também na análise de sensibilidade.

Em terceiro, há a *opção de conversão com parada temporária* simultaneamente. Nesta opção, complementando a opção já calculada $F(t)$, caso ainda a usina não possua lucro mesmo com esta flexibilidade, considera-se a alternativa da usina não produzir nem etanol, nem açúcar, sem incorrer os custos variáveis de produção, mas assumindo apenas o custo fixo. Assim, temos a opção $G(t)$ na equação (5.5), a qual considera o máximo entre $F(t)$ e o 30% do custo fixo negativo.

$$H(t) = \text{Max}[F(t), -(0,30)CF] \quad (5.5)$$

5.2. Modelagem por Opções Reais com simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo (SMC) é um método para avaliação de risco, com o qual é possível elaborar um sistema experimental que simulará, ou seja, agirá como o sistema real de maneira rápida e econômica. Nesse sentido, esse sistema irá replicar as propriedades e características do sistema real por meio de um modelo matemático. Assim, é possível tirar conclusões e tomar decisões sobre o sistema real, sem a necessidade de alterá-lo (MOORE; WEATHERFORD, 2005; RENDER *et al.*, 2010).

Há metodologias com o enfoque em otimização, isto é, na busca pela solução ótima, como por exemplo, a metodologia de programação linear, que maximiza (ou minimiza) uma função objetivo com parâmetros fixos, sujeita a diversas restrições. Dessa maneira, uma metodologia de otimização busca valores para as variáveis de decisão que irão otimizar a função objetivo do problema. Assim, por exemplo, em um modelo de maximização de lucro (função objetivo), a otimização determina as quantidades dos produtos (variáveis de entrada) a serem produzidas, dado os parâmetros de preço e restrições de produção.

Por outro lado, pelo exemplo acima, poderia se indagar o que aconteceria com o lucro – que aqui representa a variável de saída e a medida de desempenho –, caso o preço fosse alterado ao longo do tempo, ou ainda caso o preço seguisse uma determinada distribuição de probabilidade. Logo, para responder tais questionamentos do tipo “e se...?”, a SMC pode ser empregada (RAYCHAUDHURI, 2008).

Dessa maneira, no exemplo citado acima, por meio da SMC, o preço passa a ser uma variável de entrada, com distribuição de probabilidade conhecida. Nesse sentido, são gerados números aleatórios, com os quais é possível obter novos resultados para o lucro, de tal forma que, passa a ser possível obter uma distribuição de probabilidade também para o lucro. Portanto, com a SMC é possível criar um modelo matemático no qual as alternativas possam ser testadas.

Em síntese, a SMC consiste em gerar milhões de números aleatórios baseados distribuição de probabilidades para as variáveis de entrada por amostragem. Como resultado, com o agregado desses resultados, obtém-se a distribuição de probabilidade da variável de saída. Assim, conforme Mun (2006), a SMC pode ser aplicada para resolver problemas de quantificação de risco, análise de sensibilidade, previsão e também pode substituir o uso de equações estocásticas com soluções fechadas difíceis de se calcular, ou que ainda não possuem soluções.

Ocorre que, com o advento da computação, a geração de números aleatórios ficou muito mais fácil. Atualmente, há diversos *softwares* que fazem esse trabalho, como por exemplo, o *Oracle Cristal Ball* ® e o *Palisade @Risk* ®, entre outros. Ainda assim, antes da computação, as técnicas de simulação já eram empregadas. William Gosset, em seus trabalhos sobre amostragem (STUDENT, 1908) – sob a alcunha de Student – já realizava simulações, ainda que de maneiras rudimentares.

De qualquer forma, a SMC, como é conhecida hoje, foi definida na década de 1940 como uma técnica em problemas de radiação e nêutrons por Stanislaw Ulam, Nicholas Metropolis e John von Neumann, enquanto trabalhavam no *Los Alamos Scientific Laboratory*, durante a Segunda Guerra Mundial (HAMMERSLEY; HANDSCOMB, 1964), com a primeira publicação em 1949 (METROPOLIS; ULAM, 1949).

A primeira aplicação de SMC em opções financeiras foi com Boyle (1977), na determinação do valor de uma opção europeia. Segundo o autor, quando o valor da opção é gerado por mais de um processo estocástico é mais vantajoso trabalhar com essa metodologia, quando comparada às metodologias existentes na época da publicação de seu trabalho. Não demorou para esse método ser utilizado também em OR, como em Geske e Shastri (1985), para aproximação de soluções de equações estocásticas.

Em OR, a SMC pode modelar muitos aspectos do mundo real, incluindo decisões complicadas, bem como as complexas relações entre o valor da opção e do ativo subjacente. Isso ocorre uma vez que a SMC pode gerar diferentes realizações alternativas para os processos estocásticos das variáveis que representam as incertezas. Logo, os retornos podem ser analisados estatisticamente para, assim, serem tomadas melhores decisões (AMRAM; KULATILAKA, 1999; RAYCHAUDHURI, 2008).

Neste trabalho, a SMC será utilizada para gerar fluxos de caixas futuros da produção e venda de etanol e açúcar. Dessa forma, para cada intervalo Δt é simulado um novo valor de preço, isto é, são feitas amostragens das variáveis aleatórias computacionalmente N vezes. Entre os diversos *softwares* dedicados à implementação dessa metodologia, para este trabalho foi utilizado o *software Oracle Crystal Ball* ®, com um número de 100.000 simulações (amostragens).

Por fim, é possível visualizar a variável de saída, neste caso, a variável VPL. Consequentemente, esta variável passa a ter uma distribuição e é possível calcular todas as suas

medidas de resumo. Portanto, é possível avaliar a variável aleatória VPL de tal forma que é possível calcular sua média, desvio-padrão, percentis e, mais importante, avaliar a probabilidade de se obter VPL positivo, isto é, $P[VPL > 0]$.

5.2.1. Simulação de Monte Carlo para processos estocásticos¹⁶

Para a simulação de processos estocásticos de séries tempo, neste trabalho considera-se a simulação de processos neutros ao risco. Isso decorre de que uma vez que se trata da estimativa de opções, deve-se considerar que tal estimativa seja livre de arbitragem. Sendo assim, deve-se subtrair o prêmio de risco π nos termos de tendência dos processos estocásticos, pois só assim o valor da opção é corretamente precificado. Dessa forma, sejam μ , π e r , respectivamente, a taxa de retorno do investimento, o prêmio de risco e a taxa livre de risco. É possível relacioná-las tal que $\mu = \pi + r$.

Para a taxa livre de risco será utilizada a taxa de longo prazo (TLP) do BNDES. De acordo com dados de dezembro/2018, esta taxa estava em 6,52% ao ano. Esta taxa representa o custo de captação do BNDES mais a expectativa de aumento de inflação para os próximos 12 meses (BNDES, 2018). Assim, como esta taxa representa a taxa de empréstimos concedidos pelo BNDES, esta será utilizada como referência para taxa livre de risco. Por último, uma vez que se deve considerar a decisão de investimento de forma mensal, é necessário transformar tal taxa para base mensal. Sendo assim, $r = (1 + 0,0652)^{\frac{1}{12}} - 1 = 0,528\%$.

Já para o prêmio de risco π , sua estimativa será feita pela metodologia de CAPM (*Capital Asset Pricing Model*), conforme feito por Bastian-Pinto *et al.* (2008) e Pantoja *et al.* (2016). Além disso, o CAPM define que o prêmio de risco do ativo é proporcional ao prêmio de risco de mercado por um parâmetro chamado de “beta” (β), tal que $\pi_{ativo} = (\beta) \pi_{carteira}$.

Dessa maneira, pode-se estimar o π_{ativo} por meio de uma regressão dos retornos logaritmos das séries de preços de etanol e açúcar (uma de cada vez) – como uma *proxy* para μ – contra a série dos retornos logaritmos dos índices da Bovespa¹⁷, representando o prêmio de risco de mercado, conforme a equação (5.6) abaixo.

¹⁶ Nesta seção só será exposto o raciocínio envolvendo simulação de Monte Carlo para processos MRM. O motivo disso se deve ao fato de que para as séries de tempo que foram simuladas, isto é, as séries de açúcar e etanol, foram utilizadas apenas MRM e não MGB.

¹⁷ Os dados utilizados referentes ao índice da Bovespa são de fevereiro/2001 a novembro/2018, coletados no portal Yahoo Finance (2018).

$$\mu_{ativo} = r + \beta(\pi_{carteira}) + \varepsilon \quad (5.6)$$

Na equação (5.6), μ_{ativo} representa os retornos logaritmos das séries de preços; o termo r , uma constante para a taxa livre de risco a ser estimada também; β , a estimativa do prêmio de risco; $\pi_{carteira}$, os retornos logaritmos dos índices da Bovespa; ε , o termo aleatório da regressão.

No entanto, os valores de β estimados para ambas as séries de preços não são estatisticamente significativos¹⁸, indicando que não há correlação entre o risco de mercado e as variações de preços do etanol e do açúcar. Logo, para as simulações de Monte Carlo neste trabalho, o valor do prêmio de risco é zero.

Após a estimativa do prêmio de risco, para se trabalhar com os processos neutros ao risco, ou seja, para o MRM simples de O-U se tornar livre de risco é necessário subtrair o prêmio de risco no termo de tendência das séries. Assim, a equação (4.7), no Capítulo 4, é reescrita com a subtração do prêmio de risco na equação (5.7) abaixo. Logo, temos o modelo neutro ao risco simples de O-U, indicado pelo sobrescrito Q para se diferenciar do modelo real.

$$dX_t^Q = \eta \left(\bar{X} - \frac{\pi}{\eta} - X_t \right) dt + \sigma dz_t^Q \quad (5.7)$$

Depois dessa etapa, para poder performar as simulações, é necessário utilizar uma versão discretizada da equação (5.7) acima. Assim, temos a seguinte equação (5.8) abaixo.

$$X_t = X_{t-1}(e^{-\eta\Delta t}) + \left(\bar{X} - \frac{\pi}{\eta} \right) (1 - e^{-\eta\Delta t}) + \sigma \sqrt{\frac{(1 - e^{-2\eta\Delta t})}{2\eta}} N(0,1) \quad (5.8)$$

Na equação (5.8), o cálculo de X_t é feito por meio da soma do valor esperado com seu termo aleatório multiplicado pela distribuição normal padronizada, isto é, $N(0,1)$. No entanto, X_t indica o logaritmo dos preços. Sendo assim, para se obter a simulação da série de preços P_t , utiliza-se a equação (5.9) a seguir.

$$P_t = \exp \left(X_t - \frac{Var(X_t)}{2} \right) \quad (5.9)$$

¹⁸ A hipótese nula para $\beta = 0$ obteve p-valor superior a 55% e 80% para as séries de preço do açúcar e etanol, respectivamente. As saídas calculadas por meio do *software* econométrico *EViews 10* de tais estimativas encontram-se no Anexo deste trabalho.

Na equação (5.9) foi necessário adaptar a relação $P_t = e^{X_t}$, subtraindo $\frac{Var(X_t)}{2}$ de X_t , para chegar na equação (5.9). Na sequência, substituindo $Var(X_t)$ pela expressão na equação (4.14), temos o valor de P_t que será calculado via simulação de Monte Carlo na equação (5.10) conforme segue:

$$P_t = \exp\left(X_t - (1 - e^{-2\eta t}) \frac{\sigma^2}{2\eta}\right) \quad (5.10)$$

Para fechar esta subseção, convém atentar-se ao fato de que os processos estocásticos são correlacionados. Uma vez que, o açúcar e o etanol são produtos do mesmo insumo, isto é, a cana-de-açúcar, há uma expectativa de correlação entre seus processos estocásticos.

Com isso, segundo Mun (2006), quando fatores críticos para a tomada de decisão são correlacionados, convém simular considerando um fator de correlação para que a modelagem fique mais próxima da realidade. Para isso, seguindo o procedimento proposto por Dias (2004), sejam as variáveis aleatórias normais X , Y e W com correlação ρ entre X e Y , então por meio de duas amostragens independentes ε_X e ε_W , as quais seguem uma distribuição normal padronizada, é possível usar a fórmula de Cholesky, dada na equação (5.11) abaixo para obter uma amostragem para a variável Y .

$$\varepsilon_Y = \rho^2 \varepsilon_X + \varepsilon_W \sqrt{1 - \rho^2} \quad (5.11)$$

Assim, o processo do cálculo do valor da opção por simulação de Monte Carlo envolve as seguintes etapas:

1. Identificação dos processos estocásticos das incertezas, as quais, neste trabalho estão representadas pelas séries de preço do açúcar e do etanol, com os procedimentos indicados nas seções anteriores;
2. Geração de N números aleatórios por amostragem, tal que $N = 100.000$. Dessa forma, considerando uma incerteza V , dado um valor inicial V_0 , é feita uma simulação *forward* neutra ao risco para valores V_t , tal que t varia entre 1 e 54, representando os 54 meses do horizonte de análise. Dessa forma, para cada mês é possível simular N valores das séries de preços;

3. Efetuação de operações matemáticas para o cálculo do valor de saída, isto é, para as funções de receita, lucro e, assim, cálculo das flexibilidades gerenciais, ou seja, das opções reais. Sendo assim, há também milhares de valores das opções $F_t(V_t)$;
4. Cálculo do $VPL_{expandido}$, isto é, o valor presente das flexibilidades $F_t(V_t)$. Para isso, calcula-se o valor presente, mediante a taxa livre de risco r , tal que temos $\frac{F_t(V_t)}{(1+r)^t}$. Na sequência, calcula-se o somatório da expressão anterior para cada mês. Dessa maneira, obtém-se o $VPL_{expandido}$, conforme a equação (5.12) abaixo.

$$VPL_{expandido_i} = \sum_{t=1}^{50} \left[\frac{F_t(V_t)}{(1+r)^t} \right] \quad (5.12)$$

Uma vez que há diferentes valores de V_t para cada simulação, na equação (5.12) há o índice i , tal que i varia entre 1 e N . Consequentemente, são calculados 100.000 valores do $VPL_{expandido}$. Nesse sentido, o $VPL_{expandido}$ passa a ser uma variável aleatória, tal que, por meio da SMC é possível visualizar sua distribuição de probabilidade, bem como suas medidas de resumo. Na Figura 17 a seguir há um exemplo da geração de números aleatórios por SMC.

Figura 17 – Simulação de Monte Carlo em etapas no simulador

Fonte: Elaboração do autor.

Na Figura 17 foram geradas 100.000 amostras de uma variável aleatória com que segue uma distribuição $Normal(10000; 1000)$ para exemplificar a geração de números. Em cada um dos quatro quadros, há um instante da geração dos 100.000 números. É possível

ver que conforme se aumenta o número de simulações, se aproxima cada vez mais da distribuição teórica. Igualmente ocorre para o valor da opção, ou seja, para o VPL expandido;

5. Cálculo do valor esperado neutro ao risco $E^Q[]$ da opção¹⁹, conforme a equação (5.13) abaixo. Isso é feito, uma vez que com a simulação e a distribuição do VPL expandido é possível calcular medidas de resumo estatística da mesma.

$$E^Q[VPL_{expandido}] = \sum_{i=1}^N \frac{VPL_{expandido_i}}{N} \quad (5.13)$$

Além disso, pela Lei dos Grandes Números²⁰, para um N muito grande, a média estimada do $VPL_{expandido}$, pela equação (5.13), converge para sua média teórica correta.

Portanto, é possível pelas etapas (1) a (5) por meio da metodologia de SMC, estimar o valor da opção, isto é, o valor das flexibilidades gerenciais e o VPL expandido da usina. Aqui é conveniente destacar que, na quantificação do valor da opção, por meio da SMC é possível calcular tal valor sem precisar formalizar uma equação diferencial da opção, como nas equações (3.3) e (3.4) (DIAS, 2004; MUN, 2006).

¹⁹ Em $E^Q[]$, a notação Q indica que se trata de uma estimativa neutra ao risco.

²⁰ A Lei dos Grandes Números afirma que, dado $\bar{X}_N = \frac{1}{N}(X_1 + \dots + X_N)$, $\bar{X}_N \rightarrow \mu$, conforme $N \rightarrow \infty$.

6. PRINCIPAIS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os principais resultados da tese desenvolvida. Dessa maneira, primeiramente são expostos os resultados encontrados no modelo de Opções Reais, seguido de uma análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo.

6.1. Resultado da avaliação por opções reais e simulação de Monte Carlo

Primeiramente, conforme explicado no capítulo anterior, considerou-se como decisão irreversível na tomada de decisão dentro de um ambiente de uma usina sucroenergética, a venda de seus produtos, quais sejam, açúcar e etanol, a contratos estabelecidos antes do início da safra. Além disso, na safra 2018/2019, a porcentagem da colheita alocada para produção de etanol foi superior a 60% (UNICA, 2018). Assim foi analisado o caso de a usina produzir 60% de etanol e 40% de açúcar como decisão irreversível, tal que a produção fosse vendida a preços de mercado. Sendo assim, tal decisão também é modelada por SMC, considerando todos os parâmetros já indicados anteriormente.

Os resultados encontrados apontam para um VPL com média e desvio-padrão de R\$ 13,489 milhões e R\$ 36,603 milhões, respectivamente. Mais ainda, a probabilidade de o VPL ser positivo é de 62,92%. Na Figura 18 que segue é possível visualizar a distribuição de probabilidade do VPL.

Figura 18 – Distribuição de probabilidade no caso inicial

Fonte: Elaboração do autor.

Na Figura 18 é possível visualizar a distribuição de probabilidade do VPL da decisão irreversível de vender a produção a contrato. Em azul há área correspondente a VPL positivo, enquanto que, em vermelho, o VPL negativo. Percebe-se também que é possível obter VPL negativo. Afinal, para alocação de 60% do *mix* para produção de etanol implica $P[VPL > 0] = 62,7\%$, ou seja, conforme variam as incertezas de mercado, há uma chance de 37,3% de se obter o VPL negativo. Assim, testou-se a *opção de parada temporária*.

Para a *opção de parada temporária*, considera-se um cenário de baixos preços de mercado a ponto de não compensar para a usina incorrer os custos variáveis de produção. Sendo assim, resta para firma apenas despesas fixas que não dependem da produção. Por isso é considerado que as despesas fixas são reduzidas a 30% de seu valor original. Portanto, a opção de parada é o máximo entre o VPL e 30% dos custos fixos negativos, tal que, $Max[VPL; -0,3(CF)]$.

Os resultados indicam que a *opção de parada temporária* aumenta o valor esperado do VPL, ou seja, $E[VPL]$, do caso base analisado – que considera o *mix* de produção de 60% para a produção de etanol – em 62,50%, para R\$ 21,954 milhões. Não só, mas também a probabilidade do VPL ser positivo aumenta de 62,7% para 74,39%. Assim, houve o acréscimo de R\$ 8.443 milhões com o valor da opção. Por último, no modelo avaliado, no horizonte de 54 meses analisados, para 100.000 simulações, em 92% delas houve o caso de ao menos uma *opção de parada temporária* ser exercida.

Além da flexibilidade pela *opção de parada temporária* descrita, há também a *opção de conversão*. Esta opção pode ser exercida a cada mês, de tal forma que, a cada mês, a usina define o *mix* de produção que maximiza o lucro naquele mês. Conforme já explicado no Capítulo 5, foi considerado o lucro entre cinco alternativas de *mix* de produção: de 40 a 60 por cento de alocação, com intervalos de 5%.

Os resultados indicaram que, em comparação com o caso inicial – alocação de 60% para produção de etanol e 40% para açúcar –, há valorização de 25,1% do valor esperado do VPL, para R\$ 16,71 milhões, com $P[VPL > 0] = 64,26\%$. Portanto, o valor da *opção de conversão* acrescenta R\$ 3,356 milhões ao caso inicial.

Por mais que os retornos sejam favoráveis para a alocação de 60% para etanol, no horizonte de 54 meses de produção, houve momentos em que esse *mix* estabelecido não era o ótimo. De acordo com o modelo, para 100.000 de simulações, em 82,2% houve ao menos um mês de produção que o *mix* de 60% para etanol não era o ótimo.

Além disso, caso fosse considerado o *mix* de produção com apenas 40% da colheita alocada para o etanol, o valor esperado do VPL iria de R\$ 1,154 milhões para R\$ 16,309 milhões, representando um aumento de 1.313,7%. Mais ainda, a probabilidade de o VPL ser positivo aumenta de 48,4% para 61,5%. Caso fosse considerada a *opção de conversão* para esse *mix* inicial, haveria uma valorização de 1.344,48%. Portanto, percebe-se que para os casos cujos VPLs possuem uma massa considerável negativa, as OR conseguem aumentar de maneira significativa o rendimento.

É possível também analisar o efeito da interação conjunta entre as *opções de conversão com parada temporária*. Nesse caso, a usina parte novamente do *mix* de produção estabelecido como caso inicial, isto é, de 60% para produção de etanol e 40% para a produção de açúcar. Assim, para cada mês, aplica-se primeiro a *opção de conversão*, ou seja, testa-se em cada mês a alternativa mudar o *mix* e, após isso, considera-se a *opção de parada temporária*.

Os resultados indicaram para as interações entre dessas opções, o VPL com valor esperado e desvio-padrão de R\$ 25,124 milhões e R\$ 32,864 milhões, respectivamente, com $P[VPL > 0]$ de 75,58%. Na Figura 19 abaixo, é possível visualizar a distribuição de probabilidade da interação entre essas opções de conversão e parada temporária.

Figura 19 – Distribuição de probabilidade das *opções de conversão e parada temporária* conjuntas

Fonte: Elaboração do autor.

Na Figura 19 é possível visualizar a distribuição de probabilidade do VPL com *opção conversão com parada temporária*. Em vermelho há a massa da distribuição negativa e, em azul, a positiva. Percebe-se que a massa positiva é bem maior, além de uma notável assimetria na distribuição. Isso decorre do fato de que com as *opções de conversão com parada temporária* limitam as perdas que ocorreriam sem elas.

Nesse sentido, o valor da opção passa a representar R\$ 11,770 milhões, o que equivale a um aumento de 88,14%. Assim, as *opções de conversão e parada temporária* em conjunto conseguem aumentar o valor da usina, evitando os efeitos indesejados das incertezas de mercado. É possível comparar as distribuições de probabilidade antes e depois das OR, conforme a Figura 20 subsequente:

Figura 20 – Distribuição de probabilidade sem e com opções reais

Fonte: Elaboração do autor.

Na Figura 20, há a distribuição do VPL da usina, considerando o *mix* inicial de 60% ao etanol e 40% ao açúcar, em azul, e o VPL da usina com as *OR de conversão com parada temporária*, em vermelho. Na imagem, à esquerda, o VPL inicial da usina (em azul) assume valores menores, chegando a -90.000.000,00, enquanto o VPL da usina com OR (em vermelho) começa a partir de -30.000.000,00. Essa diferença indica a principal vantagem da aplicação das OR para usinas sucroenergéticas, isto é, a limitação das perdas. Além disso, essa figura também mostra por meio de duas linhas verticais o valor esperado de cada distribuição, tal que a diferença entre elas, isto é, o valor R\$ 11,770 milhões indica o ganho médio proveniente das flexibilidades.

Conforme Trigeorgis (1993), a interação entre OR podem ser aditivas ou subaditivas. O autor, em seu trabalho, discorre sobre o assunto, explicando que o exercício de uma opção de abandono pode eliminar uma opção de expansão, reduzindo assim o valor da opção do ativo. Logo, tais opções se tratam de opções subaditivas. Ou ainda, como uma opção de compra e uma opção de venda europeia em datas diferentes para um mesmo ativo são aditivas.

À luz desses argumentos, tem-se o resultado de que para o valor de uma usina sucroenergética, as opções de conversão de *mix* de produção e parada temporária são aditivas. Mais ainda, tratam-se do tipo *puramente aditivas*. Isso decorre dos resultados da interação entre as *opções de conversão* e *opção de parada temporária*, as quais quando calculadas antes separadamente e somadas resultam no mesmo valor quando calculadas juntas, na *opção de conversão com parada temporária*. Logo, uma opção não afetou a outra.

Para finalizar essa seção abaixo, segue a Tabela 12 com os resultados dos valores esperados dos VPL de cada opção, bem como para o caso inicial.

Tabela 12 – Resumo dos resultados encontrados na avaliação por OR

	Valor esperado do VPL ¹	P[VPL > 0]	Acréscimo percentual no caso inicial
<i>Usina sucroenergética (caso inicial)</i>	13,510	62,92%	-
<i>Usina sucroenergética com opção de conversão</i>	16,710	64,26%	25,13%
<i>Usina sucroenergética com opção de parada temporária</i>	21,953	74,39%	62,50%
<i>Usina sucroenergética com opção de conversão com parada temporária</i>	25,124	75,58%	88,14%

¹ Em milhões de reais (R\$).

Considerando alocação de 60% para produção de etanol e 40% para produção de açúcar;

Fonte: Elaboração do autor.

6.2. Análise de sensibilidade

Nessa seção é feita análise de sensibilidade nos parâmetros do caso inicial e também nas opções reais de conversão do *mix* de produção e parada temporária.

Mix de produção: Primeiramente, para o caso inicial, foi feita uma análise de sensibilidade em relação ao *mix* de produção, isto é, se fosse determinado a contrato outra proporção entre as produções de etanol e açúcar, qual seria o VPL obtido? Para responder essa pergunta, a porcentagem de alocação da colheita de etanol foi alterada em uma faixa de 30% a 70%, em intervalos de 5%, *ceteris paribus*. Os resultados encontram-se na Tabela 13 a seguir:

Tabela 13 – Análise de sensibilidade do *mix* de produção no caso inicial

<i>Alocação para etanol</i>	<i>Média¹</i>	<i>Desvio-Padrão¹</i>	<i>P[VPL > 0]</i>
30%	-5,32	50,61	43,3%
35%	-2,20	48,11	45,7%
40%	0,91	45,67	48,4%
45%	4,02	43,30	51,3%
50%	7,13	41,01	54,7%
55%	10,24	38,81	58,5%
60%	13,35	36,72	62,7%
65%	16,46	34,76	67,1%
70%	19,57	32,95	71,7%

¹ Valores em R\$ 1.000.000,00.

Fonte: Elaboração do autor.

Pela Tabela 13 é evidente que a maior alocação do *mix* de produção para a produção de etanol implica melhores resultados econômicos. Não só os retornos são maiores – pela coluna média –, mas também os riscos são menores – pela coluna desvio-padrão e $P[VPL > 0]$.

Já era esperado melhores resultados para o *mix* de produção voltado para a produção do etanol, uma vez que esse foi o produto de destaque na recente safra de 2018/2019 (UNICA, 2018). Agora foi possível confirmar isso pelos resultados simulados. Assim, se o foco da safra fosse a produção de açúcar, pelos resultados na Tabela 8, o VPL esperado não só deixaria de ser positivo, mas teria uma variação em mais de 127%²¹.

Coefficiente na opção de parada temporária: Para o fator multiplicado na *opção de parada temporária*, conforme o cálculo $Max[VPL; -0,3(CF)]$, assim, para o caso inicial foi utilizado 30%. Testou-se também outros valores entre 0 e 1 para análise de sensibilidade. Os resultados

²¹ De acordo com a Tabela 8, a variação percentual de R\$ 19,57 milhões para R\$ 5,27 milhões negativos é de 127%.

indicaram que conforme o fator se aproxima de zero, o VPL mínimo simulado aumenta, enquanto o VPL máximo simulado praticamente não é alterado. Logo, a amplitude e o desvio-padrão dos resultados simulados são menores. Isso ocorreu tanto para a *parada temporária*, quanto para a *opção de conversão com parada temporária*. Outras estatísticas dos resultados desta análise de sensibilidade para a opção de parada temporária e parada temporária com alocação encontram-se na Tabela 14 e na Tabela 15, respectivamente, abaixo.

Tabela 14 – Fator multiplicativo na *opção de parada temporária*

	Fator 0%	Fator 30%	Fator 70%	Fator 100%
<i>VPL esperado</i> ¹	31,723	22,112	15,889	14,261
<i>Desvio-padrão</i> ¹	24,310	29,514	34,189	35,851
<i>Assimetria</i>	1,25	0,8652	0,5286	0,3895
<i>Mínimo</i> ¹	0	-28,116	-64,035	-88,377
<i>Máximo</i> ¹	216,390	216,390	216,390	216,390
<i>P[VPL > 0]</i>	100,0%	74,7%	65,0%	63,5%

¹ Valores em R\$ 1.000.000,00.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 15 – Fator multiplicativo na *opção de conversão com parada temporária*

	Fator 0%	Fator 30%	Fator 70%	Fator 100%
<i>Média</i> ¹	33,079	23,766	17,977	16,573
<i>Desvio Padrão</i> ¹	26,484	31,551	35,905	37,339
<i>Assimetria</i>	1,39	0,9983	0,6662	0,5385
<i>Mínimo</i> ¹	0	-28,116	-63,478	-84,327
<i>Máximo</i> ¹	230,499	229,238	228,990	228,990
<i>P[VPL > 0]</i>	100,00%	75,17%	66,05%	64,72%

¹ Valores em R\$ 1.000.000,00.

Fonte: Elaboração do autor.

Custo fixo: Para o parâmetro custo fixo, definido seu valor inicial em R\$ 2.000.000,00, foram feitas alterações positivas e negativas em 10%. Para o caso inicial, tais alterações implicam variações de 48% negativas e positivas no valor esperado do VPL. Já considerando a *opção de conversão*, o valor esperado do VPL teve alterações de 37%, para a *opção de parada temporária*, 24% e, por último, para *opção de conversão com parada temporária*, 21%. Assim,

percebe-se que, para as flexibilidades que possuem maior valor de opção, o custo fixo influencia menos no modelo. Esses resultados estão dispostos na Tabela 16 à Tabela 19 abaixo.

Tabela 16 – Análise de sensibilidade no custo fixo para o caso inicial

<i>Custo fixo¹</i>	1,8	2,0	2,2
<i>Valor esperado do VPL¹</i>	19,961	13,484	7,337
<i>Alterações percentuais</i>	48,04%	-	-45,59%
<i>P[VPL > 0]</i>	78,21%	63%	45,97%

¹ Valores em R\$ 1.000.000,00.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 17 – Análise de sensibilidade no custo fixo para a *opção de conversão*

<i>Custo fixo¹</i>	1,8	2,0	2,2
<i>Valor esperado do VPL¹</i>	22,907	16,722	10,536
<i>Alterações percentuais</i>	37%	-	-37%
<i>P[VPL > 0]</i>	70,76%	64,37%	58,09%

¹ Valores em R\$ 1.000.000,00.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 18 – Análise de sensibilidade no custo fixo para a *opção de parada temporária*

<i>Custo fixo¹</i>	1,8	2,0	2,2
<i>Valor esperado do VPL¹</i>	27,354	22,003	16,717
<i>Alterações percentuais</i>	24,32%	-	-24,03%
<i>P[VPL > 0]</i>	81,22%	74,69%	67,39%

¹ Valores em R\$ 1.000.000,00.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 19 – Análise de sensibilidade no custo fixo para a *opção de parada temporária e conversão*

<i>Custo fixo¹</i>	1,8	2,0	2,2
<i>Valor esperado do VPL¹</i>	29,061	23,886	18,765
<i>Alterações percentuais</i>	21,67%	-	-21,44%
<i>P[VPL > 0]</i>	81,84%	75,02%	68,91%

¹ Valores em R\$ 1.000.000,00.

Fonte: Elaboração do autor.

Custo por tonelada de cana-de-açúcar processada: Utilizou-se o valor de R\$ 91,17 e realizou-se alterações de 10% positivas e negativas, as quais implicaram novas mudanças em mais de 360% no valor esperado do VPL no caso inicial; 276%, para a *opção de conversão*; 184% para *opção de parada temporária*; e, 163%, para a *parada temporária com conversão*.

Vale destacar também que ao aumentar o custo por unidade em 10%, a probabilidade de o VPL ser positivo diminui consideravelmente, chegando a 16,51% para o caso inicial e, mesmo para a *opção de conversão com parada temporária*, até 32%. Por outro lado, uma redução em 10% implica probabilidades superiores a 95% de se obter um VPL positivo. Assim, percebe-se que, pelo modelo, o custo de processamento por tonelada de cana-de-açúcar é um parâmetro muito relevante para o sucesso das usinas, conforme é possível verificar tais resultados na Tabela 20 à Tabela 23.

Tabela 20 – Análise de sensibilidade no custo por tonelada de cana-de-açúcar processada para o caso inicial

<i>Custo por tonelada de cana-de-açúcar²</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais</i>	<i>P[VPL > 0]</i>
82,00	62,899	361,56%	96,69%
91,00	13,646	-	62,87%
100,00	-35,605	-362,87%	16,51%

¹ Em R\$ milhões.

² Em R\$ / toneladas.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 21 – Análise de sensibilidade no custo por tonelada de cana-de-açúcar processada para a opção de conversão

<i>Custo por tonelada de cana-de-açúcar²</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais</i>	<i>P[VPL > 0]</i>
82	66,310	276,8%	96,8%
91	17,599	-	65,05%
100	-31,111	-276,8%	20,52%

¹ Em R\$ milhões.

² Em R\$ / toneladas.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 22 – Análise de sensibilidade no custo por tonelada de cana-de-açúcar processada para a opção de parada temporária

<i>Custo por tonelada de cana-de-açúcar²</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais</i>	<i>P[VPL > 0]</i>
82	64,590	184%	98,48%
91	22,782	-	75,47%
100	-6,278	-128%	28,91%

¹ Em R\$ milhões.

² Em R\$ / toneladas.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 23 – Análise de sensibilidade no custo por tonelada de cana-de-açúcar processada para a opção de conversão com parada temporária

<i>Custo por tonelada de cana-de-açúcar²</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais</i>	<i>P[VPL > 0]</i>
82	67,508	163%	98,43%
91	25,670	-	76,28%
100	-3,682	-114,4%	32,47%

¹ Em R\$ milhões.

² Em R\$ / toneladas.

Fonte: Elaboração do autor.

Fatores de conversão da produção: Para os fatores de conversão, inicialmente considerou-se que a partir de uma tonelada de cana-de-açúcar pode-se produzir 40 litros de etanol e duas sacas de açúcar. Novamente, também foram feitas alterações positivas e negativas em 10% nesses

parâmetros, isto é, primeiro alterou-se a conversão do etanol com a conversão do açúcar constante e vice-versa.

Os resultados indicaram que tais alterações na conversão do etanol implicam em maiores alterações percentuais no valor esperado do VPL, tanto para o caso inicial, quanto para as OR analisadas, quando comparadas com as alterações nos fatores de conversão da produção. Apenas com a *opção de conversão com parada temporária* que o VPL se mantém positivo para toda a análise de sensibilidade dos fatores de conversão. Os valores de toda a análise podem ser conferidos na Tabela 24 à Tabela 31 abaixo.

Tabela 24 – Análise de sensibilidade no fator de conversão para produção de etanol no caso inicial

<i>Fator de conversão</i> ²	<i>Valor esperado do VPL</i> ¹	<i>Alterações percentuais</i>
36	-22,293	-267%
40	13,316	0%
44	48,925	267%

¹ Em R\$ milhões.

² Em litros/toneladas.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 25 – Análise de sensibilidade no fator de conversão para produção de etanol na *opção de conversão*

<i>Fator de conversão</i> ²	<i>Valor esperado do VPL</i> ¹	<i>Alterações percentuais</i>
36	-15,030	-189,8%
40	16,732	-
44	50,458	201,6%

¹ Em R\$ milhões.

² Em litros/toneladas.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 26 – Análise de sensibilidade no fator de conversão para produção de etanol na *opção de parada temporária*

<i>Fator de conversão²</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais</i>
36	-1,648	-107,48%
40	21,989	-
44	52,034	136,63%

¹ Em R\$ milhões.

² Em litros/toneladas.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 27 – Análise de sensibilidade no fator de conversão para produção de etanol na *opção de conversão com parada temporária*

<i>Fator de conversão²</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais</i>
36	4,338	-82,7%
40	25,077	-
44	53,351	112,75%

¹ Em R\$ milhões.

² Em litros/toneladas.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 28 – Análise de sensibilidade no fator de conversão para produção de açúcar no caso inicial

<i>Fator de conversão²</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais</i>
1,8	-7,935	-160%
2,0	13,316	0%
2,2	34,567	160%

¹ Em R\$ milhões.

² Em sacas/toneladas.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 29 – Análise de sensibilidade no fator de conversão para produção de açúcar na *opção de conversão*

<i>Fator de conversão</i> ²	<i>Valor esperado do VPL</i> ¹	<i>Alterações percentuais</i>
1,8	-6,673	-139,88%
2,0	16,732	-
2,2	42,053	151,33%

¹ Em R\$ milhões.

² Em sacas/toneladas.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 30 – Análise de sensibilidade no fator de conversão para produção de açúcar na *opção de parada temporária*

<i>Fator de conversão</i> ²	<i>Valor esperado do VPL</i> ¹	<i>Alterações percentuais</i>
1,8	6,331	-71,20%
2,0	21,989	-
2,2	39,698	80,54%

¹ Em R\$ milhões.

² Em sacas/toneladas.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 31 – Análise de sensibilidade no fator de conversão para produção de açúcar na *opção de parada temporária com conversão*

<i>Fator de conversão</i> ²	<i>Valor esperado do VPL</i> ¹	<i>Alterações percentuais</i>
1,8	7,328	-70,78%
2,0	25,077	-
2,2	46,808	86,66%

¹ Em R\$ milhões.

² Em sacas/toneladas.

Fonte: Elaboração do autor.

Tributação: Em relação à análise de sensibilidade na tributação, as alterações positivas e negativas em 10% implicaram baixas variações no valor esperado do VPL. Não só, mas a probabilidade de o VPL ser positivo pouco foi alterada também. Percebe-se que, de acordo com o modelo, o parâmetro de tributação é o que menos influencia o valor final das usinas. Abaixo segue os resultados na Tabela 32 à Tabela 35.

Tabela 32 – Análise de sensibilidade na tributação para o caso inicial

<i>Tributação</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais</i>	<i>P[VPL > 0]</i>
31%	13,918	4,55%	62,86%
34%	13,312	-	62,86%
37%	12,707	-4,55%	62,86%

¹ Em R\$ milhões.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 33 – Análise de sensibilidade na tributação para a opção de conversão

<i>Tributação</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais</i>	<i>P[VPL > 0]</i>
31%	17,527	4,55%	64,40%
34%	16,765	-	64,40%
37%	16,003	-4,55%	64,40%

¹ Em R\$ milhões.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 34 – Análise de sensibilidade na tributação para a opção de parada temporária

<i>Tributação</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais</i>	<i>P[VPL > 0]</i>
31%	23,226	6,07%	74,99%
34%	21,897	-	74,38%
37%	20,577	-6,03%	73,71%

¹ Em R\$ milhões.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 35 – Análise de sensibilidade na tributação para a *opção de conversão com parada temporária*

<i>Tributação</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais</i>	<i>P[VPL > 0]</i>
31%	26,513	5,85%	76,24%
34%	25,048	-	75,63%
37%	23,592	-5,85%	74,96%

¹ Em R\$ milhões.

Fonte: Elaboração do autor.

Correlação: Testou-se alterações na correlação para a simulação das séries de preço. Para o caso inicial foi calculado o valor de 44,62% com os dados históricos. Agora, para a análise de sensibilidade, testou-se os valores de -100%, -50%, 0%, 50% e 100%.

Os resultados dessa análise indicaram que o valor esperado do VPL, para o caso inicial principalmente, não obteve alterações significativas. Por outro lado, o desvio-padrão do VPL foi alterado significativamente. Para correlações negativas, a alteração percentual do desvio-padrão foi negativa, tal que, com uma correlação de -100%, o desvio padrão foi reduzido em 70%, enquanto que, para correlações positivas, houve aumento do desvio-padrão. Além disso, a probabilidade do valor esperado do VPL ser positivo foi maior quando a correlação era negativa. Inclusive, nas simulações com coeficiente -100%, a probabilidade de o VPL ser positivo foi maior que 95%.

Sendo assim, percebe-se que uma correlação positiva implica tanto ganhos quanto perdas maiores. No entanto, correlações negativas implicam menores valores de lucros e prejuízos. Por fim, há maior proteção ao ambiente de incertezas da usina quando os preços possuem correlações negativas. Abaixo da Tabela 36 à Tabela 39 é possível visualizar os resultados.

Tabela 36 – Análise de sensibilidade na correlação (ρ) para o caso inicial

<i>Correlação (ρ)</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Desvio-padrão do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais²</i>	<i>P[VPL > 0]</i>
-1,0	13,518	11,310	-69,1%	93,23%
-0,5	13,404	23,225	-36,6%	71,03%
0,0	13,312	30,940	-15,5%	65,41%
0,5	13,260	37,150	1,5%	62,38%
1,0	13,290	42,526	16,1%	60,51%

¹ Em R\$ milhões.² Alterações percentuais no desvio-padrão do VPL.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 37 – Análise de sensibilidade na correlação (ρ) para a opção de conversão

<i>Correlação (ρ)</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais²</i>	<i>Desvio- padrão do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais³</i>	<i>P[VPL > 0]</i>
-1,0	19,653	22,82%	18,301	-51,86%	93,96%
-0,5	18,664	16,64%	26,992	-29,00%	74,94%
0,0	17,472	9,19%	33,293	-12,43%	68,51%
0,5	16,057	0,34%	38,418	1,05%	64,27%
1,0	14,315	-10,32%	42,397	11,52%	61,10%

¹ Em R\$ milhões.² Alterações percentuais no valor esperado do VPL.³ Alterações percentuais no desvio-padrão do VPL.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 38 – Análise de sensibilidade na correlação (ρ) para a opção de parada temporária

<i>Correlação (ρ)</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais³</i>	<i>Desvio- padrão do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais²</i>	<i>P[VPL > 0]</i>
-1,0	13,630	-38,30%	11,305	-61,6%	93,65%
-0,5	16,057	-27,31%	20,591	-30,1%	76,46%
0,0	19,245	-12,88%	25,752	-12,5%	74,66%
0,5	22,275	0,84%	29,846	1,4%	74,46%
1,0	25,088	13,57%	33,368	13,3%	74,64%

¹ Em R\$ milhões.² Alterações percentuais no valor esperado do VPL.³ Alterações percentuais no desvio-padrão do VPL.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 39 – Análise de sensibilidade na correlação (ρ) para a opção de conversão com parada temporária

<i>Correlação (ρ)</i>	<i>Valor esperado do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais²</i>	<i>Desvio- padrão do VPL¹</i>	<i>Alterações percentuais³</i>	<i>P[VPL > 0]</i>
-1,0	19,908	-16,0%	18,436	-41,62%	94,43%
-0,5	20,752	-12,4%	24,904	-21,14%	79,28%
0,0	22,357	-5,6%	28,786	-8,85%	76,35%
0,5	23,797	0,5%	31,899	1,01%	74,77%
1,0	24,864	5,0%	34,356	8,79%	74,00%

¹ Em R\$ milhões.² Alterações percentuais no valor esperado do VPL.³ Alterações percentuais no desvio-padrão do VPL.

Fonte: Elaboração do autor.

7. CONCLUSÕES

Esta tese de doutorado se propôs a investigar o efeito da flexibilidade sobre a tomada de decisão em usinas sucroenergéticas por meio da metodologia de Opções Reais com simulação de Monte Carlo. Com tal proposta, verificou-se se a aplicação da metodologia supracitada pôde trazer melhores resultados econômicos aos investidores do setor sucroenergético, além de reduzir riscos.

Observou-se que pelas incertezas de preço de mercado, o desempenho de uma usina pode resultar em um VPL negativo, o que não ocorreria se as flexibilidades disponíveis para os investidores – tais como parada temporária ou conversão de produção entre açúcar e o etanol – fossem consideradas. No entanto, essa é uma situação possível de ser evitada com a incorporação adequada das flexibilidades gerenciais ao processo de análise do investimento. Nesse sentido, as flexibilidades incorporadas podem atuar como um instrumento de proteção e minimização de riscos, proporcionando mais acuidade aos possíveis resultados encontrados, valorizando, por consequência, esses empreendimentos.

Conforme visto, as flexibilidades gerenciais avaliadas foram: (1) a *opção de conversão*, a qual permite alterar o *mix* de produção, ou seja, os percentuais de etanol e de açúcar que serão produzidos; (2) a *opção de parada temporária*, utilizada em situações adversas de preços de mercado do açúcar e ou do etanol, nas quais a usina pode interromper sua produção, reduzindo suas perdas; e (3) a *opção de conversão com parada temporária* conjuntamente. Tais flexibilidades foram analisadas em comparação à decisão parcialmente irreversível – devido aos custos afundados do investimento – de uma usina sucroenergética alocar 60% da cana-de-açúcar colhida para a produção de etanol e os restantes 40% para a produção de açúcar, a qual é estabelecida em contrato, não possibilitando qualquer mudança na proporção alocada de cana-de-açúcar.

À luz da contextualização econômico-regulatória do setor sucroenergético na última década – o qual passou por uma grave crise que resultou em diversas usinas fechadas e outras em recuperação judicial –, a utilização de uma metodologia que contempla a inserção das flexibilidades listadas no parágrafo anterior levou a resultados de avaliação de investimentos muito superiores. Conforme visto, esses aumentos para uma usina sucroenergética foram: (1) de até 88,14% para o valor esperado do VPL, quando considerada a *opção de conversão com*

parada temporária; (2) de 62,50%, para a *opção de parada temporária*; e, (3) de 25,13%, no contexto da *opção de conversão*.

Mais ainda, enquanto no caso inicial, a probabilidade de o VPL da usina ser positivo era de apenas 62,9%, com a incorporação das flexibilidades por meio da metodologia de Opções Reais, esse valor aumentou para 76%, diminuindo, assim, o risco nas usinas sucroenergéticas obterem resultados indesejáveis. Nesse sentido, uma vez que tais flexibilidades são do tipo *defensivas*, essas conseguem entregar melhores resultados econômicos em um ambiente de mercado tão incerto.

Não apenas isso, pela análise de sensibilidade dos parâmetros na avaliação das usinas, destaca-se o resultado de que quanto menor a correlação (em valores relativos) entre os processos estocásticos do açúcar e do etanol, menor o risco para a usina. De tal maneira que para uma correlação de -100%, a probabilidade do valor esperado do VPL ser positivo da usina é superior a 93%. Assim, quanto maior a oposição da formação de preços entre etanol e açúcar, maiores são as chances de as usinas evitarem uma crise como a que ocorreu no início dos anos de 2010.

Ademais, para avaliar as flexibilidades foi necessário definir um processo estocástico para as séries de preços do etanol e do açúcar. Mais ainda, também foi quantificada a relação de ambas as séries de preços com a série de preços da gasolina. Assim, foi analisada a dinâmica das séries de preço da *gasolina*, do *etanol* e do *açúcar* no período de 2002 a 2017. Constatou-se que no curto prazo ocorreu uma transmissão de preços das variáveis açúcar e gasolina para a variável etanol. Por outro lado, os preços do açúcar não foram influenciados pelos demais (gasolina e etanol). Já a os preços da gasolina não foram influenciados pelo açúcar e sofreram muito pouca influência dos preços do etanol. Nesse sentido, conclui-se que não há uma interdependência simultânea desses nos preços desses três produtos.

Para a dinâmica de preços do açúcar, que segue uma lógica internacional de oferta e demanda, observou-se uma grande valorização no seu preço no período analisado – 2002 a 2017. Logo, a dinâmica observada nos preços do açúcar respondeu aos seus próprios movimentos no mercado internacional, sem que a gasolina ou o etanol tivessem qualquer efeito significativo sobre essa dinâmica.

No entanto, houve a transmissão do açúcar para o etanol. Em um contexto de valorização do preço do açúcar, enquanto se optou pela produção deste produto nas usinas, diminuiu-se o interesse pelo etanol, reduzindo a produção deste combustível. Consequentemente, com menor

oferta de etanol, os preços aumentaram, principalmente do etanol anidro. Logo, o sucesso do açúcar contribuiu para o detrimento do etanol no período de estudo. Assim, conclui-se que, durante a crise, o açúcar foi o principal produto das usinas, enquanto o etanol atuou como subproduto.

Ainda sobre a transmissão de preços, considera-se que, embora o controle de preços tenha ocorrido sobre a gasolina A nas refinarias, a gasolina C, a qual é vendida nos postos de combustível, seguiu sendo vendida sem controle de preços. Logo, em decorrência dos choques do preço do etanol anidro, o preço da gasolina C foi alterado para cima, apesar da vigência da política de controle de preços sobre a gasolina A. Dessa maneira, a baixa transmissão do etanol para a gasolina correspondeu pelos choques do anidro. Assim, conclui-se que nesse período o etanol atuou principalmente como um bem complementar à gasolina.

Já por outro lado, como as margens de rendimento do etanol estavam baixas, dado o controle de preços na gasolina, qualquer alteração positiva no preço deste era tido como um alívio para o setor sucroenergético. Assim, um choque exógeno positivo no preço da gasolina era uma oportunidade para o sucroenergético aumentar os preços do etanol também. Logo, a transmissão da gasolina para o etanol foi relevante.

Paralelamente ao controle de preços dos combustíveis, houve elevações no preço do barril de petróleo e, assim, o interesse das principais instituições energéticas nacionais estava voltado para a exploração do pré-sal. Consequentemente, o sucroenergético perdeu apoio. Entretanto, essas mesmas elevações no preço do petróleo e sua exploração também trouxeram preocupações ambientais, uma vez que no Brasil, o setor de transporte utiliza majoritariamente combustíveis fósseis. Assim, o acordo selado na COP-21, em 2015, para redução de emissões se concentrará em reduzir as emissões na área de transportes, criando oportunidades para o sucroenergético. Sendo assim, o compromisso em cumprir com as metas seladas na COP-21, aliado ao programa RenovaBio 2030 – que possui objetivos de descarbonizar a matriz energética brasileira por meio de estímulos à produção de biocombustíveis –, elevaram as expectativas de que haverá investimentos em novas usinas e modernização de outras, bem como de que haverá aumento na produção do setor.

Adicionalmente, há que se levar em conta as projeções da Empresa de Pesquisa Energética, a qual, conforme o Plano Decenal de Energia 2027 (EPE/MME, 2018), para 2027, espera que a produção de açúcar não crescerá tanto, aumentando até 16% no período de 10 anos, enquanto

que a oferta e a demanda de etanol total (anidro e hidratado) aumentarão em 50%, para 45 bilhões de litros produzidos e vendidos e a colheita de cana-de-açúcar aumentará em 32% para 837 milhões de toneladas. Logo, é possível esperar que as usinas sucroenergéticas foquem cada vez mais na produção de etanol e menos na produção de açúcar. Sendo assim, para os próximos anos, nas usinas sucroenergéticas, o principal produto será o etanol, em vez do açúcar. Não só, mas também há expectativas de que o etanol se tornará o principal combustível veicular no Brasil, superando as vendas de gasolina inclusive.

Outrossim, observou-se que as políticas intervencionistas no preço da gasolina pararam de ocorrer desde 2016. Assim, se tal condição persistir, em um cenário futuro de aumento da produção de etanol, é possível também esperar que haverá maior transmissão de preços entre os combustíveis etanol e gasolina e também com o preço do açúcar, isto é, uma interdependência simultânea de preços, diferente do que foi estimado nesta tese de doutorado entre 2002 e 2017.

É possível também comentar sobre a possibilidade de estudos futuros. Nesta tese de doutorado, a avaliação por Opções Reais foi feita pela avaliação das opções *defensivas* de conversão do *mix* de produção e parada temporária, em um contexto de crise no setor que levou ao fechamento de diversas usinas. Assim, uma primeira sugestão é de realizar avaliações de flexibilidades gerenciais *agressivas*, como por exemplo, por opção de expansão por meio da comercialização de energia elétrica excedente, e também como essas flexibilidades poderiam agregar valor às usinas sucroenergéticas, ainda no mesmo contexto econômico regulatório de crise.

Uma outra sugestão diz respeito à escolha do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar residual. Uma alternativa muito usada é destinar o bagaço de cana-de-açúcar como insumo nas caldeiras para gerar calor, que é aproveitado para a cogeração de bioeletricidade. Já outra alternativa – ainda pouco explorada – seria produzir etanol de segunda geração a partir desse bagaço. Sendo assim, uma sugestão de estudo é avaliar e comparar as opções de expansão da produção de etanol de segunda geração e cogeração de energia elétrica novamente pela metodologia das Opções Reais.

Ademais, outra sugestão é realizar um estudo de simulação de produção de etanol e açúcar e avaliá-lo economicamente por meio da metodologia de Opções Reais. Em diversos trabalhos na área de engenharia química, como em Albarelli (2013) e Junqueira (2015), por exemplo, foram feitas simulações técnicas de produção de açúcar e etanol. Nesses, diversos detalhes

técnicos foram especificados, como por exemplo, composição da cana-de-açúcar, extração, tratamento do caldo, evaporação, temperatura, entre outros. Ainda assim, tais condições de produção foram avaliadas por meio das técnicas tradicionais de fluxo de caixa descontado, e, além do mais, sem considerar modelagem de processos estocásticos para os preços de etanol e açúcar e, também, a ponto de as flexibilidades gerenciais de produção serem excluídas na avaliação.

Percebe-se, então, que, na literatura, as avaliações ou seguiram rigorosos padrões técnicos de produção, dispensando o rigor na avaliação econômica, ou optaram pelo rigor na economia, dispensando as especificidades técnicas de produção. Nesse sentido, é feita a sugestão de integrar uma avaliação econômica por Opções Reais com a avaliação técnica de simulação de produção.

É conveniente também destacar aqui que há limitações na pesquisa desenvolvida nessa tese de doutorado. A principal limitação a se destacar foi a impossibilidade da modelagem da *opção de abandono* (também chamada de opção de saída). Na literatura não foi localizado nenhum trabalho para o setor sucroenergético brasileiro com a opção de abandono. No entanto, esta opção foi encontrada em aplicações de Opções Reais em outras áreas, como por exemplo, na engenharia florestal, com Souza (2017); na cafeicultura, com Cardoso (2007); e, na fruticultura, com Macedo e Nardelli (2011).

Embora muitas usinas fecharam com a crise no setor, a opção de abandono não foi modelada. Conjectura-se que, o endividamento das usinas e a sua dificuldade em rolar as dívidas foi o principal fator. Dessa forma, nas usinas sucroenergéticas brasileiras, para a modelagem da opção de abandono ser mais verossímil, esta deve ser atrelada a fatores financeiros, e não a fatores econômicos, como o lucro e a receita. Logo, não foi possível aplicar a abordagem de Opções Reais. Por isso, tal flexibilidade gerencial não foi abordada neste trabalho e acredita-se que também não foi em outros trabalhos pelo mesmo motivo.

Por fim, espera-se que os resultados obtidos e conclusões alcançadas nesta tese possam contribuir para os gestores e formadores de políticas públicas do setor sucroenergético encontrarem na aplicação da metodologia de Opções Reais uma ferramenta mais robusta nas tomadas de decisões setoriais. Não só, mas também que se alcancem melhores resultados econômicos e que eventuais crises, como a que se instalou no início dos anos de 2010, tenham seus efeitos mitigados.

REFERÊNCIAS

ACCIOLI, Claudio; MONTEIRO, Solange. Modelo em xeque. **Revista Conjuntura Econômica**, v. 67, n. 3, p. 24-34, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). **Base de dados da Agência Nacional do Petróleo**, 2018. Disponível em www.anp.gov.br. Último acesso em dezembro/2018.

_____. **Conheça os produtores de etanol autorizados pela ANP**. 2019. Disponível em http://www.anp.gov.br/images/PROD_FORN_BIOCOMBUSTIVEIS/autorizacoes/Autorizacoes_Etanol.xlsx. Último acesso em janeiro de 2019.

_____. **Boletim do etanol N°09/2017**, 2017. Disponível em http://www.anp.gov.br/images/publicacoes/boletins-anp/Boletim_do_Etanol/Boletim_do_Etanol_No09_FEVEREIRO_2017.pdf. Último acesso em janeiro de 2019.

AKAIKE, Hirotugu. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: **Selected Papers of Hirotugu Akaike**. Springer New York, p. 199-213, 1998.

ALBARELLI, Juliana Queiroz. **Produção de açúcar e etanol de primeira e segunda geração: simulação, integração energética e análise econômica**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, 2013.

AMRAM, Martha; KULATILAKA, Nalin. **Real options**. 1999.

ANNA, Eduardo Pimentel Sant’; BASTOS, Júlio Cesar Albuquerque. Elasticidade da demanda por gasolina no Brasil e o uso da tecnologia flex fuel no período 2001-2012. In: **42º Encontro Nacional de Economia - ANPEC**, 2014, Natal-RN. 42º Encontro Nacional de Economia - ANPEC, 2014.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira – 2014**. São Paulo, 2015.

AVÓ, M.: Estratégia em tempos turbulentos: **A realidade das empresas familiares vista através do ramo de álcool combustível brasileiro**. Dissertação (Mestrado) - Fundação Getúlio Vargas - Escola de Administração de Empresas, São Paulo, 2008.

BACELAR, Tarcisio Souto et al. Teoria das opções reais (TOR) na avaliação de investimentos em projetos de energia renováveis. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018**. 2018.

BAJAY S. V. Integrating competition and planning: A mixed institutional model of the Brazilian electric power sector. **Energy**, 31:865–76, 2006.

BASTIAN-PINTO, Carlos L.; BRANDAO, Luiz E. T. Modelando Opções de Conversão com Movimento de Reversão à Média Revista Brasileira de Finanças, vol. 5, núm. 2, 2007, pp. 97-124 Sociedade Brasileira de Finanças. **Revista Brasileira de Finanças**, v. 5, n. 2, p. 97-124, 2007.

BASTIAN-PINTO, Carlos; BRANDÃO, Luiz; HAHN, Warren J. Flexibility as a source of value in the production of alternative fuels: The ethanol case. **Energy Economics**, v. 31, n. 3, p. 411-422, 2009.

BASTIN, Cristina; SZKLO, Alexandre; ROSA, Luiz Pinguelli. Diffusion of new automotive technologies for improving energy efficiency in Brazil's light vehicle fleet. **Energy Policy**, v. 38, n. 7, p. 3586-3597, 2010.

BATISTA, Fabio Rodrigo Siqueira et al. Avaliação dos métodos de Grant, Vora & Weeks e dos mínimos quadrados na determinação do valor incremental do mercado de carbono nos projetos de geração de energia elétrica no Brasil. **Pesquisa Operacional**, v. 31, n. 1, p. 135-155, 2011.

BERNANKE, Ben S. Irreversibility, uncertainty, and cyclical investment. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 98, n. 1, p. 85-106, 1983.

BINI, Dienice Ana; CANEVER, Mario Duarte; DENARDIN, Anderson Antônio. Correlação e causalidade entre os preços de commodities e energia. **Nova Economia**, v. 25, n. 1, 2015.

BLACK, Fischer; SCHOLES, Myron. The pricing of options and corporate liabilities. **The Journal of Political Economy**, p. 637-654, 1973.

BLOCK, Alexander; CORONEL, Daniel Arruda; DE OLIVEIRA VELOSO, Gilberto. Análise da transmissão de preços no setor sucroalcooleiro brasileiro. **Revista Eletrônica de Estratégia & Negócios**, v. 5, n. 2, p. 120-137, 2012.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SOCIAL (BNDES). **Taxa de longo prazo – TLP – BNDES**. 2018. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/tlp-taxa-de-longo-prazo>>. Último acesso em 22 de dezembro de 2018.

BOYLE, Phelim P. Options: A monte carlo approach. **Journal of financial economics**, v. 4, n. 3, p. 323-338, 1977.

BRASIL, H. G.; FREITAS, J.; MARTINS, V.; GONÇALVES, D.; RIBEIRO, E. **Opções reais: conceitos e aplicações a empresas e negócios**. São Paulo: Atlas, 2007.

BRASIL, Lei No. 10.438, de 26 de abril de 2002. **Diário Oficial da União**, Brasília-DF, 2002.

_____, Lei No. 13.299, de 21 de junho de 2016. **Diário Oficial da União**, Brasília-DF, 2016.

BRET-ROUZAUT, Nadine; FAVENNEC, Jean-Pierre: **Oil and Gas Exploration and Production: Reserves, costs, contracts**. Editions Technip, Paris, 2007.

BRUNSTEIN, Israel; TOMIYA, Eduardo Heiji. Modelo econômico de empresa sucroalcooleira. **Gestão & Produção**, v. 2, n. 3, p. 264-280, 1995.

BUSCARINI, R. J. G.; CESCO, I. G.: Análise do impacto dos veículos flex-fuel na formação e regulação de preços de combustíveis veiculares no Brasil. In: *Rio Oil & Gas Expo and*

Conference 2012, 2012, Rio de Janeiro. **Technical Papers**. Rio de Janeiro: IBP, 2012. v.1. p.1-10, 2012.

CADERNOS FGV ENERGIA. **Biocombustíveis**. Agosto 2017, Ano 4, Nº 8, 2017.

CALDEIRA FILHO, C. A.: **Aspectos cognitivos da formulação de estratégias políticas: um estudo de caso no setor do bioetanol brasileiro**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Administração de Empresas de São Paulo, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2012.

CARDOSO, C. B. C. **Análise de projetos considerando o valor de abandono**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1989.

CARDOSO, Carlos Eduardo. **Determinação dos limites de entrada e saída de um projeto de investimento em uma lavoura de café com aplicação da teoria de opções reais**. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2007.

CARDOSO, Leonardo Chaves Borges; BITTENCOURT, Maurício Vaz Lobo. Mensuração das elasticidades-preço da demanda, cruzada e renda no mercado de etanol brasileiro: um estudo usando painéis cointegrados. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 51, n. 4, p. 765-784, 2013.

CARVALHO, Maria Paula. **Superoferta mundial de açúcar faz produtores brasileiros direcionarem safra para etanol**. 2018 Disponível em: < <http://br.rfi.fr/economia/20180731-diante-de-uma-grande-oferta-o-preco-do-acucar-e-o-mais-baixo-em-3-anos>>. Último acesso em: 06 de janeiro de 2019.

CASTRO N. J., DANTAS G. A. **Lições do PROINFA e do Leilão de Fontes Alternativas para a Inserção da Bioeletricidade Sucroalcooleira na Matriz Elétrica Brasileira. Bioeletricidade e a indústria do álcool e açúcar possibilidades e limites**. 1st ed., Rio de Janeiro: Synergia; p. 47–58, 2008a.

CASTRO, Nivalde José de; DANTAS, Guilherme de A. A Importância da Inserção da Bioeletricidade na Matriz Brasileira e o Leilão de Energia de Reserva. **Rio de Janeiro: IFE**, n. 2.227, 2008b.

CASTRO, Nivaldo José de; BRANDÃO, Roberto; DANTAS, Guilherme de Azevedo. O Processo de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro e os Impactos da MP 579. **Seminário Redução das Tarifas do Setor Elétrico Brasileiro**, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/46_TDSE-51.pdf. Último acesso em agosto/2016.

CAVALCANTI, Marcelo Castello Branco. **Tributação relativa etanol-gasolina no Brasil: competitividade dos combustíveis, arrecadação do estado e internalização de custos de carbono**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

CAVALETT, Otávio et al. Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 14, n. 3, p. 399-410, 2012.

CAZEIRO, Paulo Cesar de Almeida. **Processo de aperfeiçoamento da cadeia de produção e comercialização do etanol: um estudo sobre a regulamentação e a tributação do mercado de etanol combustível no Brasil**. Dissertação (mestrado) - Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, 2010.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA/Esalq). **Base de dados**, 2018. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br>. Último acesso em janeiro de 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. 2018. Disponível em: https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/23678_459b56cfa84b956c7de6561d4fedc5eb. Último acesso em 06 de janeiro de 2019.

COPELAND, T.; ANTIKAROV, V. **Real options: A practitioner's guide**. New York, 2001

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa *et al.* **Proálcool 40 anos: Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro**. Editora Blucher, 2018.

COSTA, Brener Elias da. **Estudo bibliométrico sobre opções reais no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. 2014.

COSTA, C. C. D.; BURNQUIST, H. L. Impactos do controle do preço da gasolina sobre o etanol biocombustível no Brasil. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, 46(4), 1003-1028, 2016.

COX, John C. et al. Option pricing: A simplified approach. **Journal of financial Economics**, v. 7, n. 3, p. 229-263, 1979.

DANTAS, Guilherme A.; LEGEY, Luiz FL; MAZZONE, Antonella. Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 356-364, 2013.

DEFILIPPI FILHO, L. **Estudo de viabilidade do uso do palhico para geração de energia na entressafra de uma usina sucroenergética**. Dissertação de mestrado, Fundação Getúlio Vargas, 2013.

DIAS, A. C. A. M.; BASTIAN-PINTO, C. L.; BRANDÃO, L.; GOMES, L. Flexibility and uncertainty in agribusiness projects: investing in a cogeneration plant. RAM. **Revista de Administração Mackenzie**, v. 12, p. 105-126, 2011.

DIAS, M. A. G.: **Análise de Investimentos com Opções Reais - Teoria e Prática com Aplicações em Petróleo e em outros Setores - Volume 1: Conceitos Básicos e Opções Reais em Tempo Discreto**. Editora Interciência, 2014.

_____: **Opções reais híbridas com aplicações em petróleo**. Tese (doutorado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2005.

_____: **Real Options with Monte Carlo Simulation**, 2004. Disponível em: <<http://marcoagd.usuarios.rdc.puc-rio.br/monte-carlo.html>>. Último acesso em: dezembro de 2018.

DIAS, M. O. S.; ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A.; MACIEL FILHO, R.; ROSSELL, C. E.; MACIEL, M. R. W. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: integration to conventional bioethanol production process. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 87, n. 9, p. 1206-1216, 2009.

DICKEY, David A.; FULLER, Wayne A.: Distribution of the Estimators for autoregressive Time Series with a Unit Root. **Journal of the American Statistical Association**, Vol. 74, No. 366 (Jun., 1979), pp. 427-431, 1979.

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

_____. The options approach to capital investment. **Cambridge: Harvard Business Review**. 1995.

DIXIT, Avinash. Investment and hysteresis. **Journal of economic perspectives**, v. 6, n. 1, p. 107-132, 1992.

ESBERARD, Rafael Ramalho; CHAIM, Rafael Veiga; TUROLLA, Frederico Araújo. Custos de produção como diferencial estratégico: o caso do setor sucroalcooleiro. **Revista Administração em Diálogo**, v. 11, n. 2, 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanco energético nacional 2018: ano base 2017**. Brasília, 2018.

_____. **Balanco energético nacional 2017: ano base 2016**. Ministério de Minas e Energia, 2017.

_____. **Plano Decenal de Energia 2026**, Brasília, 2017b.

_____. **Balanco energético nacional 2016: ano base 2015**. Brasília, 2016.

_____. **Plano Decenal de Energia 2023**, Brasília, 2014.

_____. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2007/2016**, Brasília, Vol. 1, 2007a.

_____. **Balanco energético nacional 2007: ano base 2006**. Brasília, 2007b.

ENDERS, Walter. **Applied econometric time series**. John Wiley & Sons, 2008.

FARIA, Vinícius de. **Comparação da formação do custo da cana-de-açúcar, e sua influência sobre o custo de produção realizado pela usina e por fornecedores que entregam cana na esteira, na cidade de Piracicaba – SP, para safra 13/14.** Monografia (Graduação), Universidade Estadual de Campinas, 2014.

FERNANDES, Francisco Oscar Louro. **Custos de produção das usinas de açúcar e etanol, com Oscar Fernandes.** 2017. (02min08s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=xCRqihv57KY>>. Acesso em 02 de janeiro de 2019.

FERNANDES, R. Delimitação do mercado relevante na revenda dos combustíveis, gasolina C, álcool hidratado e gás natural veicular: uma análise via produtos. **Revista de Economia**, Curitiba, v. 39, p. 93, 2013.

FONSECA, Marcelo Nunes et al. Análise de viabilidade do desenvolvimento de um campo de petróleo: uma abordagem por opções reais no contrato de partilha de produção. **Revista Brasileira de Gestão de Negócios**, v. 19, n. 66, p. 574-593, 2017.

FREITAS, Rodrigo R. de et al. Analysis of ore transportation: A financial approach using the Black & Scholes method in real options. **Journal of Finance and Investment Analysis**, v. 7, n. 4, p. 1-4, 2018.

GAMARRA, J. E. **Transmissão de preços entre os mercados do etanol e da gasolina desde o lançamento dos carros Flex-Fuel, no mercado brasileiro.** 2009. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GARCIA, Junior Ruiz; LIMA, Divina Aparecida Leonel Lunas; VIEIRA, Adriana Carvalho Pinto. A nova configuração da estrutura produtiva do setor sucroenergético brasileiro: panorama e perspectivas. **Revista de Economia Contemporânea**, v. 19, n. 1, p. 162-184, 2015.

GESKE, Robert; SHASTRI, Kuldeep. Valuation by approximation: a comparison of alternative option valuation techniques. **Journal of Financial and Quantitative Analysis**, v. 20, n. 1, p. 45-71, 1985.

GILIO, L.; CASTRO, N. R. Avaliação de aspectos limitantes ao crescimento do etanol e o setor sucroenergético no Brasil. **Revista Eletrônica de Energia**, 2017.

GOLDEMBERG, José. Biomass and energy. **Química nova**, v. 32, n. 3, p. 582-587, 2009.

GOMIDE, F. Em defesa dos reservatórios. SANTOS, Julio. 27 de novembro de 2014. **Revista Brasil Energia**, 2014

GONÇALVES, D. S.; BRASIL, H. G.; SOUSA NETO, J. A: **Option of switching an investment project into an agribusiness project.** 6. ed. Nova Lima: Fundação Dom Cabral, V. 1., p. 33, 2006.

GRASSI, M. C. B.; PEREIRA, G. A. G. Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of Biofuels. **Industrial Crops and Products**, v. 129, p. 201-205, 2019.

HAMMERSLEY, J. M.; HANDSCOMB, D. C. **Monte Carlo Methods**. Methuen, London, 1964.

HANNAN, Edward J.; QUINN, Barry G. The determination of the order of an autoregression. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, p. 190-195, 1979.

HINRICHS, Roger A.; KLEINBACH, Merlin; REIS, Lineu Belico dos. **Energia e Meio Ambiente**, Tradução da 5ª edição. Cengage Learning Edições Ltda, São Paulo, SP, 2015.

HIRA, Anil; DE OLIVEIRA, Luiz Guilherme. No substitute for oil? How Brazil developed its ethanol industry. **Energy Policy**, v. 37, n. 6, p. 2450-2456, 2009.

HO, Thomas SY; LEE, Sang Bin; YI, Sang-Bin. The Oxford Guide to Financial Modeling: Applications for Capital Markets. **Corporate finance, risk management and financial institutions**, 2004.

INDEXMUNDI. **IndexMundi Database**, 2018. Available at: <http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=crude-oil-brent>. Último acesso em maio de 2018.

INSTITUTO ACENDE BRASIL. **Energia - Termoeletricidade: os caminhos da expansão**, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE); SISTEMA NACIONAL DE ÍNDICES DE PREÇOS AO CONSUMIDOR (SNIPC). **Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA)**, 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Bioenergy and Biofuels**, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/renewables/bioenergy/>. Último acesso em maio de 2018.

JOHANSEN, S. Statistical analysis of cointegration vectors. **Journal of Economics Dynamics and Control**, v. 12, p.231-254, 1988.

JOHANSEN, S.; JUSELIUS, K. Maximum likelihood estimation and inference on cointegration with application to the demand of money. **Oxford Bulletin of Economics and Statistics**, v. 52, p. 169-209, 1990.

JUNQUEIRA, Tassia Lopes. **Techno-economic feasibility analysis of process alternatives for ethanol production in Brazil**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, 2015.

KHATIWADA, D.; Seabra, J.; Silveira, S.; Walter, A. Power generation from sugarcane biomass—A complementary option to hydroelectricity in Nepal and Brazil. **Energy**, v. 48, n. 1, p. 241-254, 2012.

KITAYAMA, Onório. **Bioeletricidade: perspectivas e desafios**. In: III Seminário Internacional de Energia Elétrica, Gesel/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

KULATILAKA, Nalin. The value of flexibility: the case of a dual-fuel industrial steam boiler. **Financial Management**, p. 271-280, 1993.

KULATILAKA, Nalin; TRIGEORGIS, Lenos. The general flexibility to switch: Real options revisited. **Real options and investment under uncertainty: classical readings and recent contributions**, p. 179-198, 2004.

KWIATKOWSKI, D.; PHILLIPS, P. C.; SCHMIDT, P.; SHIN, Y. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root?. **Journal of Econometrics**, v. 54, n. 1-3, p. 159-178, 1992.

LAMBRECHT, Bart M. Real options in finance. **Journal of Banking & Finance**, v. 81, p. 166-171, 2017.

LEÃO, J. **Álcool energia verde**. São Paulo: Iqual Editora, 2002.

LIANG, Wen-Jung; WANG, Kuang Cheng Andy; CHOU, Ping-Yao. The superiority among specific, demand ad valorem and cost ad valorem subsidy regimes. **Journal of Economics**, v. 123, n. 1, p. 1-21, 2018.

MACEDO, Marcelo Alvaro da Silva; NARDELLI, Paula Moreira. Teoria de Opções Reais e viabilidade econômico-financeira de projetos agroindustriais: o caso da opção de abandono. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, v. 13, n. 1, 2011.

MARCOVITCH, Jacques. **Para mudar o futuro: mudanças climáticas, políticas públicas e estratégias empresariais**. Edusp, 2006.

MARJOTTA-MAISTRO, Marta Cristina; BARROS, Geraldo Sant'na de Camargo. Relações comerciais e de preços no mercado nacional de combustíveis. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Vol. 41 Nº 4, 2003.

MARRECO, J. M.: **Planejamento de Longo Prazo da Expansão da Oferta de Energia Elétrica no Brasil sob uma Perspectiva da Teoria das Opções Reais**. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2007.

McDONALD, Robert L., SIEGEL, Daniel. The Value of Waiting to Invest. **Quarterly Journal of Economics**, Vol. 101, No. 4, (November 1986), pp. 707-727

MELIN, Bruno Batista. **Análise das Opções reais de um empreendimento de mineração utilizando simulação de Monte Carlo**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

MELLO, Marcelo Braga Correa de. **Avaliação de Projetos de Investimentos com Opções Reais: Cálculo do Valor da Opção de Espera de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede**. Tese de Doutorado. PUC-Rio, 2015.

MELO, André de Souza; SAMPAIO, Yony de Sá Barreto. Uma Nota Sobre o Impacto do Preço do Açúcar, do Etanol e da Gasolina na Produção do Setor Sucroalcooleiro. **Revista Brasileira de Economia**, v. 70, n. 1, p. 61-69, 2016.

MENDES, F. M.; DIAS, M. O. S.; FERRAZ, A.; MILAGRES, A. M. F.; SANTOS, J. C.; BONOMI, A. Techno-economic impacts of varied compositional profiles of sugarcane

experimental hybrids on a biorefinery producing sugar, ethanol and electricity. **Chemical Engineering Research and Design**, 125, 72-78, 2017.

MENDRONE, Natalia de Almeida; SOUZA, Walter Felizardo de. **Análise de custos e viabilidade econômica de usinas sucroalcooleiras com diferentes sistemas de funcionamento das linhas de evaporadores**. Universidade de São Paulo, 2012.

MERTON, Robert C. Theory of rational option pricing. **The Bell Journal of Economics and Management Science**. Vol. 4, No. 1 (Spring, 1973), pp. 141-183

METROPOLIS, Nicholas; ULAM, Stanislaw. The Monte Carlo method. **Journal of the American statistical association**, v. 44, n. 247, p. 335-341, 1949.

MICHELLON, E.; SANTOS, A. A. L.; RODRIGUES, J. R. A. Breve descrição do proálcool e perspectivas futuras para o etanol produzido no Brasil. In: **XLVI Congresso Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural**. Anais da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2008.

MILANEZ, Artur Yabe et al. De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar: uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 41, p. 237-294, mar. 2015.

MINARDI, A. M. A. F. **Teoria das opções aplicada a projetos de investimentos**. São Paulo, Editora Atlas, 2004.

MING, C. **A CIDE, outra vez**. O Estado de São Paulo. 14 de fevereiro de 2015, 2015. Disponível em: <http://economia.estadao.com.br/blogs/celso-ming/a-cide-outra-vez/>. Acessado em: 23/04/2015.

MOORE, Jeffrey H.; WEATHERFORD, Larry R. **Tomada de decisão em administração com planilhas**. Bookman, 6ª Edição, 2005.

MORAES, Marcelo Lopes de; BACCHI, Mirian Rumenos Piedade. Etanol: do início às fases atuais de produção. **Revista de Política Agrícola**, v. 23, n. 4, p. 5-22, 2015.

MORAES, M. A. F. D. et al. Externalidades sociais dos combustíveis. **Etanol e Bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**, v. 1, 2010.

MORAES, M. A. F. D.; ZILBERMAN, D. **Production of Ethanol from Sugarcane in Brazil: From State Intervention to a Free Market**, (Vol. 43). Springer Science & Business Media, 2014.

MOREIRA, J. R.; PACCA, S. A.; PARENTE, V.: The future of oil and bioethanol in Brazil. **Energy Policy**, 65, 7-15, 2014.

MOREIRA, José R.; GOLDEMBERG, José. The alcohol program. **Energy policy**, v. 27, n. 4, p. 229-245, 1999.

MOURA, Bruno Valle de. **O papel do açúcar e da gasolina na determinação dos preços de etanol no brasil**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

MUN, Johnathan. **Modeling risk: Applying Monte Carlo simulation, real options analysis, forecasting, and optimization techniques**. John Wiley & Sons, 2006.

MYERS, Stewart C. Determinants of corporate borrowing. **Journal of financial economics**, v. 5, n. 2, p. 147-175, 1977.

NAPPO, M. **A demanda por gasolina no Brasil: Uma avaliação de suas elasticidades após a introdução dos carros bicomcombustível**. Dissertação de Mestrado. FGV - EESP, São Paulo, 2007.

NARDINI, C. R. **Mudança no padrão das intervenções do governo na economia e impactos no setor sucroalcooleiro**. Monografia. Insper Instituto de Ensino e Pesquisa, 2017.

NEVES, M. F.; CONEJERO, M. A. **Estratégias para a cana no Brasil: um negócio classe mundial**. São Paulo, Editora Atlas, 2010.

NG, S.; PERRON, P. Lag length selection and the construction of unit root tests with good size and power. **Econometrica**, Chicago, v. 61, n. 6, p.1519-1554, Nov. 2001.

NYKO, D., GARCIA, J. L. F., MILANEZ, A. Y., CASTRO, N. J. D., BRANDÃO, R., DANTAS, G. D. A. Determinantes do baixo aproveitamento do potencial elétrico do setor sucroenergético: uma pesquisa de campo. **BNDES Setorial**, n. 33, mar. 2011, p. 421-476.

NYKO, Diego, Valente, M. S., Milanez, A. Y., Tanaka, A. K. R., & Rodrigues, A. V. P. A evolução das tecnologias agrícolas do setor sucroenergético: estagnação passageira ou crise estrutural? **BNDES Setorial**, n. 37, mar. 2013, p 399-442, 2013.

OLIVEIRA, Denis Luis de; BRANDÃO, L. E.; IGREJAS, R.; GOMES, L. L. Switching outputs in a bioenergy cogeneration project: A real options approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 74-82, 2014.

OPERADOR NACIONAL DO SETOR ELÉTRICO (ONS). **Histórico da operação, ano base: 2015**, 2016. Disponível em: http://www.ons.org.br/historico/geracao_energia.aspx. Último acesso em: agosto/2016.

ORELLANO, Veronica Fernandez; SOUZA, Alberto De Nes de; AZEVEDO, Paulo Furquim de. Elasticidade-preço da demanda por etanol no Brasil: como renda e preços relativos explicam diferenças entre estados. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 51, n. 4, p. 699-718, 2013.

PADDOCK, James L.; SIEGEL, Daniel R.; SMITH, James L. Option valuation of claims on real assets: The case of offshore petroleum leases. **The Quarterly Journal of Economics**, p. 479-508, 1988.

PANTOJA, David Eduardo Lopez et al. Valoração econômica da flexibilidade de produção em diferentes regiões do setor sucroalcooleiro brasileiro. **Revista Brasileira de Gestão de Negócios**, v. 18, n. 60, 2016.

PEDERSON, Glenn; ZOU, Tianyu. Using real options to evaluate ethanol plant expansion decisions. **Agricultural finance review**, v. 69, n. 1, p. 23-35, 2009.

PENEDO; G. M.: **Avaliação da flexibilidade de escolha dos insumos de produção do biodiesel através da teoria de opções reais**. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

PEREIRA, Renata Pedreira. **Avaliação de projeto de biocombustível com flexibilidade operacional por opções reais**. Dissertação de Mestrado. Faculdades Ibmecc, 2008.

PERRON, P.; NG, S. Useful modifications to some unit root tests with dependent errors and their local asymptotic properties. **Review of Economic Studies**, Bristol, v. 63, n. 3, p. 435-463, jul. 1996.

PESSOA, Gerisval Alves. **Avaliação de projetos de mineração utilizando a teoria das opções reais em tempo discreto: um estudo de caso em mineração de ferro**. Tese de Doutorado. Fundação Getúlio Vargas, 2006.

PESSOA, Priscilla Figueiredo Polari. **Opções de conversão com movimento de reversão à média com saltos de Poisson: o caso do setor sucroalcooleiro**. Rio de Janeiro, 2011. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

PETROBRAS. **Adotamos nova política de preços de diesel e gasolina**, 14 de outubro de 2016. Available at: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/adotamos-nova-politica-de-precos-de-diesel-e-gasolina.htm>. Último acesso em maio de 2018.

_____. **Revisão da política de preços de diesel e gasolina**, 30 de junho de 2017. Available at: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/revisao-da-politica-de-precos-de-diesel-e-gasolina.htm>. Last access: Último acesso em maio de 2018.

PHILLIPS, Peter C.B.; PERRON, Pierre. Testing for a unit root in time series regression. **Biometrika**, v. 75, n. 2, p. 335-346, 1988.

PINDYCK, Robert S. Irreversible Investment, Capacity Choice, and the Value of the Firm. **The American Economic Review**. Vol. 78, No. 5, pp. 969-985, 1988.

PINDYCK, Robert S.; RUBINFELD, Daniel L. **Microeconomics**. Prentice Hall, Sétima Edição, 2009.

PINTO, Mairun Junqueira Alves. **Investimentos diretos estrangeiros no setor sucroenergético**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Administração das Organizações. Universidade de São Paulo, 2011.

POSTALI, Fernando A. S.; PICCHETTI, Paulo. Geometric Brownian motion and structural breaks in oil prices: a quantitative analysis. **Energy Economics**, v. 28, n. 4, p. 506-522, 2006.

POSTALI, Fernando Antonio Slaibe. **Benefícios governamentais e investimentos no setor de petróleo na presença de custos cumulativos: uma análise com base em opções reais**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2004.

PUGLIERI, Rafael. **Análise da indústria sucroalcooleira sob a ótica da defesa da concorrência: como definir mercados relevantes**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia – EP/FEA/IEE/IF, Universidade de São Paulo, 2013.

RAMOS, Pedro. **Agroindústria canavieira e propriedade fundiária no Brasil**. Tese de doutorado, FGV, 1991.

_____. Os mercados mundiais de açúcar e a evolução da agroindústria canavieira do Brasil entre 1930 e 1980: do açúcar ao álcool para o mercado interno. **Economia Aplicada**, V. 11, p. 559-85, 2007.

RAPHAEL, Rafael Alcides. **Uma Aplicação da Teoria de Opções Reais na Avaliação Econômico-Financeira de Projetos e Análise das Flexibilidades Operacionais na Indústria de Alumínio**. Tese de Doutorado. PUC-Rio, 2010.

RAYCHAUDHURI, Samik. Introduction to monte carlo simulation. In: **Simulation Conference, 2008. WSC 2008**. Winter. IEEE, 2008. p. 91-100.

RENDER, Barry; STAIR JR, Ralph M.; HANNA, Michael E. **Análise Quantitativa para a Administração: com Excel e POM-QM para Windows**. Bookman, Edição 10, 2010.

RENEWABLES FUELS ASSOCIATION (RFA). **Fueling a High Octane Future – 2016 Ethanol Industry Outlook**, 2018. Disponível em: <http://www.ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2016/02/Ethanol-Industry-Outlook-2016.pdf>. Último acesso em janeiro de 2019.

RODRIGUES, Antonio de Pádua. Dívida de usinas de cana deve somar R\$ 95 bilhões e superar receita do setor. **Época Negócios**, 24 de dezembro de 2015.

RODRIGUES, L.; FARINA, E. M. M. Q. A política nacional de biocombustíveis e os ganhos de eficiência do setor produtivo. **Caderno Opinião**, FGV Energia, 2018.

SAMANEZ, Carlos Patrício; FERREIRA, L. D. R.; CASTRO, J. G.; DE SOUZA, F. S.; AIUBE, F. A. L. Dynamic stochastic model for economic evaluation of electric power cogeneration in the sugar-alcohol industry. **Custos e Agronegocio on line**, v. 13, p. 71-95, 2017.

SANT'ANNA, A. C.; GRANCO, G.; BERGTOLD, J.; CALDAS, M. M. Os Desafios da expansão da cana-de-açúcar: como pensam e agem arrendatários e produtores? **Radar: tecnologia, produção e comércio exterior**, Brasília, n. 39, 67 p., jun. 2015.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. **Rotação e reformas**. Agência Embrapa de Informação e Tecnológica. Disponível em: < http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_75_22122006154841.html#>. Último acesso em: 03 de janeiro de 2019.

SANTOS, Gervásio F. Fuel demand in Brazil in a dynamic panel data approach. **Energy Economics**, v. 36, p. 229-240, 2013.

SANTOS, Lúcia et al. Real options versus traditional methods to assess renewable energy projects. **Renewable Energy**, v. 68, p. 588-594, 2014.

SAUER, Sérgio; LEITE, Sergio Pereira. Expansão agrícola, preços e apropriação de terra por estrangeiros no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 50, n. 3, p. 503-524, 2012.

SCHMIT, Todd M.; LUO, Jianchuan; TAUER, Loren W. Ethanol plant investment using net present value and real options analyses. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 10, p. 1442-1451, 2009.

SCHÜNEMANN, Liciane. **A demanda de gasolina automotiva no Brasil: o impacto nas elasticidades de curto e longo prazo da expansão do GNV e dos carros flex**. Faculdade de Economia e Finanças Ibmecc, Rio de Janeiro, 2007.

SCHWARZ, Gideon. Estimating the dimension of a model. **The annals of statistics**, v. 6, n. 2, p. 461-464, 1978.

SECRETARIA DO TESOUREIRO NACIONAL (STN). **CIDE-Combustíveis**, 2013. Disponível em: http://www.stn.fazenda.gov.br/documents/10180/190777/CartilhaCIDE13_01_23.pdf. Último acesso em janeiro de 2019.

SERRA, Teresa; ZILBERMAN, David. Biofuel-related price transmission literature: A review. **Energy Economics**, v. 37, p. 141-151, 2013.

SILVA, J. H. da. Um perfil da expansão canavieira na Alta Paulista. **Revista Pegada**, v. 10, n. 1, 2012.

SILVA, R. I. da. **Avaliação de fontes alternativas para geração de energia elétrica a partir da biomassa de palha da cana: uma abordagem por Opções Reais**. Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, Régis Yuzo Mori Alves da. **Proposta de metodologia de avaliação de portfólio por opções reais, considerando o valor da informação: um estudo de caso em exploração de petróleo**. Tese de Doutorado. Fundação Getúlio Vargas, 2010.

SOSNOSKI, Anna Andrea Kajdacsy Balla; RIBEIRO, Celma de Oliveira. Hedging in the ethanol and sugar production: integrating financial and production decisions. **Production**, v. 22, n. 1, p. 115-123, 2012.

SOUSA, Eduardo Leão de; MACEDO, Isaías de Carvalho; PILAGALLO, Oscar. **Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**. São Paulo, Luc Projetos de Comunicação, 2010.

SOUZA NETO, J. A.; OLIVEIRA, V. I.; BERGAMINI JR, L. C. **Opções Reais: Introdução à teoria e à prática**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2008.

SOUZA, Alberto Pereira de. **Aplicação da Teoria de Opções Reais na análise de investimento em geração de energia elétrica a partir de madeira de eucalipto**. Tese de doutorado. Universidade de Brasília. 2017.

SOUZA, Kennedy Jamestony de Carvalho. **Uma análise da relação entre os mercados sucroalcooleiros de São Paulo e Pernambuco: abordagens de transmissão de preços e políticas públicas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2018.

SOUZA, Zilmar José de; AZEVEDO, Paulo Furquim de. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 44, n. 2, p. 179-199, 2006.

STUDENT. The probable error of a mean. **Biometrika**, p. 1-25, 1908.

SUSLICK, S. B.; SCHIOZER, D. J.: Risk analysis applied to petroleum exploration and production: an overview. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Vol. 44, p. 1 – 9, 2004.

SZMRECSANYI, T. M.; MOREIRA, E. P. O Desenvolvimento da agroindústria canavieira do Brasil desde a segunda guerra mundial. **Estudos Avançados**, v. 5, n. 11, p. 57-79, 1991

TATONI, Walter Milan. **Avaliação de projetos de investimento em cogeração de energia utilizando bagaço de cana-de-açúcar em biorrefinarias a partir do uso da teoria das opções reais**. Tese de Doutorado. Fundação Getúlio Vargas, 2012.

TAYLOR-DE-LIMA, R. L.; DA SILVA, A. J. G.; LEGEY, L. F.; SZKLO, A. Evaluation of economic feasibility under uncertainty of a thermochemical route for ethanol production in Brazil. **Energy**, 150, 363-376, 2018.

TENKORANG, Frank et al. Relationship between ethanol and gasoline: AIDS approach. **Energy Economics**, v. 50, p. 63-69, 2015.

TONIN, João Ricardo; MATHEUS TONIN, Julyerme. Do Proálcool ao “Próetanol”: novos desafios na produção do etanol brasileiro. **Revista Gepec**, v. 85903, 2014.

TORQUATO S. A., RAMOS R. C. Biomassa da Cana-de-Açúcar e a Geração de Bioeletricidade em São Paulo: Usinas Signatárias ao Protocolo Agroambiental Paulista. **Informações Econômicas**, 2013.

TOURINHO, O. A. F. **The Valuation of Reserves of Natural Resources: An Option Pricing Approach**. University of California, Berkeley, PhD Dissertation, November, 1979.

TREVISAN, Juliana Eloise; LIMA, Nilton Cesar; DE SOUZA, Gustavo Henrique Silva. Custo da produção da cana de açúcar em uma usina sucroalcooleira da Região do Triângulo Mineiro. **Revista de Estudos Contábeis**, v. 8, n. 14, p. 39-57.

TRIGEORGIS, Lenos. The nature of option interactions and the valuation of investments with multiple real options. **Journal of Financial and quantitative Analysis**, v. 28, n. 1, p. 1-20, 1993.

TRIGEORGIS, Lenos. **Real options: Managerial flexibility and strategy in resource allocation**. MIT Press, 1996.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR (UNICA). **Acompanhamento quinzenal da safra na região Centro-Sul: Posição até 16/12/2018**, 2018.

_____. **Base de dados de União da Indústria de Cana-de-Açúcar**, 2019. Disponível em: <www.unicadata.com.br>. Último acesso em janeiro de 2019.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Sugar: World Markets and Trade – World Production, Markets, and Trade Reports**. 2018. Disponível em: <<https://www.fas.usda.gov/psdonline/circulars/Sugar.pdf>>. Último acesso em 06 de janeiro de 2019.

VOLLERT, Alexander. **A stochastic control framework for real options in strategic evaluation**. Springer Science & Business Media, 2012.

VOLPE, André Luís da Silva; MARJOTTA-MAISTRO, Marta Cristina; VALSECHI, Octávio Antonio. Arbitragem entre açúcar e etanol em usinas vendedoras de energia elétrica. **Revista iPecege**, v. 2, n. 1, p. 7-28, 2016.

WATANABE, Melissa. **A desregulamentação do setor sucroalcooleiro e seu impacto na estratégia de produção das usinas no estado do Paraná**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

YAHOO FINANCE. **Cotações de IBOVESPA (BVSP)**. 2018. Disponível em: <https://finance.yahoo.com/quote/%5EBVSP/>. Acesso em: 20 de novembro de 2018.

ZHANG, Dengjun; ASCHE, Frank; OGLEND, Atle. Ethanol and trade: An analysis of price transmission in the US market. **Energy Economics**, v. 42, p. 1-8, 2014.

ZILIO, Leonardo Botelho; LIMA, Roberto Arruda de Souza. Atratividade de Canaviais Paulistas sob a ótica da Teoria das Opções Reais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 53, n. 3, p. 377-394, 2015.

ANEXO – TABELAS ECONOMETRICAS

Tabela 40 – Teste ADF para série do açúcar

Null Hypothesis: LN_ACUCAR has a unit root Exogenous: None Lag Length: 1 (Automatic - based on SIC, maxlag=14)				
			t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic			-0.101387	0.6475
Test critical values:	1% level		-2.577454	
	5% level		-1.942545	
	10% level		-1.615565	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LN_ACUCAR) Method: Least Squares Date: 01/14/19 Time: 13:25 Sample (adjusted): 3 188 Included observations: 186 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LN_ACUCAR(-1)	-0.000117	0.001149	-0.101387	0.9194
D(LN_ACUCAR(-1))	0.359043	0.068404	5.248841	0.0000
R-squared	0.130138	Mean dependent var		0.000681
Adjusted R-squared	0.125411	S.D. dependent var		0.065340
S.E. of regression	0.061106	Akaike info criterion		-2.741729
Sum squared resid	0.687038	Schwarz criterion		-2.707044
Log likelihood	256.9808	Hannan-Quinn criter.		-2.727673
Durbin-Watson stat	1.945806			

Tabela 41 – Teste ADF com intercepto para série do açúcar

Null Hypothesis: LN_ACUCAR has a unit root Exogenous: Constant Lag Length: 1 (Automatic - based on SIC, maxlag=14)				
			t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic			-3.126809	0.0263
Test critical values:	1% level		-3.465585	
	5% level		-2.876927	
	10% level		-2.575051	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LN_ACUCAR) Method: Least Squares Date: 01/14/19 Time: 13:26 Sample (adjusted): 3 188 Included observations: 186 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LN_ACUCAR(-1)	-0.064519	0.020634	-3.126809	0.0021
D(LN_ACUCAR(-1))	0.388338	0.067484	5.754526	0.0000
C	0.251481	0.080454	3.125793	0.0021
R-squared	0.174227	Mean dependent var		0.000681
Adjusted R-squared	0.165203	S.D. dependent var		0.065340
S.E. of regression	0.059699	Akaike info criterion		-2.782991
Sum squared resid	0.652216	Schwarz criterion		-2.730963
Log likelihood	261.8182	Hannan-Quinn criter.		-2.761907
F-statistic	19.30533	Durbin-Watson stat		1.976040
Prob(F-statistic)	0.000000			

Tabela 42 – Teste ADF com intercepto e tendência para série do açúcar

Null Hypothesis: LN_ACUCAR has a unit root Exogenous: Constant, Linear Trend Lag Length: 1 (Automatic - based on SIC, maxlag=14)				
			t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic			-3.372453	0.0583
Test critical values:	1% level		-4.008154	
	5% level		-3.434167	
	10% level		-3.141001	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LN_ACUCAR) Method: Least Squares Date: 01/14/19 Time: 13:48 Sample (adjusted): 3 188 Included observations: 186 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LN_ACUCAR(-1)	-0.077138	0.022873	-3.372453	0.0009
D(LN_ACUCAR(-1))	0.398576	0.067852	5.874150	0.0000
C	0.289754	0.085792	3.377401	0.0009
@TREND("1")	0.000115	9.05E-05	1.269398	0.2059
R-squared	0.181474	Mean dependent var		0.000681
Adjusted R-squared	0.167982	S.D. dependent var		0.065340
S.E. of regression	0.059600	Akaike info criterion		-2.781053
Sum squared resid	0.646492	Schwarz criterion		-2.711682
Log likelihood	262.6380	Hannan-Quinn criter.		-2.752942
F-statistic	13.45034	Durbin-Watson stat		1.988719
Prob(F-statistic)	0.000000			

Tabela 43 – Teste Ng-Perron com intercepto para série do açúcar

Null Hypothesis: LN_ACUCAR has a unit root Exogenous: Constant Lag length: 1 (Spectral GLS-detrended AR based on SIC, maxlag=14) Sample (adjusted): 1 188 Included observations: 188 after adjustments				
	MZa	MZt	MSB	MPT
Nq-Perron test statistics	-9.64205	-2.17944	0.22603	2.60615
Asymptotic critical values*:	1%	-13.8000	-2.58000	0.17400
	5%	-8.10000	-1.98000	0.23300
	10%	-5.70000	-1.62000	0.27500
*Nq-Perron (2001, Table 1)				
HAC corrected variance (Spectral GLS-detrended AR)				0.009233

Tabela 44 – Teste Ng-Perron com intercepto e tendência para série do açúcar

Null Hypothesis: LN_ACUCAR has a unit root Exogenous: Constant, Linear Trend Lag length: 1 (Spectral GLS-detrended AR based on SIC, maxlag=14) Sample (adjusted): 1 188 Included observations: 188 after adjustments				
	MZa	MZt	MSB	MPT
Nq-Perron test statistics	-22.0692	-3.28523	0.14886	4.35471
Asymptotic critical values*:	1%	-23.8000	-3.42000	0.14300
	5%	-17.3000	-2.91000	0.16800
	10%	-14.2000	-2.62000	0.18500
*Nq-Perron (2001, Table 1)				
HAC corrected variance (Spectral GLS-detrended AR)				0.009613

Tabela 45 – Teste KPSS com intercepto e tendência para série do açúcar

Null Hypothesis: LN_ACUCAR is stationary Exogenous: Constant, Linear Trend Bandwidth: 10 (Newey-West automatic) using Bartlett kernel				
				LM-Stat.
Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin test statistic				0.068867
Asymptotic critical values*:				1% level 0.216000
				5% level 0.146000
				10% level 0.119000
*Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (1992, Table 1)				
Residual variance (no correction)				0.037566
HAC corrected variance (Bartlett kernel)				0.279574
KPSS Test Equation Dependent Variable: LN_ACUCAR Method: Least Squares Date: 01/14/19 Time: 18:37 Sample: 1 188 Included observations: 188				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	3.735686	0.028310	131.9568	0.0000
@TREND("1")	0.001673	0.000262	6.388057	0.0000
R-squared	0.179920	Mean dependent var	3.892094	
Adjusted R-squared	0.175511	S.D. dependent var	0.214598	
S.E. of regression	0.194858	Akaike info criterion	-0.422512	
Sum squared resid	7.062336	Schwarz criterion	-0.388082	
Log likelihood	41.71617	Hannan-Quinn criter.	-0.408563	
F-statistic	40.80727	Durbin-Watson stat	0.113079	
Prob(F-statistic)	0.000000			

Tabela 46 – Teste ADF para série do etanol

Null Hypothesis: LN_ETANOL has a unit root Exogenous: None Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=14)				
				t-Statistic Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic				-0.250003 0.5950
Test critical values:				1% level -2.577387
				5% level -1.942536
				10% level -1.615571
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LN_ETANOL) Method: Least Squares Date: 01/14/19 Time: 13:28 Sample (adjusted): 2 188 Included observations: 187 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LN_ETANOL(-1)	-0.000978	0.003910	-0.250003	0.8029
R-squared	0.000268	Mean dependent var	0.000441	
Adjusted R-squared	0.000268	S.D. dependent var	0.053682	
S.E. of regression	0.053675	Akaike info criterion	-3.006421	
Sum squared resid	0.535859	Schwarz criterion	-2.989143	
Log likelihood	282.1004	Hannan-Quinn criter.	-2.999420	
Durbin-Watson stat	1.674903			

Tabela 47 – Teste ADF com intercepto para série do etanol

Null Hypothesis: LN_ETANOL has a unit root Exogenous: Constant Lag Length: 1 (Automatic - based on SIC, maxlag=14)				
			t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic			-4.627655	0.0002
Test critical values:	1% level		-3.465585	
	5% level		-2.876927	
	10% level		-2.575051	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LN_ETANOL) Method: Least Squares Date: 01/14/19 Time: 13:29 Sample (adjusted): 3 188 Included observations: 186 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LN_ETANOL(-1)	-0.176259	0.038088	-4.627655	0.0000
D(LN_ETANOL(-1))	0.249486	0.071640	3.482510	0.0006
C	0.176521	0.038222	4.618350	0.0000
R-squared	0.128031	Mean dependent var		0.000525
Adjusted R-squared	0.118501	S.D. dependent var		0.053814
S.E. of regression	0.050525	Akaike info criterion		-3.116690
Sum squared resid	0.467162	Schwarz criterion		-3.064662
Log likelihood	292.8522	Hannan-Quinn criter.		-3.095606
F-statistic	13.43489	Durbin-Watson stat		2.059621
Prob(F-statistic)	0.000004			

Tabela 48 – Teste ADF com intercepto e tendência para série do etanol

Null Hypothesis: LN_ETANOL has a unit root Exogenous: Constant, Linear Trend Lag Length: 1 (Automatic - based on SIC, maxlag=14)				
			t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic			-4.693458	0.0010
Test critical values:	1% level		-4.008154	
	5% level		-3.434167	
	10% level		-3.141001	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LN_ETANOL) Method: Least Squares Date: 01/14/19 Time: 13:32 Sample (adjusted): 3 188 Included observations: 186 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LN_ETANOL(-1)	-0.181964	0.038770	-4.693458	0.0000
D(LN_ETANOL(-1))	0.252418	0.071799	3.515644	0.0006
C	0.187593	0.040628	4.617327	0.0000
@TREND("1")	-5.69E-05	7.02E-05	-0.809691	0.4192
R-squared	0.131160	Mean dependent var		0.000525
Adjusted R-squared	0.116839	S.D. dependent var		0.053814
S.E. of regression	0.050573	Akaike info criterion		-3.109533
Sum squared resid	0.465485	Schwarz criterion		-3.040162
Log likelihood	293.1866	Hannan-Quinn criter.		-3.081421
F-statistic	9.158272	Durbin-Watson stat		2.062290
Prob(F-statistic)	0.000011			

Tabela 49 – Teste Ng-Perron para série do etanol

Null Hypothesis: LN_ETANOL has a unit root Exogenous: Constant Lag length: 1 (Spectral GLS-detrended AR based on SIC, maxlag=14) Sample (adjusted): 1 188 Included observations: 188 after adjustments				
	MZa	MZt	MSB	MPT
Nq-Perron test statistics	-39.7178	-4.44119	0.11182	0.65991
Asymptotic critical values*: 1%	-13.8000	-2.58000	0.17400	1.78000
5%	-8.10000	-1.98000	0.23300	3.17000
10%	-5.70000	-1.62000	0.27500	4.45000
*Nq-Perron (2001, Table 1)				
HAC corrected variance (Spectral GLS-detrended AR)			0.004449	

Tabela 50 – Teste Ng-Perron com tendência para série do etanol

Null Hypothesis: LN_ETANOL has a unit root Exogenous: Constant, Linear Trend Lag length: 1 (Spectral GLS-detrended AR based on SIC, maxlag=14) Sample (adjusted): 1 188 Included observations: 188 after adjustments				
	MZa	MZt	MSB	MPT
Nq-Perron test statistics	-39.8841	-4.45802	0.11177	2.32618
Asymptotic critical values*: 1%	-23.8000	-3.42000	0.14300	4.03000
5%	-17.3000	-2.91000	0.16800	5.48000
10%	-14.2000	-2.62000	0.18500	6.67000
*Nq-Perron (2001, Table 1)				
HAC corrected variance (Spectral GLS-detrended AR)			0.004446	

Tabela 51 – Teste ADF para série da gasolina

Null Hypothesis: LN_GAS has a unit root				
Exogenous: None				
Lag Length: 1 (Automatic - based on SIC, maxlag=14)				
			t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic			-0.438814	0.5233
Test critical values:				
	1% level		-2.577454	
	5% level		-1.942545	
	10% level		-1.615565	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(LN_GAS)				
Method: Least Squares				
Date: 01/14/19 Time: 13:35				
Sample (adjusted): 3 188				
Included observations: 186 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LN_GAS(-1)	-0.000373	0.000849	-0.438814	0.6613
D(LN_GAS(-1))	0.173368	0.072689	2.385062	0.0181
R-squared	0.030417	Mean dependent var		-0.000529
Adjusted R-squared	0.025147	S.D. dependent var		0.016813
S.E. of regression	0.016601	Akaike info criterion		-5.348070
Sum squared resid	0.050706	Schwarz criterion		-5.313385
Log likelihood	499.3705	Hannan-Quinn criter.		-5.334014
Durbin-Watson stat	1.988638			

Tabela 52 – Teste ADF com intercepto para série da gasolina

Null Hypothesis: LN_GAS has a unit root Exogenous: Constant Lag Length: 1 (Automatic - based on SIC, maxlag=14)				
			t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic			-1.540668	0.5109
Test critical values:	1% level		-3.465585	
	5% level		-2.876927	
	10% level		-2.575051	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LN_GAS) Method: Least Squares Date: 01/14/19 Time: 13:36 Sample (adjusted): 3 188 Included observations: 186 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LN_GAS(-1)	-0.019839	0.012877	-1.540668	0.1251
D(LN_GAS(-1))	0.182316	0.072675	2.508645	0.0130
C	0.027976	0.018466	1.514997	0.1315
R-squared	0.042427	Mean dependent var		-0.000529
Adjusted R-squared	0.031961	S.D. dependent var		0.016813
S.E. of regression	0.016542	Akaike info criterion		-5.349782
Sum squared resid	0.050078	Schwarz criterion		-5.297754
Log likelihood	500.5297	Hannan-Quinn criter.		-5.328698
F-statistic	4.054040	Durbin-Watson stat		1.993363
Prob(F-statistic)	0.018934			

Tabela 53 – Teste ADF com intercepto e tendência para série da gasolina

Null Hypothesis: LN_GAS has a unit root Exogenous: Constant, Linear Trend Lag Length: 1 (Automatic - based on SIC, maxlag=14)				
			t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic			-2.735260	0.2238
Test critical values:	1% level		-4.008154	
	5% level		-3.434167	
	10% level		-3.141001	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LN_GAS) Method: Least Squares Date: 01/14/19 Time: 13:36 Sample (adjusted): 3 188 Included observations: 186 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LN_GAS(-1)	-0.076048	0.027803	-2.735260	0.0068
D(LN_GAS(-1))	0.216450	0.073411	2.948459	0.0036
C	0.118900	0.043953	2.705171	0.0075
@TREND("1")	-0.000111	4.88E-05	-2.274199	0.0241
R-squared	0.068887	Mean dependent var		-0.000529
Adjusted R-squared	0.053539	S.D. dependent var		0.016813
S.E. of regression	0.016357	Akaike info criterion		-5.367050
Sum squared resid	0.048694	Schwarz criterion		-5.297679
Log likelihood	503.1357	Hannan-Quinn criter.		-5.338939
F-statistic	4.488303	Durbin-Watson stat		2.010383
Prob(F-statistic)	0.004582			

Tabela 54 – Teste Ng-Perron para série da gasolina

Null Hypothesis: LN_GAS has a unit root Exogenous: Constant Lag length: 1 (Spectral GLS-detrended AR based on SIC, maxlag=14) Sample (adjusted): 1 188 Included observations: 188 after adjustments				
	MZa	MZt	MSB	MPT
Ng-Perron test statistics	-2.59414	-1.07863	0.41580	9.18870
Asymptotic critical values*: 1%	-13.8000	-2.58000	0.17400	1.78000
5%	-8.10000	-1.98000	0.23300	3.17000
10%	-5.70000	-1.62000	0.27500	4.45000
*Ng-Perron (2001, Table 1)				
HAC corrected variance (Spectral GLS-detrended AR)				
				0.000405

Tabela 55 – Teste Ng-Perron com tendência para série da gasolina

Null Hypothesis: LN_GAS has a unit root Exogenous: Constant, Linear Trend Lag length: 1 (Spectral GLS-detrended AR based on SIC, maxlag=14) Sample (adjusted): 1 188 Included observations: 188 after adjustments				
	MZa	MZt	MSB	MPT
Ng-Perron test statistics	-13.4028	-2.48650	0.18552	7.38910
Asymptotic critical values*: 1%	-23.8000	-3.42000	0.14300	4.03000
5%	-17.3000	-2.91000	0.16800	5.48000
10%	-14.2000	-2.62000	0.18500	6.67000
*Ng-Perron (2001, Table 1)				
HAC corrected variance (Spectral GLS-detrended AR)				
				0.000418

Tabela 56 – Teste ADF para série da gasolina diferenciada

Null Hypothesis: D(LN_GAS_) has a unit root				
Exogenous: None				
Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=14)				
t-Statistic				Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic				-11.38867
Test critical values:				0.0000
1% level				-2.577454
5% level				-1.942545
10% level				-1.615565
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(LN_GAS_,2)				
Method: Least Squares				
Date: 01/14/19 Time: 09:43				
Sample (adjusted): 3 188				
Included observations: 186 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(LN_GAS_(-1))	-0.825524	0.072486	-11.38867	0.0000
R-squared	0.412117	Mean dependent var		0.000142
Adjusted R-squared	0.412117	S.D. dependent var		0.021604
S.E. of regression	0.016564	Akaike info criterion		-5.357777
Sum squared resid	0.050759	Schwarz criterion		-5.340434
Log likelihood	499.2733	Hannan-Quinn criter.		-5.350749
Durbin-Watson stat	1.989577			

Tabela 57 – Teste ADF para série da gasolina diferenciada com intercepto

Null Hypothesis: D(LN_GAS_) has a unit root Exogenous: Constant Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=14)				
			t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic			-11.36583	0.0000
Test critical values:	1% level		-3.465585	
	5% level		-2.876927	
	10% level		-2.575051	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LN_GAS_2) Method: Least Squares Date: 01/14/19 Time: 09:43 Sample (adjusted): 3 188 Included observations: 186 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(LN_GAS_(-1))	-0.826509	0.072719	-11.36583	0.0000
C	-0.000413	0.001218	-0.338548	0.7353
R-squared	0.412483	Mean dependent var		0.000142
Adjusted R-squared	0.409290	S.D. dependent var		0.021604
S.E. of regression	0.016604	Akaike info criterion		-5.347647
Sum squared resid	0.050728	Schwarz criterion		-5.312962
Log likelihood	499.3312	Hannan-Quinn criter.		-5.333591
F-statistic	129.1822	Durbin-Watson stat		1.988788
Prob(F-statistic)	0.000000			

Tabela 58 - Teste ADF para série da gasolina diferenciada com intercepto e tendência

Null Hypothesis: D(LN_GAS_) has a unit root Exogenous: Constant, Linear Trend Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=14)				
			t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic			-11.34337	0.0000
Test critical values:	1% level		-4.008154	
	5% level		-3.434167	
	10% level		-3.141001	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LN_GAS_2) Method: Least Squares Date: 01/14/19 Time: 09:44 Sample (adjusted): 3 188 Included observations: 186 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(LN_GAS_(-1))	-0.827141	0.072918	-11.34337	0.0000
C	-0.001139	0.002473	-0.460486	0.6457
@TREND("1")	7.68E-06	2.27E-05	0.337740	0.7359
R-squared	0.412849	Mean dependent var		0.000142
Adjusted R-squared	0.406432	S.D. dependent var		0.021604
S.E. of regression	0.016644	Akaike info criterion		-5.337517
Sum squared resid	0.050696	Schwarz criterion		-5.285489
Log likelihood	499.3891	Hannan-Quinn criter.		-5.316434
F-statistic	64.33713	Durbin-Watson stat		1.988731
Prob(F-statistic)	0.000000			

Tabela 59 – Teste Ng-Perron para gasolina diferenciada com intercepto

Null Hypothesis: D(LN_GAS_) has a unit root Exogenous: Constant Lag length: 0 (Spectral GLS-detrended AR based on SIC, maxlag=14) Sample (adjusted): 2 188 Included observations: 187 after adjustments				
	MZa	MZt	MSB	MPT
Ng-Perron test statistics	-84.3305	-6.46171	0.07662	0.35566
Asymptotic critical values*:				
1%	-13.8000	-2.58000	0.17400	1.78000
5%	-8.10000	-1.98000	0.23300	3.17000
10%	-5.70000	-1.62000	0.27500	4.45000
*Ng-Perron (2001, Table 1)				
HAC corrected variance (Spectral GLS-detrended AR)				0.000304

Tabela 60 – Teste Ng-Perron para gasolina diferenciada com intercepto e constante

Null Hypothesis: D(LN_GAS_) has a unit root Exogenous: Constant, Linear Trend Lag length: 0 (Spectral GLS-detrended AR based on SIC, maxlag=14) Sample (adjusted): 2 188 Included observations: 187 after adjustments				
	MZa	MZt	MSB	MPT
Ng-Perron test statistics	-88.5368	-6.64789	0.07509	1.05162
Asymptotic critical values*:				
1%	-23.8000	-3.42000	0.14300	4.03000
5%	-17.3000	-2.91000	0.16800	5.48000
10%	-14.2000	-2.62000	0.18500	6.67000
*Ng-Perron (2001, Table 1)				
HAC corrected variance (Spectral GLS-detrended AR)				0.000283

Tabela 61 – Estimativa dos parâmetros da regressão para série do etanol

Dependent Variable: Y Method: Least Squares (Gauss-Newton / Marquardt steps) Date: 01/07/19 Time: 09:42 Sample: 1 187 Included observations: 187 Y = C(1) + C(2)*X				
	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	0.141001	0.037861	3.724214	0.0003
C(2)	-0.140729	0.037715	-3.731366	0.0003
R-squared	0.069992	Mean dependent var		0.000441
Adjusted R-squared	0.064965	S.D. dependent var		0.053682
S.E. of regression	0.051909	Akaike info criterion		-3.068021
Sum squared resid	0.498486	Schwarz criterion		-3.033463
Log likelihood	288.8599	Hannan-Quinn criter.		-3.054018
F-statistic	13.92309	Durbin-Watson stat		1.570015
Prob(F-statistic)	0.000253			

Tabela 62 – Estimativa dos parâmetros da regressão para série do açúcar

Dependent Variable: Y Method: Least Squares (Gauss-Newton / Marquardt steps) Date: 01/07/19 Time: 09:42 Sample: 1 187 Included observations: 187 $Y = C(1) + C(2)*X$				
	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	0.141001	0.037861	3.724214	0.0003
C(2)	-0.140729	0.037715	-3.731366	0.0003
R-squared	0.069992	Mean dependent var		0.000441
Adjusted R-squared	0.064965	S.D. dependent var		0.053682
S.E. of regression	0.051909	Akaike info criterion		-3.068021
Sum squared resid	0.498486	Schwarz criterion		-3.033463
Log likelihood	288.8599	Hannan-Quinn criter.		-3.054018
F-statistic	13.92309	Durbin-Watson stat		1.570015
Prob(F-statistic)	0.000253			

Tabela 63 – Estimativa do prêmio de risco para série do açúcar

Dependent Variable: LOG_RETORNO_ACUCAR Method: Least Squares (Gauss-Newton / Marquardt steps) Date: 01/08/19 Time: 09:32 Sample (adjusted): 11 196 Included observations: 186 after adjustments $LOG_RETORNO_ACUCAR = C(1) + C(2)*LOG_RETORNO_CARTEIR$ A				
	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	-0.005667	0.004887	-1.159576	0.2477
C(2)	0.041922	0.070469	0.594896	0.5526
R-squared	0.001920	Mean dependent var		-0.005322
Adjusted R-squared	-0.003505	S.D. dependent var		0.066067
S.E. of regression	0.066182	Akaike info criterion		-2.582110
Sum squared resid	0.805940	Schwarz criterion		-2.547424
Log likelihood	242.1362	Hannan-Quinn criter.		-2.568054
F-statistic	0.353902	Durbin-Watson stat		1.263561
Prob(F-statistic)	0.552644			

Tabela 64 – Estimativa do prêmio de risco para série do etanol

Dependent Variable: LOG_RETORNO_ETANOL Method: Least Squares (Gauss-Newton / Marquardt steps) Date: 01/08/19 Time: 09:32 Sample (adjusted): 2 197 Included observations: 196 after adjustments $LOG_RETORNO_ETANOL = C(1) + C(2)*LOG_RETORNO_CARTEIR$ A				
	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	8.95E-05	0.006709	0.013344	0.9894
C(2)	0.022027	0.095610	0.230381	0.8180
R-squared	0.000274	Mean dependent var		0.000260
Adjusted R-squared	-0.004880	S.D. dependent var		0.093131
S.E. of regression	0.093358	Akaike info criterion		-1.894603
Sum squared resid	1.690841	Schwarz criterion		-1.861153
Log likelihood	187.6711	Hannan-Quinn criter.		-1.881061
F-statistic	0.053075	Durbin-Watson stat		1.246969
Prob(F-statistic)	0.818039			

Tabela 65 – Escolha da defasagem no modelo VAR

VAR Lag Order Selection Criteria						
Endogenous variables: D_LN_GAS LN_ACUCAR LN_ETANOL						
Exogenous variables: C ENTRESSAFRA						
Date: 01/14/19 Time: 11:22						
Sample: 1 188						
Included observations: 179						
Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	704.7875	NA	8.16e-08	-7.807681	-7.700842	-7.764359
1	1101.527	771.3147	1.07e-09	-12.13997	-11.87287*	-12.03166*
2	1114.225	24.26112*	1.03e-09*	-12.18129*	-11.75393	-12.00799
3	1121.486	13.63032	1.05e-09	-12.16186	-11.57424	-11.92358
4	1125.548	7.488014	1.11e-09	-12.10668	-11.35880	-11.80342
5	1128.023	4.480563	1.19e-09	-12.03378	-11.12564	-11.66554
6	1136.348	14.78863	1.20e-09	-12.02623	-10.95784	-11.59301
7	1141.273	8.584163	1.26e-09	-11.98070	-10.75204	-11.48249
8	1145.539	7.293322	1.33e-09	-11.92781	-10.53889	-11.36462
* indicates lag order selected by the criterion						
LR: sequential modified LR test statistic (each test at 5% level)						
FPE: Final prediction error						
AIC: Akaike information criterion						
SC: Schwarz information criterion						
HQ: Hannan-Quinn information criterion						

Tabela 66 – Estimativa do modelo VAR

Vector Autoregression Estimates				
Date: 01/14/19 Time: 11:10				
Sample (adjusted): 3 188				
Included observations: 186 after adjustments				
Standard errors in () & t-statistics in []				
	D_LN_GAS	LN_ACUCAR	LN_ETANOL	
D_LN_GAS(-1)	0.195638 (0.07115) [2.74981]	0.409553 (0.28337) [1.44528]	0.494134 (0.21978) [2.24830]	
LN_ACUCAR(-1)	0.010139 (0.00609) [1.66550]	0.956990 (0.02425) [39.4697]	0.032385 (0.01881) [1.72211]	
LN_ETANOL(-1)	-0.056069 (0.01322) [-4.24281]	-0.050079 (0.05264) [-0.95145]	0.790488 (0.04082) [19.3637]	
ENTRESSAFRA	0.003303 (0.00258) [1.28202]	0.025848 (0.01026) [2.51928]	0.029350 (0.00796) [3.68821]	
C	0.015050 (0.02150) [0.70010]	0.209974 (0.08562) [2.45230]	0.074421 (0.06641) [1.12065]	
R-squared	0.119179	0.914128	0.768099	
Adj. R-squared	0.099713	0.912231	0.762974	
Sum sq. resids	0.046064	0.730768	0.439586	
S.E. equation	0.015953	0.063540	0.049281	
F-statistic	6.122508	481.7001	149.8762	
Log likelihood	508.2996	251.2422	298.5107	
Akaike AIC	-5.411824	-2.647766	-3.156029	
Schwarz SC	-5.325110	-2.561052	-3.069315	
Mean dependent	-0.000529	3.894453	0.999454	
S.D. dependent	0.016813	0.214476	0.101224	
Determinant resid covariance (dof adj.)		1.46E-09		
Determinant resid covariance		1.35E-09		
Log likelihood		1107.730		
Akaike information criterion		-11.74978		
Schwarz criterion		-11.48964		
Number of coefficients		15		