

**MODELOS DE AGENTES COM COMPORTAMENTOS HETEROGÊNEOS PARA
REPRESENTAR A FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DO PREÇO INTERNACIONAL DO
PETRÓLEO**

Renan Pinheiro Silvério

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Planejamento Energético,
COPPE, da Universidade Federal do Rio de
Janeiro, como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Doutor em Planejamento
Energético.

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

MODELOS DE AGENTES COM COMPORTAMENTOS HETEROGÊNEOS PARA
REPRESENTAR A FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DO PREÇO INTERNACIONAL DO
PETRÓLEO

Renan Pinheiro Silvério

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA
DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM
PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

Prof. Alexandre Salem Szklo, DSc.

Prof. Roberto Schaeffer, Ph.D.

Prof. André Frossard Pereira de Lucena, DSc.

Prof. Helder Queiroz Pinto Jr., Ph.D.

Prof. José Gustavo Féres, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2017

Silvério, Renan Pinheiro

Modelos de agentes com comportamentos heterogêneos para representar a formação e evolução do preço internacional do petróleo/ Renan Pinheiro Silvério. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIV, 154 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 134-141.

1. Preços de Energia. 2. Preços de Petróleo. 3. Modelos de Agentes Heterogêneos. I. Szklo, Alexandre Salem. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Agradecimentos

Gostaria de registrar os agradecimentos ao meu orientador Alexandre Szklo, pelo constante suporte e incentivo ao longo desses anos de estudo. Suas contribuições e intervenções ao longo de todas as etapas da elaboração desta tese foram extremamente valiosas.

Também deixo o meu agradecimento aos membros da Banca Examinadora, que gentilmente cederam o seu tempo para ler este trabalho e compartilharam o seu conhecimento e as suas impressões durante a defesa.

Agradeço à equipe do PPE, em especial à Sandra e ao Paulo, pela constante disposição em ajudar.

Agradeço à Petrobras, como instituição, pela oportunidade de continuar aprofundando os meus estudos. Para além do plano institucional, agradeço a todos os meus colegas e amigos da equipe de Estudos e Mercados e Negócios da Estratégia, com quem tive a oportunidade de aprender e me aprimorar ao longo dos últimos anos. À Renata, por ter me dado a missão de estudar o mercado de petróleo lá pelos idos de 2008. E ao Rafael, por ter me apresentado o pacote estatístico R, ferramenta por trás de todos os cálculos apresentados nesta Tese.

Agradeço à minha família, pelo incentivo e pelo amor incondicional ao longo de toda a minha vida de estudos. Nada disso seria possível sem vocês.

Por último, agradeço à minha esposa Mariana, por tudo.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

MODELOS DE AGENTES COM COMPORTAMENTOS HETEROGÊNEOS PARA
REPRESENTAR A FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DO PREÇO INTERNACIONAL DO
PETRÓLEO

Renan Pinheiro Silvério

Dezembro/2017

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Programa: Planejamento Energético

A depender da abordagem utilizada, a literatura da última década a respeito do efeito da especulação financeira sobre os preços do petróleo apresenta conclusões distintas. Argumentamos que tal dificuldade deriva do caráter comportamental da especulação financeira, difícil de capturar empiricamente. Assim, a presente Tese propõe o uso de modelos de agentes com comportamentos heterogêneos para a representação do mercado de petróleo. É proposta uma abordagem exploratória onde são testadas seis especificações diferentes para modelos compostos por agentes com dois tipos comportamento, um “fundamentalista” e outro “grafista”. Os resultados mostram que todos os modelos testados possuem desempenho superior ao passeio aleatório para explicar os movimentos recentes do mercado de petróleo. Foi possível observar que os modelos que possuem um mecanismo de formação de expectativas mais sofisticado para os agentes com comportamento fundamentalista apresentaram desempenho superior aos outros. O uso da inferência Bayesiana como método de estimativa dos modelos permitiu identificar que a estimativa dos parâmetros que regem o mecanismo de mudança de comportamento dos agentes apresenta incerteza significativa com os dados utilizados.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements
for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

HETEROGENOUS BEHAVIOUR AGENT MODELS TO REPRESENT THE
FORMATION AND EVOLUTION OF THE INTERNATIONAL OIL PRICE

Renan Pinheiro Silvério

December/2017

Advisor: Alexandre Salem Szklo

Department: Energy Planning

Depending upon the chosen approach, the scientific literature of the last decade on the effects of financial speculation over oil prices has reached divergent conclusions. We argue that this difficulty derives from the behavioural aspect of financial speculation, which is empirically hard to discern. Therefore, this thesis proposes the use of Heterogeneous Agent Models to represent the oil market. It proposes an exploratory approach, in which it tests six different specifications for models comprising agents with two distinct types of behavior, namely “fundamentalists” and “chartists”. Findings show that all the proposed models were able to explain the recent oil market developments better than a random walk model. The models in which fundamentalists have the most sophisticated expectation formation mechanism presented superior performance in comparison to others. Moreover, the use of Bayesian inference as an estimation method allowed us to identify that the parameter estimates concerning the behaviour switching mechanism face huge uncertainties associated with the provided data set.

Sumário

| | |
|---|----|
| 1 - Introdução..... | 1 |
| 2 - Financeirização do mercado de petróleo – O petróleo é um ativo financeiro? | 9 |
| 2.1 - O desenvolvimento da esfera financeira no mercado de Petróleo..... | 9 |
| 2.2 - A relação entre a especulação financeira e os preços de petróleo..... | 15 |
| 2.3 - Influência do setor financeiro sobre o preço do petróleo – indo além da especulação financeira..... | 19 |
| 3 - Determinação do preço de ativos financeiros – revisão teórica..... | 23 |
| 3.1 - A abordagem moderna em finanças – fundamentos da hipótese dos mercados eficientes..... | 23 |
| 3.2 - As críticas à abordagem moderna das finanças..... | 27 |
| 3.2.1 - A crítica empírica à hipótese dos mercados eficientes | 27 |
| 3.2.2 - A crítica ao homo economicus e ao agente representativo | 30 |
| 3.3 - Modelos de Agentes Heterogêneos como ferramenta de modelagem | 34 |
| 3.3.1 - O que define um Modelo de Agentes Heterogêneos? | 34 |
| 3.3.2 - Estratégias de modelagem do comportamento dos diferentes tipos de agentes..... | 35 |
| 3.3.3 - Como e porque os agentes mudam de comportamento ao longo do tempo..... | 40 |
| 3.3.4 - O mecanismo de precificação dos ativos | 43 |
| 3.3.5 - Estimação empírica dos modelos de agentes heterogêneos | 44 |
| 4 - Propostas de modelagem para o mercado de petróleo usando modelos de agentes heterogêneos..... | 50 |
| 4.1 - As bases de um modelo de agentes heterogêneos para o mercado de petróleo..... | 50 |

| | |
|---|----|
| 4.2 - Descrevendo o comportamento dos agentes “Fundamentalistas” e “Grafistas” e o Mecanismo de mudança de comportamento..... | 53 |
| 4.2.1 - Comportamento dos agentes “grafistas” | 53 |
| 4.2.2 - Comportamento dos agentes “fundamentalistas” | 55 |
| 4.2.3 - Mecanismos de Mudança de Comportamento | 60 |
| 4.3 - O descritivo dos modelos a serem estimados | 67 |
| 4.3.1 - Modelo 1..... | 68 |
| 4.3.2 - Modelo 2..... | 69 |
| 4.3.3 - Modelo 3..... | 69 |
| 4.3.4 - Modelo 4..... | 70 |
| 4.3.5 - Modelo 5..... | 70 |
| 4.3.6 - Modelo 6..... | 71 |
| 4.3.1 - Modelo 0..... | 72 |
| 4.4 - O processo de estimação | 72 |
| 4.4.1 - Breve revisão do processo de Inferência Bayesiana..... | 72 |
| 4.4.1.1 - Estimação de um modelo..... | 72 |
| 4.4.1.2 - Diagnóstico de um modelo..... | 76 |
| 4.4.2 - Procedimento de estimação dos modelos..... | 80 |
| 4.4.3 - Descrição das bases de dados | 84 |
| 5 - Análise dos resultados e discussão | 86 |
| 5.1 - Diagnóstico dos Modelos | 86 |
| 5.1.1 - Estatísticas descritivas dos dados | 86 |
| 5.1.2 - Resultados da estimativa das séries de valores fundamentalistas | 87 |

| | |
|---|-----|
| 5.1.3 - Estatísticas de convergência dos Modelos 0 a 6..... | 91 |
| 5.1.4 - Estatísticas de ajuste dos Modelos 0 a 6 | 94 |
| 5.2 - Apresentação dos resultados e discussão. | 96 |
| 5.2.1 - Análise das Estatísticas dos Parâmetros | 96 |
| 5.2.2 - Análise da evolução da participação dos agentes fundamentalistas e grafistas..... | 104 |
| 5.2.3 - Simulação do comportamento dos modelos para múltiplos períodos dentro da amostra..... | 108 |
| 5.2.3.1 - Simulação para os anos 2008 e 2009 | 109 |
| 5.2.3.1 - Simulação para os anos 2014 a 2015 | 113 |
| 5.2.4 - Discussão dos Resultados..... | 117 |
| 6 - Conclusões..... | 126 |
| Referências Bibliográficas..... | 134 |
| Anexo I – Gráficos Traço e de Autocorrelação dos Modelos estimados | 142 |

Lista de Figuras

| | |
|---|-----|
| Figura 1 Descrição das diferentes abordagens para a modelagem do mercado de petróleo..... | 3 |
| Figura 2 Volume Negociado e Posições em Aberto - Valores Combinados para Brent e WTI..... | 13 |
| Figura 3 Posições Abertos nos contratos futuros do Brent e do WTI x Produção Mundial (jan/2000=100) | 14 |
| Figura 4 Abordagens para o Problema da Especulação Financeira nos preços do Petróleo | 18 |
| Figura 5 Descritivo dos Modelos a partir das escolhas de modelagem realizadas | 68 |
| Figura 6 Representação esquemática do processo de estimação utilizando a abordagem de inferência Bayesiana..... | 76 |
| Figura 7 Evolução no tempo das Séries de Dados..... | 86 |
| Figura 8 Comparativo entre a estimativa do valor fundamentalista baseada na Média-Móvel de 12 meses (linha tracejada) e o preço realizado (linha sólida)..... | 87 |
| Figura 9 Comparativo entre a estimativa do valor fundamentalista baseada no Balanço entre oferta e demanda (linha tracejada) e o preço realizado (linha sólida). | 89 |
| Figura 10 Comparativo entre a estimativa do valor fundamentalista baseada em modelo VAR com cinco variáveis (linha tracejada) e o preço realizado (linha sólida). | 91 |
| Figura 11 Distribuições dos valores dos Parâmetros – Mediana (barra) e Intervalo de Credibilidade (5% – 95%) - Modelos 1 a 6 | 103 |
| Figura 12 Evolução da participação dos agentes com comportamento fundamentalista ao longo do tempo – Modelos 1, 2 e 3. | 105 |
| Figura 13 Evolução da participação dos agentes com comportamento fundamentalista ao longo do tempo – Modelos 4, 5 e 6. | 107 |
| Figura 14 Representação do processo de estimação dos parâmetros | 108 |

| | |
|--|-----|
| Figura 15 Representação do processo de simulação do preço a partir dos parâmetros estimados | 109 |
| Figura 16 Valores simulados (linha tracejada) para o período que compreende os meses de jan/2008 a dez/2009 – Modelos 1 a 3 | 110 |
| Figura 17 Valores simulados (linha tracejada) para a participação dos agentes com comportamento fundamentalista no período que compreende os meses de jan/2008 a dez/2009 – Modelos 1 a 3..... | 111 |
| Figura 18 Valores simulados (linha tracejada) para o período que compreende os meses de jan/2008 a dez/2009 – Modelos 4 a 6 | 112 |
| Figura 19 Valores simulados para a participação dos agentes com comportamento fundamentalista no período que compreende os meses de jan/2008 a dez/2009 – Modelos 4 a 6 | 113 |
| Figura 20 Valores simulados (linha tracejada) para o período que compreende os meses de jan/2014 a dez/2015 – Modelos 1 a 3 | 114 |
| Figura 21 Valores simulados (linha tracejada) para a participação dos agentes com comportamento fundamentalista no período que compreende os meses de jan/2014 a dez/2015 – Modelos 1 a 3..... | 115 |
| Figura 22 Valores simulados (linha tracejada) para o período que compreende os meses de jan/2014 a dez/2015 – Modelos 4 a 6 | 116 |
| Figura 23 Valores simulados (linha tracejada) para a participação dos agentes com comportamento fundamentalista no período que compreende os meses de jan/2014 a dez/2015 – Modelos 1 a 3..... | 117 |
| Figura 24 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros gama e sigma..... | 142 |
| Figura 25 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros alfa, beta1 e beta2..... | 143 |
| Figura 26 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros beta3, gama e teta..... | 144 |
| Figura 27 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para o parâmetro sigma . | 144 |

| | |
|--|-----|
| Figura 28 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros alfa, beta1 e beta2..... | 145 |
| Figura 29 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros beta3, gama e teta..... | 146 |
| Figura 30 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para o parâmetro sigma . | 146 |
| Figura 31 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros alfa, beta1 e beta2..... | 147 |
| Figura 32 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros beta3, gama e teta..... | 148 |
| Figura 33 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para o parâmetro sigma . | 148 |
| Figura 34 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros alfa, beta1 e beta2..... | 149 |
| Figura 35 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros beta3, gama e teta..... | 150 |
| Figura 36 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para o parâmetro sigma . | 150 |
| Figura 37 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros alfa, beta1 e beta2..... | 151 |
| Figura 38 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros beta3, gama e teta..... | 152 |
| Figura 39 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para o parâmetro sigma . | 152 |
| Figura 40 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros alfa, beta1 e beta2..... | 153 |
| Figura 41 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros beta3, gama e teta..... | 154 |
| Figura 42 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para o parâmetro sigma . | 154 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 Especificações dos Modelos de Agentes Heterogêneos a serem estimados | 67 |
| Tabela 2 Estatísticas Descritivas das Séries de Dados | 86 |
| Tabela 3 Estimativa dos Parâmetros do modelo usado na construção do Segundo Caso de formação de Expectativa do Agente Fundamentalista | 88 |
| Tabela 4 Estimativa dos Parâmetros do modelo usado na construção do Terceiro Caso de formação de Expectativa do Agente Fundamentalista | 90 |
| Tabela 5 Estatísticas BMK para as simulações do Modelo 0 | 92 |
| Tabela 6 Estatísticas BMK para as simulações do Modelo 1 | 92 |
| Tabela 7 Estatísticas BMK para as simulações do Modelo 2 | 92 |
| Tabela 8 Estatísticas BMK para as simulações do Modelo 3 | 92 |
| Tabela 9 Estatísticas BMK para as simulações do Modelo 4 | 93 |
| Tabela 10 Estatísticas BMK para as simulações do Modelo 5 | 93 |
| Tabela 11 Estatísticas BMK para as simulações do Modelo 6 | 93 |
| Tabela 12 Z-Scores da estatística de Geweke nos Modelos 0 a 6 | 93 |
| Tabela 13 Comparativo entre os critérios gerais de Ajuste dos Modelos | 95 |
| Tabela 14 Checagens Posteriores Preditivas dos Modelos - Valores em % | 95 |
| Tabela 15 Estimativa dos Parâmetros do Modelo 0 | 97 |
| Tabela 16 Estimativa dos Parâmetros do Modelo 1 | 97 |
| Tabela 17 Estimativa dos Parâmetros do Modelo 2 | 99 |
| Tabela 18 Estimativa dos Parâmetros do Modelo 3 | 99 |
| Tabela 19 Estimativa dos Parâmetros do Modelo 4 | 100 |
| Tabela 20 Estimativa dos Parâmetros do Modelo 5 | 101 |
| Tabela 21 Estimativa dos Parâmetros do Modelo 6 | 102 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 22 Comparativo entre as medianas das Distribuições dos Parâmetros dos Modelos | 103 |
|--|-----|

1 - Introdução

Junto com o gás natural e o carvão, o petróleo está entre as principais fontes de energia da economia mundial. Dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2016) mostram que, em 2014, o petróleo respondeu por 31% da energia primária consumida no mundo. Segundo a mesma fonte, entre os diferentes setores da economia, o transporte de cargas e passageiros é aquele em que os derivados de petróleo apresentam participação mais relevante, representando 92% do consumo de energia final desse setor no mundo, também em 2014.

Rastrear a evolução do preço de uma fonte energética da importância que o petróleo possui para a economia mundial tornou-se objeto de interesse de empresas, analistas de mercado, acadêmicos e organizações governamentais e não-governamentais. Tamanho interesse, contudo, não se traduziu em um consenso a respeito da forma de modelar esse mercado. HUNTINGTON et al. (2013) mostram uma grande diversidade de abordagens para a modelagem do mercado de petróleo. Em sua análise os autores criam uma taxonomia em que separam as abordagens em quatro grandes grupos: modelos estruturais, modelos computacionais, modelos de forma reduzida/financeiros e modelos baseados em inteligência artificial. Colocando a análise dos quatro grupos de modelos em perspectiva histórica, é possível relacionar cada abordagem com a estrutura do mercado de petróleo e com o estado da arte das ferramentas metodológicas disponíveis em cada momento no tempo.

O primeiro grupo comprehende aqueles modelos em que se utilizam ferramentas da teoria microeconómica para representar os diferentes atores do mercado. Utilizando uma estrutura matemática e analítica, esses modelos permitiram o entendimento das interações entre os agentes. Foram muito utilizados entre os anos 1970 e 1990 como instrumento para entender as implicações do comportamento da OPEP sobre o mercado de petróleo. AL-QAHTANI et al. (2008) apresentam uma revisão dessa literatura. Em um contexto onde a definição dos preços era influenciada pelas decisões dos países produtores da OPEP diante das diferentes condições de mercado, fazia sentido as modelagens tentarem representar essa regra de decisão.

O segundo grupo pode ser compreendido como um esforço de detalhamento do primeiro. A ideia de utilizar do crescente poder computacional disponível para representar um mercado de petróleo mais detalhado foi adotada por instituições como o Departamento de Energia dos EUA e a Organização dos Países Exportadores de Petróleo para os seus exercícios de análise de política energética. Como mostram HUNTINGTON et al. (2013) estes são modelos em que são representadas multiplas

regiões, com detalhamento do segmento de refino e dos fluxos de petróleo e derivados no mundo. Os modelos World Logistics Refining and Demand Model (WORLD) utilizado em ORGANIZATION OF PETROLEUM EXPORTING COUNTRIES et al. (2016) e o módulo de petróleo do National Energy Modeling System (NEMS) descrito em GABRIEL et al. (2001) são dois importantes exemplos.

O terceiro grupo, dos modelos em forma reduzida/financeiros, possui como objetivo a realização de projeções de curto prazo a partir de relações mais diretas entre os preços do petróleo e algumas variáveis representativas das condições do mercado de petróleo. A existência de um mercado bem desenvolvido para petróleos marcadores permitia o uso de uma referência única de preços para estudos econométricos. Entre os principais exemplos podemos destacar os modelos VAR estruturais construídos por autores como KILIAN (2006) e FATTOUH e MAHADEVA (2012), por exemplo. Entre os modelos que enfatizam características típicas de séries financeiras dos preços do petróleo, por sua vez, podemos mencionar, por exemplo, o modelo de dois fatores com componentes estocásticos apresentado por SCHWARTZ e SMITH (2000). Segundo HUNTINGTON et al. (2013), esse tipo de modelagem tornou-se mais frequente a partir da década de 2000, um resultado da crescente sofisticação das técnicas econométricas e da, cada vez mais frequente, associação entre o preço do petróleo e o mercado financeiro.

O grupo que contém os modelos baseados em inteligência artificial, o último mencionado, se baseia no uso de técnicas como as redes neurais artificiais, lógica *fuzzy* e algoritmos genéticos para reconhecer padrões na série de preços do petróleo. Como destacam HUNTINGTON et al. (2013), são modelos em que o foco maior é a previsão do preço do petróleo no futuro, sem uma preocupação clara com a descrição da relação entre o preço e variáveis relacionadas aos fundamentos de mercado. CHIROMA et al. (2016) apresentam uma revisão da literatura dedicada a construção de modelos baseados em técnicas de inteligência artificial. Dada a dependência de maior poder computacional para a aplicação destas técnicas, a literatura relacionada também tende a ser mais recente. Conforme os autores colocam, a ideia de usar estas técnicas está na possibilidade de identificar padrões não lineares nas séries de preços de petróleo e utilizá-las para exercícios de previsão. A Figura 1, sumariza os 4 grupos de modelagens identificados por HUNTINGTON et al. (2013).

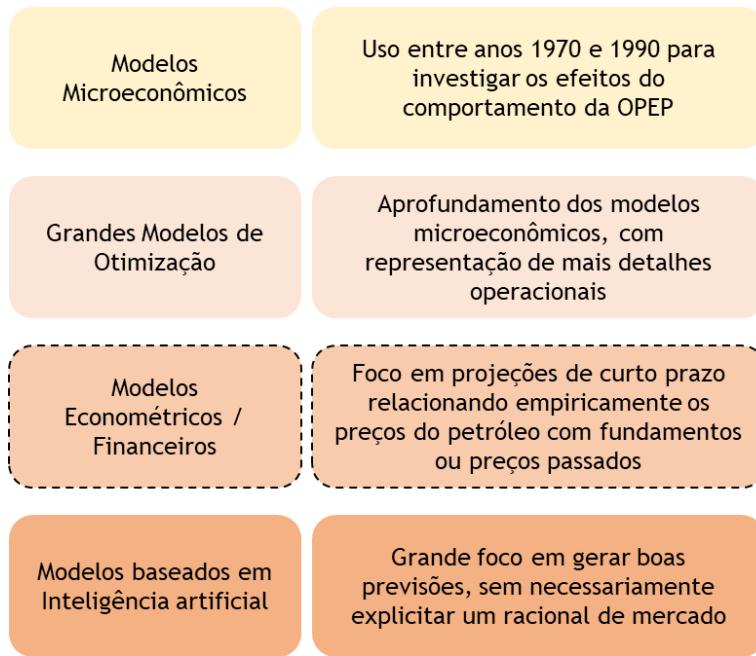


Figura 1 Descrição das diferentes abordagens para a modelagem do mercado de petróleo.

Fonte: Elaboração própria a partir de HUNTINGTON et al. (2013)

FATTOUH (2011) mostra que a arquitetura do mercado de petróleo baseada no uso dos petróleos marcadores Brent e WTI como referência para a precificação, que se formou no final dos anos 1980, permanece em vigor até o momento atual. Do ponto de vista da relação de forças entre os agentes, também é possível argumentar a existência de uma relativa estabilidade nas relações geopolíticas entre os *players* mais relevantes do mercado de petróleo. Embora dados do BP Statistical Review of World Energy 2017 (BP, 2017) mostrem um gradativo aumento da participação asiática na demanda por petróleo e um incremento significativo da produção de petróleo em países como os EUA, o Brasil e o Canadá, os principais elementos da estrutura de mercado existente nos anos 1980, a predominância da OPEP na produção e a predominância dos EUA e Europa na demanda, ainda permanecem.

Como é possível depreender da análise de FATTOUH (2011) e de estudos como o de SILVERIO e SZKLO (2012), a característica que diferencia o atual momento do mercado de petróleo daquele que era observado no final dos anos 1980 é o papel do setor financeiro no processo de formação de preços. Ao longo dos últimos 25 anos, com especial ênfase nos anos posteriores à década de 2000, houve um significativo desenvolvimento dos mercados financeiros para a transação de derivativos que utilizam os óleos marcadores Brent e WTI como referência. Olhando especificamente para os mercados futuros, dados (BLOOMBERG, 2017a) mostram um incremento de 303% no volume de posições em aberto nos contratos futuros do WTI e de 791% no volume de

posições em aberto nos contratos futuros atrelados ao Brent entre janeiro de 2000 e dezembro de 2016.

Entre os marcadores Brent e WTI, a presente Tese utilizará o primeiro como referência global para os preços internacionais do petróleo. Esta escolha está baseada na percepção existente na indústria mundial de petróleo de que o Brent e seus derivativos são utilizados como referência contratual em cerca de 60% das transações de compra e venda de petróleo (WEEKLY, 2017). Outro ponto que suporta a referida escolha são as características estruturais do mercado onde o marcador WTI é transacionado descritas em PURVIN & GERTZ (2010), que fazem com que o seu preço seja fortemente influenciado pela dinâmica do mercado local¹.

A primeira seção do capítulo 2 mostrará que a alta do preço do petróleo nos anos que precederam a crise econômica global de 2008 colocou esta transformação em evidência ao interpretá-la como uma das possíveis causas da elevação dos preços, como é possível observar nos primeiros trabalhos que relacionaram a alta dos preços com a especulação financeira. MASTERS e WHITE (2008) é um exemplo desta literatura. Entre acadêmicos, políticos e outros observadores do mercado, formou-se um debate a respeito dos efeitos da especulação financeira sobre os preços do petróleo². Como será detalhado na segunda seção do Capítulo 2, esse debate foi realizado através de diferentes elementos:

- a) A associação das posições dos agentes no mercado futuro com os preços do petróleo, como é feito em CAVALCANTE (2008), DOMANSKI e HEATH (2007) e CHEVALLIER (2010).
- b) A identificação de movimentos especulativos nos preços do petróleo a partir de dados empíricos como o movimento dos estoques, como ocorre em FATTOUH e MAHADEVA (2012), KILIAN e MURPHY (2010) e GONÇALVES (2017).

¹ As características mencionadas dizem respeito, especificamente à logística de escoamento da produção. Nos anos 1980 e 1990 a infraestrutura foi preparada para o recebimento de importações na região. Com a elevação da produção ocorrida na década de 2010, não havia capacidade suficiente para movimentação no sentido inverso para o escoamento da produção, resultando em desvalorização do WTI em relação a outros marcadores. (PURVIN & GERTZ, 2010)

² Cabe acrescentar ainda que tal debate não ficou restrito ao segmento de petróleo, uma vez que outras commodities mostraram um comportamento similar. Um dos índices de commodities mais populares do mercado financeiro americano, o Thomson Reuters/CoreCommodity CRB, mostrou alta de 75% entre 2000 e 2007 enquanto o preço do petróleo Brent mostrou alta de 154% no mesmo período.(BLOOMBERG, 2017b)

- c) A análise das limitações de um modelo baseado apenas em fundamentos do mercado de petróleo para explicar o comportamento dos preços, como propõe KAUFMANN (2011).
- d) A associação qualitativa entre o comportamento dos agentes, as suas posições no mercado futuro e o comportamento dos preços, como sugere TOKIC (2011).

Um ponto importante a se destacar do debate supracitado é a proposta de abordar o problema através da distinção entre uma fração de agentes dedicados à observação dos fundamentos de mercado e outra fração dedicada a uma atividade especulativa. MASTERS e WHITE (2008), por exemplo, atribuem a elevação dos preços do petróleo à maior participação de investidores em índices de commodities nos mercados de petróleo. Em linha com ele, os autores mencionados em a), utilizaram dados da Commodity Futures Trading Commission (CFTC) a respeito das posições dos diferentes tipos de agentes para realizar esse tipo de análise, assumindo uma correspondência biunívoca entre cada tipo de agente e o seu comportamento no mercado. Tal correspondência se faz necessária porque os dados supracitados, apesar de informarem a participação de cada tipo de agente, não possibilitam a identificação de como cada tipo efetivamente se comportou. Daí a necessidade de assumir que cada tipo possui um comportamento determinado.

No Capítulo 2 é argumentado que a assunção dessa correspondência biunívoca entre o tipo de agente e o seu comportamento não é suficiente para a análise do problema. A análise de TOKIC (2011) defende que o comportamento de *feedback* positivo³ causou a forte elevação dos preços na primeira metade de 2008. O autor argumenta que esse comportamento foi adotado por parte dos agentes “comerciais” e “não comerciais”, quebrando a correspondência. É possível encontrar um outro exemplo na observação feita por SZADO (2011) de que os agentes comerciais não fazem o hedge completo de suas operações de forma deliberada, como uma forma de especular a respeito do futuro dos preços do petróleo. Tais exemplos suportam a importância de se estudar diretamente o comportamento dos agentes, independente da “identidade” do agente que o adota.

Sendo assim, como mostra o problema da especulação financeira, o estudo do comportamento dos agentes é crítico para compreensão de problemas relacionados ao mercado de petróleo em sua arquitetura atual. Em função disso, a proposta da presente

³ O comportamento de *feedback* positivo é definido como aquele em que um agente extrapola a tendência recente dos preços. Ou seja, altas (baixas) recentes de preços resultam na formação de uma expectativa de novas elevações (quedas) de preços.

Tese é dar um passo atrás e olhar o problema de modelar o mercado de petróleo pela ótica do comportamento dos agentes. Diferente da análise associando os dados de posições dos agentes com o movimento dos preços, ou das análises descritas em b) e c), em que o comportamento dos agentes não possui um papel central na análise, identifica-se a necessidade de se utilizar uma ferramenta de modelagem que possibilite o estudo do comportamento dos agentes de forma mais direta para a análise do mercado de petróleo.

Para atender a necessidade supracitada, a presente Tese propõe contribuir com a literatura através da construção e análise de modelos de Agentes com Comportamentos Heterogêneos para representação do mercado de petróleo. É proposta uma abordagem exploratória onde são testadas seis especificações diferentes para modelos compostos por agentes com dois tipos comportamento. O objetivo é verificar a pertinência da referida abordagem para a representação do mercado de petróleo. Dada a ausência de consenso quanto à forma de especificar esse tipo de modelo para o estudo dos mercados de commodities (em particular do petróleo), a abordagem exploratória tem o objetivo de identificar características e regularidades que possam aprimorar o propósito de modelagem do mercado de petróleo.

Uma segunda contribuição proposta pela presente diz respeito à forma de estimação do modelo proposto. A presente Tese utiliza a metodologia de inferência Bayesiana para a estimação dos parâmetros dos modelos propostos. Conforme mostram GELMAN et al. (2014), o uso da inferência Bayesiana confere flexibilidade ao processo de estimação para lidar com a complexidade esperada desse tipo de modelagem. BERGER e BAYARRI (2004) destacam, por sua vez, que a inferência Bayesiana permite a mensuração direta da incerteza de uma estimativa, possibilitando a definição de distribuições de probabilidade para o valor dos parâmetros. Por último, os conceitos envolvidos no processo de inferência Bayesiana são consistentes com o método analítico proposto por WERKER e BRENNER (2004) para a calibração empírica de modelos de simulação. Tais fatores tornam a utilização desse ferramental adequada ao problema proposto, apesar da sua não utilização por parte da literatura em que se buscou a estimação empírica de modelos de Agentes Heterogêneos.

A definição da ferramenta para a realização desse objetivo é discutida no Capítulo 3. Nele é apresentada a abordagem teórica que fundamenta as ferramentas tradicionais para a modelagem de ativos financeiros e são expostas as limitações que a torna inadequada ao objetivo expresso no Capítulo 2. Como alternativa, é proposto o uso de modelos de Agentes com Comportamentos Heterogêneos (HAs –

Heterogeneous Agent Models na sigla em inglês)⁴, cujo as principais características estão descritas em HOMMES (2005). A Seção 3.3 descreve as principais características dos HAMs, justifica o seu uso, faz uma revisão das diferentes opções de modelagem utilizadas na literatura recente e descreve as principais tentativas de estimação empírica desse tipo de modelagem. Especificamente no que tange ao comportamento dos agentes, a principal questão de interesse, os modelos propostos na presente Tese possuem duas características em que ele é representado: o processo de formação de expectativas e o mecanismo pelo qual é possibilitado aos agentes mudar o comportamento adotado ao longo do tempo. Por último, o capítulo 3 detalha o argumento em favor do uso da inferência Bayesiana para a estimação dos modelos de Agentes com Comportamentos Heterogêneos propostos.

O Capítulo 4 apresenta a descrição dos modelos que serão estimados na presente Tese. O termo “modelos” no plural é consequência direta da discussão do Capítulo 3, que mostra a ausência de um consenso quanto às diferentes opções de design possíveis para os HAMs desenvolvidos pela literatura. Em função disso, a presente Tese optou por uma abordagem mais exploratória, estimando 6 diferentes combinações dessas opções de modelagem como forma de analisar a adequação desse tipo de modelagem ao mercado de petróleo.

No que diz respeito à formação de expectativas, são exploradas três formas distintas pelas quais os agentes com comportamento fundamentalista podem formular suas expectativas. Inspirada no estudo de FRITZ et al. (2015), as diferentes estratégias de formação de expectativa variam em grau de complexidade e conexão com os fundamentos do mercado de petróleo. A primeira delas corresponde ao uso da média móvel de 12 meses dos preços realizados, a segunda corresponde a um modelo linear simplificado relacionando os preços com o balanço entre oferta e demanda e a terceira corresponde a um VAR que relaciona o preço do petróleo com cinco outras variáveis ligadas aos fundamentos de mercado. No que tange ao mecanismo de mudança de comportamento, são analisadas duas possibilidades. Na primeira delas, os agentes mudam o seu comportamento com o passar do tempo com base no desempenho pregresso de cada comportamento, como propõem BROCK e HOMMES (1997) e ELLEN e ZWINKELS (2010), por exemplo. Na segunda possibilidade, os agentes mudam o seu comportamento com base no distanciamento entre o preço realizado no

⁴ Ao longo do texto, optei por manter a sigla em inglês para facilitar a busca por referências na literatura internacional.

período anterior e a expectativa dos agentes com comportamento fundamentalista para aquele mesmo período, como propõem KAO et al. (2015), por exemplo.

As duas primeiras seções do Capítulo 5 descrevem os resultados obtidos e apresentam dois exercícios de simulação utilizando os modelos, que consistem na geração de resultados a partir dos modelos para múltiplos períodos dentro da amostra. Cada um dos 6 modelos produz uma simulação de seus resultados para os períodos 2008-2010 e 2014-2016. A última seção do Capítulo 5 discute os resultados obtidos enquanto o Capítulo 6 é reservado para as conclusões.

2 - Financeirização do mercado de petróleo – O petróleo é um ativo financeiro?

2.1 - O desenvolvimento da esfera financeira no mercado de Petróleo

O ponto de partida para a discussão a respeito do comportamento dos preços do petróleo está na compreensão da arquitetura do mercado em que ele é transacionado. Embora seja considerado uma commodity, ENERGY INTELLIGENCE (2011) mostra que existe uma ampla diversidade de correntes de petróleo sendo transacionadas no mundo, cada uma delas com suas respectivas características físico-químicas que, por sua vez, influenciarão em seu rendimento em derivados após o processamento no refino. Segundo MABRO e HORSNELL (1994), apesar dessa diversidade, o mercado de petróleo gravita em torno de uma pequena quantidade de óleos marcadores que atuam como uma referência de preços para o restante da produção.

Como mostra FATTOUH (2011), a relação entre as diferentes correntes e os óleos marcadores se dá em função da existência de contratos de compra e venda em que cada corrente utiliza o preço de um óleo marcador acrescido de um diferencial para a formação de seu preço. O óleo marcador pode ser transacionado em mercados físicos e financeiros a qualquer momento no tempo. O diferencial de preço em relação ao marcador, que por sua vez é o principal alvo da negociação entre produtores e refinadores, é utilizado inicialmente para refletir a diferença entre as características físico-químicas do petróleo transacionado e do respectivo marcador no preço final. Além da diferença de qualidade, esse diferencial também compreende outras questões comerciais, como o equilíbrio entre oferta e demanda daquela corrente específica, o poder negocial dos produtores e/ou dos refinadores, limitações logísticas e as características da infraestrutura de refino que irá processá-lo.

A ascensão da estrutura mencionada nos parágrafos anteriores, em que os preços das diferentes correntes de petróleo são “satélites” que gravitam em torno dos petróleos marcadores está relacionada com as transformações estruturais da indústria de petróleo ocorridas desde os anos 1970. Conforme mostra MABRO (1984), até o início dos anos 1970, os preços do petróleo serviam, principalmente, como referência para a repartição das rendas da indústria entre as empresas multinacionais e os governos detentores dos recursos e para eventuais transações extra-contratuais entre empresas para fins de ajuste em seu planejamento operacional. Nesse período, a produção do petróleo era concentrada em poucos países e o seu controle estava nas mãos de um grupo limitado de grandes empresas multinacionais integradas. O preço internacional

de referência era o preço da corrente saudita Árabe Leve, definido diretamente pela OPEP em suas reuniões.

Conforme descrito em SILVERIO (2012), os anos 1970 marcaram o início da ascensão dos mercados para os petróleos marcadores Brent, no Mar do Norte (Europa), e WTI, nos EUA. Entre o fim dos anos 1970 e o início dos anos 1980 ocorreram múltiplas transformações estruturais na indústria de petróleo que viabilizaram essa ascensão. MABRO (2005) aponta a pulverização das participações das empresas na oferta e na demanda, condições regulatórias favoráveis e estáveis e a existência de conexões com múltiplos mercados internacionais como fatores favoráveis ao surgimento de mercados bem desenvolvidos nessas regiões. No que toca a questão da pulverização da oferta de petróleo, FATTOUH (2011) destaca que o processo de nacionalização das reservas petrolíferas nos países da OPEP resultou na desintegração das multinacionais petrolíferas e abriu espaço para o aumento do número de transações fora dos contratos de longo prazo, predominantes até aquele momento.

Além dessas transformações, é importante mencionar que os choques do petróleo de 1973 e 1979, que resultaram em uma elevação significativa dos preços ao longo da década de 1970, também tiveram papel importante nesse processo ao influenciarem as condições de oferta e demanda. Os altos preços resultantes dos dois choques de petróleo resultaram em um impulso para as empresas reduzirem a sua dependência do petróleo importado da OPEP, seja pelo aumento da produção, seja pela redução da demanda. Dados da BP (2017) mostram que os mercados em que surgiram os novos marcadores apresentavam, já em meados da década de 1970, uma participação de 56% do consumo total de petróleo no mundo. Após os choques do petróleo, esses mercados também experimentaram uma forte elevação da produção de petróleo. Ainda segundo dados da BP (2017), a produção de petróleo nos países do Mar do Norte (Reino Unido e Noruega), mostrou elevação de 226 mil barris por dia em 1975 para 3,6 milhões de barris por dia em 1985. No mesmo período, a produção de petróleo nos EUA mostrou alta de 500 mil barris por dia, impulsionada pelas novas descobertas em águas profundas no Golfo do México e no Alasca.

No plano regulatório, PURVIN & GERTZ (2010) mostra que a ascensão de um *benchmark* de preços de petróleo West Texas Intermediate (WTI) só ocorreu após a desregulamentação dos preços praticados no país na década de 1970, oferecendo condições mais favoráveis e simples para os produtores de petróleo no país comercializarem a sua produção. No caso Europeu, MABRO e HORSNELL (1994) mostram que, além do grande número de novas empresas produtoras e da baixa

concentração da capacidade de refino no Noroeste Europeu, a existência de uma legislação tributária britânica favorável à realização de transações entre empresas diferentes ofereceu um impulso adicional para o desenvolvimento do mercado do marcador Brent na região.

Além das condições específicas de cada região, o próprio comportamento da Organização dos Países Exportadores de Petróleo contribuiu com o desenvolvimento dos mercados para óleos marcadores. Entre o final dos anos 1970 e os primeiros anos da década de 1980, os preços administrados da OPEP precisavam coexistir com os preços dos marcadores Brent e WTI, definidos nos mercados do Mar do Norte e dos EUA, respectivamente. Conforme mostra MABRO (1984) as disputas entre os países membros foram erodindo gradativamente o sistema de preços oficiais da organização, ampliando cada vez mais o número de transações sendo realizadas nos mercados dos óleos marcadores Brent e WTI, contribuindo com o seu desenvolvimento. Não era incomum que países membros da OPEP optassem por vender a sua produção nos mercados *spot*, aproveitando oportunidades de arbitragem aberta entre os preços administrados e os preços de mercado, estimulando o desenvolvimento dos mercados *spot*.

É nesse contexto de desenvolvimento dos mercados *spot* para o petróleo no Mar do Norte e nos EUA que tem início o movimento de surgimento das camadas financeiras nos mercados destes petróleos marcadores. Conforme mostram MABRO e HORSNELL (1994) o surgimento do contrato futuro vinculado ao WTI na NYMEX é lançado em 1983, e a primeira tentativa de lançamento de um contrato futuro relacionado ao petróleo Brent ocorre na mesma época. SILVERIO (2012) mostra que, a partir de então, o desenvolvimento do mercado futuro na NYMEX foi rápido, acompanhando a expansão do mercado *spot* na região. No caso do mercado no Mar do Norte, o fracasso dessa primeira tentativa de introdução de um contrato futuro se deu pela existência de um mercado para contratos *forward*, já razoavelmente desenvolvido, que cumpria com uma porção significativa das funções esperadas de um contrato futuro. Conforme mostra GARBADE e SILBER (1983), o surgimento de contratos futuros para a negociação de qualquer commodity possui dois propósitos básicos. O primeiro deles diz respeito a sua atuação como instrumento de gestão de risco e o segundo como ferramenta para o auxílio no processo de *price discovery*⁵. Ambas as funções estavam presentes no

⁵ Formalmente, o processo de *price discovery* diz respeito à forma como as relações de compra e venda entre os agentes resultarão em um sinal de preços da commodity. É o meio pelo qual as informações com potencial de influenciar o mercado efetivamente se traduzem em preços. SILVERIO (2012) estuda a forma como a arquitetura do mercado de petróleo influencia nesse processo.

contrato futuro de petróleo da Nymex e nos preços *forward* do petróleo Brent, justificando o seu surgimento.

No que tange a função de gestão de risco, SILVERIO (2012) mostra que as grandes distâncias percorridas por uma carga de petróleo entre o produtor e o refinador representam um considerável risco para ambas as partes. Dadas as flutuações diárias dos preços *spot* do petróleo e o fato de que uma carga entre o Oriente Médio e a Europa pode demorar até 2 meses em trânsito, a exposição de ambas as partes a flutuações de preços é significativa. Nesse sentido, a existência de uma negociação para os preços futuros dos petróleos marcadores para um período de meses à frente possibilitou a compradores e vendedores realizarem operações de *hedge* para sua própria proteção diante das possibilidades de flutuação de preços, mitigando parte significativa desse risco.

Quando se trata da função de *price discovery*, o surgimento dos mercados *forward* e futuro para os principais óleos marcadores também desempenhou papel importante. Conforme descrito em MABRO e HORSNELL (1994), os preços de fechamento nos mercados *spot* que estavam se desenvolvendo à época eram publicados em base diária, sempre ao final do processo de coleta de informações por parte das agências de *price reporting*. Ao introduzirem uma plataforma para os agentes transacionarem papéis relacionados ao petróleo ao longo do dia com a possibilidade de visualização dos preços em tempo real, os mercados futuros trouxeram mais informação a respeito da precificação do petróleo em cada momento do tempo, possibilitando aos agentes ter uma base menos imprecisa para a precificação do seu petróleo em contratos de compra e venda. De forma similar, porém menos intensa, os mercados *forward* do Brent representavam um benefício similar para os participantes daquele mercado, uma vez que esse mercado possuía elevada liquidez na época.

FATTOUH (2011) aponta a crise de mercado que resultou no contrachoque do petróleo em 1986 como a etapa final para o surgimento da estrutura de mercado existente hoje. Logo após o forte movimento de queda dos preços observado na primeira metade dos anos 1980, a Arábia Saudita adotou uma mudança em sua estratégia comercial com o objetivo de retomar a participação de mercado decorrente de sua atuação como “garantidora” das metas de produção da OPEP. Os contratos de *netback*⁶

⁶ MABRO (1987) descreve esses contratos como instrumentos em que o preço do petróleo em uma operação de compra e venda é determinado *ex-post* a partir dos preços dos derivados de petróleo obtidos como fruto do seu refino. Ao garantirem uma margem ao refinador, esse tipo de contrato serviu como instrumento de retomada de participação de mercado por parte daqueles que o adotaram.

utilizados como instrumento pelos sauditas nesse processo foram rapidamente adotados por outros produtores, que passaram a disputar os mesmos mercados consumidores que os sauditas buscavam retomar.

A queda de preços que resultou desse processo de disputa pelos mercados internacionais levou a uma percepção de instabilidade do mercado em função do uso dos contratos de *netback*. Conforme mostra FLORES-MACÍAS (2010), a estatal mexicana Pemex, foi a primeira companhia a adotar um mecanismo alternativo de precificação, relacionando os preços da sua produção a uma cesta de *benchmarks* internacionais, evitando a instabilidade dos contratos de *netback*. Embora tenha enfrentado resistência no início, o mecanismo proposto pela estatal mexicana foi adotado por outros países produtores nos anos subsequentes tornando-se a prática usual do mercado pelas décadas seguintes.

Com a consolidação de um mecanismo de precificação em que os preços dos óleos marcadores adquiriram o papel central na definição do preço de todas as outras correntes de petróleo transacionadas no mundo, as necessidades dos agentes por instrumentos para a gestão de risco e um aprimoramento no processo de descoberta dos preços impulsionaram o desenvolvimento dos mercados futuros em ambos os mercados. Os dados apresentados na Figura 2 a seguir mostram que, em 2000, o número de posições em aberto nos mercados futuros para os petróleos Brent e WTI estava próximo de 1 milhão de contratos.

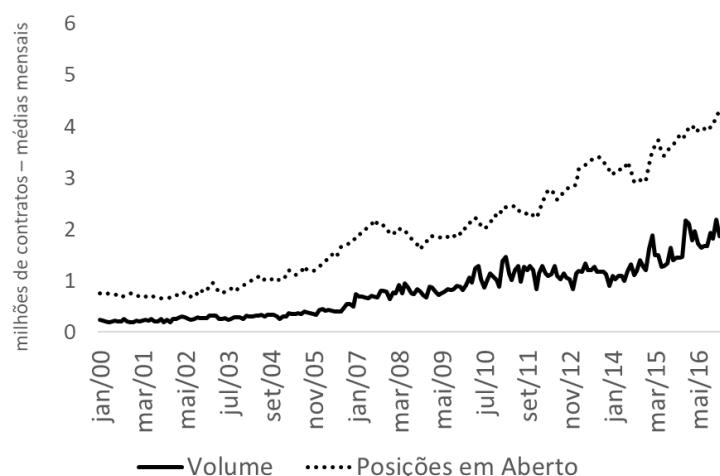


Figura 2 Volume Negociado e Posições em Aberto - Valores Combinados para Brent e WTI

Fonte: Bloomberg (2017)

Além do significativo estágio de desenvolvimento observado já a partir de meados dos anos 1990, o gráfico mostra que este foi apenas o início de um ciclo de expansão que duraria ao longo das duas décadas e meia subsequentes. Parte desse

movimento pode ser atribuído ao fato de que houve um aumento da produção e da demanda por petróleo no período, o que fez com que ocorressem mais transações para a realização das mesmas funções. Contudo, a Figura 3 mostra que a taxa de crescimento das posições em aberto em ambos os mercados foi significativamente superior à da produção de petróleo indicando, de fato, uma maior relevância das esferas financeiras de negociação do petróleo com o passar dos anos.

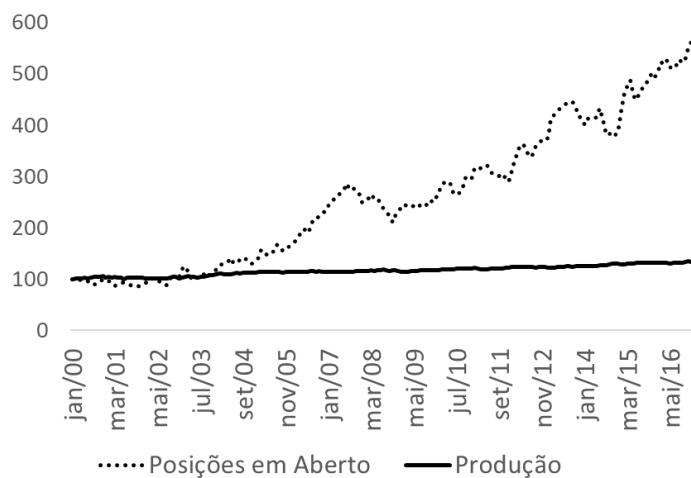


Figura 3 Posições Abertos nos contratos futuros do Brent e do WTI x Produção Mundial (jan/2000=100)

Fonte: Bloomberg (2017) e US DOE Short Term Energy Outlook Custom Table Builder

Chama a atenção ainda a aceleração desse crescimento ao longo da década de 2000. Ao descrever um processo de financeirização no mercado de petróleo, GKANOUTAS-LEVENTIS (2013) identifica um conjunto de fatores que permitiu o expressivo desenvolvimento dos mercados futuros de petróleo nesse período. Entre eles está a possibilidade de participação nos mercados através da internet, com a posterior ascensão do *trading* eletrônico, que reduziu custos de transação e possibilitou o aumento da participação nesses mercados, injetando ainda mais liquidez. Os outros fatores estão no plano regulatório, onde o autor afirma que duas mudanças legais nos EUA também contribuíram com o processo: a introdução do Commodity Futures Modernization Act (CFMA) em 2000 e a revisão na regulação relacionada à prudência dos investidores na tomada de riscos por meio do uso do capital de terceiros. Nesse contexto, o CFMA permitiu um intenso desenvolvimento dos mercados de balcão⁷, que

⁷ Os contratos futuros são negociados em bolsas organizadas em que o processo de clearing (reconciliação das posições dos agentes com as transações realizadas) é realizado por uma entidade central. No caso dos mercados de balcão, não existe essa entidade central, fazendo com que todas as operações de compra e venda sejam o resultado de negociações bilaterais. Tal característica fazem com que esses mercados sejam considerados mais “opacos” na ausência de uma regulação ativa.

agora estavam fora da jurisdição da Commodity Futures Trading Commission (CFTC). A revisão da regulação relacionada à prudência dos investidores, por sua vez, permitiu aos investidores institucionais participarem cada vez mais de mercados mais arriscados, como o de petróleo, por exemplo.

Os desenvolvimentos descritos até o momento nesta seção corroboram a descrição da atual arquitetura do mercado internacional de petróleo em FATTOUH (2011). Ou seja, o mercado de petróleo existente hoje é produto da ascensão dos mercados *spot* nos anos 1970 e 1980, da adesão ao mecanismo de precificação baseado em fórmulas que fazem referências a *benchmarks* globais de preços e da ascensão e desenvolvimento de uma camada financeira de negociação do petróleo. Como será possível observar nas próximas seções, tais características terão um impacto importante no processo de identificação dos principais determinantes do movimento dos preços de petróleo e dos esforços de modelagem desse mercado.

2.2 - A relação entre a especulação financeira e os preços de petróleo

Conforme observado na seção anterior, o aumento da participação do setor financeiro na arquitetura do processo de formação de preços no mercado de petróleo foi mais intenso no período posterior à década de 2000. Nesse período, foi observada uma forte elevação nos preços do petróleo, que culminou no atingimento de valores recorde para o barril de petróleo em 2008. A coincidência dos dois fenômenos no mesmo horizonte do tempo sugeriu a possibilidade de algum tipo de relação de causalidade entre eles para os diferentes observadores do mercado de petróleo: políticos, acadêmicos, mídia e o público em geral.

Nesse contexto surge uma narrativa a respeito desse relacionamento em que a ideia fundamental afirma que o desenvolvimento dos mercados financeiros para a negociação de petróleo permitiu que os especuladores influenciassem diretamente os preços, causando uma “bolha especulativa”. Embora não seja o primeiro a sugerir isso, o texto de MASTERS e WHITE (2008) é bastante assertivo ao defender esta narrativa. Nesse sentido, existe uma significativa literatura no período buscando avaliar evidências que corroborem ou neguem a referida narrativa.

Os primeiros esforços ocuparam-se de identificar relações empíricas de causalidade entre o aumento das posições dos agentes “especuladores” e o comportamento dos preços do petróleo. Exemplificando essa prática, os testes de causalidade Granger realizados por CAVALCANTE (2008), DOMANSKI e HEATH

(2007) e CHEVALLIER (2010) não foram capazes de identificar que o aumento dos “especuladores” influenciou o movimento⁸ de elevação dos preços observados até então. Nos três estudos, o aumento das posições dos agentes “especuladores” foi estimado a partir dos dados públicos do relatório Commitment of Traders (CoT) da Commodity Futures and Trading Commission (CFTC), em que os diferentes participantes declaram a natureza da sua atividade de *trading*, e essa declaração é utilizada como referência para todas as transações de cada agente.⁹

Outra forma de explorar o mesmo tipo de relacionamento diz respeito à comparação dos preços do petróleo com o aumento da participação dos Commodity Index Traders (CITs)¹⁰ no mercado de petróleo. Esses investidores, que entram no mercado de petróleo com investimentos considerados passivos, estariam exercendo uma pressão de compra responsável pela elevação dos preços. Além de ser um dos argumentos levantados por MASTERS e WHITE (2008), tal relacionamento é explorado também por SANDERS e IRWIN (2010) e IRWIN e SANDERS (2011) que estudam um grupo amplo de commodities. Contrariando MASTERS e WHITE (2008), ambos os estudos não são conclusivos para a identificação de tal relação.

Ao utilizarem uma base de dados proprietária da CFTC, BÜYÜKŞAHIN e HARRIS (2011) aprofundam os estudos realizados previamente com os dados públicos do relatório CoT ao utilizarem uma base de dados mais desagregada e em frequência diária (os dados do CoT possuem frequência semanal). Analisando as influências das posições de cerca de 8 subgrupos de agentes, os autores também não encontram

⁸ Formalmente, os testes empíricos realizados pelos autores não rejeitaram a hipótese nula de que o aumento da participação dos especuladores não granger-causava o comportamento dos preços.

⁹ Até 2009, o relatório dividia os agentes apenas em “Commercials” e “Non-Commercials”. A distribuição atual, onde os agentes são separados em quatro grupos: “Producer/Processor/Merchant and User”, “Commodity Swap Dealers”, “Managed Money Traders”, e “Others/Non-Reportable” foi instituída após uma recomendação de um *staff report* emitido pela CFTC a respeito da influência da especulação sobre os preços a pedido do congresso Americano. O primeiro grupo diz respeito às empresas que participam de atividades físicas na indústria de petróleo, produzindo, refinando ou negociando com volumes físicos do produto, sendo agentes que geralmente praticam *hedge*. Os “Commodity Swap Dealers” são agentes que também praticam *hedge*, mas para proteger suas posições em outras esferas financeiras do mercado de petróleo, como os mercados de balcão. Os “Managed Money Traders” são usualmente associados com os “especuladores”, uma vez que o grupo contém agentes que não lidam com a commodity física. O último grupo não é claramente definido, mas também não representa um número significativo de agentes e transações.

¹⁰ Instituições que investem em índices de commodity como forma de expor o seu portfólio a esses mercados, sem necessariamente possuírem uma visão a respeito do balanço entre oferta e demanda no futuro. Geralmente adotam uma postura passiva com estratégias do tipo *buy-and-hold*. Segundo a construção dos dados realizada pela CFTC, esse grupo estaria dentro do conjunto dos “non-commercials”. Dadas as hipóteses levantadas pela literatura, a CFTC produziu relatórios suplementares detalhando a participação desse tipo de agente nos mercados, viabilizando os dados necessários para os estudos citados.

evidência de que as posições dos agentes precederam o movimento de alta dos preços. Pelo contrário, as evidências do estudo mostram que o comportamento dos tipos de agentes que compõem o grupo dos “Non-Commercial”s e os “Commodity Swap Dealers” tiveram a evolução das suas posições precedida pela alta dos preços, indicando um comportamento de extração de tendência por parte desses grupos.

Indo além das análise de causalidade, TOKIC (2011) formula uma hipótese teórica para a influência do setor financeiro sobre o movimento de alta de preços (e a posterior queda) observado ao longo de 2008 e testa a sua validade através da análise do comportamento dos diferentes tipos de agentes evidenciados no relatório CoT. Segundo a sua hipótese, a forte elevação dos preços foi ocasionada por agentes adotando estratégias de extração de tendências recentes de preços. Diferente das análises mencionadas até o momento, em que esse tipo de comportamento é associado com os agentes “Non-Commercial”, Tokic afirma que foram os agentes “Commercial” que na verdade se engajaram com esse tipo de comportamento no início de 2008. Segundo o autor, tal fato é justificado pela distorção de expectativas causada pela entrada dos investidores institucionais no mercado de petróleo, após a queda na rentabilidade de outras classes de ativos no final de 2007.

Saindo do plano das análises utilizando os dados das posições dos agentes, KAUFMANN (2011) buscou testar a hipótese da existência de um efeito da especulação financeira sobre os preços, através de uma análise do poder explicativo de um modelo baseado em fundamentos de mercado. Além da insuficiência do modelo baseado em fundamentos para explicar o movimento dos preços, o autor defende que a quebra do relacionamento de longo prazo entre os preços de contratos futuros de diferentes níveis de maturidade e a elevação dos estoques de petróleo dos EUA observada desde 2004 seriam argumentos favoráveis para a hipótese de que a especulação financeira justificou o comportamento dos preços.

A tese dos estoques físicos como uma evidência da existência de especulação financeira também foi explorada em PIERRU e BABUSIAUX (2010). Ao contrário de KAUFMANN (2011) os autores constroem um modelo teórico em que uma elevação dos preços do petróleo provocada pela especulação financeira não necessariamente resulta em uma elevação física dos estoques. Além dessa constatação, os autores alertam para a dificuldade de se testar adequadamente esse relacionamento, uma vez que os dados relativos aos estoques de petróleo mais acessíveis e usualmente utilizados na literatura acadêmica desconsideram a existência de estocagem nos principais produtores da OPEP e em grandes mercados consumidores como China e Índia, que hoje não fazem

parte da OCDE. A Figura 4 sumariza os principais pontos da literatura que tratou da especulação financeira no mercado de petróleo.



Figura 4 Abordagens para o Problema da Especulação Financeira nos preços do Petróleo

Fonte: Elaboração própria

FATTOUH et al. (2013) tratam da literatura que objetivou a construção de modelos do mercado de petróleo para o teste da hipótese de que houve um efeito especulativo sobre os preços do petróleo. Nesse contexto, eles destacam a construção de modelos VAR estruturais, em que se admite a possibilidade de choques fundamentalistas e especulativos como uma forma adequada de testar essa hipótese. Para os autores, o modelo proposto por KILIAN e MURPHY (2010), que identifica influência especulativa nos anos de 1979, 1986, 1990 e 2002, explica a elevação dos preços entre 2003 e 2008 como o resultado de sucessivos choques de demanda física, afastando a hipótese de que o movimento em questão tenha ocorrido em função da especulação financeira.

Oferecendo um olhar distinto, GONÇALVES (2017) constrói um modelo VAR de natureza similar, em que adota algumas das críticas e propostas alternativas de especificação ao modelo de KILIAN e MURPHY (2010) realizadas na literatura. Como resultado de sua análise, a autora identifica uma contribuição significativa da demanda especulativa sobre a elevação dos preços ocorrida entre 2003 e 2008, que atuou de forma complementar à demanda física por petróleo.

A diversidade de resultados e posicionamentos encontrados até o momento, evidencia o caráter inconclusivo da discussão a respeito da influência da especulação financeira sobre os preços do petróleo. Como foi possível observar, as análises exemplificadas na presente seção mostram que, independente do arcabouço teórico

utilizado, existem contribuições na literatura favoráveis a ambas as posições nesse debate.

2.3 - Influência do setor financeiro sobre o preço do petróleo – indo além da especulação financeira

A discussão da seção anterior evidenciou o caráter atualmente inconclusivo do debate a respeito da influência da especulação financeira sobre os preços do petróleo. A depender da metodologia utilizada e das diferentes nuances existentes nas escolhas de modelagem, é possível identificar o fator especulativo como determinante ou não para o comportamento dos preços do petróleo.

SZADO (2011) propõe uma análise dos diferentes significados atribuídos ao termo “especulação” entre acadêmicos, analistas, textos legais e políticos. Em um dos exemplos analisados ele cita o regulamento da Commodity Futures Trading Commission (CFTC, 2008) que afirma que:

“Em mercados futuros de commodities, um trader que não realiza uma operação de hedge, mas negocia com o objetivo de obter lucros através da bem sucedida antecipação de movimentos no nível de preços ou de movimentos relativos entre preços no caso de transações em diferenciais”¹¹

Ao analisar definições do termo elaboradas pelo grande público, o autor cita a definição oferecida por um reconhecido portal de informações sobre o setor financeiro:

“o processo de selecionar investimentos com alto risco com o objetivo de auferir lucros a partir da antecipação de um movimento de preços” (...) “especulação não deveria ser considerada uma forma de apostas, uma vez que os especuladores realizarão uma decisão informada antes de escolherem assumir riscos adicionais. Além disso, a especulação não pode ser caracterizada como um investimento tradicional porque os riscos adquiridos são acima da média.”¹²

Além de apresentar estas definições, o autor ainda trata da noção de *hedge seletivo*, onde mesmo em uma operação de *hedge*, existe uma posição especulativa implícita na decisão do agente a respeito de qual será a proporção do seu portfolio que

¹¹ “In commodity futures, a trader who does not hedge, but who trades with the objective of achieving profits through the successful anticipation of outright price movements or through relative price movements in the case of spread trades”, tradução do autor.

¹² Segundo SZADO (2011), a citação original, retirada do site Investopedia afirma que: “the process of selecting investments with higher risk in order to profit from an anticipated price movement;” (...) “Speculation should not be considered purely form of gambling, as speculators do make an informed decision before choosing to acquire the additional risks. Additionally, speculation cannot be categorized as a traditional investment because the acquired risk is higher than average.”

será alvo da operação de *hedge*. Segundo ele, tal constatação é reconhecida pela CFTC e acaba produzindo uma imprecisão na diferenciação entre *hedgers* e *especuladores*.

Existe um ponto em comum entre as diferentes definições apresentadas por SZADO (2011) e a noção de *hedge* seletivo cuja menção é importante. Tal ponto em comum é o fato de que a especulação financeira é fruto do comportamento dos agentes. O objetivo da operação, a assunção de riscos por parte dos agentes e a escolha da extensão da operação de *hedge* são elementos que só podem ser identificados se observarmos o comportamento dos agentes.

Na análise da literatura descrita na seção anterior, é possível observar que uma das grandes dificuldades em se desenhar modelos e testes de hipótese para a influência da especulação financeira sobre os preços do petróleo está na dificuldade de se identificar adequadamente o comportamento dos agentes. Nos modelos em que se utilizam dados da CFTC a respeito das posições dos agentes, por exemplo, a única informação disponível é a identificação do agente com um dos grupos, mas não o seu comportamento. Ao introduzir a possibilidade de que os agentes comerciais estivessem adotando um comportamento tipicamente especulativo de extração de tendência, TOKIC (2011) construiu uma contribuição razoável para o debate, ainda que não tenha sido possível realizar um teste empírico de suas hipóteses.

Dada a indisponibilidade em se acessar diretamente a informação sobre o comportamento a partir dos dados de posição dos agentes, a linha de argumentação proposta por KAUFMANN (2011), por sua vez, buscou associar a verificação da hipótese da especulação financeira com a dificuldade de um modelo baseado em fundamentos para explicar o comportamento dos preços. Embora teoricamente razoável, o teste proposto esbarra nas dificuldades existentes em se separar as limitações do modelo que decorrem da existência de choques especulativos, daquelas que decorrem das suas próprias imperfeições.

O uso de modelos VAR estruturais mencionados por FATTOUH et al. (2013) e GONÇALVES (2017), por sua vez, possui o objetivo de identificar a existência da especulação financeira através dos seus efeitos observáveis sobre os estoques de petróleo. Nestes estudos, a existência de especulação financeira é associada com o efeito prático de uma elevação dos preços acompanhada de incremento nos estoques físicos. Comparado com as outras abordagens analisadas, esta é uma que mitiga as limitações associadas à dificuldade de se obter informações sobre o comportamento dos agentes a partir dos dados disponíveis. Apesar disso, a possibilidade levantada por PIERRU e BABUSIAUX (2010) de que a demanda especulativa aconteça sem a

ocorrência de um efeito prático observável sobre os estoques, sugere a necessidade de outras formas de se testar a influência da especulação sobre os preços do petróleo.

Dada as dificuldades observadas na literatura analisada, é razoável supor que o tratamento da questão do comportamento dos agentes de forma direta seja um requisito para o estudo da influência da especulação financeira sobre o preço do petróleo. Em todas as abordagens analisadas, é possível notar que a questão do comportamento dos agentes é tratada de forma indireta ou contornada por meio de hipóteses simplificadoras. Enquanto os modelos VAR estruturais e outros modelos baseados em fundamentos buscam identificar os efeitos dos diferentes comportamentos dos agentes implícito na relação empírica entre os preços do petróleo e seus fundamentos, as análises que recorrem ao uso dos dados da CFTC atribuem, ex-ante, cada tipo de agente a um determinado comportamento, utilizando essa hipótese simplificadora como forma de explicitar o comportamento dos agentes. Em oposição às visões analisadas, a análise de TOKIC (2011) quebra esse paradigma ao utilizar os dados da CFTC, mas admitir que não existe uma correspondência biunívoca entre os diferentes tipos de agentes e os diferentes comportamentos.

Em função dessa constatação, a presente Tese propõe que o problema de verificação da influência da especulação financeira sobre o preço do petróleo seja reescrito como um problema mais amplo de identificação do papel do comportamento dos agentes financeiros no processo de determinação do preço do petróleo. Em um primeiro momento, tal proposta justifica-se pela constatação realizada a partir das definições apresentadas por SZADO (2011), que indicam que o comportamento especulativo é apenas um dentre diferentes comportamentos que os agentes podem adotar. Em outras palavras, da mesma forma que um agente disposto a assumir riscos pode ser considerado um agente com um comportamento especulativo, é necessário que exista pelo menos um comportamento oposto capaz de definir o agente não-especulativo.

Além disso, a discussão da Seção 2.1 mostra que a origem da discussão mais intensa sobre a influência da especulação financeira sobre o preço do petróleo no final da década de 2000 tem a sua origem relacionada com o desenvolvimento e aumento da importância do setor financeiro no processo de determinação dos preços do petróleo. Dessa forma, embora os esforços tenham sido canalizados para a questão da especulação financeira, o objeto de interesse é o efeito que essa nova arquitetura do mercado de petróleo possui sobre o movimento dos preços. Como argumento adicional, é possível acrescentar que uma modelagem construída a partir das diferentes

possibilidades de comportamento dos agentes possibilita o teste empírico de hipóteses como a levantada por TOKIC (2011).

Em linha com os pontos discutidos, a presente Tese tem o objetivo de estudar a capacidade que um modelo em que se descreve o comportamento heterogêneo dos agentes possui para nos auxiliar no entendimento dos movimentos dos preços de petróleo nos últimos anos. Indo além da influência da especulação financeira a ideia é identificar se, ao se adotar uma abordagem que admite mais de um comportamento para os agentes, é possível obter modelos que representem de forma mais geral a relação entre as transformações na arquitetura do mercado de petróleo e os movimentos nos preços.

3 - Determinação do preço de ativos financeiros – revisão teórica

O objetivo deste capítulo é apresentar uma fundamentação teórica para a metodologia de modelagem proposta na presente Tese. Os modelos de Agentes Heterogêneos representam uma classe ampla e variada de ferramentas que possibilitam a análise de problemas econômicos onde as diferenças de comportamento entre os diferentes agentes são relevantes para a sua descrição.

Nesse sentido, a próxima seção descreverá brevemente o paradigma moderno da precificação de ativos em finanças, com ênfase especial nas consequências da hipótese dos mercados eficientes enunciada em FAMA (1976). A seção subsequente tratará das críticas à hipótese dos mercados eficientes e suas implicações para a determinação de preços de ativos financeiros. A terceira seção do capítulo destina-se a mostrar como os modelos de Agentes Heterogêneos podem ser utilizados como uma ferramenta de modelagem compatível com essas críticas.

3.1 - A abordagem moderna em finanças – fundamentos da hipótese dos mercados eficientes

Em um dos textos considerados seminais sobre o tema, FAMA (1970) afirma que a principal função dos preços de um ativo em um mercado financeiro é permitir a melhor alocação possível para os recursos dos agentes em face de suas restrições e preferências. Segundo o autor, para que os preços possam exercer essa função é necessário que eles reflitam plenamente toda a informação disponível para os agentes que operam nesse mercado. O mercado em que os preços possuem essa característica é caracterizado como um mercado eficiente.

Em outras palavras, os preços esperados de um ativo em um mercado financeiro eficiente refletem completamente o conjunto de informações que está disponível para os agentes. Dessa forma, flutuações nos preços decorrem da chegada de informação nova aos agentes. Em notação matemática, a hipótese pode ser expressa como:

$$E(p_{t+1}|\theta_t) = [1 + E(x_{t+1}|\theta_t)]p_t \quad (1)$$

Onde:

$E(x_{t+1}|\theta_t)$ corresponde ao retorno esperado no período $t+1$, dado o conjunto de informação disponível em t .

$E(p_{t+1}|\theta_t)$ corresponde ao preço esperado para o ativo no período $t+1$, dado o conjunto de informação disponível em t

p_t corresponde ao preço do ativo no período t.

Embora o enunciado da Hipótese dos Mercados eficientes seja simples, a verificação empírica da ideia de que os preços são capazes de refletir plenamente toda a informação disponível é complicada. Em seu discurso de recebimento do Prêmio Nobel em Economia no final de 2013 (FAMA, 2014) o próprio Eugene Fama afirma que o principal desafio é “tornar a hipótese testável”. Nesse sentido, o autor afirma que a possibilidade empírica de se testar a hipótese dos mercados eficientes requer a adoção de uma hipótese adicional a respeito do modelo que explica a precificação dos ativos.

Ou seja, conhecendo o modelo que rege o comportamento esperado dos preços dos ativos em um mercado eficiente, seria possível analisar empiricamente os preços dos ativos e verificar se eles estão se comportando de acordo com o modelo, validando (ou não) a hipótese. Sendo assim, testar a hipótese dos mercados eficientes significa testar, conjuntamente, a hipótese e o modelo de precificação de ativos utilizado para analisá-la.

Conforme mostra LEROY (1989), um dos primeiros modelos de precificação de ativos utilizado como base para o teste da hipótese dos mercados eficientes foi o modelo de passeio aleatório. Partindo do pressuposto de que as informações existentes estão perfeitamente disponíveis para os agentes e que cada um deles interpreta os seus efeitos sobre o mercado de forma racional, apenas a chegada de novas informações poderia justificar alterações de preços entre um período e outro. Assumindo, adicionalmente, que as informações do mundo chegam até os agentes de maneira aleatória, é razoável supor que os preços dos ativos devam apresentar comportamentos igualmente aleatórios.

O corolário da suposição do parágrafo anterior é o fato de que os mercados eficientes tendem a ter preços que se comportam de forma aleatória através do tempo e independente das realizações passadas. Isso justifica a argumentação feita por FAMA (1965) de que testar empiricamente a hipótese de eficiência de um mercado equivale a testar a aleatoriedade das séries temporais de preços dos ativos negociados no referido mercado. Entre as ferramentas utilizadas para tal o autor destaca a realização de testes estatísticos para identificação de correlação serial nas séries de preços e/ou para a análise da frequência com que ocorrem reversões no sinal da variação dos preços.

Paralelamente, SAMUELSON (1965) mostra que a ideia de que os preços dos ativos deveriam seguir um passeio aleatório entrou em contradição com os modelos baseados em fundamentos de mercado, comuns na prática financeira da época. Como os preços poderiam ser adequadamente antecipados por teorias baseadas em

fundamentos de mercado pelos agentes e, ao mesmo tempo, exibir um comportamento aleatório imprevisível? A solução para essa questão foi associar o comportamento dos preços dos ativos com o conceito probabilístico de Martingales.

Segundo LEROY (1989), um Martingale é definido como um processo estocástico em que o valor esperado da observação $t+1$, condicionado a todas as observações realizadas até o tempo t , equivale ao valor da observação t . Em notação matemática:

$$E(X_{t+1}|X_1, \dots, X_t) = X_t \quad (2)$$

Onde:

$E(X_{t+1}|X_1, \dots, X_t)$ corresponde ao valor esperado do processo estocástico no período $t+1$ condicionado à todas as observações anteriores.

X_t corresponde ao valor do processo estocástico observado em t .

Em seu artigo, SAMUELSON (1965) mostra que um modelo de precificação de ativos que leva em consideração informações a respeito dos fundamentos do mercado pode produzir séries de preços que possam ser caracterizadas como Martingales. Para que isso seja possível, é necessário que não exista uma forma pela qual os agentes utilizem as previsões do modelo de precificação de ativos baseados em fundamentos do mercado para obter ganhos extraordinários, fato que faz com que os retornos extraordinários esperados sejam nulos (um “*fair game*”). Tal demonstração permite reconciliar a relevância dos fundamentos de mercado para a determinação dos preços com o fato de que eles podem exibir comportamentos erráticos e aparentemente aleatórios. A flutuação dos preços seria originária do constante fluxo de novas informações e ajuste dos agentes as novas condições do mercado que surgem a cada momento.

As condições necessárias para que os modelos de fundamento de mercado possam ser associados com as séries de preços que tenham a propriedade de Martingales expressas por SAMUELSON (1965) implicam que os agentes já tenham trazido a valor presente toda a informação disponível sobre as probabilidades que regem o comportamento dos preços no futuro. Conforme mostra LEROY (1989), uma das principais definições da hipótese dos mercados eficientes aplicada atualmente (FAMA, 1976) faz jus a essa implicação ao afirmar que os agentes participantes de um mercado eficiente devem possuir expectativas racionais.

Conforme uma das definições apresentadas em MUTH (1961, pp. 316), a hipótese das expectativas racionais equivale a afirmar que:

“As expectativas das firmas (ou, mais geralmente, a distribuição subjetiva de probabilidade dos resultados) tende a ser distribuída, para um mesmo conjunto de informação, da mesma forma que a previsão da teoria econômica (ou a distribuição “objetiva” da probabilidade dos resultados).” (MUTH, 1961, pp. 316)

Sendo assim, em “mercados eficientes” os agentes são capazes de corretamente antecipar o comportamento futuro dos preços dos ativos com base nas teorias estabelecidas para a determinação do seu valor fundamentalista. Com isso, torna-se impossível que qualquer um dos agentes consiga desenvolver uma estratégia para obter ganhos extraordinários.

LEROY (1989, pp. 1595) aponta que essa correspondência entre as expectativas do conjunto de agentes e as expectativas advindas das teorias econômicas resulta na:

“(...) caracterização antropomórfica do “mercado”: alguém só pode falar de forma não ambígua da informação do “mercado” se, e somente se, todos os agentes forem possuidores do mesmo conjunto de informação(...).” (LEROY, 1989, pp. 1595)

Indo além, e partindo do pressuposto que a informação é o único elemento que rege o comportamento dos agentes, essa correspondência perfeita entre a informação disponível para o universo dos agentes e a informação disponível para o “mercado” permite a construção de modelos com base na hipótese de que um único agente representativo é o suficiente para descrever plenamente o comportamento de um mercado. Conforme mostra KIRMAN (1992) essa forma de pensar tornou comum a construção de modelos econômicos em que as escolhas de um número diverso de agentes em um determinado mercado são agregadas nas escolhas de um único agente representativo.

Dentre as inúmeras críticas ao arcabouço moderno das finanças aqui descrito, o questionamento da ideia de que os mercados podem ser modelados a partir da premissa de um único agente representativo e racional apresenta importância central para o propósito da presente Tese. A seção subsequente apresentará as principais críticas a ambas as hipóteses e as alternativas oferecidas pela literatura que faz esse questionamento.

3.2 - As críticas à abordagem moderna das finanças

3.2.1 - A crítica empírica à hipótese dos mercados eficientes

Conforme é possível ver em MALKIEL (2003), o status dominante das teorias de precificação de ativos financeiros que se construíram a partir da assunção de validade da hipótese dos mercados eficientes motivou um sem número de artigos que buscaram pô-la à prova. Segundo a análise de Malkiel, a linha básica de “ataque” à hipótese dos mercados eficientes é a busca por evidências estatísticas de que existem mercados cujos ativos apresentam retornos com algum grau de previsibilidade. Embora ele afirme que a existência de elementos comportamentais e psicológicos dos agentes seja importante, eles se expressam, primordialmente, através das anomalias empíricas observadas.

A revisão feita por MALKIEL (2003) mostra que as críticas consistem em apontar diversos efeitos observados empiricamente nas séries de preços de ativos que possibilitariam um grau de previsibilidade de retornos, o que não é esperado de uma série com a característica de uma Martingale. Os principais efeitos são mencionados abaixo:

- Existência de um *momentum* de curto prazo -> A evidência de correlações seriais entre os retornos de curto prazo invalidaria a hipótese de que os retornos de um ativo são aleatórios.
- Previsibilidade associada a parâmetros de *valuation* -> Evidências de que os retornos de ativos podem ser previstos a partir do *yield* de dividendos e múltiplos como a razão preço/lucro.
- Efeitos associados às características das empresas -> Os retornos das ações das empresas seriam diferenciados a depender do tamanho da firma, com firmas menores gozando de rendimentos superiores à firmas maiores, para um mesmo perfil de risco.

Em defesa da hipótese dos mercados eficientes, o autor argumenta que as evidências apresentadas sobre esses aspectos, embora numerosas, não seriam robustas o suficiente para justificar o abandono da hipótese em favor de outros programas de pesquisa. Em sua argumentação, a causa das evidências é a existência de algum grau de irracionalidade e imperfeição entre os agentes em determinados mercados. Apesar de existirem, contudo, essas imperfeições e irracionalidades são consideradas extraordinárias e temporárias. Com isso, a ação do tempo e do comportamento racional dos agentes seria capaz de eliminar rapidamente as oportunidades de ganhos extraordinários.

Como evidência em contrário às críticas, é feita uma revisão das análises que comparam a performance obtida por gestores profissionais de fundos com a performance obtida por fundos de investimentos passivos, que recorrem a estratégias de *buy and hold*. A análise aponta que não há uma diferença significativa de performance em favor dos gestores profissionais, que se presume serem mais habilidosos para capturar essas oportunidades de ganhos extraordinários.

A análise feita por SHILLER (2014) é um contraponto importante às opiniões expressas em MALKIEL (2003), na medida em que questiona a previsibilidade das séries de preços dos ativos financeiros como principal parâmetro a ser observado para o teste estatístico da hipótese dos mercados eficientes. Para ele, o poder dos testes estatísticos que tentam identificar se existe algum grau de previsibilidade nas séries de preços de ativos é insuficiente para distinguir os casos em que há baixa previsibilidade dos casos em que não há nenhuma.

Em sua visão, isso ocorre porque as séries que violam a hipótese dos mercados eficientes ainda estão sujeitas a um alto grau de influência de elementos que não são necessariamente previsíveis a partir dos fundamentos de mercado. Questões relacionadas à fatores psicológicos, comportamentos de manada, entre outros, podem fazer com que as séries de preços apresentem baixo ou nenhum grau de previsibilidade, tornando-as muito parecidas com séries aleatórias. Fazendo uma analogia com a econometria de séries temporais, a dificuldade em distinguir as duas situações se assemelha com o baixo poder dos testes estatísticos que buscam distinguir passeios aleatórios de processos auto regressivos univariados cujo coeficiente da primeira defasagem seja muito próximo de 1¹³.

Como alternativa para o teste da hipótese dos mercados eficientes, o autor coloca a importância de se observar a variabilidade das séries de preços. SHILLER (1980) aparece como um dos primeiros estudos nessa trilha. A linha mestra de argumentação do artigo afirma que uma determinada série de preços não pode ser considerada uma Martingale se a sua variância ultrapassar limites superiores e inferiores teoricamente determinados. Usando essa linha de testes, o autor aponta que a hipótese de que os preços em vários mercados são uma Martingale é rejeitada, trazendo elementos para a rejeição da hipótese dos mercados eficientes. Em paralelo a Shiller, LEROY e PORTER (1981) desenvolveram testes estatísticos similares,

¹³ Assim como outros livros-texto em econometria de séries temporais, ENDERS (2010) descreve os elementos necessários para a compreensão da analogia feita por Shiller.

utilizando o mesmo conceito de limites superior e inferior para a variância, com conclusões semelhantes.

LEROY (1989) mostra que os testes mencionados foram alvo de considerável revisão pela literatura, que identificou, dentre outras coisas, um viés em favor da rejeição da hipótese de que os preços seguem uma Martingale. Essas críticas resultaram em ondas de desenvolvimento e aperfeiçoamento dos testes propostos com o intuito de eliminar as imperfeições identificadas. Apesar da eliminação do viés mencionado anteriormente, os resultados dos novos testes continuaram indicando a rejeição da hipótese de que os preços seguem uma Martingale, produzindo evidência empírica contra a hipótese dos mercados eficientes. Em uma análise mais recente, COCHRANE (2008) aponta que as mesmas evidências ainda persistem nos estudos empíricos mais atuais.

Diferente da crítica feita por Malkiel, que estabeleceu um caráter transitório e extraordinário às violações empíricas da hipótese dos mercados eficientes, a trilha inaugurada por Shiller, Leroy e Porter mostra que existem violações empíricas à hipótese dos mercados eficientes de caráter mais duradouro, que sobreviveram a uma intensa revisão por parte da literatura. Como coloca COCHRANE (2008), as evidências sugerem que continua sendo válido perguntar quais são os fatores que fazem os preços se movimentarem com mais frequência e intensidade do que o previsto pela teoria.

Relembrando a advertência feita por Fama de que a hipótese dos mercados eficientes é, na verdade, uma hipótese conjunta de eficiência dos mercados e de um modelo de precificação dos ativos, é sempre possível atribuir as evidências empíricas a um problema no modelo de precificação de ativos e não na hipótese de eficiência dos mercados. Nesse sentido, não há uma justificativa inequívoca para abandonar a teoria tradicional de precificação de ativos e as demais premissas que ela engloba.

Contudo, além dos testes empíricos com as séries de preços, que se limitam a testar essa hipótese conjunta mencionada no parágrafo anterior, a literatura encontrou evidências no comportamento humano que questionam premissas mais básicas dos modelos baseados na hipótese dos mercados eficientes. As críticas relacionadas às hipóteses do comportamento humano serão descritas em maiores detalhes na subseção seguinte.

3.2.2 - A crítica ao *homo economicus* e ao agente representativo

As evidências contra e a favor da hipótese dos mercados eficientes, apresentadas na subseção anterior, sugerem um questionamento das premissas mais básicas que a sustentam: a noção de racionalidade¹⁴ dos agentes e a ideia de que existe um agente representativo capaz de sumarizar o comportamento do universo de agentes. Com relação à noção de racionalidade, as críticas mais relevantes partem da literatura que buscou estudar o processo de tomada de decisão por parte dos agentes econômicos. A crítica à noção de que existe um agente representativo, por sua vez, deriva da crítica ao pressuposto de agentes perfeitamente racionais. Essa crítica sugere a existência de uma diversidade de comportamentos humanos nos mercados que não poderiam ser simplesmente agregados em um agente representativo homogêneo.

Buscando construir uma ponte entre o entendimento do processo de tomada de decisão para a economia e para a psicologia, SIMON (1955) apresenta o conceito de racionalidade limitada, onde a descrição de um comportamento racional pode considerar diferentes formas de limitação ao comportamento humano, sejam elas oriundas do ambiente externo ou do próprio indivíduo. Essas limitações, que se referem à indisponibilidade de informação completa sobre um determinado problema e às limitações na capacidade de processamento de informação, impedem que o indivíduo busque uma solução ótima para um determinado problema.

Em função disso, SIMON (1955) aponta que a estratégia para resolução de problemas com essas características passa pela identificação de uma heurística de seleção de alternativas que atendam a critérios que permitam identificar uma dada alternativa como satisfatória. A resolução de um problema nessas condições depende de dois elementos: um processo de busca e uma aspiração. O processo de busca consiste no método utilizado pelo indivíduo para escolher diferentes soluções alternativas antes de submetê-las ao julgamento da sua aspiração, que definirá se cada uma das soluções escolhidas é ou não satisfatória. Como o processo de busca geralmente representa um esforço para o indivíduo, a primeira solução encontrada e considerada satisfatória é a escolhida.

SIMON (1972) exemplifica esse fenômeno de forma concreta ao mostrar o problema do jogador de xadrez que, embora precise tomar suas decisões em um ambiente limitado e com regras bem definidas, enfrenta o problema de avaliar a melhor

¹⁴ Aqui a racionalidade pode ser entendida como a habilidade que os agentes possuem de corretamente antecipar o comportamento futuro dos preços dos ativos com base nas teorias estabelecidas para a determinação do seu valor fundamentalista. MUTH (1961)

alternativa dentre um número de alternativas distintas da ordem de grandeza de 10^{120} para realizar a melhor jogada possível. Tamanha complexidade torna impossível para o ser humano (e mesmo para computadores) avaliar todas as possibilidades disponíveis e selecionar aquela que é ótima. A estratégia alternativa para lidar com isso, por sua vez, passa por identificar um conjunto de jogadas razoáveis e escolher aquela que atende mais adequadamente a um determinado critério de satisfação.

Também expondo as peculiaridades humanas no processo de tomada de decisão, o texto escrito por KAHNEMAN e TVERSKY (1979) apresenta a Teoria da Perspectiva. Nela os autores mostram como o comportamento humano diante da necessidade de tomar decisões sob risco difere do que foi previsto pela teoria tradicional da utilidade esperada de Von Neuman-Morgenstern¹⁵. Entre os principais resultados dos estudos realizados por Kahneman e Tversky está o fato de que, em problemas de decisão sob risco, as pessoas baseiam as suas escolhas na perspectiva de ganhos e perdas de cada alternativa, apresentam comportamentos distintos de aversão a risco diante de possibilidades de ganhos ou perdas e normalmente superestimam as probabilidades de eventos extremos.

A literatura que se construiu a partir dessa análise inicial contribuiu para consolidar o campo de pesquisa da economia comportamental, que se ocupou de identificar características do raciocínio humano incompatíveis com um comportamento racional maximizador alinhado com a teoria econômica tradicional e relacioná-las com violações das suas principais previsões. HIRSHLEIFER (2015), por exemplo, descreve de forma sucinta os diferentes tipos de comportamentos e vieses cognitivos que podem afetar o comportamento dos agentes no mercado financeiro. Excesso de confiança, aversão a perdas e a influência dos sentimentos na tomada de decisão estão entre os exemplos de comportamentos apresentados pelo autor.

Ainda no campo da tomada de decisão individual GIGERENZER e TODD (1999) mostram que, ao invés do comportamento racional maximizador, o ser humano desenvolveu um conjunto de estratégias para a tomada de decisão que levam em consideração as características dos problemas e as limitações da cognição humana. O programa de pesquisa que estuda a chamada heurística “rápida e frugal” de tomada de decisão foi capaz de identificar uma série de pequenos comportamentos diante dos mais

¹⁵ Kahneman e Tversky expuseram indivíduos a uma série de problemas distintos de decisão sob risco onde as decisões das pessoas analisadas apresentaram inconsistências quando o mesmo problema foi apresentado de formas distintas e em diversos casos o pressuposto da transitividade das preferências foi violado. Esses resultados contradizem dois importantes pressupostos teóricos da microeconomia neoclássica.

variados tipos de problemas que permitem ao indivíduo encontrar uma solução rapidamente e com um baixo custo cognitivo.

Diferente do que sugere o termo “racionalidade limitada” cunhado por SIMON (1955) e da ideia de que o ser humano apresenta comportamentos irracionais defendida pelos economistas comportamentais, Gigerenzer afirma que a heurística “rápida e frugal” representa uma vantagem evolutiva da espécie humana. Isso é possível porque as decisões tomadas com base nessa “caixa de ferramentas”¹⁶ de estratégias de decisão, acabam por se revelar superiores em uma série de contextos, tanto pelo custo cognitivo quanto pela qualidade da decisão tomada. NETH e GIGERENZER (2015) mostram que essa superioridade ocorre, principalmente, em contextos onde há elevado grau de incerteza.

Além da divergência com relação ao comportamento dos agentes, outra frente que funciona como possível explicação para que os mercados violem as previsões da teoria econômica tradicional em finanças diz respeito à forma como esses agentes interagem entre si e com o mercado. SOROS (2009) argumenta que a principal dificuldade em se antecipar o movimento dos mercados é o fato de que os agentes econômicos alteram o funcionamento do mercado ao tentar prever os seus desdobramentos e agir sobre eles. Essa dificuldade representa o conceito de reflexividade, onde as ações dos agentes exercem influência sobre o ambiente e produzem um *feedback* para eles. O conceito de reflexividade, por sua vez, está na raiz do conceito de incerteza (ou falibilidade) em que os agentes não são capazes de prever o que vai acontecer com o ambiente em função da complexidade da relação entre as suas ações e o desenrolar dos acontecimentos.

ROSENBERG (2014), por sua vez, argumenta que os conceitos de Reflexividade e Incerteza apresentados em SOROS (2009) explicam por que o estado de equilíbrio da economia neoclássica está sendo permanentemente alterado, produzindo fenômenos localizados no tempo como bolhas e crises. Mais do que bolhas e crises, a imprevisibilidade das consequências das estratégias adotadas produz bastante variabilidade entre os agentes econômicos. Ainda segundo Rosenberg, esta diversidade é um dos principais requisitos que permitem ao ambiente econômico evoluir e se comportar segundo mecanismos Darwinianos, onde há uma grande variabilidade de

¹⁶ Em vários de seus textos, como é possível ver em GIGERENZER (2001), o autor faz referência a uma “caixa de ferramentas” de estratégias de tomada de decisão que podem ser utilizadas em diferentes contextos.

comportamentos e estratégias e os mais adaptados “sobrevivem” em um determinado momento.

KIRMAN (2006) também faz uma analogia Darwiniana para explicar o processo de evolução dos mercados econômicos e justificar a heterogeneidade dos agentes. Em sua argumentação, ele mostra que autores que representam o paradigma da escolha racional e da eficiência dos mercados utilizaram o conceito de seleção natural e adaptação para explicar porque os indivíduos dotados de um comportamento racional maximizador são uma aproximação razoável para representar a realidade. Segundo essa linha de pensamento, os indivíduos não racionais já foram devidamente excluídos do mercado em função de sua performance inferior, levando a mercados formados por uma maior homogeneidade entre os agentes.

A crítica de KIRMAN (2006) a essa linha de pensamento está fundamentada em dois elementos. Na noção de que o ambiente (mercados) está sofrendo constante modificação e na ideia de que a adaptação dos agentes a essa mudança ocorre em um ritmo mais lento que o das alterações ambientais. Com isso, embora exista uma competição eliminando os indivíduos menos adaptados, as constantes mudanças no ambiente alteram as “regras do jogo” mudando o perfil dos indivíduos mais aptos para a sobrevivência. A demora dos agentes em se adaptar perfeitamente a essas mudanças faz com que o estado de equilíbrio com indivíduos homogeneousmente bem adaptados seja inatingível, tornando a heterogeneidade dos agentes a regra.

Embora seguindo argumentações diferentes, as análises de KIRMAN (2006) e ROSENBERG (2014) chegam ao resultado semelhante de que os sistemas econômicos são formados por agentes heterogêneos. Essa heterogeneidade, que se realiza na dimensão do comportamento dos agentes, é suportada pela evidência de que os agentes adotam uma miríade de estratégias para lidar com problemas complexos e ambientes incertos. Além disso, é importante ressaltar que existem argumentações em favor da ideia de que sistemas econômicos formados por agentes heterogêneos não só existem, mas tendem a ser mais resilientes do que sistemas formados por agentes homogêneos.

Um exemplo desse tipo de argumentação é a análise desenvolvida por KAUÊ DAL'MASO PERON et al. (2012). Os autores representam um mercado financeiro através da modelagem de redes complexas de agentes a partir da informação contida nas matrizes de correlação entre os preços de diferentes ativos. Ao analisarem a evolução dinâmica e topológica das redes construídas, os autores observam que as maiores variações ocorrem durante momentos de instabilidade financeira. E é

exatamente nestes momentos que há uma maior evidência de comportamento coletivo entre os agentes e os ativos. Em outras palavras, há uma maior homogeneidade no comportamento dos agentes, com correlações mais elevadas entre os ativos.

Em virtude das argumentações apresentadas acima, faz sentido que a abordagem tradicional das finanças, que se fundamenta na representação de um agente típico com um comportamento racional maximizador único seja substituída por uma abordagem que leve os elementos demonstrados acima em consideração na hora de representar e modelar os problemas econômicos. Nas próximas seções serão discutidos os fundamentos dos modelos de Agentes Heterogêneos, que se apresentam como candidatos para essa substituição.

3.3 - Modelos de Agentes Heterogêneos como ferramenta de modelagem

3.3.1 - O que constitui um Modelo de Agentes Heterogêneos?

Os Modelos de Agentes Heterogêneos (HAM) são uma tentativa válida de endereçar as críticas à finança tradicional discutidas nas seções anteriores. Conforme mostra LEBARON (2006), esse tipo de modelagem faz parte da família de Modelos Baseados em Agentes (ABM – Agent Based Modelling, na sigla em inglês)¹⁷ que se caracteriza pela representação de dois ou mais tipos de agentes que interagem entre si em um ambiente. HOMMES (2005) restringe o escopo dessa definição e afirma que os modelos de Agentes Heterogêneos são versões mais restritas e geralmente analiticamente tratáveis dos modelos Baseados em Agentes, que usualmente se caracterizam por grandes sistemas computacionais de simulação onde um número grande de agentes interagem entre si para representar um ambiente social/ecológico.

Conforme fica claro nos modelos apresentados por Hommes em sua revisão bibliográfica, existem alguns elementos que são necessários para a caracterização desse tipo de modelagem e são comuns aos mais variados exemplos apresentados. A partir disso, é possível construir uma definição mais formal para os HAMs, que representam a união dos elementos abaixo:

1. Regras de comportamento: São as regras que definem como os agentes tomam as suas decisões no ambiente econômico.

¹⁷ Na literatura é comum o uso tanto dos termos Agent-Based Modelling (ABM) e Agent-Based Computational Economics (ACE) para se referir a essa família de modelos. Por ser menos restritivo, optarei pelo uso do termo Agent-Based Modelling (ABM) ao longo do texto.

2. Mecanismo de precificação: Em modelos econômicos, representa o mecanismo pelo qual as decisões tomadas pelos agentes são traduzidas no comportamento dos preços do ativo analisado.
3. Mecanismo de evolução/aprendizado: representa a forma como os agentes avaliam as suas ações passadas e decidem se desejam mudar ou não o seu comportamento nos períodos futuros.

É possível relacionar esses três elementos de forma clara com as críticas apresentadas na seção anterior. As regras de comportamento dos agentes, por exemplo, podem ser definidas de modo a representar agentes que se utilizem de heurísticas de decisão como as descritas por GIGERENZER (2001) e SIMON (1955). A diversidade de agentes e a existência de mecanismos de evolução/aprendizado, por sua vez, podem ser interpretados como um relaxamento da hipótese de que o universo de agentes pode ser reduzido a um único agente representativo.

As seções subsequentes expandirão as ideias enunciadas no parágrafo anterior. As subseções 3.3.2, 3.3.3, e 3.3.4 apresentarão a diversidade existente na literatura no que tange, respectivamente, as regras de comportamento dos agentes, os mecanismos de precificação e os mecanismos de evolução/aprendizado. A subseção 3.3.5 encerra o capítulo discutindo as estratégias utilizadas para a estimativa empírica dos modelos de Agentes Heterogêneos. Essa discussão, por sua vez, servirá como ferramental para o entendimento da literatura que utiliza os HAMs para a análise do mercado de petróleo, tarefa a ser empreendida no capítulo 4.

3.3.2 - Estratégias de modelagem do comportamento dos diferentes tipos de agentes

Conforme descrito na seção anterior, as regras de comportamento dos agentes terão influência direta sobre a forma como eles tomam suas decisões no ambiente econômico. Uma das principais contribuições dos modelos de agentes heterogêneos está na possibilidade de refletir os efeitos da existência de dois ou mais tipos diferentes de comportamentos em um determinado mercado. Como é possível notar desde o trabalho de ZEEMAN (1974), a dimensão em que essa heterogeneidade se expressa diz respeito à coexistência entre comportamentos estabilizadores e desestabilizadores em um mesmo universo de agentes.

Com esse tipo de heterogeneidade, é possível manter algum grau de comparabilidade com a abordagem mais tradicional do agente representativo, na

medida em que, em vários exemplos, o comportamento estabilizador nada mais é do que o comportamento racional de um agente representativo típico. O acréscimo de um outro tipo de agente, com um comportamento desestabilizador é o suficiente para introduzir novas dinâmicas e aproximar os resultados das evidências empíricas que suscitaram as críticas ao modelo tradicional.

Conforme mostra HOMMES (2005), o uso da dicotomia entre “Fundamentalistas” e “Grafistas”¹⁸ se tornou um paradigma para os modelos de Agentes Heterogêneos mais simplificados e ponto de partida para a maior parte das análises. Nessa dicotomia, os “Fundamentalistas” atuam como os agentes estabilizadores enquanto os “Grafistas” adotam heurísticas mais simplificadas e/ou regras de análise técnica para formar suas expectativas, produzindo um comportamento desestabilizador no sistema.

Com relação à forma de representação desse comportamento, os modelos de agentes heterogêneos necessitam da especificação de uma função de demanda pelo ativo por parte de cada um dos tipos de agentes representados. Para o atendimento desse requisito, alguns autores como CHIARELLA e HE (2002), por exemplo, constroem a função de demanda a partir de um problema de maximização da utilidade esperada resultante da escolha do agente para a composição de uma cesta compreendendo um ativo arriscado e outro livre de risco. Conforme descrito pelos autores e em livros textos de Teoria Microeconômica (MAS-COLELL et al., 1995), esse caminho de construção resulta em funções de demanda expressas como uma função positiva do retorno esperado e negativa da variância associada ao ativo de risco¹⁹, que é o ativo para o qual o mercado está sendo modelado. Autores como ELLEN e ZWINKELS (2010), por outro lado, não apresentam uma descrição detalhada do problema de maximização de utilidade esperada e assumem, diretamente, que a demanda pelo ativo é uma função linear do retorno esperado, sem explicitar maiores considerações.

Nesse contexto, a diferenciação entre os tipos de agentes usualmente é feita através da especificação de como as expectativas são formadas. Nos modelos mais tradicionais, que utilizam expectativas racionais (MUTH, 1961), a expectativa para o preço futuro do ativo de risco corresponde exatamente à sua estimativa fundamentalista. Essa premissa pode ser flexibilizada para representar diferentes comportamentos.

Para a representação de comportamentos estabilizadores associados aos agentes “fundamentalistas” um dos expedientes mais comuns é o uso de expectativas

¹⁸ Na literatura há a referência ao termo em inglês “Fundamentalist-Chartist”.

¹⁹ Como forma de simplificar as demonstrações analíticas, é comum que o modelo seja construído considerando que o ativo livre de risco ofereça retorno nulo.

adaptativas onde os agentes acreditam que o preço de mercado convergirá para o valor “fundamental” do ativo. Nessa situação, o valor “fundamental” é definido como o preço teórico que aquele ativo teria se fossem considerados apenas os seus fundamentos de mercado. Se o ativo em questão for um preço de ação, por exemplo, o valor “fundamental” estará relacionado com o fluxo de caixa descontado dos dividendos esperados. Se for uma taxa de câmbio, esse valor poderá estar relacionado a uma paridade de taxa de juros da moeda em questão com a moeda americana. Se for um título público, o valor estará ligada ao fluxo futuro de pagamentos e assim sucessivamente.

No caso das commodities, e em particular do petróleo, que é o alvo da presente Tese, não há uma indicação teórica consolidada para a melhor forma de expressar o seu valor “fundamental”. FRITZ et al. (2015), em face dessa incerteza, constroem modelos utilizando diferentes formas de especificar o valor fundamental do petróleo e mostram que há um impacto significativo da especificação utilizada sobre os resultados finais de suas análises. As três diferentes especificações utilizam: a) um valor fundamental baseado em variáveis do mercado de petróleo; b) uma média móvel deslocada dos preços que, para cada período t , utiliza valores posteriores e anteriores a t ; e; c) uma linha de tendência quadrática estimada a partir da série histórica dos preços.

Além do ajuste nas expectativas, a forma funcional da função de demanda pode ser ajustada para representar características específicas de comportamento. DAY e HUANG (1990), por exemplo, introduzem um fator multiplicando o componente que descreve o retorno esperado com o intuito de representar uma maior propensão do agente fundamentalista a demandar o ativo caso o preço de mercado esteja excessivamente distante do valor fundamental. Em um outro exemplo, REN e LI (2012) introduz um agente fundamentalista cuja função utilidade está baseada na Teoria das Perspectivas (KAHNEMAN; TVERSKY, 1979). O problema de maximização de utilidade resolvido a partir da função de utilidade ajustada resulta no acréscimo de um coeficiente na função de demanda pelo ativo no caso em que é esperada uma redução da riqueza do agente. Segundo os autores, esse coeficiente mede a intensidade da aversão a perdas financeiras descrita pela Teoria das Perspectivas.

Com relação aos agentes “grafistas” também há uma diversidade razoável para a representação do seu comportamento. Com o intuito de evidenciar o comportamento desestabilizador, as expectativas desse tipo de agente geralmente são representadas como heurísticas simplificadas de comportamento, usualmente algum tipo de

comportamento extrapolativo. O uso do termo “grafista” remonta ao comportamento dos agentes econômicos que recorrem à análise gráfica para identificar tendências e padrões de comportamento em séries de preços de ativos.

LO et al. (2000) apresentam uma tentativa de modelar o comportamento dos agentes “grafistas” de forma mais fidedigna às ferramentas usualmente utilizadas pelos praticantes da análise técnica. Entendendo a análise técnica como uma atividade de reconhecimento de padrões em gráficos e a sua utilização para a formação de expectativas, os autores recorreram a técnicas de estatística não-paramétrica para o reconhecimento de padrões em séries temporais com o intuito de mimetizar essa atividade. Embora os seus resultados sejam estatisticamente significativos, a aplicação da técnica e a multiplicidade de padrões de análise técnica que podem ser modelados dificultam a sua aplicação em modelos de agentes heterogêneos, que possuem a premissa de serem analiticamente tratáveis. A discussão da literatura apresentada à seguir evidenciará isso na medida em que o recurso à mecanismos simplificados de formação de expectativa tornou-se o padrão para representar o comportamento dos agentes “grafistas” nesse tipo de modelagem.

FRANKEL e FROOT (1986), ao estudarem o mercado internacional de câmbio do início dos anos 1980, notam que as expectativas de depreciação do dólar são diferentes a depender do horizonte de previsão investigado em pesquisas de expectativa com agentes do mercado. Além da heterogeneidade, os autores notaram que as expectativas de mais curto prazo (1 a 2 semanas) acreditavam numa extração da tendência cambial recente enquanto as expectativas de mais longo prazo (até 6 meses) esperavam uma reversão da tendência, indicada por todos os fundamentos do mercado. É importante notar que o fato de que os fundamentos indicavam uma reversão da tendência levou os autores a enunciarem uma série de paradoxos entre os fundamentos e a realidade que a presença de agentes com um comportamento extrapolativo ajudaria a estudar. Nesse caso em particular, o comportamento extrapolativo foi atribuído aos agentes “grafistas” pelo simples fato de que estas eram as expectativas de curto prazo que constavam nas pesquisas.

ALLEN e TAYLOR (1990) apresentam um estudo mais detalhado da participação dos “grafistas” no mercado internacional de câmbio. Em um primeiro momento há um esforço de descrever melhor o comportamento desse grupo. Ao contrário do sugerido em FRANKEL e FROOT (1986), os “grafistas” podem adotar um comportamento bastante diversificado, extrapolando tendências recentes ou identificando motivação para uma reversão do comportamento de mercado. Isso se deve à miríade de padrões

que podem ser identificados nos gráficos das séries históricas, bem como à subjetividade da análise, que possibilita que dois agentes apresentem interpretações distintas para um mesmo gráfico.

Nesse contexto, os autores apresentam diferentes tipos de formação de expectativa que podem ser atribuídos aos “grafistas” e testam empiricamente a sua conexão com as projeções de agentes coletadas do mundo real através de pesquisa. Os cinco tipos possíveis identificados pelos autores são descritos abaixo:

Expectativas Estáticas:

$$P_{t+1}^e - P_t = 0 \quad (3)$$

Expectativas “Bandwagon”:

$$P_{t+1}^e - P_t = \alpha \Delta P_t, \alpha > 0 \quad (4)$$

Expectativas Extrapolativas:

$$P_{t+1}^e = (1 - \beta)P_t + \beta P_{t-1}, 1 > \beta > 0 \quad (5)$$

Expectativas Adaptativas:

$$P_{t+1}^e = P + \gamma(P_t - P_t^e), \gamma > 0 \quad (6)$$

Expectativas Regressivas:

$$P_{t+1}^e - P_t = -\theta(P_t - \bar{P}_t), \theta > 0 \quad (7)$$

Onde:

P_i^e é a expectativa de preços no período i

P_i é o preço realizado no período i

\bar{P}_i é o preço médio realizado até o período i

ΔP_i é a variação de preços entre os períodos i-1 e i

α representa o percentual das variações passadas que é repassado para a expectativa

β representa o peso dado para cada período na formação de expectativas extrapolativas

γ representa a velocidade de adaptação das expectativas, quanto maior, mais rápida a adaptação

θ representa a velocidade de reversão à média das expectativas regressivas

Entre os tipos de expectativas analisados, o segundo (Equação 4) possui uma maior tendência a apresentar uma variabilidade excessiva, na medida em que as expectativas tendem a variar com uma intensidade maior do que os preços realizados. Em todos os outros casos a elasticidade das expectativas com respeito a variações nos preços históricos é equivalente a 1 (Equação 3) ou inferior a 1 (Equações 5, 6 e 7),

fazendo com que sua variabilidade seja igual ou inferior à do mercado. Na situação analisada por Allen e Taylor, os resultados empíricos mostram que não é possível rejeitar a hipótese de que a maior parte dos “grafistas” entrevistados adota o primeiro caso em detrimento dos outros, indicando que as previsões desse grupo não tendem a apresentar uma variabilidade superior à do próprio mercado. Esse resultado apresenta um indicativo de que os grafistas podem ter um comportamento favorável à estabilização do mercado. Contudo, os autores mencionam que o potencial desestabilizador dos grafistas permanece, independente do tipo de mecanismo de formação de expectativas, no fato de que todos os mecanismos ignoram dados a respeito dos fundamentos do mercado em questão.

Aos resultados apresentados por ALLEN e TAYLOR (1990) combina-se a conclusão da pesquisa apresentada por TAYLOR e ALLEN (1992) em que uma grande proporção dos participantes entrevistados no mercado cambial na bolsa de Londres utiliza a análise gráfica de alguma forma em suas previsões. Por causa disso, esses diferentes tipos de mecanismos de formação de expectativas usualmente aparecem associados ao comportamento dos agentes “grafistas” em modelos de agentes heterogêneos na literatura, com os autores sendo frequentemente citados como embasamento teórico para a modelagem utilizada.

A título de exemplo, entre os textos citados até o momento na presente seção, é possível mostrar que praticamente todos utilizaram um ou mais dos mecanismos mencionados por Taylor e Allen para modelar as expectativas dos agentes “grafistas”. O texto de DAY e HUANG (1990), que é contemporâneo ao artigo de Taylor e Allen, utiliza um comportamento de expectativa adaptativa para os seus beta-investidores não fundamentalistas. CHIARELLA e HE (2002), FARMER e JOSHI (2002), CHIARELLA et al. (2008) e REN e LI (2012) estão entre os autores que modelam os “grafistas” como um tipo de agente que extrapola tendências de curto prazo. JOËTS (2015) pode ser entendido como uma exceção à regra no sentido em que os “grafistas” de seu modelo respondem a diferença entre as médias móveis de curto e longo prazo para formarem suas expectativas de futuro.

3.3.3 - Como e porque os agentes mudam de comportamento ao longo do tempo

A seção anterior discutiu as diferentes formas de modelar o comportamento dos agentes no modelo de agentes heterogêneos. Um outro importante aspecto desse tipo de modelagem diz respeito às dinâmicas de evolução e aprendizagem dos agentes.

Conforme mostra HOMMES (2005), a evolução e a aprendizagem residem no fato de que os agentes podem avaliar o seu comportamento ao longo do tempo e modificá-lo. A proposta da presente seção será a de apresentar exemplos de mecanismos descritos na literatura para modelar a forma e as razões pelas quais os agentes modificam o seu comportamento ao longo do tempo.

Entre os mecanismos presentes na literatura relacionada aos modelos de agentes heterogêneos, a proposição feita por BROCK e HOMMES (1997) é uma das mais presentes. Brock e Hommes afirmam que os agentes econômicos avaliam a performance passada do seu comportamento através de uma métrica definida, usualmente uma medida de rentabilidade. A opção pela mudança ou não de estratégia de comportamento, por sua vez, será determinada por uma função que relaciona o valor da métrica de performance com a sua probabilidade de mudança de comportamento. Em seu artigo os autores ajustam um modelo multinomial logit para relacionar a lucratividade passada de um comportamento com a probabilidade de que ele seja adotado pelos agentes. A Equação 8 abaixo descreve esse relacionamento, com o parâmetro β indicando a velocidade com que os agentes mudam de comportamento em função de uma reversão da rentabilidade dos diferentes tipos de comportamento. Um valor de $\beta=0$ está associado com uma divisão estática entre os diferentes tipos de comportamento enquanto um valor de $\beta=\infty$ está associado com mudanças instantâneas onde todos agentes adotam um dos tipos de comportamento.

$$f_1^t = \frac{\exp(\beta x_1^{t-n})}{\exp(\beta x_1^{t-n}) + \exp(\beta x_2^{t-n})} \quad (8)$$

Onde:

f_1^t é a fração dos agentes que adota o comportamento 1 no período t

x_1^{t-n} é o valor da métrica de avaliação da performance passada associado ao comportamento 1

x_2^{t-n} é o valor da métrica de avaliação da performance passada associada ao comportamento 2

β é o parâmetro que mede a intensidade com que os agentes respondem a uma diferença relativa na avaliação de performance entre os comportamentos dos agentes.

Uma das principais questões relacionadas ao mecanismo proposto por BROCK e HOMMES (1997) está na janela histórica que os agentes utilizam para avaliar a medida de performance do seu comportamento. Em sua formulação original, Brock e

Hommes indicam que os agentes utilizam uma média ponderada de todo o histórico para avaliar a performance do seu comportamento passado, sem contudo detalhar como essa ponderação é realizada. CHIARELLA et al. (2008) e CHIARELLA et al. (2014), em uma interpretação de que a memória dos agentes é limitada e os eventos mais recentes possuem um peso maior, utilizam uma série geometricamente declinante para ponderar as observações passadas em sua métrica de performance. ELLEN e ZWINKELS (2010), por sua vez, escolhem um caminho distinto ao limitar o horizonte de avaliação do histórico a um número definido de períodos, mantendo essa janela de avaliação fixa.

JOËTS (2015) também utiliza um mecanismo similar ao proposto por Brock e Hommes para modelar o mecanismo de avaliação e mudança de comportamento dos agentes. Contudo, sua análise difere da proposta original ao utilizar uma métrica de performance que difere de uma simples mensuração do lucro obtido a partir de um tipo de comportamento. Em sua análise ele considera que os agentes irão escolher entre um comportamento e outro com base no grau de arrependimento associado às suas escolhas passadas, mesclando componentes cognitivas e emocionais. A mensuração desse arrependimento está atrelada à função que descreve a utilidade obtida a partir dos diferentes tipos de comportamento e faz com que o arrependimento por ter adotado uma estratégia seja o motivador para aumentar a probabilidade de que o agente adote a estratégia oposta. A função que liga à métrica de performance ao comportamento é a mesma já descrita na Equação 8.

Diferindo do mecanismo proposto por BROCK e HOMMES (1997), HOMMES (2001) descreve uma métrica de performance relacionada ao quanto os preços do ativo em questão desviaram do valor fundamental do ativo baseado em expectativas racionais. Dessa forma, quanto mais o preço desviou do seu valor fundamental, maior o incentivo para que os agentes acreditem que ele retomará para essa referência, motivando mudanças de comportamento que signifiquem o abandono de estratégias não fundamentalistas. Essa abordagem é utilizada por HE e WESTERHOFF (2005) e REITZ e SLOPEK (2008) sem que sejam feitas grandes alterações à proposição inicial. Embora a sua formulação seja atrativa do ponto de vista teórico, a utilização desse mecanismo pressupõe a existência de conhecimento a respeito do valor fundamentalista do ativo por parte de todos agentes.

O mecanismo de interação e recrutamento, proposto por KIRMAN (1993), difere completamente do paradigma em que a performance passada dita a mudança do comportamento dos agentes. Na visão do autor, o comportamento dos agentes é modificado pela dinâmica aleatória de encontros e interações entre os agentes que

podem resultar em uma mudança de comportamento. Conforme descrito por HOMMES (2005) quanto maior a quantidade de agentes adeptos de um tipo de comportamento, maior a probabilidade de que essas interações aleatórias resultem em novos adeptos para aquele tipo de comportamento. Essa característica faz com que, dinamicamente, os agentes se aglomerem ao redor de um determinado tipo de comportamento. Esse mecanismo aparece como uma possibilidade de modelagem cujos resultados são consistentes com os fenômenos descritos em ALLEN et al. (2006), onde um único sinal público é o suficiente para que as expectativas dos agentes se aglomerem em torno de um determinado ponto focal.

Apesar da existência de diferentes tipos de mecanismos que governam a mudança de comportamento dos agentes, há exemplos de estudos na literatura onde essa possibilidade não é considerada, sendo essa uma alternativa possível de modelagem. Entre os exemplos apresentados até agora no capítulo, DAY e HUANG (1990), FARMER e JOSHI (2002) e REN e LI (2012) focam na análise dos resultados advindos da simples coexistência de dinâmicas de comportamento distintas entre os agentes, sem necessariamente propor um mecanismo de variação de comportamento.

3.3.4 - O mecanismo de precificação dos ativos

O último elemento que compõe os Modelos de Agentes Heterogêneos a ser descrito nesse capítulo corresponde ao mecanismo pelo qual é realizada a precificação do ativo cujo mercado é modelado. Esse mecanismo corresponde à(s) equação(ões) do modelo que descrevem como o comportamento dos agentes se traduz em flutuações nos preços. Conforme mostra HOMMES (2005), a literatura que utiliza os modelos de agentes heterogêneos como ferramenta de análise não apresenta uma grande variabilidade na descrição do mecanismo de precificação de ativos. Isso provavelmente se deve ao fato de que essa literatura apresenta uma preocupação maior com as consequências do comportamento dos agentes em detrimento de outras características institucionais do mercado²⁰.

Nesse sentido, a literatura dos Modelos de Agentes Heterogêneos utiliza com frequência a ideia de que os preços de um determinado ativo são consequência das ações de um *market maker*, conforme descrito em DAY e HUANG (1990), por exemplo. A função desse agente é a de mensurar a demanda dos participantes do mercado por

²⁰ Conforme mostram KAHNEMAN e SMITH (2002) existem áreas de pesquisa, como a teoria dos leilões, em que os impactos do mecanismo de precificação sobre o mercado são o elemento central de estudo.

um ativo e compará-la com a oferta do mesmo ativo, suprindo o mercado em caso de excesso de demanda, ou absorvendo a oferta excedente no caso oposto. Esse agente será descrito por funções lineares de oferta e demanda que explicitam a que preço eles estão dispostos a ofertar o suficiente para satisfazer o excesso de demanda ou absorver a oferta excedente²¹. O preço praticado por esse agente, que atua na margem para equilibrar o mercado, por sua vez, será o preço de mercado do ativo.

Ainda que descrito e representado de formas distintas, todos os exemplos da literatura que relacionam o excesso de demanda dos diferentes tipos de participantes do mercado com o preço de mercado através de uma função linear adotaram concepção similar à descrita no parágrafo anterior. Livros-texto de teoria microeconômica como MAS-COLELL et al. (1995), mostram que tal mecanismo de precificação é compatível com os resultados da formação de preços em um mercado competitivo onde é adotada a premissa de que a renda não influencia no comportamento de mercado dos agentes. Dessa forma artigos como os de, por exemplo, BROCK e HOMMES (1997), CHIARELLA e HE (2002), HE e WESTERHOFF (2005), ELLEN e ZWINKELS (2010) e FRITZ et al. (2015), utilizam essa lógica para a definição do mecanismo de precificação dos ativos estudados.

3.3.5 - Estimação empírica dos modelos de agentes heterogêneos

Depois de definida a estrutura de um modelo de agentes heterogêneos, faz-se necessário validá-lo perante a realidade a fim de assegurar a sua utilidade. Em virtude da natureza relativamente recente do uso de modelos de agentes heterogêneos, existem poucos textos que fazem uma revisão da literatura dedicada a esse tipo de modelagem. No que diz respeito, em particular, à estimação empírica dos modelos de agentes heterogêneos, uma das principais referência é o texto de CHEN et al. (2012), que estuda a relação entre modelos de Agentes Heterogêneos e a econometria. Parte da discussão da presente seção será baseada nas ideias apresentadas pelos autores no texto mencionado.

²¹ Em bolsas de negociação de mercados futuros, os market makers são agentes que estão a disposição para comprar ou vender contratos de forma a prover liquidez para os outros agentes. Sua lucratividade depende do número de transações e usualmente independente do valor do ativo transacionado. Esse tipo de agente é remunerado pelo provimento de liquidez através do diferencial entre as ofertas de compra e venda, conhecido como *bid-ask spread*. (INVESTOPEDIA, 2003)

No referido artigo os autores identificam que a relação dos modelos de agentes heterogêneos com a econometria se dá em dois níveis distintos²². O primeiro deles diz respeito ao uso de ferramental econométrico para a análise das séries temporais de preços de ativos produzidas pelos modelos de agentes heterogêneos. Nesse contexto, os autores estão interessados em investigar se as séries geradas pelos modelos apresentam os principais fatos estilizados comumente encontrados em séries financeiras e concluir se os modelos são capazes de representar a realidade de forma quantitativa. O segundo nível diz respeito ao uso do ferramental econométrico para a estimação dos modelos a fim de encontrar valores para os parâmetros que possibilitem a reprodução de dados empíricos. Em outras palavras, os autores estão interessados em estimar os modelos com o objetivo de testar sua capacidade de explicar a realidade e até mesmo realizar previsões.

Nesse sentido, parcela significativa da literatura mencionada nas seções anteriores, em especial os textos produzidos antes do ano 2000, ocuparam-se de explorar a relação entre os modelos de agentes heterogêneos e a realidade no primeiro dos dois níveis. Trabalhos como os de DAY e HUANG (1990) e BROCK e HOMMES (1997), apenas para mencionar alguns exemplos, não apresentam uma tentativa de ajustar os modelos aos dados empíricos. A sua validação se dá no momento em que a série gerada a partir dos modelos é capaz de produzir comportamentos caóticos, bolhas endógenas, volatilidade agrupada e caudas pesadas, dentre outros fenômenos. Uma parcela mais recente da literatura, por outro lado, busca estimar os parâmetros dos modelos de forma a ajustá-los aos dados históricos. Modelos como os que foram produzidos em ELLEN e ZWINKELS (2010), CHIARELLA et al. (2014) e JOËTS (2015) foram considerados validados no momento em que os parâmetros estimados apresentaram significância estatística e produziram séries com razoável grau de ajuste em relação aos dados históricos.

Dentro do universo de modelos baseados em agentes que o texto de CHEN et al. (2012) explora, há exemplos de modelos com graus distintos de complexidade. Um dos objetivos dos autores, que explora um universo de modelos similar ao coberto em LEBARON (2006) é identificar se a complexidade dos modelos é diretamente relacionada com a adequação empírica dos modelos e com a sua capacidade de explicar a realidade. Os autores mostram que, no que tange ao primeiro nível de relação

²² No texto, os autores mencionam uma terceira via de relacionamento, onde os modelos de agentes heterogêneos são utilizados para apresentar micro fundamentos aos modelos econométricos e fornecem insights para a discussão da temática do agente representativo. Essa discussão foge ao escopo da presente Tese. O leitor interessado pode buscar maiores informações sobre essa temática em CHEN et al. (2012) e KIRMAN (1992).

entre os modelos e a econometria, o aumento da complexidade dos modelos não contribui com um aumento significativo no número de fatos estilizados que eles são capazes de explicar. Os modelos de Agentes Heterogêneos (HAMs), que são objeto de estudo da presente Tese, estão do lado mais simples do espectro de modelos analisados pelos autores e, apesar disso, já apresentam um bom poder de explicar fatos estilizados das séries financeiras²³.

A tarefa de estimar/calibrar os HAMs, apesar da sua relativa simplicidade em relação a outros modelos baseados em agentes, se apresenta como um exercício significativamente complexo. Essa complexidade é resultado da necessidade de se estimar parâmetros de naturezas distintas em um mesmo contexto. Conforme pode ser visto da descrição realizada nas seções anteriores, há dois tipos de elementos a serem estimados.

O primeiro deles, de natureza comportamental, diz respeito a como os agentes se comportam. “Como eles expressam suas expectativas?” e “Com que velocidade eles aprendem com seus erros de previsão?” são questões cuja resposta é oferecida por parâmetros do modelo que podem ser estimados. O outro elemento diz respeito a questões pertinentes ao ambiente externo aos agentes. “Com que velocidade os preços respondem à flutuações na demanda dos agentes?” também é uma pergunta que pode ser respondida por um parâmetro do modelo.

A estimação direta e simultânea de todos os parâmetros é uma forma relativamente comum de lidar com o problema de estimar os parâmetros do modelo. Nesse sentido, é possível identificar na literatura o recurso a técnica de mínimos quadrados não lineares ou a estimadores baseados em métodos de máxima verossimilhança. A ideia, nesses casos, é derivar uma equação única que contenha todos os parâmetros do modelo e estimá-los simultaneamente utilizando a técnica escolhida.

KUKACKA e BARUNIK (2016) mostram que não há um consenso com relação à técnica a ser utilizada para a estimação. Em um meta-estudo com cerca de 43 modelos, os autores mostram que há exemplos do uso de métodos de Máxima Verossimilhança, Quasi-Máxima Verossimilhança, Mínimos Quadrados Não-Lineares e Mínimos Quadrados Ordinários. Como forma de reduzir a complexidade e viabilizar o

²³ Uma evidência significativa de que o princípio da parcimônia utilizado na formulação de modelos econométricos também se aplica nesse caso. É importante ressaltar, que tal resultado não é uma sentença contra o incremento na complexidade dos modelos, mas sim, um indicativo de que as rotas buscadas para tornar os modelos mais complexos até o momento não aumentaram o seu poder explicativo.

processo de estimação, em mais da metade dos modelos analisados são construídos modelos com 4 ou menos parâmetros. Além disso, para lidar com problemas de ótimos locais no uso de modelos de otimização, vários estudos recorreram ao uso de técnicas de “grid search”, que consistem em repetidas otimizações a partir de diferentes pontos iniciais. Um último problema identificado pelos autores diz respeito aos testes de hipóteses sobre os valores dos parâmetros. Em vários modelos analisados, foram identificadas dificuldades na realização de testes de hipótese ligados ao parâmetro que rege a velocidade da mudança de comportamento dos agentes no tempo.

Outra alternativa apontada por CHEN et al. (2012) e também identificada por KUKACKA e BARUNIK (2016) é o uso da estimação indireta pelo método de momentos simulados para os casos em que não é possível derivar analiticamente uma equação única para o modelo. Por essa técnica, a estimação é feita através do ajuste dos momentos²⁴ de uma série simulada pelo modelo. Ao expressar esses momentos em termos dos parâmetros a serem estimados, é possível identificar qual o valor dos parâmetros que mais aproxima a série simulada da série real.

KUKACKA e BARUNIK (2016), ao explorarem mais profundamente o recurso ao uso de técnicas de estimação indireta, também apontam limitações de ordem prática para a sua aplicação na estimação de modelos de Agentes Heterogêneos. Entre as dificuldades apontadas estão a arbitrariedade na escolha dos momentos a serem simulados, a dependência de séries de alta frequência (dados diários) e a existência de múltiplos mínimos locais, que fazem com que diferentes condições iniciais resultem em diferentes estimativas.

As duas primeiras dificuldades se relacionam diretamente com o *trade-off* entre a adequação da representação escolhida de um lado e o custo computacional e a precisão da estimativa de outro lado. Quanto maior o número de momentos simulados, mais fiel é a representação da série a ser estimada, mas também maior é o custo computacional de processamento e maior é a dependência de dados de alta frequência para uma estimativa adequada dos momentos de alta ordem. A terceira dificuldade, por sua vez, resulta das características das funções de máxima verossimilhança do modelo, que apresentam regiões planas para valores factíveis dos parâmetros e favorecem a ocorrência de ótimos locais em tentativas de otimização. Em outras palavras, os

²⁴ Um momento de ordem n de uma distribuição é definido pela expressão $M(n) = E(x - \mu)^n$, onde μ é a média da distribuição. A distribuição normal pode ser definida apenas pelos momentos de primeira (média) e segunda ordem (variância). Um maior número de momentos permite uma descrição mais precisa de uma distribuição de probabilidade. HAZEWINKEL (1988)

modelos de Agentes Heterogêneos estudados pelos autores permitem a ocorrência de resultados similares para diferentes valores de alguns dos seus parâmetros.

WERKER e BRENNER (2004), em uma tentativa de identificar formas de aprimorar a calibragem e a estimação de modelos de simulação, propõem o uso de um método analítico para orientar esse processo. O método, que os autores identificam como a aplicação do “Realismo Crítico”, consiste na utilização de dados empíricos tanto para auxiliar a construção dos diferentes modelos quanto para a seleção dos modelos mais adequados dentre aqueles construídos.

Em primeiro lugar, as premissas e a estrutura do modelo, por indução, são desenvolvidas com base no conhecimento comum, na teoria econômica e na realidade empírica. Cada escolha dos parâmetros e das premissas corresponde a uma possível especificação do modelo. A partir das possíveis especificações para o modelo, um conjunto de resultados é deduzido a partir de cada uma delas. A análise empírica dos resultados obtidos permitirá a identificação das especificações que são razoáveis do ponto de vista teórico, e permitirá o descarte daquelas que levarem a resultados considerados absurdos ou pouco plausíveis. Os autores identificam uma semelhança significativa entre a abordagem proposta e a inferência Bayesiana.

Em uma primeira definição, a inferência Bayesiana pode ser compreendida como o processo de identificação da probabilidade *a posteriori* de que um fenômeno tenha ocorrido, dado um conjunto de informações. Essa probabilidade, por sua vez, depende da probabilidade *a priori* de que aquele fenômeno tenha ocorrido e da probabilidade de ocorrência daquele conjunto de informações condicionada à ocorrência do fenômeno. Em outras palavras, a inferência Bayesiana consiste na atualização das percepções *a priori* a respeito de um determinado fenômeno a partir da observação *a posteriori* dos dados.

Com base na definição apresentada acima, a semelhança torna-se evidente na medida em que, na abordagem proposta por WERKER e BRENNER (2004), as diferentes especificações de um modelo, correspondem a uma visão *a priori* do valor que os parâmetros podem assumir. A verificação empírica dos resultados deduzidos a partir das diferentes especificações do modelo, por sua vez, corresponde ao uso dos dados para a atualização da visão sobre qual o intervalo de valor que os parâmetros podem de fato assumir. Apesar de, até onde a literatura foi analisada, não existirem exemplos de utilização da técnica de inferência Bayesiana para a estimação dos parâmetros de modelos de Agentes Heterogêneos, a semelhança apontada acima

permite inferir que existe considerável razoabilidade na utilização da técnica para esse fim.

Além da razoabilidade de sua utilização, existem duas outras razões que podem tornar a técnica de inferência Bayesiana adequada para a aplicação proposta. A primeira delas diz respeito à sua adequação a problemas complexos. Conforme mostram GELMAN et al. (2014), o uso de métodos de simulação computacional para a computação das distribuições de probabilidade *a posteriori* confere grande flexibilidade (as custas de maior requerimento de poder computacional) para a análise de problemas complexos. A segunda, diz respeito à forma como a incerteza a respeito dos parâmetros é descrita. Conforme destacam BERGER e BAYARRI (2004) a principal vantagem da inferência Bayesiana sobre outros métodos está na possibilidade de mensuração direta da incerteza de uma estimativa. A distribuição de probabilidade *a posteriori* de um parâmetro permite obter conhecimento sobre a sua incerteza.

Dessa forma, as três razões acima descritas levam a presente Tese a propor o uso da inferência Bayesiana para a estimação de um modelo de Agentes com Comportamentos Heterogêneos para o mercado de petróleo. Tal proposta se apoia na adequação da técnica à complexidade natural desse tipo de modelagem e na possibilidade de explorar detalhadamente as incertezas a respeito dos parâmetros dos modelos que serão propostos no próximo capítulo.

4 - Propostas de modelagem para o mercado de petróleo usando modelos de agentes heterogêneos

Em linha com a discussão empreendida no capítulo anterior, o objetivo do presente capítulo é apresentar propostas de modelagem para o mercado de petróleo a partir de modelos de Agentes Heterogêneos. Além da descrição do mercado a partir desse tipo de modelo, o presente capítulo também se propõe a descrever como será a estimativa empírica dos modelos propostos por meio do uso da inferência bayesiana.

Nesse sentido, a primeira seção buscará apresentar a construção das bases de um modelo de Agentes Heterogêneos para o mercado de petróleo a ser estimado. Dado o caráter relativamente recente do uso desse tipo de modelagem no estudo do mercado de petróleo, existe uma série de questões ligadas à “arquitetura” dos modelos para as quais ainda não há uma resposta inequívoca e consensual na literatura. Em face das diversas possibilidades de modelagem optou-se, na presente Tese, pela construção de múltiplos modelos similares em que parte dessas possibilidades é explorada. A segunda seção do capítulo tratará da discussão a respeito das alternativas de modelagem que serão exploradas na presente Tese.

Construídos os modelos, a terceira seção tratará do processo de estimação. Pretende-se que a referida seção apresente, após uma breve revisão da técnica de inferência bayesiana, os detalhes do processo de estimação dos parâmetros dos modelos propostos. A quarta seção, por sua vez, tratará das bases de dados a serem utilizadas, descrevendo como foi a sua obtenção.

4.1 - As bases de um modelo de agentes heterogêneos para o mercado de petróleo

Assim como descrito no Capítulo 3, os modelos de agentes heterogêneos da presente Tese serão construídos a partir dos seus principais elementos constituintes. Isso significa que os modelos propostos precisam possuir equações para descrever o comportamento de pelo menos dois tipos de agentes, um mecanismo que regulará a proporção de cada tipo de agente no mercado e uma equação de precificação que traduzirá os comportamentos e a estrutura do mercado (proporção de cada tipo de agente) em uma trajetória de preços.

Como preceito geral, optou-se pela construção do modelo mais simples possível capaz de trazer as principais características desse tipo de modelagem para a análise do problema desejado. A escolha desse preceito geral está calcada na posição de CHEN et al. (2012), apresentada previamente, de que o aumento da complexidade de um

modelo não necessariamente representa uma maior adequação da série modelada com a realidade. Outro ponto que suporta essa escolha é a intenção de realizar uma estimativa empírica dos modelos. KUKACKA e BARUNIK (2016) mostram que a prática na literatura que se ocupou de estimar modelos de agentes heterogêneos foi a redução do número de parâmetros a serem estimados.

Com base no exposto até o momento, os modelos a serem construídos apresentam a estrutura geral que pode ser descrita com base nas equações abaixo:

$$D_t^1 = f(\Delta P_t^{e1}) \quad (9)$$

$$D_t^2 = g(\Delta P_t^{e2}) \quad (10)$$

$$W_t^1 = h(\Delta P_t^{e1}, \Delta P_t^{e2}, \Delta P_t, \Delta P_{t-1}, \dots, W_{t-1}^1, W_{t-2}^1, \dots) \quad (11)$$

$$W_t^2 = 1 - W_t^1 \quad (12)$$

$$\Delta P_t = \alpha + W_t^1 D_t^1 + W_t^2 D_t^2 + \epsilon_t \quad (13)$$

As Equações 9 e 10 possuem a função de descrever as demandas dos diferentes tipos de agentes constituintes do modelo. Cada tipo de agente é definido em função do tipo de comportamento adotado. O comportamento, por sua vez, está relacionado com a demanda dos agentes, cujo principal elemento definidor é a sua expectativa a respeito do comportamento futuro dos preços. A heterogeneidade dos dois tipos de agentes reside na ideia de que eles formarão suas expectativas a respeito do futuro de forma distinta entre si e, também, se relacionarão de forma distinta com suas respectivas expectativas de futuro.

As Equações 11 e 12, por sua vez, possuem a função de descrever o mecanismo pelo qual será determinada a participação de cada grupo de agente no mercado. Dada a natureza endógena desse mecanismo, é seguro afirmar que essa determinação será uma função das expectativas dos agentes, dos preços efetivamente realizados, da composição do mercado em períodos anteriores ou das possíveis combinações entre esses elementos.

Por último, a Equação 13 é aquela que reúne os outros elementos para relacioná-los com o comportamento dos preços. A forma funcional apresentada, em que o preço é uma função apenas das demandas dos diferentes tipos de agentes e das suas respectivas participações no mercado, difere da prática adotada em alguns exemplos da literatura como ELLEN e ZWINKELS (2010) e KAO et al. (2015). Nos textos selecionados, a equação de formação de preços possui uma estrutura análoga à da Equação 14 abaixo:

$$\Delta P_t = \alpha + \beta_1 D_t - \beta_2 S_t + \beta_3 (W_t^1 D_t^1 + W_t^2 D_t^2) + \epsilon_t \quad (14)$$

Como é possível observar, além das demandas dos diferentes tipos de agentes do mercado, existem termos para expressar a demanda e a oferta física por petróleo. Essa prática assume, como descrito nos textos mencionados, que o mercado de petróleo é formado pela coexistência de ofertantes e demandantes no mercado físico e dois grupos de especuladores, um deles com um comportamento “fundamentalista” e outro com um comportamento “grafista”, no processo de formação de preços.

Conforme descrito em MABRO (2005), o mercado de petróleo é formado por diferentes camadas físicas e financeiras que trabalham de forma paralela no processo de formação de preços. Dessa forma, a equação de formação de preços descrita na Equação 14 mistura elementos pertencentes a diferentes camadas do processo de formação de preços do petróleo e trata-os como complementares. SILVERIO e SZKLO (2012) e SILVERIO (2012) mostram que, embora essas camadas de formação de preços atuem de forma complementar no processo de formação de preços, elas processam as informações do mercado de petróleo de forma distinta com a dominância do processo ora recaindo sobre a esfera física e ora sobre a esfera financeira.

Considerando que os agentes do mercado físico irão se comportar em linha com a sua visão a respeito dos fundamentos do mercado é possível representá-los como integrantes de um grupo voltado à representação de um comportamento fundamentalista. Entre os agentes do mercado financeiro também existem aqueles que orientam a sua tomada de posição com base em expectativas a respeito dos fundamentos do mercado de petróleo. Esse grupo de agentes também pode integrar o grupo voltado à representação de um comportamento “fundamentalista”. Ainda na esfera financeira, existem agentes cuja visão de futuro está baseada em uma extração das condições atuais e que tendem a adotar com mais facilidade um comportamento de *trend following*. Esse grupo de agentes, por sua vez, pode integrar o grupo voltado à representação de um comportamento “grafista”.

Com base no exposto do parágrafo acima, a Equação 13 torna-se suficiente para expressar todos os elementos do mercado de petróleo necessários ao processo de formação de preços. Os componentes de demanda e oferta física de petróleo incluídos na Equação 14 estão, de certa maneira, implícitos no comportamento dos agentes fundamentalistas, tornando a sua inclusão desnecessária para a especificação do modelo.

Outra diferença entre a Equação 13 e as versões apresentadas comumente na literatura (representadas pela Equação 14) é a ausência de um parâmetro que relate

as demandas dos agentes grafistas e fundamentalistas e a variação dos preços. Embora explicitamente ausente da Equação 13, o seu efeito permanecerá presente e será mensurado pelos parâmetros que acompanharão as expectativas de preços dos agentes fundamentalistas e grafistas para compor as suas respectivas demandas. Dessa forma é possível afirmar que, com relação à esse ponto em particular, a versão proposta na presente Tese é equivalente à comumente apresentada na literatura, sendo apresentada apenas de uma forma distinta.

4.2 - Descrevendo o comportamento dos agentes “Fundamentalistas” e “Grafistas” e o Mecanismo de mudança de comportamento.

Embora representem as bases dos modelos de agentes heterogêneos a serem explorados na presente Tese, as Equações 9 a 13 ainda apresentam um nível de detalhamento insuficiente para a plena compreensão dos modelos. Nesse sentido, faz-se necessário descrever a forma assumida pelas funções f, g e h nas Equações de 9 a 11.

Em função das diferentes possibilidades para a descrição destes componentes na literatura, foi possível desdobrar o modelo base em múltiplas alternativas, a depender das escolhas realizadas. Como será possível observar nas seções subsequentes, o comportamento dos agentes “Fundamentalistas” e o mecanismo de mudança de comportamento aparecem como as características em que houve maior controvérsia no que diz respeito à sua representação na literatura. Em função disso, estas características foram escolhidas como aquelas que serão sensibilizadas na análise exploratória proposta. As subseções seguintes detalharão essas escolhas e as suas respectivas fundamentações.

4.2.1 - Comportamento dos agentes “grafistas”

Conforme observado no capítulo anterior, o comportamento dos agentes “grafistas” adotado na literatura analisada adquiriu um caráter simplificado, sendo representado tanto sob a forma de uma extrapolação de tendência quanto sob a forma de uma visão estabilizadora de reversão à média. A análise da literatura que utiliza modelos de Agentes Heterogêneos, contudo, mostrou uma maior tendência a adotar agentes “grafistas” com um comportamento de extrapolação de tendência, potencialmente desestabilizadores.

É razoável supor que essa escolha está ligada ao fato de que o uso do modelo de Agentes Heterogêneos tem, entre as suas razões, a intenção de explicitar a

coexistência de agentes estabilizadores e desestabilizadores nos mercados. Essa coexistência, conforme visto no Capítulo 3, seria o fator responsável por possibilitar a representação de dinâmicas de flutuação dos preços dos ativos que não eram observáveis em modelos baseados na construção de um agente representativo único.

Sendo assim, construir um modelo com um agente fundamentalista, de caráter naturalmente estabilizador, e um agente grafista com o mesmo caráter pode ser considerado como sendo insuficiente para que seja atingido um dos principais objetivos da utilização de modelos de Agentes Heterogêneos. Tal fato pode ser contornado pelo uso de dois tipos de agentes “grafistas”, um deles com comportamento estabilizador e outro com comportamento desestabilizador, possibilitando uma maior diferenciação em relação a modelos baseados em agentes representativos.

Apesar disso, optou-se na presente Tese pelo uso de um único agente grafista de natureza desestabilizadora. Além do embasamento na literatura, o propósito de construir um modelo com o objetivo de estimá-lo empiricamente justifica a opção por uma especificação mais parcimoniosa. Sendo assim, a utilização de um único tipo de agente grafista em oposição a um único tipo de agente fundamentalista reduzirá o número de parâmetros a serem estimados e, mais a frente, terá um impacto menor sobre a estimação dos parâmetros do mecanismo que rege a mudança de comportamento dos agentes.

Em linha com a análise realizada em ELLEN e ZWINKELS (2010), que mostrou existir uma assimetria de comportamento significativa quando os agentes “grafistas” respondem a períodos prévios de alta ou de queda de preços, a especificação do seu comportamento a ser utilizada na presente modelagem também possibilitará a emergência do mesmo tipo de assimetria. A Equação 15, representada abaixo, é um detalhamento da Equação 10 mostrada na seção 4.1, destacando as características discutidas até o momento.

$$D_t^2 = \begin{cases} \beta_2^-(P_{t-1} - P_{t-2}), & (P_{t-1} - P_{t-2}) < 0 \text{ e } \beta_2^- \geq 0 \\ \beta_2^+(P_{t-1} - P_{t-2}), & (P_{t-1} - P_{t-2}) \geq 0 \text{ e } \beta_2^+ \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

Na Equação 15, os parâmetros com sobrescrito positivo representam a resposta dos agentes grafistas a variações prévias de preços positivas enquanto os parâmetros com sobrescrito negativo representam a resposta a variações prévias negativas. As restrições para que os parâmetros assumam valores positivos garantem que as respostas dos agentes “grafistas” possuam um caráter desestabilizador, extrapolando as tendências observadas.

4.2.2 - Comportamento dos agentes “fundamentalistas”

A análise da literatura realizada no capítulo anterior mostra que é esperado que o comportamento dos agentes “fundamentalistas” possua um caráter estabilizador. Nesse sentido, os agentes “fundamentalistas” acreditam que o preço do petróleo convergirá para uma estimativa fundamentalista de mercado e a sua demanda aumenta (diminui) sempre que é esperada uma elevação (queda) dos preços. Com base nisso, é possível afirmar que a forma de estimar o valor fundamentalista é o principal elemento do comportamento desse tipo de agente.

A inspiração da análise realizada por FRITZ et al. (2015) é notável, na medida, em que ela questiona o processo de formação de expectativas dos agentes com comportamento fundamentalista que é adotado como hipótese em modelos de Agentes Heterogêneos. Na conclusão de seu estudo os autores apontam para diferenças significativas nos resultados observados, a depender do processo de formação de expectativas efetivamente utilizado. Tal conclusão expõe a ausência de consenso na literatura a respeito da melhor forma de modelar o valor fundamental utilizado como expectativa pelos “fundamentalistas”. Na ausência de tal definição, existem exemplos na literatura em que se recorreu a média móvel ou a uma média histórica dos preços realizados para solucionar tal problema.

Assim como FRITZ et al. (2015) a presente Tese não adotará um caminho único para representar a expectativa dos agentes fundamentalistas, mas sim três vias distintas, refletindo diferentes graus de complexidade no processo de formação de expectativas dos agentes. Essa decisão tem como objetivo testar se a adoção de especificações distintas para o comportamento dos agentes fundamentalistas resulta em resultados significativamente distintos, eventualmente reforçando ou refutando o resultado adotado pelos autores. Outro objetivo dessa decisão está em investigar se a complexidade do comportamento dos agentes “fundamentalistas” tem um impacto significativo sobre a sua participação no mercado ao longo do tempo.

Como forma de representar essa evolução de complexidade do comportamento dos agentes fundamentalistas, foram adotadas três formas distintas de formação de expectativas: uma média móvel de 12 meses, uma relação linear entre o preço do petróleo e o desequilíbrio entre oferta e demanda mundial e um modelo VAR com variáveis para a atividade econômica mundial e uma diferenciação entre a produção de petróleo dentro e fora da OPEP.

Assim como em FRITZ et al. (2015), ELLEN e ZWINKELS (2010) e em outros exemplos da literatura, assumir que os agentes enxergam o valor fundamental do petróleo como a média móvel de um período determinado é uma forma razoável de modelar um comportamento simplificado por parte dos agentes, em linha com uma racionalidade mais limitada, como discutido no Capítulo 3. ELLEN e ZWINKELS (2010) assumem que a média móvel é composta por realizações passadas e futuras em relação à um determinado ponto. Tal consideração tem o objetivo de fazer com que o valor fundamental ao qual os agentes “fundamentalistas” revertam seja uma versão suavizada da realização dos preços do petróleo. Na presente Tese, assim como ocorre em FRITZ et al. (2015), por outro lado, o recurso a uma média móvel tem o objetivo de representar uma heurística simplificada de comportamento que permita decisões rápidas a um baixo custo para os agentes. Em função disso, faz sentido que a série seja construída apenas com base em realizações passadas, como descrito na Equação 16 abaixo.

$$P_t = \frac{(P_t + \dots + P_{t-12})}{12}, \forall t \quad (16)$$

A adoção de uma relação linear entre os preços do petróleo e o desequilíbrio entre a oferta e a demanda mundial por petróleo, por sua vez, possui fundamentação em preceitos básicos da teoria econômica. Assumindo que o desequilíbrio entre oferta e demanda represente um indicativo da formação ou destruição de estoques de petróleo no mercado internacional, relacioná-lo linearmente com os preços é a especificação mais simples capaz de relacionar o comportamento dos preços com as condições de oferta e demanda no mercado mundial. O objetivo de utilizar a especificação mais simples possível, também reflete a tentativa de representar um comportamento compatível com a noção de uma racionalidade limitada.

Sua natureza simplificada ignora uma série de questões já exploradas na literatura relacionada à indústria de petróleo, como o papel da capacidade de refino, o papel da capacidade ociosa dos países membros da OPEP e a influência dos preços do petróleo sobre os fundamentos de demanda, apenas para citar alguns exemplos²⁵. Ao relacionar os preços com alguma informação sobre a oferta e a demanda por petróleo e ignorar as complexidades supracitadas, essa especificação para o processo de formação de expectativas dos agentes “fundamentalistas” assume um papel de

²⁵ KAUFMANN et al. (2008) é um exemplo da literatura em que é proposta uma modelagem onde vários destes fatores são tratados. FATTOUH (2010), por sua vez, discute a questão dos feedbacks no mercado de petróleo, que são provocados pelos efeitos dos preços sobre variáveis de oferta e demanda.

complexidade intermediária entre as três possibilidades utilizadas. A Equação 17, abaixo, apresenta a especificação de comportamento utilizada.

$$\Delta P_t = \beta B_{t-1} + \epsilon_t \quad (17)$$

Onde:

B_{t-1} corresponde ao desequilíbrio entre oferta e demanda no mercado mundial de petróleo no período t-1

A terceira forma de representar o processo de formação de expectativas dos agentes “fundamentalistas” busca representar uma modelagem de maior complexidade, assumindo que os agentes utilizem técnicas mais avançadas em sua formação de expectativas. Nesse sentido, foi construído um VAR relacionando os preços do petróleo com a oferta (segregada entre aquela oriunda de países de dentro e fora da OPEP), um índice representativo da atividade econômica global e uma medida do desequilíbrio entre oferta e demanda por petróleo.

O modelo utilizado foi amplamente inspirado nos modelos construídos em KILIAN (2006), KILIAN e MURPHY (2010), BAUMEISTER e KILIAN (2013). A ideia central é o recurso ao uso de um modelo Vetorial Autorregressivo (VAR), que permite a mensuração dos efeitos cruzados entre as diferentes variáveis e suas respectivas defasagens e a segregação dos efeitos contemporâneos das variáveis umas sobre as outras. Em outras palavras, a estrutura desse tipo de modelagem permite a captura de *feedbacks* dos preços do petróleo sobre as variáveis que deveriam explicar o seu comportamento, isolando adequadamente suas respectivas influências sobre os preços.

Apesar da inspiração na literatura citada, o modelo VAR utilizado na presente Tese foi adaptado em linha com críticas apresentadas por KOLODZEIJ e KAUFMANN (2014) ao paradigma de modelagem dos preços de petróleo representado pelos textos de Kilian. Entre as críticas apresentadas, os autores apontam os potenciais efeitos negativos da utilização de um índice de custo de fretes como *proxy* para a atividade econômica global. A elevada correlação do custo dos fretes com o preço do petróleo indica que a variável não permite um isolamento adequado dos efeitos da atividade econômica sobre os preços do petróleo.

Outra crítica mencionada pelos autores diz respeito ao fato de que a agregação da produção mundial de petróleo ignora as diferenças de comportamento entre países membros e não membros da OPEP em termos de influência sobre os preços de petróleo. Como mostra HUNTINGTON et al. (2013) a distinção entre a produção de países membros e não-membros da OPEP foi característica crítica em diferentes

exercícios de modelagem na literatura relacionada à explicação do comportamento dos preços do petróleo.

Em função da argumentação acima, optou-se por reconhecer a validade destas críticas na especificação do modelo utilizado na presente Tese. Para endereçar a primeira questão, o índice de atividade econômica sugerido por Killian foi substituído por um índice de Produção Industrial compilado pelo CPB Netherlands Bureau of Economic Analysis, conforme sugerido em GONÇALVES (2017). Para a segunda questão, a variável de produção internacional de petróleo foi subdividida em duas, uma para a produção dos países membros da OPEP e outra para a produção dos países não membros. Em linha com essas considerações, o modelo a ser utilizado na presente Tese apresenta-se conforme descrito em notação matricial pela Equação 18 a seguir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_t \\ AI_t \\ O_t^{OPEP} \\ O_t^{NOPEP} \\ B_t \end{bmatrix}_{5 \times 1} = \begin{bmatrix} c^1 \\ c^2 \\ c^3 \\ c^4 \\ c^5 \end{bmatrix}_{5 \times 1} + \begin{bmatrix} \beta_t^{1,1} & \dots & \beta_t^{1,5} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_t^{5,1} & \dots & \beta_t^{5,5} \end{bmatrix}_{5 \times 5} \begin{bmatrix} \Delta P_{t-1} \\ AI_{t-1} \\ O_{t-1}^{OPEP} \\ O_{t-1}^{NOPEP} \\ B_{t-1} \end{bmatrix}_{5 \times 1} + \dots + \begin{bmatrix} \beta_{t-p}^{1,1} & \dots & \beta_{t-p}^{1,5} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{t-p}^{5,1} & \dots & \beta_{t-p}^{5,5} \end{bmatrix}_{5 \times 5} \begin{bmatrix} \Delta P_{t-p} \\ AI_{t-p} \\ O_{t-p}^{OPEP} \\ O_{t-p}^{NOPEP} \\ B_{t-p} \end{bmatrix}_{5 \times 1} + \begin{bmatrix} u_t^1 \\ u_t^2 \\ u_t^3 \\ u_t^4 \\ u_t^5 \end{bmatrix}_{5 \times 1} \quad (18)$$

Onde:

ΔP_t representa a variação mensal do logaritmo do preço do petróleo no período t

AI_t representa o índice mensal de produção industrial do mundial

O_t^{OPEP} representa a variação mensal do logaritmo da produção dos países da OPEP no período t

O_t^{NOPEP} representa a variação mensal do logaritmo da produção dos países não membros da OPEP no período t

B_t representa o equilíbrio entre oferta e demanda no período t

$\begin{bmatrix} c^1 \\ c^2 \\ c^3 \\ c^4 \\ c^5 \end{bmatrix}_{5 \times 1}$ representa o vetor de constantes das equações do VAR

$\begin{bmatrix} \beta_{t-p}^{1,1} & \dots & \beta_{t-p}^{1,5} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{t-p}^{5,1} & \dots & \beta_{t-p}^{5,5} \end{bmatrix}_{5 \times 5}$ representa a matriz dos coeficientes que relacionam as variáveis umas com as outras na defasagem p

$$\begin{bmatrix} u_t^1 \\ u_t^2 \\ u_t^3 \\ u_t^4 \\ u_t^5 \end{bmatrix}_{5 \times 1}$$

termo de erro que acompanha as equações do modelo VAR.

Definidos os modelos de formação de expectativas fundamentalistas, faz-se necessário construir as séries de valores fundamentalistas que representarão as expectativas dos agentes em cada momento do tempo, para efeito de modelagem. No caso do primeiro modelo de formação de expectativas com base na média móvel, a construção pode ser considerada direta, dado que a série será construída a partir da média móvel calculada dos preços.

No caso dos outros dois modelos descritos acima existe a necessidade de um passo adicional para a construção das séries de valores fundamentalistas. O resultado da estimação de ambos os modelos será uma série das expectativas de variação do preço com base nos fundamentos em cada momento do tempo. Para a efetiva construção de uma série de valores fundamentalistas esperados em cada momento do tempo, a variação de preços estimada em cada momento t deve ser aplicada sobre o preço efetivamente realizado do período $t-1$.

O procedimento de construção descrito acima tem o objetivo de representar o fato de que há uma constante atualização de expectativas dos agentes, que na prática formam as suas expectativas apenas para o mês (período) seguinte e, em cada momento, já conhecem a realização presente dos preços. A simples acumulação das variações de preços estimadas desde o período inicial, por outro lado, significa que os agentes utilizariam como fonte de informação apenas os preços do período inicial e a série estimada de variações de preços, ignorando, em cada momento do tempo, a informação a respeito dos preços vigentes e, consequentemente, não representando adequadamente uma constante atualização de expectativas dos agentes.

Na literatura relacionada à modelagem de agentes heterogêneos para o mercado de petróleo, FRITZ et al. (2015) também apresenta preocupação similar em representar o fato de que há uma constante atualização de expectativas dos agentes. Diferente do procedimento adotado na presente Tese, os autores mencionados estimam os seus modelos de forma recursiva, com a estimação dos preços esperados (e não das variações de preços) no período t utilizando toda a informação disponível até o período $t-1$.

A existência de poucos exemplos na literatura em que essa preocupação é explicitamente apresentada possui duas razões principais. Uma delas reside no fato de que as estimativas de valor fundamental da indústria utilizam informações dos preços passados ou valores constantes, como ocorre em HE e WESTERHOFF (2005), por exemplo. A outra está calcada na ideia de que o valor fundamental é uma métrica teórica “ideal” para a qual os agentes convergem naturalmente, assim como o valor presente do fluxo de pagamentos futuros de um título de dívida pública. É essa a linha defendida por ELLEN e ZWINKELS (2010) ao usar uma média móvel centrada utilizando valores passados e futuros como forma de “suavizar” a série de preços e revelar uma tendência fundamental de longo prazo para a qual os agentes fundamentalistas deveriam reverter.

É razoável concluir que as escolhas de modelagem das expectativas fundamentalistas e do procedimento de construção das séries de valores fundamentalistas adotadas na presente Tese possuem elementos de todas as abordagens descritas acima. Os modelos de formação de expectativa em que a variação estimada dos preços é uma função de variáveis fundamentalistas e utiliza informação de toda a amostra representam a busca por uma métrica teórica “ideal”, que relaciona os preços esperados com o comportamento dos fundamentos de mercado. Por outro lado, quando as variações de preços não são simplesmente acumuladas a partir do período inicial, mas são aplicadas, em cada período, ao preço efetivamente realizado do período anterior, há a preocupação de representar uma constante atualização das expectativas dos agentes.

Dessa forma, é possível indicar que a demanda dos agentes fundamentalistas será expressa pela Equação 19 abaixo, onde a expectativa a respeito do valor fundamentalistas variará de acordo com as três métricas apresentadas na presente seção. Ela representa o detalhamento da Equação 9 apresentada anteriormente, onde P_t^e representa uma das três possíveis métricas de mensuração do valor fundamentalista dos preços.

$$D_t^1 = \beta_1 (P_t^e - P_{t-1}), \text{ onde } \beta_1 \geq 0 \quad (19)$$

4.2.3 - Mecanismos de Mudança de Comportamento

Após a descrição do comportamento dos diferentes tipos de agentes a próxima etapa é a construção de um mecanismo pelo qual será regulada a mudança de comportamento dos agentes. Como não há uma estimativa do quantitativo de participantes no mercado, as mudanças de comportamento dos agentes ao longo do

tempo são expressas através da distribuição dos agentes entre os dois grupos descritos nas seções anteriores. Assim como em outros elementos dos modelos de Agentes Heterogêneos, a literatura mostra o uso de diferentes mecanismos para explicar porque os agentes mudam de um grupo para o outro.

Como é possível observar em HOMMES (2005) os agentes podem mudar de comportamento por diferentes razões. Entre as razões observadas na literatura é possível que os agentes mudem de comportamento tendo como base a performance pregressa de suas estratégias, como em BROCK e HOMMES (1997) e ELLEN e ZWINKELS (2010), por exemplo. Outra motivação que explica a mudança de comportamento dos agentes está ligada às interações entre os agentes e o poder de convencimento de um grupo sobre o outro, como exemplificado no modelo de comportamento das formigas de KIRMAN (1993). Uma última métrica utilizada como forma de expressar a mudança de comportamento dos agentes diz respeito ao aumento da proporção de agentes fundamentalistas sempre que o preço do ativo se afasta de seu valor fundamentalista, como em um processo de checagem de realidade. Tal mecanismo é adotado em HE e WESTERHOFF (2005), por exemplo.

Dado o foco da presente Tese no mercado de petróleo, assumir que os agentes que nele operam (empresas, bancos e outras instituições financeiras) podem mudar de comportamento de acordo com a performance passada de seu comportamento apresenta-se como uma possibilidade imediata de modelagem do mecanismo de mudança de comportamento. Nesse sentido optou-se por usar um mecanismo de substituição análogo ao descrito em BROCK e HOMMES (1997) e ELLEN e ZWINKELS (2010), onde a probabilidade de mudança de comportamento está vinculada à performance passada por uma função logística que mapeia um domínio no conjunto dos números reais em um intervalo que vai de 0 até 1.

Embora simples, o uso dessa abordagem requer a identificação do horizonte passado que os agentes consideram no processo de mensuração da performance passada de cada tipo de comportamento. Entre as possibilidades observadas na literatura, há a tentativa de identificar um horizonte que melhor se adeque aos dados através do uso de técnicas econômétricas, como adotado em ELLEN e ZWINKELS (2010), por exemplo. Por outro lado, há exemplos na literatura em que o horizonte de tempo utilizado pelos agentes corresponde à toda a série de dados disponível, como proposto por CHIARELLA e HE (2002), que estimam um parâmetro representativo da “memória” dos agentes. Esse parâmetro representa o peso dado pelos agentes às observações mais distantes no tempo.

Embora aparentem ser distintas, é possível identificar uma equivalência entre as duas abordagens se for levado em consideração o fato de que um parâmetro de memória que represente um peso muito mais elevado para as observações mais recentes pode ser considerado equivalente à construção de um mecanismo em que as observações mais distantes no passado são ignoradas. Em função disso, na presente Tese, a construção de um mecanismo de mudança de comportamento com base na avaliação passada de performance considera que os agentes utilizam toda a informação passada para a sua decisão. Em linha com o espírito proposto por CHIARELLA e HE (2002), contudo, adota-se um parâmetro para mensurar o grau de “memória” dos agentes. A Equação 20, a seguir, mostra como é calculada a métrica de performance passada dos agentes “fundamentalistas” segundo a lógica descrita acima. A construção para os agentes “grafistas” é análoga.

$$A_t^F = \varepsilon_{t-1}^F + \alpha \varepsilon_{t-2}^F + \alpha^2 \varepsilon_{t-3}^F + \alpha^3 \varepsilon_{t-4}^F + \dots + \alpha^p \varepsilon_{t-p-1}^F, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (20)$$

Onde:

A_t^F é a divergência acumulada entre a expectativa dos agentes fundamentalistas e os preços efetivamente realizados até o período t

ε_{t-i}^F corresponde à divergência entre a expectativa dos agentes fundamentalistas e o preço efetivamente realizado em cada um dos períodos t-i

α é o coeficiente que mede a “memória” dos agentes. Quanto mais próximo de 1 é o seu valor, maior é a influência de divergências “antigas” na formação da divergência acumulada.

Definida a métrica de mensuração da performance passada dos agentes, o passo seguinte é a definição da função que relaciona a métrica de performance dos agentes com a sua participação no mercado. Independente da métrica de performance passada utilizada, o uso da função logística proposta por BROCK e HOMMES (1997) aparece com bastante frequência na literatura e será adotada na presente Tese. As Equações 21 e 22, descritas a seguir mostram a sua aplicação para mensurar a participação de “fundamentalistas” e “grafistas” a partir de suas respectivas métricas de performance.

$$w_t^F = \frac{\exp(-\theta \left(\frac{A_t^F}{A_t^F + A_t^C} \right))}{\exp(-\theta \left(\frac{A_t^F}{A_t^F + A_t^C} \right)) + \exp(-\theta \left(\frac{A_t^C}{A_t^F + A_t^C} \right))}, \quad \text{onde } \theta > 0 \quad (21)$$

$$w_t^C = 1 - w_t^F \quad (22)$$

Onde:

w_t^F significa a participação dos agentes fundamentalistas no período t

w_t^C significa a participação dos agentes grafistas no período t

A_t^F é a divergência acumulada entre a expectativa dos agentes fundamentalistas e os preços efetivamente realizados até o período t

A_t^C é a divergência acumulada entre a expectativa dos agentes grafistas e os preços efetivamente realizados até o período t

θ é o parâmetro que mede a velocidade com que a participação é afetada pela relação entre as divergências acumuladas

Nas equações apresentadas acima, o parâmetro θ mede a intensidade com que os agentes respondem à sua performance pregressa. Quanto mais próximo de zero, maior a tendência dos agentes a ignorar o passado e se distribuírem igualmente entre os dois grupos. Na situação contrária, valores muito elevados para esse parâmetro significam que os agentes buscarão mudar o seu comportamento o mais rápido possível diante de mudanças nas performances relativas dos dois comportamentos. Outro ponto relevante a ser destacado nas equações acima é o fato de que as métricas de performance utilizadas na equação estão normalizadas. Tal procedimento, introduzido por ELLEN e ZWINKELS (2010) tem a função dupla de facilitar o processo de estimativa do parâmetro θ e permitir uma comparabilidade do seu valor entre modelos distintos. Como o uso de múltiplos modelos é uma proposta da presente Tese, tal procedimento também foi adotado.

Como foi visto no Capítulo 3, a performance passada das diferentes estratégias dos agentes não é o único fator a influenciar o aumento da participação de um grupo ou de outro no mercado. Conforme mostram REITZ e SLOPEK (2008) e HE e WESTERHOFF (2005) a participação relativa de agentes fundamentalistas e grafistas pode ser influenciada pela percepção do quanto distante os preços aparentam estar de um valor fundamentalista de referência para o mercado. Na argumentação citada, quanto mais distante o preço está de um valor fundamentalista, maior seria a propensão a um aumento da participação dos agentes fundamentalistas, justificando a reversão dos preços para essa referência.

É razoável afirmar que tal ideia é um exemplo claro de uma heurística “rápida e frugal” de tomada de decisão no sentido descrito por GIGERENZER e TODD (1999), na medida em que as mudanças de comportamento derivam apenas da observação direta

do estado atual do mercado e de uma métrica simples de distanciamento entre o preço em vigor e um valor fundamental esperado. Nesse sentido, a hipótese de que os agentes adotam esse tipo de heurística de decisão para definir qual será o seu comportamento no mercado também será explorada no âmbito da presente Tese.

Como os outros elementos de modelagem discutidos até o momento, a literatura também não apresenta consenso em como representar o mecanismo de mudança de comportamento descrito nos parágrafos anteriores. Para representar a proporção relativa de cada tipo de agente no mercado, REITZ e SLOPEK (2008), por exemplo, utilizaram uma função para mapear uma métrica de distanciamento entre o preço do petróleo e o seu valor fundamental em um intervalo que vai de 0,5 a 1. A Equação 23, descrita a seguir, mostra a forma funcional utilizada por eles.

$$w_t^F = \frac{1}{1+\exp(-\theta|P_{t-1}-P_{t-1}^F|)}, \text{ onde } \theta > 0 \quad (23)$$

Onde:

w_t^F significa a participação dos agentes fundamentalistas no período t

P_{t-1} corresponde aos preços realizados no período t-1

P_{t-1}^F corresponde à expectativa de preços dos agentes fundamentalistas no período t-1

θ é o parâmetro que mede a velocidade da reação dos agentes a uma discrepância entre a expectativa dos agentes fundamentalistas e os preços realizados no período anterior

A forma funcional descrita acima possui algumas implicações estruturais cuja menção é relevante. Se for analisada a imagem da função expressa pela Equação 23 para os valores possíveis que o módulo da diferença entre P_t e P_t^F pode assumir podemos demonstrar que w_t^F terá valores entre 0,5 e 1, indicando que a participação dos agentes fundamentalistas no mercado será de, pelo menos 50%. Tal indicação está apoiada na ideia de que, a qualquer momento do tempo, sempre existirão agentes fundamentalistas atuando no mercado em linha com as condições de oferta e demanda do mercado de petróleo.

HE e WESTERHOFF (2005), por outro lado, adotam uma forma funcional diferente para representar a mesma ideia. A Equação 24, que representa a lógica adotada pelos autores, difere da versão proposta por REITZ e SLOPEK (2008) na medida em que possibilita que a participação dos agentes fundamentalistas possa ser

nula em um dado momento do tempo. Outra diferença cuja menção é relevante, é o fato de que a distância entre o preço e o valor fundamental é elevada ao quadrado como uma forma de garantir que apenas a informação a respeito da magnitude seja considerada nos cálculos.

$$w_t^F = \frac{\theta(P_{t-1} - P_{t-1}^F)^2}{1 + \theta(P_{t-1} - P_{t-1}^F)^2}, \text{ onde } \theta > 0 \quad (24)$$

Onde:

w_t^F significa a participação dos agentes fundamentalistas no período t

P_{t-1} corresponde aos preços realizados no período t-1

P_{t-1}^F corresponde à expectativa de preços dos agentes fundamentalistas no período t-1

θ é o parâmetro que mede a velocidade da reação dos agentes a uma discrepância entre a expectativa dos agentes fundamentalistas e os preços realizados no período anterior

KAO et al. (2015) também questionam a restrição que a forma funcional utilizada por REITZ e SLOPEK (2008) impõe para que a fração dos fundamentalistas esteja entre 0,5 e 1. Diferente de HE e WESTERHOFF (2005), eles propõem uma flexibilização na Equação 23 com a inclusão de um novo parâmetro que permita que seja estimada a fração mínima que os fundamentalistas podem atingir em um dado momento do tempo. A Equação 25 a seguir mostra como a função é especificada nesse caso. KAO et al. (2015) vão além ao admitirem a hipótese de que o parâmetro teta possa assumir valores negativos. Teoricamente, um valor negativo para teta indicaria que os agentes fundamentalistas tendem a abandonar o mercado quando o distanciamento dos preços realizados e do valor fundamentalista se torna mais amplo, indicando uma crença insuficiente no processo de reversão que motivou a restrição para valores positivos em outras versões do mecanismo na literatura.

$$w_t^F = \frac{\kappa}{\kappa + \exp(-\theta \left| \frac{P_{t-1} - P_{t-1}^F}{\sigma_{t-d}} \right|)} \quad (25)$$

Onde:

w_t^F significa a participação dos agentes fundamentalistas no período t

P_{t-1} corresponde aos preços realizados no período t-1

P_{t-1}^F corresponde à expectativa de preços dos agentes fundamentalistas no período t-1

σ_t é o desvio padrão dos preços no período t-1 estimado através de um modelo GARCH.

θ é o parâmetro que mede a velocidade e o sentido da reação dos agentes a uma discrepância entre a expectativa dos agentes fundamentalistas e os preços realizados no período anterior

K é um parâmetro que indica qual a participação mínima que os agentes fundamentalistas podem atingir.

Analizando as opções descritas acima, não existe um racional sólido para restringir, estruturalmente, o tamanho da participação dos agentes fundamentalistas a um intervalo entre 0,5 e 1. Embora REITZ e SLOPEK (2008) argumentem que não é razoável supor que o mercado não possua agentes fundamentalistas em um dado momento do tempo, não há um elemento teórico sólido para indicar que essa participação mínima seja de, necessariamente, 50%. Na presente Tese optou-se por uma estrutura de modelo mais geral, que englobe a situação descrita acima, mas não exclua a possibilidade de que os fundamentalistas possam ter uma participação menor do que os 50%.

Entre as soluções que não restringem o intervalo de participação dos fundamentalistas, a proposta de KAO et al. (2015) introduz um novo parâmetro de forma não linear, ampliando a complexidade de um eventual processo estimação. Embora a forma adotada seja uma proposta para solucionar a inclusão de uma restrição praticamente ad-hoc ao valor da participação dos fundamentalistas, a forma funcional escolhida para a inclusão do parâmetro introduz complexidades e não linearidades que podem dificultar o processo de estimação.

Em função disso a Equação 26, que contém a especificação proposta para representar o segundo mecanismo de mudança de comportamento na presente Tese, apresenta um ajuste em relação as formas utilizadas por KAO et al. (2015) e REITZ e SLOPEK (2008). A inclusão de um parâmetro α de forma linear na equação, tem o objetivo de representar qual seria a parcela mínima dos agentes fundamentalistas no mercado. Embora ainda seja assumido que essa participação mínima é fixa ao longo do horizonte de análise, flexibiliza o patamar de 50%, permitindo que o mesmo seja estimado a partir dos dados.

$$w_t^F = \frac{1}{1+\exp(-\theta|P_{t-1}-P_{t-1}^F|)} - \alpha, \text{ onde } \theta > 0 \text{ e } 0 < \alpha < 0,5 \quad (26)$$

Onde:

w_t^F significa a participação dos agentes fundamentalistas no período t

P_{t-1} corresponde aos preços realizados no período t-1

P_{t-1}^F corresponde à expectativa de preços dos agentes fundamentalistas no período t-1

θ é o parâmetro que mede a velocidade da reação dos agentes a uma discrepância entre a expectativa dos agentes fundamentalistas e os preços realizados no período anterior

α é um parâmetro que indica qual a participação mínima que os agentes fundamentalistas podem atingir.

4.3 - O descritivo dos modelos a serem estimados

Conforme discussão realizada nas seções anteriores, a representação do mercado de petróleo a partir do modelo base proposto nas Equações 9 a 13 pode ser realizada a partir de diferentes especificações para os seus elementos constituintes. Em função das perguntas de pesquisa da presente Tese e da análise da literatura que se dedica ao uso de modelos de Agentes com Comportamentos Heterogêneos para o estudo do mercado de petróleo, chegou-se a seis modelos possíveis, detalhados na Tabela 1. Em linha, a Figura 5 apresenta uma representação esquemática dos mesmos modelos e as hipóteses consideradas.

Tabela 1 Especificações dos Modelos de Agentes Heterogêneos a serem estimados

| Modelo | Tipo de formação de expectativa do agente fundamentalista | Tipo de mecanismo de mudança de comportamento dos agentes |
|----------|---|---|
| Modelo 0 | Preços são definidos como um passeio aleatório | |
| Modelo 1 | Média Móvel | Performance Passada das estratégias de comportamento |
| Modelo 2 | Relação simples Preço x Balanço de Mercado | Performance Passada das estratégias de comportamento |
| Modelo 3 | Modelo Var | Performance Passada das estratégias de comportamento |

| | | |
|----------|--|--|
| Modelo 4 | Média Móvel | Distanciamento entre o preço e o valor fundamentalista |
| Modelo 5 | Relação simples Preço x Balanço de Mercado | Distanciamento entre o preço e o valor fundamentalista |
| Modelo 6 | Modelo Var | Distanciamento entre o preço e o valor fundamentalista |

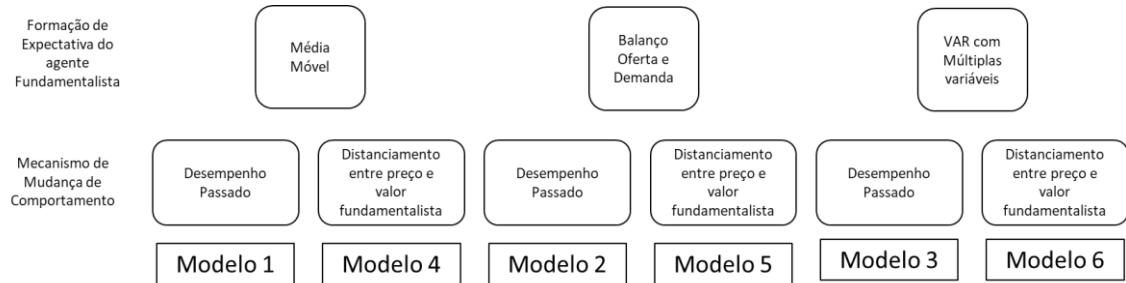


Figura 5 Descriptivo dos Modelos a partir das escolhas de modelagem realizadas

4.3.1 - Modelo 1

Conforme visualizado na Tabela 1, o Modelo 1 é aquele em que o método de formação de expectativas dos agentes é o mais simples e a mudança de comportamento é baseada na performance passada dos diferentes comportamentos. As Equações 27 a 31 descrevem o modelo que será estimado.

$$D_t^F = \beta_1(P_t^{e1} - P_{t-1}) \quad (27)$$

Onde:

P_t^{e1} corresponde à expectativa fundamentalista baseada na média móvel dos preços passados

$$D_t^C = \begin{cases} \beta_2(P_{t-1} - P_{t-2}), & (P_{t-1} - P_{t-2}) < 0 \text{ e } \beta_2 \geq 0 \\ \beta_3(P_{t-1} - P_{t-2}), & (P_{t-1} - P_{t-2}) \geq 0 \text{ e } \beta_3 \geq 0 \end{cases} \quad (28)$$

$$w_t^F = \frac{\exp(-\theta \left(\frac{A_t^F}{A_t^F + A_t^C} \right))}{\exp(-\theta \left(\frac{A_t^F}{A_t^F + A_t^C} \right)) + \exp(-\theta \left(\frac{A_t^C}{A_t^F + A_t^C} \right))}, \text{ onde } \theta > 0 \quad (29)$$

$$w_t^C = 1 - w_t^F \quad (30)$$

$$\Delta P_t = \gamma + W_t^F D_t^F + W_t^C D_t^C + \epsilon_t \quad (31)$$

4.3.2 - Modelo 2

Conforme visualizado na Tabela 1, o Modelo 2 é aquele em que o método de formação de expectativas dos agentes apresenta uma conexão com os fundamentos de mercado, ainda que de uma maneira simplificada, e a mudança de comportamento é baseada na performance passada dos diferentes comportamentos. As Equações 32 a 36 descrevem o modelo que será estimado.

$$D_t^F = \beta_1(P_t^{e2} - P_{t-1}) \quad (32)$$

Onde:

P_t^{e2} corresponde à expectativa fundamentalista baseada em uma relação econometrífica simples entre balanço de mercado e preço

$$D_t^C = \begin{cases} \beta_2(P_{t-1} - P_{t-2}), & (P_{t-1} - P_{t-2}) < 0 \text{ e } \beta_2 \geq 0 \\ \beta_3(P_{t-1} - P_{t-2}), & (P_{t-1} - P_{t-2}) \geq 0 \text{ e } \beta_3 \geq 0 \end{cases} \quad (33)$$

$$w_t^F = \frac{\exp(-\theta \left(\frac{A_t^F}{A_t^F + A_t^C} \right))}{\exp(-\theta \left(\frac{A_t^F}{A_t^F + A_t^C} \right)) + \exp(-\theta \left(\frac{A_t^C}{A_t^F + A_t^C} \right))}, \text{ onde } \theta > 0 \quad (34)$$

$$w_t^C = 1 - w_t^F \quad (35)$$

$$\Delta P_t = \gamma + W_t^F D_t^F + W_t^C D_t^C + \epsilon_t \quad (36)$$

4.3.3 - Modelo 3

Conforme visualizado na Tabela 1, o Modelo 3 é aquele em que o método de formação de expectativas dos agentes relaciona-se de forma mais complexa com diferentes fundamentos do mercado de petróleo e a mudança de comportamento é baseada na performance passada dos diferentes comportamentos. As Equações 37 a 41 descrevem o modelo que será estimado.

$$D_t^F = \beta_1(P_t^{e3} - P_{t-1}) \quad (37)$$

Onde:

P_t^{e3} corresponde à expectativa fundamentalista baseada em um modelo VAR onde o preço do petróleo se relaciona com um índice de atividade econômica, com a produção de petróleo dos países de dentro e fora da OPEP e com o balanço do mercado

$$D_t^C = \begin{cases} \beta_2(P_{t-1} - P_{t-2}), & (P_{t-1} - P_{t-2}) < 0 \text{ e } \beta_2 \geq 0 \\ \beta_3(P_{t-1} - P_{t-2}), & (P_{t-1} - P_{t-2}) \geq 0 \text{ e } \beta_3 \geq 0 \end{cases} \quad (38)$$

$$w_t^F = \frac{\exp(-\theta \left(\frac{A_t^F}{A_t^F + A_t^C} \right))}{\exp(-\theta \left(\frac{A_t^F}{A_t^F + A_t^C} \right)) + \exp(-\theta \left(\frac{A_t^C}{A_t^F + A_t^C} \right))}, \text{ onde } \theta > 0 \quad (39)$$

$$w_t^C = 1 - w_t^F \quad (40)$$

$$\Delta P_t = \gamma + W_t^F D_t^F + W_t^C D_t^C + \epsilon_t \quad (41)$$

4.3.4 - Modelo 4

Conforme visualizado na Tabela 1, o Modelo 4 é aquele em que o método de formação de expectativas dos agentes é o mais simples e a mudança de comportamento é baseada no distanciamento entre os preços do petróleo e o valor calculado a partir do método de formação de expectativa dos agentes fundamentalistas. As Equações 42 a 46 descrevem o modelo que será estimado.

$$D_t^F = \beta_1 (P_t^{e1} - P_{t-1}) \quad (42)$$

Onde:

P_t^{e1} corresponde à expectativa fundamentalista baseada na média móvel dos preços passados

$$D_t^C = \begin{cases} \beta_2 (P_{t-1} - P_{t-2}), & (P_{t-1} - P_{t-2}) < 0 \text{ e } \beta_2 \geq 0 \\ \beta_3 (P_{t-1} - P_{t-2}), & (P_{t-1} - P_{t-2}) \geq 0 \text{ e } \beta_3 \geq 0 \end{cases} \quad (43)$$

$$w_t^F = \frac{1}{1 + \exp(-\theta |P_t - P_t^F|)} - \alpha, \text{ onde } 0 < \alpha < 0,5 \quad (44)$$

$$w_t^C = 1 - w_t^F \quad (45)$$

$$\Delta P_t = \gamma + W_t^F D_t^F + W_t^C D_t^C + \epsilon_t \quad (46)$$

4.3.5 - Modelo 5

Conforme visualizado na Tabela 1, o Modelo 5 é aquele em que o método de formação de expectativas dos agentes apresenta uma conexão com os fundamentos de mercado, ainda que de uma maneira simplificada, e a mudança de comportamento é baseada no distanciamento entre os preços do petróleo e o valor calculado a partir do método de formação de expectativa dos agentes fundamentalistas. As Equações 47 a 51 descrevem o modelo que será estimado.

$$D_t^F = \beta_1 (P_t^{e2} - P_{t-1}) \quad (47)$$

Onde:

P_t^{e2} corresponde à expectativa fundamentalista baseada em uma relação econômica simples entre balanço de mercado e preço

$$D_t^C = \begin{cases} \beta_2(P_{t-1} - P_{t-2}), & (P_{t-1} - P_{t-2}) < 0 \text{ e } \beta_2 \geq 0 \\ \beta_3(P_{t-1} - P_{t-2}), & (P_{t-1} - P_{t-2}) \geq 0 \text{ e } \beta_3 \geq 0 \end{cases} \quad (48)$$

$$w_t^F = \frac{1}{1+\exp(-\theta|P_t - P_t^F|)} - \alpha, \text{ onde } 0 < \alpha < 0,5 \quad (49)$$

$$w_t^C = 1 - w_t^F \quad (50)$$

$$\Delta P_t = \gamma + W_t^F D_t^F + W_t^C D_t^C + \epsilon_t \quad (51)$$

4.3.6 - Modelo 6

Conforme visualizado na Tabela 1, o Modelo 6 é aquele em que o método de formação de expectativas dos agentes relaciona-se de forma mais complexa com diferentes fundamentos do mercado de petróleo e a mudança de comportamento é baseada no distanciamento entre os preços do petróleo e o valor calculado a partir do método de formação de expectativa dos agentes fundamentalistas. As Equações 52 a 56 descrevem o modelo que será estimado.

$$D_t^F = \beta_1(P_t^{e3} - P_{t-1}) \quad (52)$$

Onde:

P_t^{e3} corresponde à expectativa fundamentalista baseada em um modelo VAR onde o preço do petróleo se relaciona com um índice de atividade econômica, com a produção de petróleo dos países de dentro e fora da OPEP e com o balanço do mercado

$$D_t^C = \begin{cases} \beta_2(P_{t-1} - P_{t-2}), & (P_{t-1} - P_{t-2}) < 0 \text{ e } \beta_2 \geq 0 \\ \beta_3(P_{t-1} - P_{t-2}), & (P_{t-1} - P_{t-2}) \geq 0 \text{ e } \beta_3 \geq 0 \end{cases} \quad (53)$$

$$w_t^F = \frac{1}{1+\exp(-\theta|P_t - P_t^F|)} - \alpha, \text{ onde } 0 < \alpha < 0,5 \quad (54)$$

$$w_t^C = 1 - w_t^F \quad (55)$$

$$\Delta P_t = \gamma + W_t^F D_t^F + W_t^C D_t^C + \epsilon_t \quad (56)$$

4.3.1 - Modelo 0

Além dos modelos 1 a 6, descritos nas seções anteriores, será estimado um Modelo 0, adicional, que corresponde a um passeio aleatório do preço do petróleo. A ideia é utilizá-lo como um referencial em comparações futuras dos resultados e permitir a identificação dos resultados dos modelos que são decorrentes de suas características únicas e não simplesmente um fruto do acaso. A Equação 57 abaixo descreve o Modelo 0.

$$\Delta P_t = \gamma + \Delta P_{t-1} + \epsilon_t \quad (57)$$

4.4 - O processo de estimação

Conforme discutido no Capítulo 3, o processo de estimação dos modelos descritos até o momento utilizará o processo de Inferência Bayesiana. Recapitulando a discussão, a abordagem Bayesiana pode ser considerada adequada à complexidade dos modelos descritos, permite a exploração direta da incerteza do valor dos parâmetros a serem estimados e é consistente com o processo teórico de calibragem de modelos complexos de simulação sugerido por WERKER e BRENNER (2004).

A presente seção terá o objetivo de descrever o processo de inferência Bayesiana, as principais etapas a serem percorridas para a execução da estimação, o racional por trás das distribuições *a priori* selecionadas para os parâmetros e as principais métricas de ajuste dos modelos a serem avaliadas. A última subseção fará um descriptivo dos dados utilizados. O roteiro analítico proposto é bastante influenciado pelo manual de inferência bayesiana escrito por GELMAN et al. (2014) com contribuições dos resultados e proposições de outros autores, sempre que aplicável.

4.4.1 - Breve revisão do processo de Inferência Bayesiana

4.4.1.1 - Estimação de um modelo

Conforme mostram GELMAN et al. (2014), KRUSCHKE e LIDDELL (2016) e outros textos de referência, o processo de inferência bayesiana consiste na construção de uma distribuição de probabilidade conjunta para todas as quantidades observáveis e não observáveis de um problema. Tal distribuição reflete o modelo construído para a representação de um dado problema científico e, necessariamente, deriva de um referencial teórico de análise.

A estimativa da distribuição de probabilidade das quantidades não observáveis condicionada aos dados realizados, principal objetivo do pesquisador no processo de agregação de conhecimento sobre o fenômeno estudado, torna-se possível a partir das relações descritas nas Equações 58 e 59 abaixo, derivadas do teorema de Bayes²⁶.

$$p(\theta, y) = p(\theta)p(y|\theta) \quad (58)$$

$$p(\theta|y) = \frac{p(\theta, y)}{p(y)} = \frac{p(\theta)p(y|\theta)}{p(y)} \quad (59)$$

Onde:

$p(\theta, y)$ é a distribuição de probabilidade conjunta dos parâmetros θ e dos dados y

$p(\theta|y)$ é a distribuição de probabilidade *a posteriori* para os parâmetros θ dado que os dados y ocorreram

$p(\theta)$ é a distribuição de probabilidade *a priori* para os parâmetros θ

$\frac{p(y|\theta)}{p(y)}$ representa a verossimilhança dos dados observados para um dado valor dos parâmetros θ

Sendo assim, o processo de estimativa da distribuição *a posteriori* dos parâmetros θ , $p(\theta|y)$, representa a atualização do conhecimento já existente sobre eles, representado pela distribuição *a priori* $p(\theta)$, com base na informação oferecida pela verossimilhança de ocorrência dos dados, descrita por $\frac{p(y|\theta)}{p(y)}$. A verossimilhança de ocorrência dos dados observados em função dos parâmetros, por sua vez, depende do modelo teórico que está sendo utilizado para representar o objeto estudado.

Trazendo para a realidade da presente Tese, o processo de inferência bayesiana dos modelos descritos nas seções anteriores terá por objetivo definir as distribuições de probabilidade dos parâmetros $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \theta$ e γ condicionadas aos dados observados. As formas funcionais das equações, por sua vez, terão o papel de definir a função de verossimilhança de ocorrência dos dados observados em função desses parâmetros. Para cada um desses parâmetros faz-se necessária a definição de distribuições de probabilidade à priori, que serão atualizadas pelos dados para a estimativa das distribuições à posteriori. Conforme descrevem KASS e WASSERMAN (1996), as

²⁶ O teorema de Bayes é descrito pela equação $p(A|B) = \frac{p(B|A) p(A)}{p(B)}$ onde se afirma que probabilidade de um evento A ter ocorrido dado que B ocorreu relaciona-se com a probabilidade de ocorrência do evento B dado que A ocorreu atualizada pela proporção relativa entre as probabilidades individuais de A e B.

distribuições *a priori* podem conter conhecimento teórico a respeito dos valores esperados para os parâmetros a serem estimados. Na ausência de informação significativa, é possível recorrer a distribuições *a priori* de referência. Os autores mostram que essas distribuições podem ser construídas segundo uma ampla diversidade de métodos e todos eles possuem o objetivo de atuar como uma maneira formal de representar a ignorância a respeito do parâmetro. Segundo ROBERT (2007) a escolha da distribuição à priori sempre influenciará a inferência estatística que será realizada. Contudo, o grau dessa influência dependerá da disponibilidade de informação oriunda dos dados para o processo de estimação.

A descrição dos modelos que são estimados na presente Tese mostra um número moderado de parâmetros em relação ao tamanho da amostra de dados que será utilizada na análise²⁷. Embora não exista uma medida objetiva capaz de indicar o tamanho mínimo da amostra de dados necessária para minimizar a influência da escolha da distribuição à priori, assumiremos na presente Tese que essa influência tende a ser baixa. Partindo dessa suposição autores como KASS e WASSERMAN (1996), ROBERT (2007), GELMAN et al. (2014) entre outros, sugerem o uso de distribuições à priori pouco informativas com uma média razoável dentro do espaço paramétrico e uma variância de ordem de grandeza elevada. Tal sugestão será acatada. Como uma forma de verificar a razoabilidade dessa premissa, é possível verificar a sua robustez estimando o modelo com diferentes distribuições à priori e verificando o seu impacto sobre os resultados.

Em modelos mais simples, é possível derivar analiticamente as distribuições marginais *a posteriori* de cada um dos parâmetros de interesse. Em modelos com formas funcionais mais complexas e em que há uma quantidade maior de parâmetros, a derivação analítica das distribuições marginais *a posteriori* dos parâmetros não é possível. Conforme mostram GELMAN et al. (2014) e GREENBERG (2008), a solução para esses casos passa pela simulação de valores para o parâmetro a partir de aproximações da distribuição *a posteriori*, ou pela aproximação numérica do resultado das integrais que definem o modelo probabilístico.

Os métodos de aproximação numérica buscam identificar a moda das distribuições marginais dos parâmetros de forma a obter estimativas pontuais para os seus valores. Entre os métodos mais utilizados está a aproximação de Laplace, que consiste na busca por uma distribuição multivariada normal que se aproxime o máximo

²⁷ Como será mostrado na próxima seção, o período de análise em frequência mensal, resultará em mais de 190 observações.

possível da distribuição *a posteriori* do problema em análise. Conforme mostra HALL (2011), por buscar estimativas pontuais, a aproximação de Laplace tende a convergir para um resultado mais rapidamente do que métodos de simulação de Monte Carlo via cadeias de Markov (Markov Chain Monte Carlo – MCMC). Contudo, em amostras menores e modelos mais complexos, por se tratar de um método em que os resultados são apenas assintoticamente válidos e as distribuições marginais são gaussianas, o seu uso é limitado. Em função dessas características, GELMAN et al. (2014) recomenda que a aproximação de Laplace seja utilizada como um estimativa inicial que permita a obtenção de valores iniciais mais próximos dos resultados finais para outros métodos de simulação.

O método de simulação de Monte Carlo via Cadeias de Markov é uma das principais ferramentas para a tarefa de simular valores dos parâmetros que permitam a derivação da distribuição *a posteriori*. GELMAN et al. (2014) afirma que o método MCMC é bastante geral e aplicável a uma ampla gama de modelos, mesmo aqueles em que há um número elevado de parâmetros e distribuições com formas funcionais complexas. Dentro do universo dos métodos de simulação de Monte Carlo via Cadeias de Markov existe uma série de algoritmos para a geração de cadeias de Markov em que a série de valores simulados para os parâmetros possui uma distribuição estável que converge para a distribuição à posteriori que se deseja estimar depois de um número finito de iterações.

Conforme mostra GREENBERG (2008) uma cadeia de Markov é um processo estocástico onde a distribuição de probabilidade para o valor do estado de um sistema no período $t+1$ depende apenas do valor do seu estado no período t . Essa relação é descrita por uma probabilidade de transição que rege com que frequência um determinado valor para o estado do sistema analisado pode mudar para cada um dos outros valores possíveis. Quando o conjunto de valores que a cadeia de Markov pode assumir é contínuo, a matriz de probabilidades de transição é representada a partir de um kernel de transição. Uma cadeia de Markov Homogênea, por sua vez, pode ser definida como uma cadeia de Markov em que a probabilidade de transição entre estados é independente do período t em que ela é avaliada.

Quando se trata de uma cadeia de Markov homogênea, não finita e definida em um espaço de estados contínuo, existe uma série de propriedades requeridas para que ela possa ser utilizada como ferramenta no método de simulação de Monte Carlo via

Cadeias de Markov. Conforme mostra GREENBERG (2008), a cadeia de Markov precisa ser²⁸:

- Irredutível: começando em um estado i , a cadeia possui probabilidade positiva de acessar qualquer um dos outros estados;
- Aperiódica: começando em um estado i , a cadeia pode retomar o próprio estado i em pelo menos 1 período.
- Positiva Recorrente: indica que uma cadeia de Markov possui probabilidade 1 de adotar um determinado estado e que o tempo médio esperado de atingimento desse determinado estado é finito.

A combinação das propriedades descritas acima é necessária e suficiente para demonstrar que o kernel de transição de uma cadeia de Markov que as atende deve convergir para uma distribuição de probabilidade invariante dos possíveis estados da cadeia após um número finito n de aplicações sucessivas. É esse resultado²⁹ que permite usar as realizações de uma cadeia de Markov como ferramenta para obter uma aproximação das distribuições *a posteriori* dos parâmetros em um problema de inferência Bayesiana. Os algoritmos de simulação MCMC utilizados na literatura, nada mais representam do que a tentativa de construir cadeias de Markov em que o kernel de transição converge para distribuição *a posteriori* após um número finito de realizações. Em função da sua capacidade de simular as distribuições de probabilidades dos parâmetros, é utilizado como método final para a obtenção das estimativas. A Figura 6 apresenta um esquema que sumariza o processo de estimação.



Figura 6 Representação esquemática do processo de estimação utilizando a abordagem de inferência Bayesiana

Fonte: Elaboração própria

4.4.1.2 - Diagnóstico de um modelo

Após a realização das estimativas de um modelo bayesiano, faz-se necessário analisar os resultados e realizar dois tipos de diagnóstico. O primeiro tipo de diagnóstico consiste em verificar se as simulações dos valores dos parâmetros obtidas através de Métodos MCMC efetivamente convergiram para as suas respectivas distribuições *a posteriori*. Em outras palavras, consiste em verificar se o processo de estimação foi

²⁸ A referência mencionada possui as definições formais para as propriedades descritas.

²⁹ Para uma demonstração desse resultado, ver GREENBERG (2008).

adequado. O segundo tipo de diagnóstico consiste em verificar o grau de adequação do modelo ao problema em análise. Conforme afirma STATISTICAT (2013), diferente da análise frequentista, onde os testes de hipótese checam a probabilidade de os dados terem ocorrido dada uma hipótese para os parâmetros, a análise bayesiana checa a probabilidade de a hipótese ser adequada dado que um conjunto de dados ocorreu.

Conforme foi possível observar na subseção anterior, o método MCMC é considerado adequado para a simulação das distribuições *a posteriori* dos parâmetros porque o seu kernel de transição converge para a distribuição *a posteriori* após um número finito de iterações do algoritmo de amostragem. Em função disso, a adequação da estimativa é verificada através de indicadores que demonstram que as cadeias de Markov simuladas através dos algoritmos de amostragem atingiram um estado de convergência. Os indicadores utilizados para tal fenômeno dividem-se em dois grupos: diagnósticos baseados na inspeção visual e diagnósticos baseados em indicadores de convergência.

No primeiro grupo, a convergência das cadeias pode ser avaliada através da inspeção dos gráficos traço e de autocorrelação das cadeias de Markov. O gráfico traço mostra o histórico dos estados da cadeia de Markov para cada um dos parâmetros e, embora a sua inspeção seja insuficiente para atestar a convergência de uma cadeia, um gráfico que mostra uma série com algum tipo claro de tendência é um indicativo claro de não-convergência. O gráfico de autocorrelação, por sua vez, é utilizado para mensurar a dependência entre os estados da cadeia de Markov. Embora não seja um indicativo de não convergência, um gráfico de autocorrelação que não decai rapidamente para números próximos de zero a partir do primeiro *lag* mostra que a cadeia necessita de um número muito grande de iterações para possibilitar a identificação da distribuição *a posteriori*, indicando ineficiência do algoritmo de amostragem.

Entre os indicadores estatísticos (não visuais) de convergência, é possível recorrer aos diagnósticos BMK e de Geweke. O primeiro deles, baseado em BOONE et al. (2014) consiste na mensuração das distâncias de Hellinger³⁰ entre as distribuições simuladas a partir de trechos da cadeia de Markov em análise. Quanto menor for a distância de Hellinger entre as diferentes frações da cadeia, mais próximo da convergência ela se encontra. Segundo a referência, se as distâncias calculadas estiverem abaixo de 0,5 há um indicativo de convergência. O segundo, baseado em

³⁰ A distância de Hellinger é uma das formas de se mensurar a diferença entre duas distribuições de probabilidade. No diagnóstico BMK a cadeia de markov é separada em múltiplos trechos e a distância de Hellinger é utilizada para verificar o quanto diferentes são as distribuições representadas pelos diferentes trechos entre si.

GEWEKE (1991) consiste na realização de um teste de hipótese para a diferença entre as médias das porções inicial e final da cadeia de Markov sob análise. Em seu cálculo é gerada uma estatística de teste Z-score³¹ que é comparada a uma distribuição normal padrão. Se a estatística de teste estiver dentro do intervalo de 95% de confiança, a hipótese de convergência (equivalência das médias das frações da cadeia) não é rejeitada.

Finalizada a análise de convergência das cadeias de Markov a serem utilizadas na estimativa das distribuições à posteriori, faz-se necessário analisar o quanto adequado o modelo é para representar os dados do problema. Com o objetivo de analisar o poder preditivo de cada modelo e possibilitar a comparação entre eles GELMAN et al. (2014) sugere a utilização de critérios de informação. Os critérios de informação consistem em métricas de mensuração da acurácia das previsões probabilísticas realizadas pelo modelo. Diferente de métricas de avaliação de estimativas pontuais como o erro quadrático médio, por exemplo, as métricas propostas aqui levam em consideração a incerteza da previsão a ser feita pelo modelo. Essa incerteza deriva, dentre outras coisas, da incerteza do valor dos parâmetros.

Entre as métricas analisadas, ANDO (2010) identifica a possibilidade de utilização do Bayesian Predictive Information Criteria (BPIC) enquanto GELMAN et al. (2014) sugere o uso do Watanabe Akaike Information Criteria (WAIC). O critério BPIC utiliza informações da distribuição posterior simulada para construir os dois elementos constituintes de qualquer critério de informação: a função de verossimilhança (logaritmo da densidade preditiva) e uma métrica de ajuste que busca penalizar a complexidade do modelo analisado. A Equação 60 mostra a fórmula de cálculo do BPIC.

$$BPIC = -2 E(LL) + 2p \quad (60)$$

Onde:

$E(LL)$ é a esperança *a posteriori* da função de verossimilhança do modelo

p é o número de parâmetros do modelo

O WAIC, por sua vez, é computado a partir da amostra dos dados simulados da distribuição posterior para construir a função de verossimilhança e a métrica de ajuste. Por utilizar dados simulados de toda a distribuição e não estimativas pontuais dos

³¹ Segundo HALL (2011), o Z-score é calculado a partir da diferença entre as médias das porções final e inicial da cadeia de markov normalizada através da divisão pelo desvio padrão da cadeia.

momentos da distribuição posterior, o WAIC é considerado preferido pelos autores para um contexto de análise Bayesiano. A Equação 61 mostra a fórmula de cálculo do WAIC.

$$WAIC = -2 \sum_{i=1}^n \log \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S p(y_i | \theta^s) + 2 \sum_{i=1}^n (\log \left(\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S p(y_i | \theta^s) \right) - \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \log p(y_i | \theta^s)) \quad (61)$$

Onde:

$\sum_{i=1}^n \log \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S p(y_i | \theta^s)$ representa o cálculo da média da densidade posterior a partir dos dados simulados

$\sum_{i=1}^n (\log \left(\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S p(y_i | \theta^s) \right) - \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \log p(y_i | \theta^s))$ representa a métrica de correção da estimativa do WAIC. Representa o número efetivo de parâmetros do modelo.

n é o tamanho da amostra dos dados

S é o número de simulações utilizadas para a estimativa da distribuição *a posteriori* dos parâmetros

Como foi possível observar das equações acima, os dois critérios de informação mencionados são definidos como um valor negativo. Ou seja, quanto menor o valor do critério, melhor é o ajuste do modelo analisado aos dados. Como há a adoção de ajustes para a correção do viés ocasionado pelo aumento do número de parâmetros, é possível utilizar as métricas descritas acima para comparar modelos distintos, desde que eles estejam utilizando o mesmo conjunto de dados.

Além das métricas de ajuste do modelo, há um conjunto de inferências que podem ser realizadas no sentido de investigar a adequação do modelo aos dados reais. As checagens preditivas posteriores (*posterior predictive checks* na literatura em inglês), consistem na comparação entre propriedades dos dados gerados a partir do modelo com características dos dados reais utilizados na estimação. A sua análise resulta no cálculo de probabilidades que seguem a estrutura descrita pela Equação 62.

$$p_b = \Pr(T(y^{rep}, \theta) \geq T(y, \theta) | y) \quad (62)$$

Onde:

p_b representa a probabilidade da checagem preditiva posterior

$\Pr(T(y^{rep}, \theta) \geq T(y, \theta) | y)$ representa a probabilidade calculada a partir da distribuição *a posteriori* de que a propriedade T seja verdadeira

$T(y^{rep}, \theta)$ representa qualquer propriedade dos dados produzidos a partir dos modelos e dos parâmetros que se queira avaliar em comparação com $T(y, \theta)$, a mesma propriedade calculada a partir dos dados efetivamente realizados.

A escolha das propriedades T a serem investigadas é bastante dependente do problema em análise e das características que o modelo precisa representar bem para ser considerado adequado aos objetivos de pesquisa para os quais se destina. Sendo assim, a escolha das funções a serem analisadas está diretamente relacionada com os objetivos da presente Tese. Por se tratar da tentativa de utilizar um modelo para estimar uma série passada de preços de petróleo, faz sentido investigar se as principais características das distribuições dos preços projetados estão razoavelmente representadas nos dados resultantes do modelo. Para isso foram escolhidas as quatro checagens preditivas posteriores descritas pelas Equações 63 a 66.

$$p_{média} = \Pr(Média(y^{rep}, \theta) \geq Média(y, \theta) | y) \quad (63)$$

$$p_{min} = \Pr(\text{Min}(y^{rep}, \theta) \leq \text{Min}(y, \theta) | y) \quad (64)$$

$$p_{max} = \Pr(\text{Max}(y^{rep}, \theta) \geq \text{Max}(y, \theta) | y) \quad (65)$$

$$p_{sd} = \Pr(\text{DesvPad}(y^{rep}, \theta) \geq \text{DesvPad}(y, \theta) | y) \quad (66)$$

As checagens descritas nas equações acima têm o objetivo de identificar se os valores gerados pelo modelo possuem uma distribuição que se aproxime da distribuição original dos dados. Dito isso, é esperado que, para um modelo razoavelmente ajustado, a checagem (63), que envolve a análise da média da série, possua um valor próximo a 50%. As checagens (64) e (65), que lidam com os extremos inferior e superior devem resultar em probabilidades baixas, na medida em que probabilidades muito elevadas indicam que o modelo está gerando valores extremos ainda não observados na série histórica. É importante ressaltar que, por causa dessa mesma interpretação não é razoável esperar que essas probabilidades sejam equivalentes a zero, o que poderia indicar que o modelo está gerando resultados limitados a um intervalo mais restrito do que os próprios dados. Por último, a checagem (66) representa uma métrica complementar às checagens (64) e (66) ao investigar se os dados produzidos pelo modelo são mais voláteis do que a própria série histórica.

4.4.2 - Procedimento de estimação dos modelos

O procedimento utilizado para estimar os modelos descritos na seção 4.3 pode ser dividido em duas etapas: a estimação dos valores fundamentalistas e a estimação dos modelos propriamente ditos. Na primeira etapa serão produzidas três séries de expectativas de preços para os agentes fundamentalistas a serem alimentadas em cada um dos seis modelos a serem estimados. Conforme descrito anteriormente, cada uma

das três séries será utilizada duas vezes, uma para cada um dos dois possíveis mecanismos de mudança de comportamento adotados. Por ser construída diretamente a partir da simples extração do movimento passado dos preços, a expectativa de preços dos agentes grafistas será elaborada em conjunto com a estimativa dos modelos propriamente ditos, já na segunda etapa.

No caso da visão fundamentalista baseada na média móvel, a Equação 16 será aplicada diretamente à série de preços do Brent como forma de obter a sua média móvel de 12 meses. A série resultante será utilizada diretamente para representar os valores para a expectativa de preços fundamentalistas nos Modelos 1 e 4. Para permitir que as diferenças entre o período $t-1$ e t possam ser interpretadas diretamente como variações percentuais, a série de preços do Brent foi transformada em logaritmo antes da aplicação da Equação 16.

Para a construção da visão fundamentalista baseada no balanço entre oferta e demanda, por sua vez, a Equação 17 será estimada através do método dos mínimos quadrados ordinários. Pela mesma razão adotada no caso da visão fundamentalista baseada na média móvel, os valores do Brent utilizados também foram transformados em logaritmo antes da aplicação da Equação 17. Como a especificação da referida equação possui a variação do preço do Brent como variável dependente, a construção da série de valores fundamentalistas baseada no balanço entre oferta e demanda será realizada através da soma dos resultados do modelo com uma série defasada dos preços do petróleo Brent. Tal procedimento é consistente com o objetivo de refletir o comportamento dos agentes de formar suas expectativas para apenas um período à frente. A série resultante será utilizada diretamente para representar os valores para a expectativa de preços fundamentalistas nos Modelos 2 e 5.

Por último, será construída uma visão fundamentalista com base no modelo VAR através da estimativa do modelo expresso pela Equação 18. Assim como nos dois casos anteriores, e pelas mesmas razões, os valores do Brent utilizados serão transformados em logaritmo antes da estimativa do modelo. Para a construção da série de valores fundamentalistas baseadas no modelo VAR será utilizado o resultado do modelo para a primeira equação do modelo, que descreve a variação dos preços em função das outras variáveis. Assim como no caso da visão fundamentalista baseada no balanço entre oferta e demanda, será realizada a soma dos resultados da primeira equação do modelo com uma série defasada do petróleo Brent. Embora sejam descartados na construção da série de valores fundamentalistas, a natureza de um modelo VAR faz com que a informação contida nas outras quatro equações contribua diretamente sobre as

características dos resultados produzidos pela primeira equação³². A série resultante será utilizada diretamente para representar os valores para a expectativa de preços fundamentalistas nos Modelos 3 e 6.

Construídas as visões fundamentalistas, estas serão alimentadas nos Modelos 1 a 6 para a segunda etapa do processo, a estimativa propriamente dita dos modelos. A especificação e a estimativa dos seis modelos será feita através do uso do software estatístico de código aberto “R” e das ferramentas de vários de seus pacotes, com destaque para o pacote “LaplaceDemon”, descrito em HALL (2011), que possui um conjunto de ferramentas dedicadas à inferência bayesiana.

A estimativa de cada um dos modelos seguirá um roteiro padrão que consiste em três etapas. A primeira delas diz respeito à determinação das distribuições *a priori* dos parâmetros. Conforme descrito na Subseção 4.4.1, a determinação das distribuições *a priori* no problema da presente Tese terá como premissa o fato de que existe pouca informação prévia sobre o valor dos parâmetros, o que permite a adoção de distribuições *a priori* pouco informativas que, por sua vez, serão dominadas pelos dados no processo de estimativa das distribuições *a posteriori*.

Em termos práticos serão utilizadas distribuições normais para os parâmetros α , β_1 , β_2 , β_3 , θ e γ com média dentro do intervalo possível de valor dos parâmetros e variâncias elevadas. Para a variância da estimativa de preços, que também é estimada pelo modelo, será utilizada uma distribuição do tipo Half-Cauchy com a escala em 25, em linha com a sugestão de GELMAN et al. (2014) para a elaboração de uma distribuição *a priori* pouco informativa para parâmetros que descrevem a variância. As Equações 67 a 74 mostram as distribuições *a priori* escolhidas para cada parâmetro³³ e seus respectivos parâmetros descritivos.

$$\alpha \sim Normal(0,5; 10), \text{ Modelos 1, 2 e 3} \quad (67)$$

$$\alpha \sim Normal(0,25; 10), \text{ Modelos 4, 5 e 6} \quad (68)$$

$$\beta_1 \sim Normal(0,5; 10) \quad (69)$$

$$\beta_2 \sim Normal(0,5; 10) \quad (70)$$

³² Segundo ENDERS (2010), em um modelo VAR, a estimativa dos coeficientes para uma determinada variável é afetada pelos valores contemporâneos das outras variáveis.

³³ As distribuições *a priori* para alfa dependem do Modelo considerado. Enquanto nos Modelos 1, 2 e 3 o parâmetro alfa corresponde ao coeficiente que indica o quanto os agentes consideram os resultados passados na sua métrica de desempenho, nos Modelos 4, 5 e 6 o parâmetro alfa indica a participação mínima possível para os agentes com comportamento fundamentalista.

$$\beta_3 \sim Normal(0,5; 10) \quad (71)$$

$$\theta \sim Normal(2; 10) \quad (72)$$

$$\gamma \sim Normal(0,5; 10) \quad (73)$$

$$\sigma \sim HalfCauchy(25) \quad (74)$$

A opção pelos valores apresentados representa um aporte limitado de informação através das distribuições *a priori*. Os valores positivos para a média dos parâmetros refletem a expectativa teórica de que esses valores sejam de fato positivos. Dado o baixo conhecimento prévio em relação ao formato da distribuição dos parâmetros, o valor de 10 escolhido para a variância representa um compromisso entre a representação de uma distribuição *a priori* com variância ampla e pouco informativa, com o uso de um valor limitado como forma de reduzir o esforço computacional no momento da estimação. Com os parâmetros escolhidos, estamos dizendo que, *a priori*, um parâmetro cuja distribuição é $N(0,5;10)$ possui uma probabilidade de 95% de se situar entre -5,7 e 6,7. Os dados, posteriormente, contribuirão para restringir esse intervalo.

A segunda etapa é, conforme recomenda GELMAN et al. (2014), a utilização da Aproximação de Laplace como forma de obter uma indicação aproximada dos valores iniciais dos parâmetros. Essa aproximação será realizada por um limite máximo de 12000 iterações e, como o objetivo não é utilizar os seus resultados para inferência estatística, não há a necessidade de que o modelo apresente convergência ao final do processo. O algoritmo numérico de aproximação utilizado é o Spectral Projected Gradient³⁴. Conforme afirma HALL (2011), o algoritmo apresenta alta performance para modelos de dimensões mais elevadas, sendo adequado para o grau de complexidade do modelo que está sendo estimado.

Na terceira etapa, os valores iniciais obtidos na segunda etapa serão encaminhados para um algoritmo de amostragem que possibilitará a simulação das distribuições *a posteriori* dos parâmetros do modelo através de métodos MCMC. Dentre os diferentes algoritmos de amostragem disponíveis, foi escolhida uma variante do algoritmo “Slice Sampling” proposto por NEAL (2003). Segundo o autor, o algoritmo “Slice Sampling” possui uma implementação mais simples do que o algoritmo de Gibbs e uma eficiência computacional superior aos algoritmos do tipo Metropolis-Hastings. Conforme descrevem TIBBITS et al. (2014), o algoritmo “Automated Factor Slice Sampling”, a variante escolhida, é uma generalização multivariada e mais eficiente do

³⁴ Para maiores detalhes sobre o algoritmo, ver BIRGIN et al. (2000)

algoritmo “Slice Sampling” em que o processo de ajuste dos parâmetros do algoritmo para obtenção da máxima eficiência de simulação possível é automatizado.

No que diz respeito ao número de iterações do algoritmo de amostragem, não existe uma teoria capaz de determinar, ex-ante, o número de iterações necessário para o atingimento da convergência. Para fins de inferência, GELMAN et al. (2014) recomenda que seja produzida uma amostra efetiva de pelo menos 100 observações. Assumindo que existe um período inicial de busca pela convergência das cadeias de Markov e que parte das iterações deve ser descartada de forma a reduzir a autocorrelação entre as simulações, serão realizadas até 30000³⁵ iterações para cada um dos modelos.

4.4.3 - Descrição das bases de dados

Apesar da complexidade dos modelos, a sua estimação não depende da coleta de uma grande quantidade de dados. O principal uso das informações relativas aos fundamentos do mercado de petróleo se dá na estimativa das diferentes séries que cumprirão o papel de referência de valor fundamental para os agentes fundamentalistas. Além das informações relativas aos fundamentos de mercado, faz-se necessária, obviamente, uma série histórica para os preços do Brent.

Os dados históricos para o preço do Brent, para o desequilíbrio entre oferta e demanda e para a oferta de petróleo dos países membros e não membros da OPEP foi extraída do endereço eletrônico do Departamento de Energia dos EUA em DOE (2017). Os dados foram coletados a partir de uma consulta à base de dados denominado “Short Energy Outlook Data Browser”. A única exceção é o índice mensal de produção industrial do mundo compilado pelo CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis³⁶.

Todas as séries estão em frequência mensal. As séries têm início em janeiro de 2000 e se estendem até dezembro de 2016. As datas final e inicial da base de dados são limitadas pelo índice que representa uma proxy para o nível mensal de atividade econômica, que foi atualizado pela última vez em dezembro de 2016 e teve início em janeiro de 2000. A série de preços do Brent foi deflacionada utilizando-se o índice de preços ao consumidor dos EUA. Os dados de inflação utilizados para a correção

³⁵ Durante o processo de estimação foi observado que alguns dos modelos, notadamente os Modelos 3 e 6 demandaram um número maior de iterações para atingirem estatísticas adequadas de convergência.

³⁶ Disponível em <http://www.cpb.nl/en/world-trade-monitor>.

monetária da série foram obtidos na base de dados “FRED” do Federal Reserve de St Louis, também dos EUA, disponível em ST LOUIS (2017).

5 - Resultados e discussão

Após a apresentação da modelagem, do procedimento de estimação e dos principais parâmetros para a interpretação dos resultados no Capítulo 4, o presente capítulo tem o objetivo de apresentar os resultados da estimação dos modelos e discuti-los a luz das perguntas de pesquisa realizadas nos capítulos iniciais da presente Tese. O mesmo será dividido em duas grandes seções, uma delas para a apresentação do diagnóstico dos modelos e a outra para a apresentação e discussão dos resultados.

5.1 - Diagnóstico dos Modelos

5.1.1 - Estatísticas descritivas dos dados

Conforme observado no capítulo anterior, apesar da sua complexidade, os modelos não demandam uma grande quantidade de informações. A Tabela 2 abaixo contém as principais estatísticas descritivas dos dados utilizados e a Figura 7 mostra o comportamento das variáveis listadas na Tabela 2 ao longo do tempo.

Tabela 2 Estatísticas Descritivas das Séries de Dados

| stat | Brent | VarAbsBrent | Balanco | ProdNOPEP | ProdOPEP | VarPerProdIndustrial |
|---------|-------|-------------|---------|-----------|----------|----------------------|
| 1st Qu. | 43,4 | -3,05 | -1,09 | 48,1 | 34,4 | 0,005 |
| 3rd Qu. | 105,8 | 3,90 | 1,00 | 52,1 | 37,8 | 0,250 |
| Max. | 147,9 | 14,80 | 3,70 | 58,0 | 40,7 | 0,581 |
| Mean | 73,4 | 0,08 | -0,07 | 50,3 | 36,0 | 0,092 |
| Median | 69,8 | 1,00 | 0,05 | 49,2 | 36,6 | 0,125 |
| Min. | 25,6 | -27,80 | -4,25 | 44,3 | 29,4 | -1,374 |

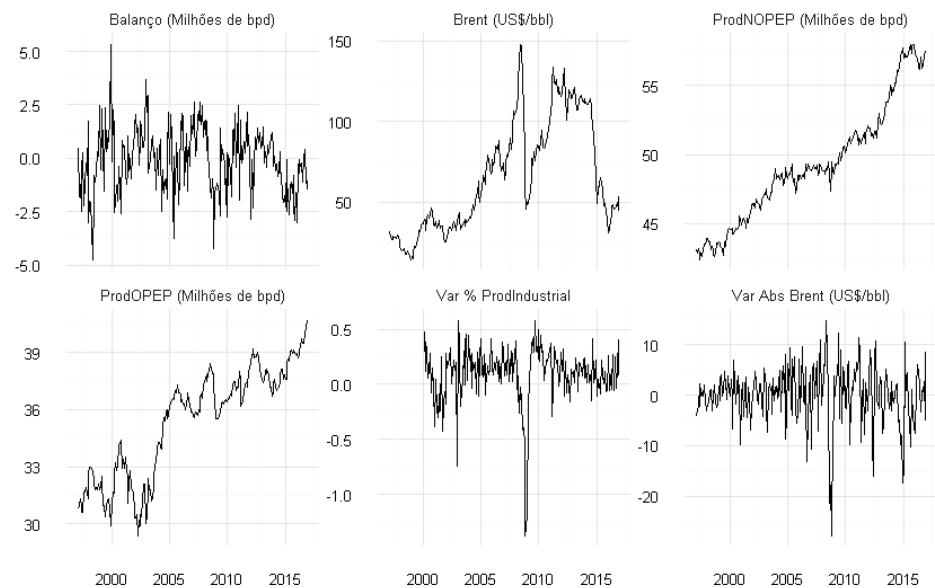


Figura 7 Evolução no tempo das Séries de Dados

Como é possível observar nas imagens acima, o Balanço entre oferta e demanda no mercado de petróleo e as variações do preço em relação ao mês anterior tendem a apresentar um comportamento mais próximo do estacionário ao longo do tempo. As séries de produção da OPEP e de fora da OPEP e do Índice de Produção Industrial CPB, por sua vez, apresentam uma tendência constante de crescimento, justificando o seu uso em diferenças no terceiro tipo de modelagem do valor fundamentalista.

5.1.2 - Resultados da estimativa das séries de valores fundamentalistas

Com base nas informações das séries de dados, a etapa seguinte consistiu na construção das três séries para os valores fundamentalistas a serem usados como referência pelos agentes fundamentalistas. No caso do primeiro tipo baseado no cálculo da média móvel, não foi necessária a estimativa de nenhum tipo de modelo, apenas a construção da série com base nos preços históricos do Brent. A Figura 8, a seguir, mostra o comportamento da média móvel calculada em comparação com os valores realizados do preço do Brent.

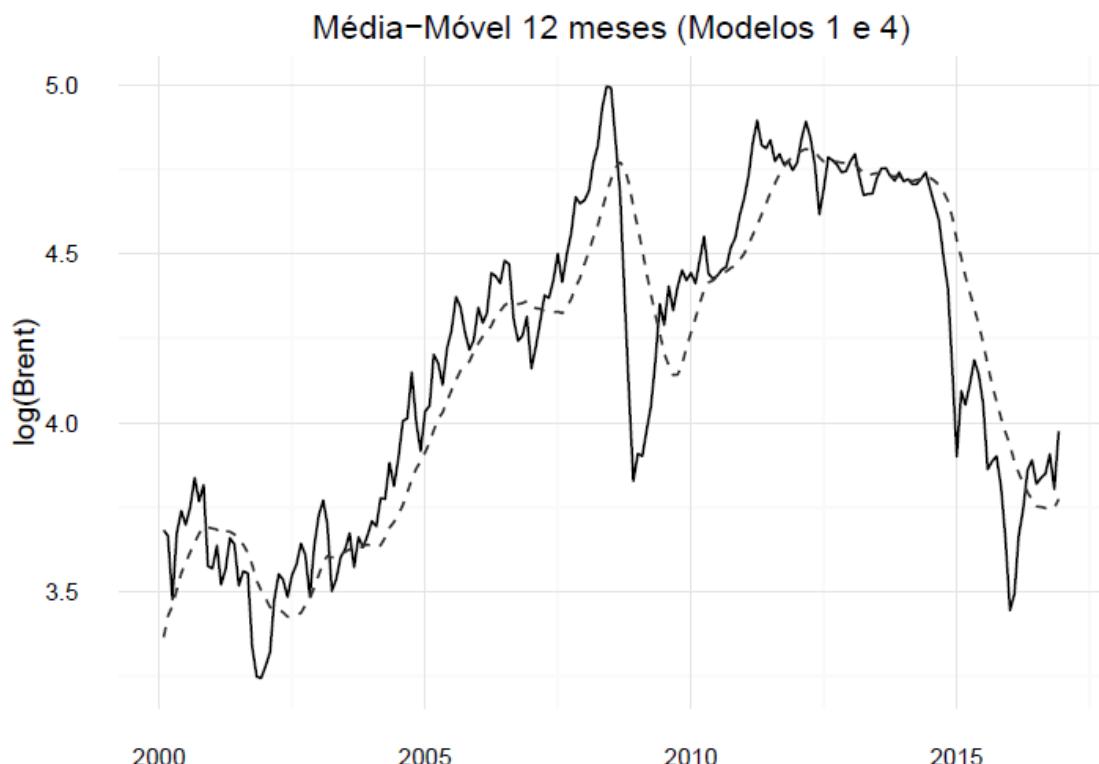


Figura 8 Comparativo entre a estimativa do valor fundamentalista baseada na Média-Móvel de 12 meses (linha tracejada) e o preço realizado (linha sólida).

Para o segundo tipo, construído a partir de um modelo simplificado com base no balanço, foi estimada uma regressão linear simples entre a variação histórica do preço do Brent e o balanço entre oferta e demanda em cada período. Por se tratarem de duas séries estacionárias, o estimador de mínimos quadrados ordinários pode ser considerado um estimador eficiente e não viesado. Os resultados estão na Tabela 3.

Tabela 3 Estimativa dos Parâmetros do modelo usado na construção do Segundo Caso de formação de Expectativa do Agente Fundamentalista

| Variaveis Dependentes: | |
|-------------------------|-------------------------|
| | delta_log_Brent |
| lag_Bal | 0.015*** (0.004) |
| Observations | 202 |
| R ² | 0.058 |
| Adjusted R ² | 0.053 |
| Residual Std. Error | 0.090 (df = 201) |
| F Statistic | 12.400*** (df = 1; 201) |

*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Em linha com a intuição econômica, o valor positivo e estatisticamente significativo do parâmetro indica que variações positivas do preço do Brent estão relacionadas com déficits no mercado de petróleo e vice-versa. O valor do R² ajustado de 0,053, contudo, mostra que essa visão tem potencial limitado de explicar as variações dos preços do petróleo. A Figura 9 mostra a comparação entre a série dos valores fundamentalistas construídas a partir do modelo descrito e o preço do Brent realizado. A proximidade entre os gráficos mostra que, para previsões em um horizonte de apenas um mês a frente, o modelo produz valores fundamentalistas mais próximos do realizado em relação ao modelo baseado em médias móveis.

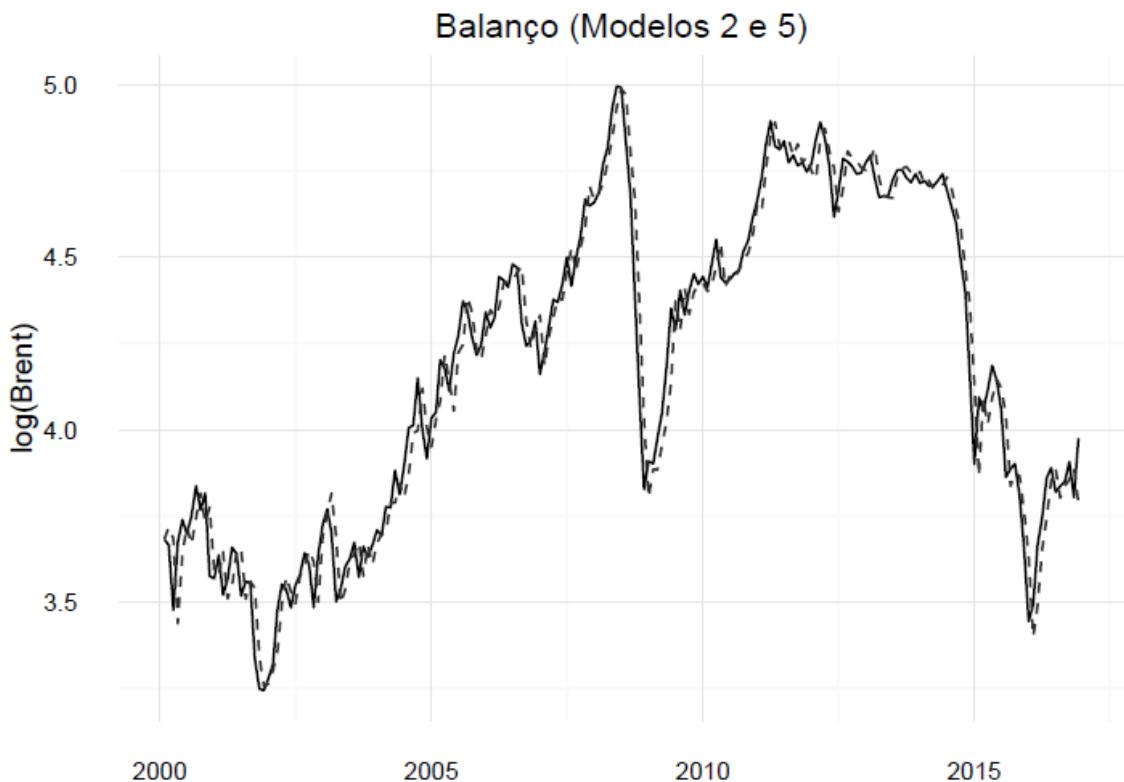


Figura 9 Comparativo entre a estimativa do valor fundamentalista baseada no Balanço entre oferta e demanda (linha tracejada) e o preço realizado (linha sólida).

Para o terceiro tipo, baseado em um conjunto maior de variáveis, foi estimado um modelo VAR com cinco equações e cinco variáveis. As séries correspondentes a produção de petróleo dentro e fora da OPEP (OPECProd e NOPECProd, respectivamente) foram diferenciadas e o seu logaritmo extraído de forma a torná-las estacionárias e possibilitar a estimação dos modelos através do método de mínimos quadrados ordinários. Como os dados são mensais, foi incluído um conjunto de variáveis dummy sazonais e a defasagem do modelo foi escolhida com base no critério de informação de Akaike (AIC). Os resultados da estimação são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 Estimativa dos Parâmetros do modelo usado na construção do Terceiro Caso de formação de Expectativa do Agente Fundamentalista

| | Variáveis Dependentes: | | | | |
|--------------------------------|------------------------|---------------|---------------|------------|---------------|
| | dlogBrent | y | | | |
| | | (1) | (2) | (3) | (4) |
| dlogBrent.l1 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | -0.34 |
| | p = 0.46 | p = 0.0001*** | p = 0.32 | p = 0.53 | p = 0.73 |
| dlogProdInd.l1 | 3.98 | 0.44 | 0.01 | 1.08 | 36.20 |
| | p = 0.16 | p = 0.00*** | p = 0.96 | p = 0.02** | p = 0.31 |
| dlogNOPECProd.l1 | -1.21 | 0.01 | -0.24 | 0.20 | 6.23 |
| | p = 0.18 | p = 0.61 | p = 0.001*** | p = 0.16 | p = 0.58 |
| dlogOPECProd.l1 | 0.33 | -0.01 | -0.01 | -0.13 | -14.20 |
| | p = 0.53 | p = 0.50 | p = 0.83 | p = 0.11 | p = 0.04** |
| Balanco.l1 | 0.01 | 0.0001 | 0.0004 | 0.0003 | 0.57 |
| | p = 0.01*** | p = 0.52 | p = 0.30 | p = 0.70 | p = 0.00*** |
| const | -0.0003 | 0.0005 | 0.002 | 0.0002 | -0.06 |
| | p = 0.97 | p = 0.004*** | p = 0.005*** | p = 0.87 | p = 0.45 |
| sd1 | 0.04 | -0.001 | 0.01 | 0.001 | 2.30 |
| | p = 0.20 | p = 0.30 | p = 0.01*** | p = 0.86 | p = 0.0000*** |
| sd2 | 0.03 | -0.002 | 0.01 | -0.002 | 0.44 |
| | p = 0.33 | p = 0.03** | p = 0.04** | p = 0.72 | p = 0.27 |
| sd3 | 0.02 | -0.001 | 0.01 | -0.003 | 0.36 |
| | p = 0.62 | p = 0.21 | p = 0.02** | p = 0.59 | p = 0.37 |
| sd4 | 0.05 | -0.001 | 0.01 | -0.001 | 0.23 |
| | p = 0.15 | p = 0.36 | p = 0.03** | p = 0.82 | p = 0.57 |
| sd5 | 0.03 | -0.001 | 0.01 | -0.001 | 1.87 |
| | p = 0.36 | p = 0.13 | p = 0.03** | p = 0.83 | p = 0.0000*** |
| sd6 | 0.01 | -0.001 | 0.01 | 0.01 | 0.51 |
| | p = 0.82 | p = 0.28 | p = 0.0000*** | p = 0.18 | p = 0.20 |
| sd7 | 0.02 | -0.001 | 0.003 | 0.001 | 1.39 |
| | p = 0.50 | p = 0.27 | p = 0.21 | p = 0.83 | p = 0.001*** |
| sd8 | -0.02 | -0.001 | 0.002 | 0.001 | 1.10 |
| | p = 0.55 | p = 0.21 | p = 0.44 | p = 0.87 | p = 0.01*** |
| sd9 | -0.02 | -0.001 | 0.02 | -0.001 | 0.33 |
| | p = 0.44 | p = 0.35 | p = 0.00*** | p = 0.91 | p = 0.39 |
| sd10 | -0.02 | -0.001 | 0.02 | -0.01 | 0.79 |
| | p = 0.62 | p = 0.21 | p = 0.00*** | p = 0.19 | p = 0.06* |
| sd11 | -0.005 | -0.001 | 0.01 | -0.01 | 1.65 |
| | p = 0.89 | p = 0.16 | p = 0.01*** | p = 0.04** | p = 0.0001*** |
| Observations | 202 | 202 | 202 | 202 | 202 |
| R ² | 0.17 | 0.35 | 0.38 | 0.13 | 0.46 |
| Adjusted R ² | 0.10 | 0.29 | 0.33 | 0.05 | 0.41 |
| Residual Std. Error (df = 185) | 0.09 | 0.002 | 0.01 | 0.01 | 1.09 |
| F Statistic (df = 16; 185) | 2.43*** | 6.21*** | 7.11*** | 1.69* | 9.84*** |

*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

As estatísticas F das cinco equações mostram que o modelo, como um todo, pode ser considerado estatisticamente significativo. Apesar disso, o R² ajustado de apenas 0,10 da equação que possui as variações do Brent como variável dependente e a grande quantidade de parâmetros não significativos mostra que mesmo com a incorporação de novas variáveis, esse modelo também apresenta um potencial limitado de explicar as variações do preço do Brent no passado. Assim como aconteceu com o segundo caso, para previsões em um horizonte de apenas um mês a frente, o modelo produz valores fundamentalistas mais próximos do realizado em relação ao modelo baseado em médias móveis. A Figura 10, a seguir, mostra isso.

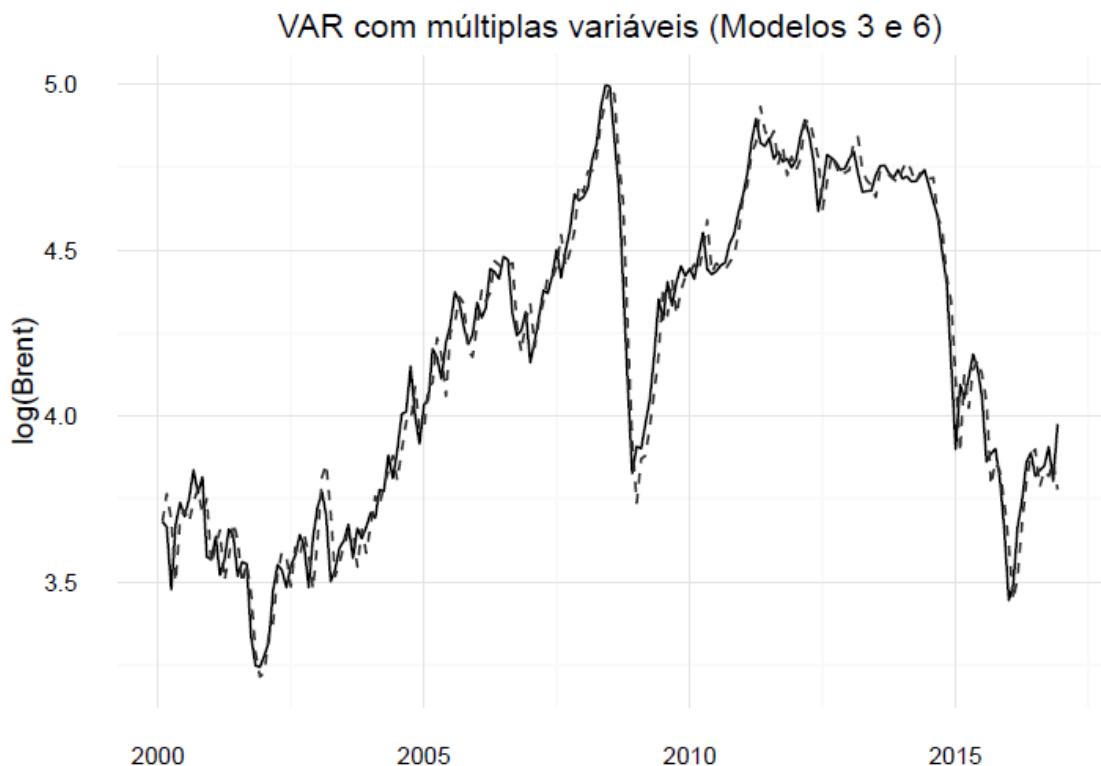


Figura 10 Comparativo entre a estimativa do valor fundamentalista baseada em modelo VAR com cinco variáveis (linha tracejada) e o preço realizado (linha sólida).

5.1.3 - Estatísticas de convergência dos Modelos 0 a 6

Seguindo o roteiro analítico proposto, os primeiros resultados a serem avaliados são as estatísticas de convergência das Cadeias de Markov utilizadas para simular as distribuições *a posteriori* dos modelos estimados. A inspeção visual dos gráficos Traço e de Autocorrelação das simulações realizadas para cada um dos modelos não indica nenhum tipo de anomalia visível no processo de simulação das distribuições à posteriori. Os gráficos citados para cada um dos modelos podem ser observados no Anexo I.

Embora importante, a simples inspeção visual dos gráficos é insuficiente para a conclusão do diagnóstico de convergência. Nesse sentido, as Tabelas 5 a 11 mostram os resultados para o teste BMK de convergência, enquanto a Tabela 12 mostra o diagnóstico Geweke para o modelo baseado no passeio aleatório e cada um dos seis modelos estimados.

Tabela 5 Estatísticas BMK para as simulações do Modelo 0

Modelo 0

| | 75 | 150 | 225 | 300 | 375 | 450 | 525 | 600 | 675 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| gama | 0,143 | 0,156 | 0,163 | 0,090 | 0,062 | 0,115 | 0,141 | 0,200 | 0,131 |
| sigma | 0,139 | 0,168 | 0,132 | 0,081 | 0,075 | 0,067 | 0,098 | 0,110 | 0,111 |

Tabela 6 Estatísticas BMK para as simulações do Modelo 1

Modelo 1

| | 150 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 | 1050 | 1200 | 1350 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| alfa | 0,077 | 0,111 | 0,080 | 0,054 | 0,110 | 0,109 | 0,094 | 0,058 | 0,066 |
| beta1 | 0,060 | 0,046 | 0,076 | 0,057 | 0,069 | 0,091 | 0,086 | 0,055 | 0,069 |
| beta2 | 0,091 | 0,114 | 0,094 | 0,103 | 0,087 | 0,109 | 0,074 | 0,107 | 0,046 |
| beta3 | 0,107 | 0,077 | 0,078 | 0,123 | 0,059 | 0,064 | 0,056 | 0,105 | 0,092 |
| gama | 0,106 | 0,104 | 0,108 | 0,113 | 0,073 | 0,100 | 0,065 | 0,108 | 0,060 |
| teta | 0,055 | 0,037 | 0,108 | 0,105 | 0,092 | 0,096 | 0,062 | 0,083 | 0,065 |
| sigma | 0,066 | 0,083 | 0,045 | 0,085 | 0,083 | 0,088 | 0,067 | 0,091 | 0,119 |

Tabela 7 Estatísticas BMK para as simulações do Modelo 2

Modelo 2

| | 300 | 600 | 900 | 1200 | 1500 | 1800 | 2100 | 2400 | 2700 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| alfa | 0,066 | 0,038 | 0,036 | 0,059 | 0,111 | 0,100 | 0,059 | 0,037 | 0,058 |
| beta1 | 0,089 | 0,102 | 0,066 | 0,104 | 0,110 | 0,114 | 0,087 | 0,071 | 0,118 |
| beta2 | 0,134 | 0,106 | 0,124 | 0,153 | 0,135 | 0,096 | 0,107 | 0,096 | 0,061 |
| beta3 | 0,179 | 0,135 | 0,095 | 0,107 | 0,183 | 0,140 | 0,099 | 0,100 | 0,109 |
| gama | 0,083 | 0,103 | 0,093 | 0,099 | 0,104 | 0,070 | 0,088 | 0,052 | 0,054 |
| teta | 0,106 | 0,160 | 0,093 | 0,098 | 0,132 | 0,186 | 0,051 | 0,125 | 0,060 |
| sigma | 0,101 | 0,048 | 0,058 | 0,067 | 0,087 | 0,110 | 0,045 | 0,071 | 0,089 |

Tabela 8 Estatísticas BMK para as simulações do Modelo 3

Modelo 3

| | 270 | 540 | 810 | 1080 | 1350 | 1620 | 1890 | 2160 | 2430 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| alfa | 0,060 | 0,037 | 0,061 | 0,117 | 0,060 | 0,062 | 0,051 | 0,031 | 0,021 |
| beta1 | 0,044 | 0,055 | 0,082 | 0,100 | 0,076 | 0,069 | 0,069 | 0,064 | 0,034 |
| beta2 | 0,106 | 0,068 | 0,081 | 0,064 | 0,088 | 0,081 | 0,065 | 0,096 | 0,087 |
| beta3 | 0,036 | 0,043 | 0,058 | 0,070 | 0,065 | 0,076 | 0,081 | 0,099 | 0,078 |
| gama | 0,057 | 0,045 | 0,070 | 0,071 | 0,071 | 0,086 | 0,093 | 0,061 | 0,082 |
| teta | 0,048 | 0,054 | 0,044 | 0,076 | 0,059 | 0,062 | 0,061 | 0,045 | 0,047 |
| sigma | 0,069 | 0,082 | 0,068 | 0,059 | 0,071 | 0,077 | 0,067 | 0,053 | 0,090 |

Tabela 9 Estatísticas BMK para as simulações do Modelo 4

Modelo 4

| | 150 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 | 1050 | 1200 | 1350 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| alfa | 0,061 | 0,043 | 0,049 | 0,040 | 0,051 | 0,036 | 0,118 | 0,077 | 0,062 |
| beta1 | 0,139 | 0,115 | 0,057 | 0,072 | 0,072 | 0,062 | 0,091 | 0,085 | 0,082 |
| beta2 | 0,075 | 0,175 | 0,144 | 0,059 | 0,093 | 0,050 | 0,062 | 0,032 | 0,085 |
| beta3 | 0,125 | 0,156 | 0,053 | 0,099 | 0,136 | 0,079 | 0,097 | 0,092 | 0,073 |
| gama | 0,112 | 0,186 | 0,112 | 0,104 | 0,097 | 0,088 | 0,057 | 0,064 | 0,095 |
| teta | 0,074 | 0,076 | 0,076 | 0,088 | 0,068 | 0,062 | 0,086 | 0,116 | 0,118 |
| sigma | 0,074 | 0,087 | 0,073 | 0,106 | 0,103 | 0,108 | 0,081 | 0,059 | 0,083 |

Tabela 10 Estatísticas BMK para as simulações do Modelo 5

Modelo 5

| | 450 | 900 | 1350 | 1800 | 2250 | 2700 | 3150 | 3600 | 4050 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| alfa | 0,029 | 0,040 | 0,040 | 0,041 | 0,054 | 0,030 | 0,061 | 0,032 | 0,034 |
| beta1 | 0,038 | 0,066 | 0,069 | 0,050 | 0,074 | 0,090 | 0,079 | 0,050 | 0,068 |
| beta2 | 0,051 | 0,057 | 0,062 | 0,048 | 0,088 | 0,030 | 0,054 | 0,047 | 0,078 |
| beta3 | 0,061 | 0,054 | 0,065 | 0,078 | 0,075 | 0,062 | 0,061 | 0,048 | 0,062 |
| gama | 0,095 | 0,065 | 0,057 | 0,037 | 0,053 | 0,068 | 0,052 | 0,048 | 0,066 |
| teta | 0,044 | 0,052 | 0,061 | 0,048 | 0,054 | 0,066 | 0,063 | 0,055 | 0,068 |
| sigma | 0,041 | 0,066 | 0,048 | 0,061 | 0,067 | 0,068 | 0,095 | 0,068 | 0,069 |

Tabela 11 Estatísticas BMK para as simulações do Modelo 6

Modelo 6

| | 750 | 1500 | 2250 | 3000 | 3750 | 4500 | 5250 | 6000 | 6750 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| alfa | 0,024 | 0,035 | 0,033 | 0,033 | 0,034 | 0,021 | 0,038 | 0,027 | 0,028 |
| beta1 | 0,049 | 0,046 | 0,050 | 0,059 | 0,053 | 0,041 | 0,062 | 0,046 | 0,038 |
| beta2 | 0,059 | 0,055 | 0,046 | 0,071 | 0,061 | 0,068 | 0,048 | 0,074 | 0,072 |
| beta3 | 0,047 | 0,048 | 0,059 | 0,073 | 0,059 | 0,074 | 0,054 | 0,040 | 0,037 |
| gama | 0,045 | 0,040 | 0,032 | 0,058 | 0,040 | 0,045 | 0,048 | 0,076 | 0,062 |
| teta | 0,029 | 0,047 | 0,059 | 0,050 | 0,055 | 0,040 | 0,038 | 0,034 | 0,035 |
| sigma | 0,051 | 0,047 | 0,057 | 0,052 | 0,055 | 0,051 | 0,046 | 0,052 | 0,035 |

Tabela 12 Z-Scores da estatística de Geweke nos Modelos 0 a 6³⁷

Z-Score

| | Modelo 0 | Modelo 1 | Modelo 2 | Modelo 3 | Modelo 4 | Modelo 5 | Modelo 6 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| alfa | | 1,195 | -0,303 | 0,378 | 1,303 | 0,391 | 0,552 |
| beta1 | | 0,307 | 1,125 | 0,265 | -0,281 | -0,764 | -1,108 |
| beta2 | | 1,030 | 0,040 | 0,001 | 0,607 | -1,340 | 0,913 |
| beta3 | | -0,512 | -0,767 | -0,466 | -0,166 | 1,708 | 0,981 |
| gama | 0,048 | -1,486 | -0,839 | -0,666 | -0,216 | 1,574 | 0,187 |
| teta | | 0,659 | -0,873 | 0,017 | -0,049 | 0,526 | 0,338 |
| sigma | 0,674 | -0,005 | -1,078 | -1,412 | 0,261 | 0,301 | 0,481 |

Em conjunto com a inspeção visual dos gráficos, o resultado dos testes mostrados acima mostra que as cadeias de Markov utilizadas para simular as

distribuições *a posteriori* de todos os modelos apresentam grau adequado de convergência. Enquanto as estatísticas BMK apontaram para valores inferiores a 0,5 em todos os modelos e em todas as partições das cadeias de Markov, a estatística de Geweke em todas as variáveis e todos os modelos esteve dentro do intervalo de confiança de 95%³⁸. Com base nessa condição, é possível afirmar que as distribuições *a posteriori* dos parâmetros obtidas a partir das simulações podem ser adequadamente utilizadas para a análise dos modelos e demais inferências estatísticas.

5.1.4 - Estatísticas de ajuste dos Modelos 0 a 6

Partindo da constatação de que as simulações conseguem representar satisfatoriamente as distribuições *a posteriori* dos modelos, a última etapa consiste na verificação da adequação do modelo proposto ao problema que está sendo analisado. Nesse sentido, conforme vimos no capítulo anterior, faz-se necessário mostrar as estatísticas de ajuste geral do modelo e as checagens posteriores preditivas, que nos permitirão comparar algumas estatísticas relevantes da série de preços estimada com a série de preços original.

Entre os indicadores de ajuste dos modelos, serão comparados o BPIC e seus diferentes componentes, DBar e pD e o WAIC. Como ambos os critérios de informação possuem fatores de ajuste que penalizam modelos mais complexos e eventuais viéses, é possível usar ambas as métricas para comparar os sete modelos. A Tabela 13 compara os resultados para todos os modelos.

³⁷ Enquanto nos Modelos 1, 2 e 3 o parâmetro alfa corresponde ao coeficiente que indica o quanto os agentes consideram os resultados passados na sua métrica de desempenho, nos Modelos 4, 5 e 6 o parâmetro alfa indica a participação mínima possível para os agentes com comportamento fundamentalista.

³⁸ Conforme mostra GEWEKE (1991), o Z-Score é distribuído segundo uma normal padrão para cadeias longas, o que faz com o intervalo de confiança de 95% resulte em valores entre -1,96 e 1,96.

Tabela 13 Comparativo entre os critérios gerais de Ajuste dos Modelos

Critérios de Ajuste dos Modelos

| | Mod.0 | Mod.1 | Mod.2 | Mod.3 | Mod.4 | Mod.5 | Mod.6 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| BPIC.Dbar | -390,9 | -403,8 | -403,1 | -428,3 | -398,1 | -403,5 | -427,9 |
| BPIC.pD | 2,1 | 8,3 | 5,3 | 8,5 | 5,7 | 5,3 | 5,3 |
| BPIC.BPIC | -386,7 | -387,1 | -392,4 | -411,2 | -386,7 | -392,9 | -417,3 |
| Concordance | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| WAIC | -388,4 | -392,4 | -394,3 | -420,1 | -390,9 | -396,8 | -421,6 |

Como esperado, o modelo mais simples de todos mostra os piores resultados para ambos os indicadores. Apesar disso, os Modelos 1 e 4, que utilizam a média móvel dos preços como referência de valor fundamentalista apresentaram valores superiores aos do Modelo 0 para os mesmos indicadores. O valor das estatísticas de ajuste é crescente quando se observa o resultado para os Modelos 2, 5, 3 e 6. Tal resultado mostra que, a depender da escolha do método de formação de expectativa dos agentes fundamentalistas, os modelos tendem a performar melhor segundo esses critérios de ajuste.

Para um mesmo processo de formação de expectativa dos agentes fundamentalistas, por outro lado, a diferenciação entre os diferentes mecanismos que regem o processo de mudança de comportamento dos agentes não apresentou diferenças representativas nas comparações dois a dois entre os modelos (Modelos 1 e 4, Modelos 2 e 5 e Modelos 3 e 6).

No que diz respeito às checagens posteriores preditivas, a Tabela 14 mostra os resultados para todos os modelos. Foram utilizadas quatro métricas para comparar os modelos com os dados que eles pretendem representar, a saber a média, o valor máximo, o valor mínimo e o desvio padrão.

Tabela 14 Checagens Posteriores Preditivas dos Modelos - Valores em %

Checagens Posteriores Preditivas

| | Mod.0 | Mod.1 | Mod.2 | Mod.3 | Mod.4 | Mod.5 | Mod.6 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\max(\hat{y}[i,]) > \max(y)$ | 19,7 | 23,2 | 25,1 | 24,1 | 23,6 | 24,1 | 25,1 |
| $\text{mean}(\hat{y}[i,]) > \text{mean}(y)$ | 53,2 | 53,7 | 52,7 | 52,2 | 53,7 | 52,7 | 52,2 |
| $\min(\hat{y}[i,]) < \min(y)$ | 9,4 | 8,4 | 8,9 | 9,4 | 8,9 | 11,3 | 10,8 |
| $\text{sd}(\hat{y}[i,]) > \text{sd}(y)$ | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Entre os indicadores mostrados na tabela acima, chama o fato de que a probabilidade de o desvio padrão da estimativa ser superior ao dos dados realizados é 0 em todos os modelos, fato que indica que a variabilidade das distribuições *a posteriori*

dos resultados nos diferentes pontos foi, necessariamente, inferior a variabilidade do valor realizado. Uma outra característica a ser observada a partir dos dados é o fato de que o valor máximo da distribuição *a posteriori* dos resultados excedeu em cerca de 20% das vezes o valor máximo do valor realizado e o valor mínimo foi inferior ao mínimo realizado em cerca de 4% das vezes. Por último, mas não menos importante, a média das distribuições *a posteriori* foi superior à média do valor realizado em cerca de 50% das vezes.

Os resultados mostram que a distribuição *a posteriori* possui uma capacidade relativamente adequada de representar os dados quando a comparação utiliza a média como referência. Para os valores máximos e mínimos, seria esperado uma probabilidade da ordem de 5%, valor compatível com o grau de concordância entre o modelo e os dados históricos, que é de 95%. Embora o valor mínimo aproxime-se desse referencial, o valor máximo o ultrapassa de forma significativa, indicando que alguma assimetria na distribuição dos dados realizados não é capturada adequadamente por nenhum dos modelos. Embora tal resultado ainda permita a utilização dos modelos propostos para inferências a respeito do valor dos parâmetros, faz-se necessária alguma cautela ao se avaliar a incerteza das estimativas produzidas, uma vez que existe uma tendência ao modelo para sobreestimar os valores mais altos que os preços podem atingir.

5.2 - Apresentação dos resultados e discussão.

Os resultados das diferentes métricas de diagnóstico apresentadas na seção anterior mostram que os modelos de agentes heterogêneos propostos na presente Tese acrescentam informação relevante ao que aconteceu com o preço do petróleo no horizonte analisado. Apesar disso, a análise das estatísticas dos parâmetros estimados mostra que há diferenças significativas entre os modelos que possuem implicações para as perguntas de pesquisa realizadas no Capítulo 2. Tal análise será feita ao longo das subseções que se seguem.

5.2.1 - Análise das Estatísticas dos Parâmetros

As Tabelas 15 a 21, a seguir, apresentam as principais estatísticas descritivas dos parâmetros estimados dos sete modelos enquanto a Tabela 22 compara as medianas das estimativas de cada um dos modelos. Em cada uma das Tabelas 15 a 21, são apresentadas as seguintes estatísticas: Quantil Inferior (LB), Mediana (Median),

Quantil Superior (UB), Erro padrão de Monte Carlo (MCSE), Média (Mean) e Desvio Padrão (SD)³⁹.

Tabela 15 Estimativa dos Parâmetros do Modelo 0

Modelo 0

| | LB | Median | UB | MCSE | Mean | SD |
|----------|-----------|---------------|-----------|-------------|-------------|-----------|
| gama | -0,010 | 0,002 | 0,015 | 0,000 | 0,002 | 0,007 |
| sigma | 0,007 | 0,009 | 0,010 | 0,000 | 0,009 | 0,001 |
| Deviance | -392,890 | -391,459 | -385,514 | 0,070 | -390,895 | 2,059 |
| LP | 185,864 | 188,836 | 189,552 | 0,035 | 188,554 | 1,029 |

Embora a mediana do parâmetro gama do Modelo 0 apresente um valor positivo, a sua magnitude de 0,002 pode ser considerada baixa. Além disso, a probabilidade de o parâmetro gama ser inferior a zero é de cerca de 38%. Os resultados são compatíveis com um modelo de passeio aleatório em que o preço do período anterior é utilizado como proxy para o preço no período seguinte.

Tabela 16 Estimativa dos Parâmetros do Modelo 1

Modelo 1

| | LB | Median | UB | MCSE | Mean | SD |
|----------|-----------|---------------|-----------|-------------|-------------|-----------|
| alfa | 0,005 | 0,147 | 0,830 | 0,008 | 0,216 | 0,219 |
| beta1 | -0,156 | 0,235 | 0,548 | 0,006 | 0,227 | 0,181 |
| beta2 | -0,466 | -0,040 | 0,470 | 0,010 | -0,025 | 0,240 |
| beta3 | 0,312 | 0,655 | 1,149 | 0,008 | 0,681 | 0,219 |
| gama | -0,002 | 0,016 | 0,034 | 0,000 | 0,016 | 0,009 |
| teta | 0,476 | 2,356 | 8,483 | 0,078 | 3,106 | 2,199 |
| sigma | 0,007 | 0,008 | 0,010 | 0,000 | 0,008 | 0,001 |
| Deviance | -409,866 | -404,260 | -394,032 | 0,159 | -403,755 | 4,076 |
| LP | 180,536 | 185,671 | 188,672 | 0,081 | 185,439 | 2,074 |

O primeiro dos modelos considera a ideia de que o valor fundamentalista é construído a partir da média móvel e a performance passada dos comportamentos é o guia para a mudança de comportamento dos agentes. A mediana do parâmetro alfa mostra uma memória elevada por parte dos agentes na hora de decidir entre os comportamentos fundamentalista e grafista. O valor de 0,147 corresponde a uma

³⁹ Os quantis inferior (LB) e superior (UB) correspondem aos quantis de 2,5% e 97,5%. Eles indicam o intervalo dentro do qual está 95% das ocorrências da distribuição a posterior dos parâmetros. O erro padrão de Monte Carlo (MCSE) mede o quanto a distribuição a posteriori estimada a partir do método de Monte Carlo se distancia da distribuição a posteriori teórica. Quanto maior o número de iterações, menor é o MCSE. HALL (2011) sugere que um MCSE inferior a 6,27% do desvio padrão (SD) da distribuição a posteriori estimada é um indicativo de que as inferências a partir da distribuição estimada serão adequadas. Essa relação é observada em todos os parâmetros dos 6 Modelos.

defasagem de, aproximadamente, 4 meses⁴⁰, em linha com outros exemplos da literatura que utilizaram médias móveis como referência para o valor fundamentalista dos agentes. É importante ressaltar, contudo, que o desvio padrão do parâmetro é elevado em relação ao seu valor absoluto, indicando uma dificuldade do modelo em produzir uma estimativa precisa quanto à memória dos agentes.

A mediana do parâmetro teta indica uma significativa propensão dos agentes a mudarem o seu comportamento em função da performance pregressa. Além disso, foi possível observar uma elevada incerteza a respeito desse parâmetro, admitindo valores próximos de 0,5 no quartil de 2,5% e valores superiores a 8 no quartil de 97,5%⁴¹. Dessa forma, é possível esperar uma grande incerteza nas participações relativas dos comportamentos fundamentalista e grafista ao longo do tempo.

Com relação aos parâmetros beta, que mensuram a relação entre as expectativas de variação dos preços dos agentes com comportamentos fundamentalista e grafista e a variação efetivamente observada nos preços, as medianas mostram um impacto baixo dos agentes fundamentalistas e corroboram a assimetria entre os agentes grafistas quando os preços estão em alta ou em baixa. O valor mais alto do parâmetro beta3 mostra que a resposta dos agentes com comportamento grafista possui mais impacto sobre os preços quando os preços estão em baixa do que quando estão em alta. O parâmetro beta2, cuja mediana é bem próxima de zero, possui uma probabilidade de 54% de não apresentar valor positivo.

⁴⁰ Seguindo a construção do modelo, onde o impacto da performance de n meses atrás é definida como alfaⁿ, um valor de $(0,147)^4$ resulta em um coeficiente de 0,0005, indicando um efeito negligenciável dos erros de previsão para $n>4$. Nos próximos comparativos envolvendo o parâmetro alfa, consideraremos valores inferiores a 0,001 como indicativo de um efeito negligenciável para os erros de previsão em um mês n .

⁴¹ Para fins de referência, um valor de 0 no parâmetro teta indica a inexistência de mudança de comportamento entre os agentes. Quanto maior o valor de teta, maior a sensibilidade da posição dos agentes a flutuações na performance pregressa dos diferentes tipos de comportamento. Um valor de 8, como o observado para o quartil superior da estimativa é um indicativo de mudança quase instantânea do comportamento.

Tabela 17 Estimativa dos Parâmetros do Modelo 2

Modelo 2

| | LB | Median | UB | MCSE | Mean | SD |
|----------|----------|----------|----------|-------|----------|-------|
| alfa | 0,052 | 0,702 | 0,995 | 0,010 | 0,631 | 0,298 |
| beta1 | 0,443 | 1,388 | 2,480 | 0,019 | 1,413 | 0,513 |
| beta2 | -0,538 | 0,163 | 1,027 | 0,018 | 0,177 | 0,405 |
| beta3 | -0,550 | 0,343 | 0,758 | 0,019 | 0,303 | 0,324 |
| gama | -0,014 | 0,005 | 0,022 | 0,000 | 0,004 | 0,009 |
| teta | 0,051 | 1,744 | 8,555 | 0,121 | 2,423 | 2,311 |
| sigma | 0,007 | 0,008 | 0,010 | 0,000 | 0,008 | 0,001 |
| Deviance | -407,584 | -403,673 | -395,199 | 0,106 | -403,083 | 3,262 |
| LP | 180,797 | 185,408 | 187,422 | 0,062 | 185,081 | 1,734 |

Comparativamente ao Modelo 1, os resultados do Modelo 2, que altera apenas o processo de formação de expectativa dos agentes com comportamento fundamentalista para um modelo simplificado baseado no balanço entre oferta e demanda, apresentam mudanças significativas. Embora o valor elevado para o parâmetro teta e a assimetria entre os valores de beta3 e beta2 também aconteçam, o Modelo 2 apresenta uma mediana significativamente mais elevada para os parâmetros beta1 e alfa. Tal resultado mostra que os preços respondem de forma mais intensa às expectativas dos agentes com comportamento fundamentalista e que a memória dos agentes na hora de considerar uma mudança de comportamento é consideravelmente maior. O valor de alfa de 0,702 representa uma memória de aproximadamente 20 meses. O parâmetro teta apresenta incerteza similar em relação ao Modelo 2. Comparativamente ao Modelo 1, no Modelo 2 os agentes possuem uma propensão similar a mudar o seu comportamento ao longo do tempo.

Tabela 18 Estimativa dos Parâmetros do Modelo 3

Modelo 3

| | LB | Median | UB | MCSE | Mean | SD |
|----------|----------|----------|----------|-------|----------|-------|
| alfa | 0,096 | 0,964 | 0,999 | 0,008 | 0,792 | 0,284 |
| beta1 | 0,907 | 1,550 | 2,473 | 0,013 | 1,593 | 0,435 |
| beta2 | -1,049 | -0,089 | 1,132 | 0,010 | -0,064 | 0,524 |
| beta3 | -1,602 | -0,160 | 0,481 | 0,013 | -0,284 | 0,536 |
| gama | -0,016 | -0,000 | 0,018 | 0,000 | 0,000 | 0,009 |
| teta | 0,038 | 1,896 | 10,374 | 0,101 | 3,345 | 3,268 |
| sigma | 0,006 | 0,007 | 0,009 | 0,000 | 0,007 | 0,001 |
| Deviance | -435,590 | -428,613 | -419,103 | 0,096 | -428,301 | 4,135 |
| LP | 192,863 | 197,569 | 199,960 | 0,035 | 197,270 | 1,821 |

Comparativamente aos Modelos 1 e 2, o uso de uma estimativa de valor fundamentalista relativamente mais complexa possui impacto significativo sobre os

parâmetros beta. Assim como no Modelo 2, o valor de beta1 é consistentemente elevado acima de 1, indicando ser este o modelo em que o comportamento fundamentalista possui o maior impacto sobre os preços. Apesar de continuarem existindo diferenças entre as medianas e os intervalos de credibilidade para os parâmetros beta3 e beta2, estas se tornaram pouco significativas em comparação com os outros dois modelos. Outro ponto que chama a atenção nos parâmetros beta2 e beta3 é o valor negativo para as suas medianas, indicando probabilidades de, respectivamente 58% e 64% de não apresentarem valores positivos.

Com relação ao parâmetro teta, o valor da mediana é inferior ao do Modelo 1 e similar a do Modelo 2, indicando uma propensão menor dos agentes a mudarem o seu comportamento em função de divergências entre as suas expectativas e os valores realizados. Por outro lado, a amplitude entre os quartis superior e inferior é a maior dos três modelos que usam o mesmo mecanismo de comportamento, indicando a maior incerteza para esse parâmetro.

Tabela 19 Estimativa dos Parâmetros do Modelo 4

Modelo 4

| | LB | Median | UB | MCSE | Mean | SD |
|----------|----------|----------|----------|-------|----------|-------|
| alfa | 0,014 | 0,267 | 0,486 | 0,004 | 0,262 | 0,143 |
| beta1 | -0,018 | 0,093 | 0,231 | 0,002 | 0,096 | 0,064 |
| beta2 | -0,786 | 0,115 | 1,021 | 0,020 | 0,122 | 0,454 |
| beta3 | 0,349 | 1,089 | 1,963 | 0,016 | 1,102 | 0,411 |
| gama | -0,008 | 0,013 | 0,032 | 0,000 | 0,012 | 0,010 |
| teta | 0,180 | 2,464 | 6,776 | 0,053 | 2,686 | 1,699 |
| sigma | 0,007 | 0,008 | 0,010 | 0,000 | 0,008 | 0,001 |
| Deviance | -402,652 | -398,843 | -389,866 | 0,106 | -398,150 | 3,381 |
| LP | 178,266 | 183,142 | 185,150 | 0,058 | 182,750 | 1,820 |

Apesar de utilizar o mesmo processo de formação de expectativa do comportamento fundamentalista considerado no Modelo 1, a média móvel, o Modelo 4 diferencia-se por um mecanismo distinto por trás da mudança do comportamento dos agentes. Em função desse mecanismo distinto, o parâmetro alfa assume um significado igualmente distinto, representando a participação mínima média dos agentes com comportamento fundamentalista no mercado.

Conforme é possível ver na Tabela 19, diferente do que assumiram REITZ e SLOPEK (2008), a participação mínima média estimada foi de cerca de 27%. O intervalo de credibilidade do parâmetro, contudo, mostra que os dados foram pouco informativos a seu respeito uma vez que o parâmetro possui uma probabilidade de 95% de se situar

entre 0,008 e 0,479, valores próximos dos limites teóricos impostos ao parâmetro. Situação similar repetir-se-á nos Modelos 5 e 6.

Com relação aos parâmetros beta, é possível observar uma assimetria significativa entre os parâmetros beta3 e beta2 e valores próximos de zero para beta1 e beta2. Assim como em outros modelos onde essa assimetria foi observada, a resposta dos preços ao comportamento grafista é mais intensa em momentos de preços em baixa do que em momentos de preços em alta.

Com relação ao parâmetro teta, o valor também não é diretamente comparável ao observado nos Modelos 1 a 3, em virtude da forma funcional diferente do mecanismo de mudança de comportamento dos agentes. Apesar disso, a distribuição de probabilidades do parâmetro, que mede a rapidez com que a participação dos agentes com comportamento fundamentalista aumenta em função de descolamentos entre os preços realizados e as suas respectivas expectativas fundamentalistas, também mostrou uma ampla região de credibilidade, evidenciando a sua incerteza.

Tabela 20 Estimativa dos Parâmetros do Modelo 5

Modelo 5

| | LB | Median | UB | MCSE | Mean | SD |
|----------|----------|----------|----------|-------|----------|-------|
| alfa | 0,016 | 0,268 | 0,488 | 0,002 | 0,262 | 0,144 |
| beta1 | 0,526 | 1,435 | 2,409 | 0,008 | 1,444 | 0,483 |
| beta2 | -0,854 | 0,080 | 0,922 | 0,012 | 0,075 | 0,455 |
| beta3 | -0,212 | 0,465 | 1,243 | 0,008 | 0,481 | 0,368 |
| gama | -0,013 | 0,007 | 0,028 | 0,000 | 0,007 | 0,011 |
| teta | 0,204 | 3,223 | 8,630 | 0,039 | 3,544 | 2,341 |
| sigma | 0,007 | 0,008 | 0,010 | 0,000 | 0,008 | 0,001 |
| Deviance | -407,868 | -404,188 | -395,426 | 0,063 | -403,545 | 3,257 |
| LP | 180,755 | 185,547 | 187,583 | 0,036 | 185,192 | 1,775 |

O Modelo 5 possui uma assimetria menor entre os valores para os diferentes parâmetros beta2 e beta3, mas é qualitativamente similar ao Modelo 4 nesse sentido. Ou seja, a assimetria significativa entre beta2 e beta3 indica uma resposta maior dos preços ao comportamento grafista em movimentos de queda dos preços. Quanto ao parâmetro beta1, o valor da mediana é mais elevado em comparação ao Modelo 4, indicando um efeito maior do comportamento fundamentalista sobre os preços. Embora a mediana do parâmetro teta não tenha sido significativamente distinta em relação ao Modelo 4, o seu intervalo de credibilidade foi mais amplo, indicando uma incerteza ainda maior para esse parâmetro nesse modelo.

Tabela 21 Estimativa dos Parâmetros do Modelo 6**Modelo 6**

| | LB | Median | UB | MCSE | Mean | SD |
|----------|----------|----------|----------|-------|----------|-------|
| alfa | 0,016 | 0,275 | 0,490 | 0,002 | 0,268 | 0,143 |
| beta1 | 1,013 | 1,612 | 2,285 | 0,004 | 1,623 | 0,321 |
| beta2 | -1,171 | -0,226 | 0,565 | 0,010 | -0,242 | 0,445 |
| beta3 | -0,587 | 0,084 | 0,951 | 0,008 | 0,114 | 0,385 |
| gama | -0,015 | 0,004 | 0,025 | 0,000 | 0,004 | 0,010 |
| teta | 0,192 | 3,359 | 9,580 | 0,040 | 3,746 | 2,569 |
| sigma | 0,006 | 0,007 | 0,009 | 0,000 | 0,007 | 0,001 |
| Deviance | -432,194 | -428,467 | -419,804 | 0,049 | -427,876 | 3,248 |
| LP | 192,961 | 197,539 | 199,569 | 0,029 | 197,230 | 1,753 |

O comportamento dos parâmetros no Modelo 6, onde as expectativas dos agentes com comportamento fundamentalista se formam com base em modelo VAR com múltiplos parâmetros pode ser considerado parcialmente similar ao que foi observado no Modelo 3. Da mesma forma, o parâmetro beta1 apresentou um valor consistentemente elevado e acima de 1, mas a assimetria entre beta2 e beta3 apesar de relativamente menor, ainda existe de forma visível. Comparativamente ao Modelo 3, os parâmetros beta2 e beta3 apresentaram uma probabilidade de não serem negativos de, respectivamente, 30% e 60%. Apenas beta2, contudo, apresentou uma mediana negativa. No que diz respeito ao parâmetro teta, o valor observado foi superior ao dos Modelos 5 e 4, também com ampla incerteza. A Tabela 22, a seguir, sumariza as medianas dos parâmetros dos 6 modelos, possibilitando a comparação direta entre eles. A Figura 11, por sua vez, apresenta graficamente a comparação entre as medianas dos parâmetros (exceto sigma) e os seus respectivos intervalos de credibilidade (5%-95%) nos Modelos 1 a 6.

Tabela 22 Comparativo entre as medianas das Distribuições dos Parâmetros dos Modelos⁴²

| param | Mod.0 | Mod.1 | Mod.2 | Mod.3 | Mod.4 | Mod.5 | Mod.6 |
|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|
| alfa | | 0,147 | 0,702 | 0,964 | 0,267 | 0,268 | 0,275 |
| beta1 | | 0,235 | 1,388 | 1,550 | 0,093 | 1,435 | 1,612 |
| beta2 | | -0,040 | 0,163 | -0,089 | 0,115 | 0,080 | -0,226 |
| beta3 | | 0,655 | 0,343 | -0,160 | 1,089 | 0,465 | 0,084 |
| gama | 0,002 | 0,016 | 0,005 | -0,000 | 0,013 | 0,007 | 0,004 |
| teta | | 2,356 | 1,744 | 1,896 | 2,464 | 3,223 | 3,359 |
| sigma | 0,009 | 0,008 | 0,008 | 0,007 | 0,008 | 0,008 | 0,007 |

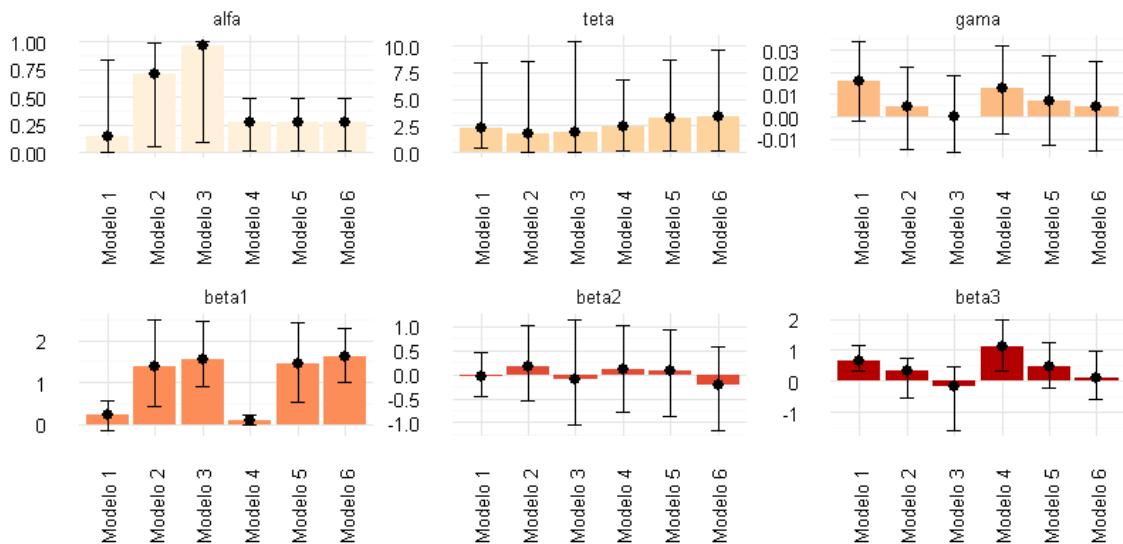


Figura 11 Distribuições dos valores dos Parâmetros – Mediana (barra) e Intervalo de Credibilidade (5% – 95%) - Modelos 1 a 6

Nota: No gráfico do canto superior esquerdo, nos Modelos 1, 2 e 3, o parâmetro alfa corresponde ao coeficiente que indica o quanto os agentes consideram os resultados passados na sua métrica de desempenho. Nos Modelos 4, 5 e 6 o parâmetro alfa indica a participação mínima possível para os agentes com comportamento fundamentalista.

De uma forma geral, é possível observar que o parâmetro beta1, que mede a resposta dos preços ao comportamento fundamentalista, tende a ser superior nos modelos em que o processo de formação de expectativa dos agentes com esse comportamento utiliza modelos baseados em fundamentos (Modelos 2, 3, 5 e 6), independente do mecanismo que rege a mudança de comportamento dos agentes. Outra tendência que é possível observar é a assimetria entre as medianas dos parâmetros beta2 e beta3, indicando que, de uma forma geral, os agentes com

⁴² Enquanto nos Modelos 1, 2 e 3 o parâmetro alfa corresponde ao coeficiente que indica o quanto os agentes consideram os resultados passados na sua métrica de desempenho, nos Modelos 4, 5 e 6 o parâmetro alfa indica a participação mínima possível para os agentes com comportamento fundamentalista. Essa diferença justifica a diferença no valor estimado das medianas.

comportamento grafista tendem a apresentar uma resposta mais intensa a preços em queda do que a preços em elevação.

Com relação ao parâmetro teta o seu valor relativamente elevado em praticamente todos os modelos, indica uma elevada propensão dos agentes a mudarem de comportamento em virtude de alterações nas condições de mercado que regem os mecanismos de mudança adotados. Além do valor elevado, foi possível constatar também que a incerteza a respeito do valor do parâmetro foi ampla em todos os Modelos, evidenciando a dificuldade em estimá-lo com as informações utilizadas.

5.2.2 - Análise da evolução da participação dos agentes fundamentalistas e grafistas

Os resultados apresentados na seção anterior possuem impacto direto sobre a estimativa da participação relativa dos agentes com comportamentos fundamentalistas e grafistas no mercado em cada modelo. De uma forma geral, uma mediana mais elevada para o parâmetro teta está associada com um movimento mais intenso de mudança entre os períodos enquanto uma maior amplitude na distribuição do parâmetro está associada com uma maior incerteza na estimativa das participações relativas. A Figura 12, a seguir, apresenta as séries com as participações relativas dos agentes com comportamento fundamentalista nos Modelos 1 a 3, que utilizam um mesmo mecanismo de mudança de comportamento. Por construção, a participação dos agentes com comportamento grafista é o exato complemento que falta para que seja atingido o valor 1, correspondente a 100% do mercado.

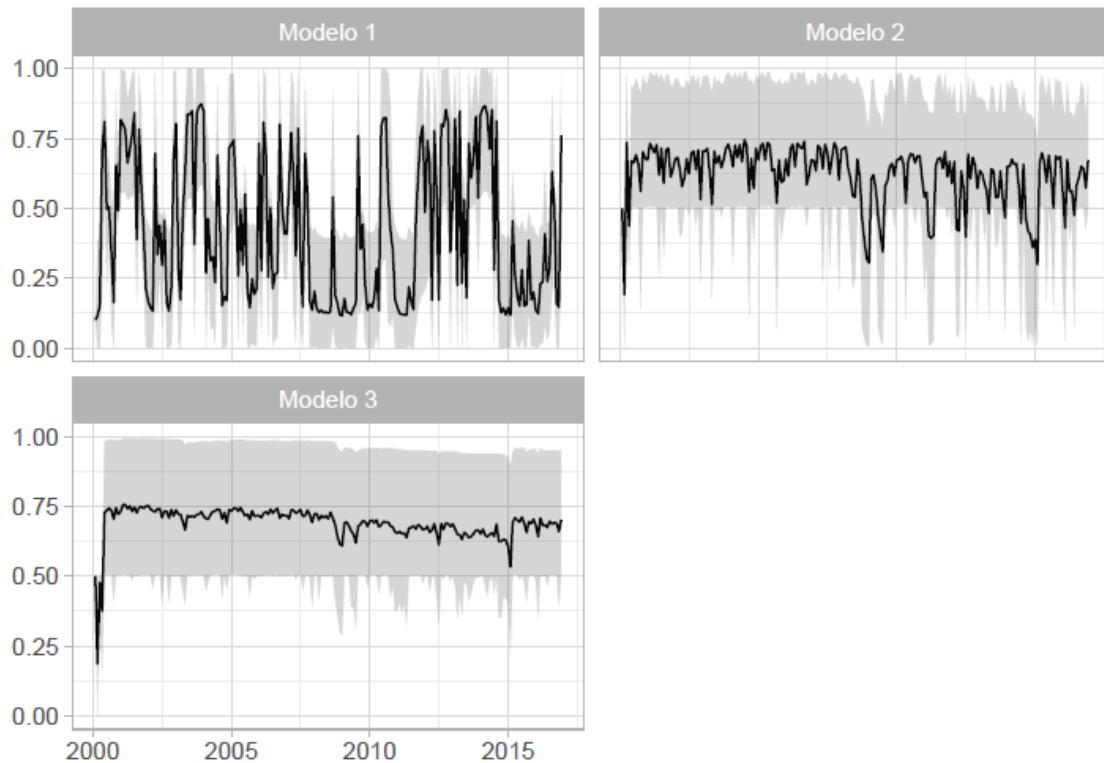


Figura 12 Evolução da participação dos agentes com comportamento fundamentalista ao longo do tempo – Modelos 1, 2 e 3.

Chama a atenção nos graficos acima o quanto diferente é a aparência dos resultados em cada um dos 3 modelos. A forte flutuação observada nos Modelos 1 e 2 é um reflexo direto dos valores para os parâmetros teta e alfa em cada um deles. A graduação decrescente de volatilidade observada entre os Modelos 1, 2 e 3 está diretamente relacionada ao fato de que a mediana para o parâmetro alfa é crescente e apresenta o seu maior valor para teta no Modelo 1. Os resultados observados para o parâmetro alfa mostram que, a depender do modelo de formação de expectativas utilizado, a “memória” dos agentes também é diferente. Enquanto no Modelo 1, são levados em consideração os resultados dos últimos 4 meses na escolha do comportamento, no Modelo 2 esse intervalo é de cerca de 20 meses e no Modelo 3 é estimado que os agentes olhem para resultados dos últimos 180 meses, indicando uma propensão a usar praticamente toda a informação pregressa disponível.

Em termos de participação dos agentes com comportamento fundamentalista, apenas o Modelo 1 apresenta uma trajetória mais volátil em termos de flutuação. O curto horizonte de histórico para decisão e o alto valor de teta fazem com que a participação relativa dos agentes oscile entre valores próximos de 0 e de 1 em todo o período. Entre 2007 e 2010, período em que houve uma forte alta, seguida por uma forte queda nos

preços do Brent após a crise econômica global, há uma tendência maior para a participação do comportamento fundamentalista permanecer abaixo dos 50%.

No caso dos Modelos 2 e 3, já é possível notar uma tendência de permanência da participação dos agentes com comportamento fundamentalista em um patamar acima de 50% em quase todo o período. Tal resultado está associado ao fato de que, a introdução de qualquer informação sobre os fundamentos do mercado de petróleo já é suficiente para produzir expectativas superiores àquelas formadas a partir da simples extração dos preços. No caso do Modelo 3, em particular, ainda que o parâmetro θ tenha permanecido em um patamar similar ao dos outros modelos, o maior valor para α gerou uma maior estabilidade na participação dos agentes com comportamento fundamentalista ao longo do tempo.

Na Figura 13 são mostrados os mesmos gráficos para os Modelos 4, 5 e 6. Pelo mecanismo de mudança de comportamento utilizado nestes modelos, a fração dos agentes que adota um comportamento fundamentalista tende a aumentar quando os preços históricos se afastam do valor fundamentalista e o valor de θ é positivo. Quando os preços estão mais próximos do seu valor fundamentalista, por outro lado, a participação a mesma fração corresponde ao valor mínimo, estimado pelo parâmetro α .

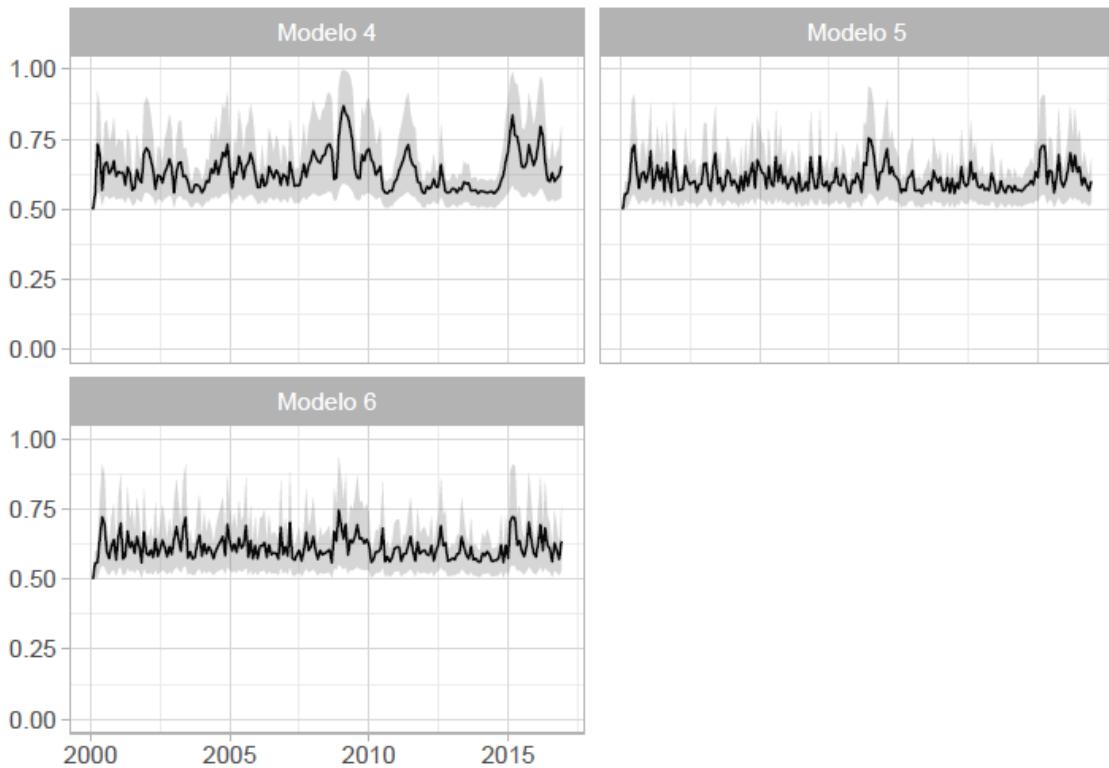


Figura 13 Evolução da participação dos agentes com comportamento fundamentalista ao longo do tempo – Modelos 4, 5 e 6.

A mudança do mecanismo de comportamento produz resultados bastante distintos em relação aos Modelos 1, 2 e 3. De uma forma geral é possível notar que a participação dos agentes com comportamento fundamentalista está acima dos 50% em praticamente todo o período analisado. Nos Modelos 5 e 6, onde o distanciamento entre o valor fundamentalista e o preço realizado tende a ser menor e mais estável, as séries de participação desse tipo de agente tendem a ter uma trajetória bastante estável ao longo do tempo.

No Modelo 4, que utiliza a média móvel como valor fundamentalista, o afastamento entre os preços realizados e o valor fundamentalista é mais frequente, fazendo com que a mediana da fração dos agentes que adotam um comportamento fundamentalista se aproxime dos 80% em momentos específicos do tempo. Como a média móvel tende a acompanhar os preços com uma defasagem maior, os distanciamentos entre o preço realizado e o valor fundamentalista que resultam em um aumento da participação do comportamento fundamentalista tendem a ocorrer em períodos de forte variação dos preços, como foi possível observar em 2008 e 2014, quando a referida participação ultrapassou os 75%.

Diferente do que ocorre com os Modelos 1 a 3, a incerteza a respeito da participação dos agentes com comportamento fundamentalista não é tão ampla, com as nuvens de incerteza indicando intervalos mais restritos de flutuação. Outro ponto que é importante ressaltar diz respeito ao fato de que, em períodos de flutuação mais extrema, como a crise de 2008, ou a queda dos preços observada em 2014, essa participação tende a aumentar em relação à média, característica mais claramente observada no Modelo 4.

5.2.3 - Simulação do comportamento dos modelos para múltiplos períodos dentro da amostra

Uma das formas de se avaliar o comportamento de modelos e permitir a comparação entre os seus resultados é a simulação de valores dentro do horizonte da amostra e a comparação com o que foi realizado. Durante o processo de estimativa, foi considerado que em cada ponto do tempo, os agentes adotariam a informação realizada dos períodos passados como ponto de partida para decidir qual ação tomar no mês corrente. Tal procedimento, representado na Figura 14, busca representar o fato de que os agentes estão constantemente adaptando suas expectativas aos valores realizados. O aprendizado com os erros pregressos é considerado, e representado através do mecanismo de mudança de comportamento dos agentes.

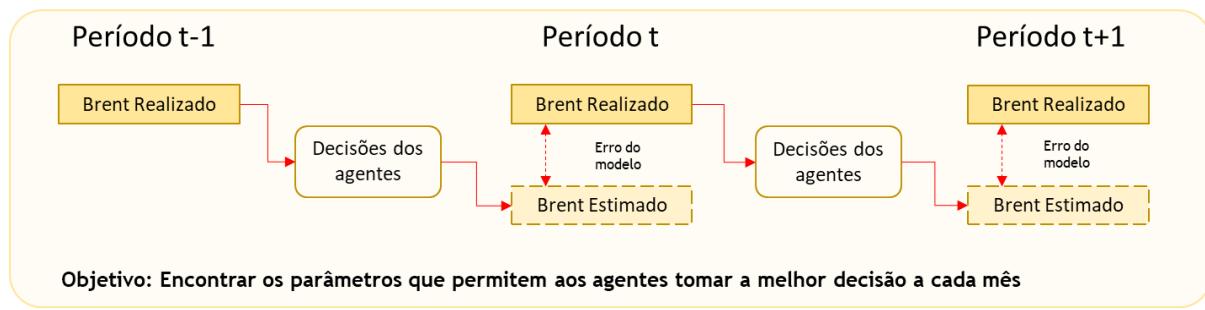


Figura 14 Representação do processo de estimação dos parâmetros

A construção do exercício de simulação de valores dentro do horizonte da amostra parte da escolha de um momento inicial fixo no tempo e da configuração do valor de cada um dos parâmetros para as medianas estimadas segundo o procedimento descrito no Capítulo 4. Assim, o primeiro valor simulado utilizou como referência o histórico realizado até esse momento inicial. Na simulação dos valores subsequentes, por sua vez, foi considerado que os agentes utilizaram os resultados das simulações dos períodos anteriores como ponto de partida para as suas decisões em cada momento. A Figura 15 mostra a representação do processo de simulação.

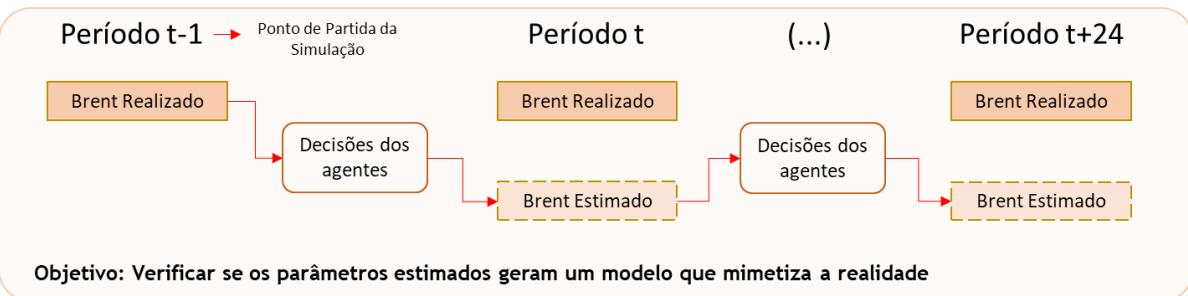


Figura 15 Representação do processo de simulação do preço a partir dos parâmetros estimados

O principal objetivo desta análise é mostrar o quanto cada modelo seria capaz de mimetizar o comportamento dos preços realizados em um horizonte de até 24 meses a frente. Nas comparações que envolvem a fração dos agentes que adotam um comportamento fundamentalista ou grafista, os valores estimados para essas frações, descritos na Subseção 5.2.2, foram considerados como referência para comparação com os resultados desse exercício de simulação.

Nas duas subseções seguintes serão observados os resultados dos exercícios de simulação para dois períodos distintos no tempo.

5.2.3.1 - Simulação para os anos 2008 e 2009

O primeiro dos períodos se inicia em janeiro de 2008 e se estende até dezembro de 2009. Foi um período marcado por uma intensa alta dos preços do petróleo até os meses de julho e agosto de 2008, seguido por uma crise econômica global que derrubou o preço do Brent para o menor patamar em 4 anos. Um corte de produção da OPEP e a recuperação da economia motivaram uma constante retomada dos preços ao longo de todo o ano de 2009. A Figura 16 mostra um painel com o resultado da simulação dos Modelos 1 a 3 para o período mencionado.

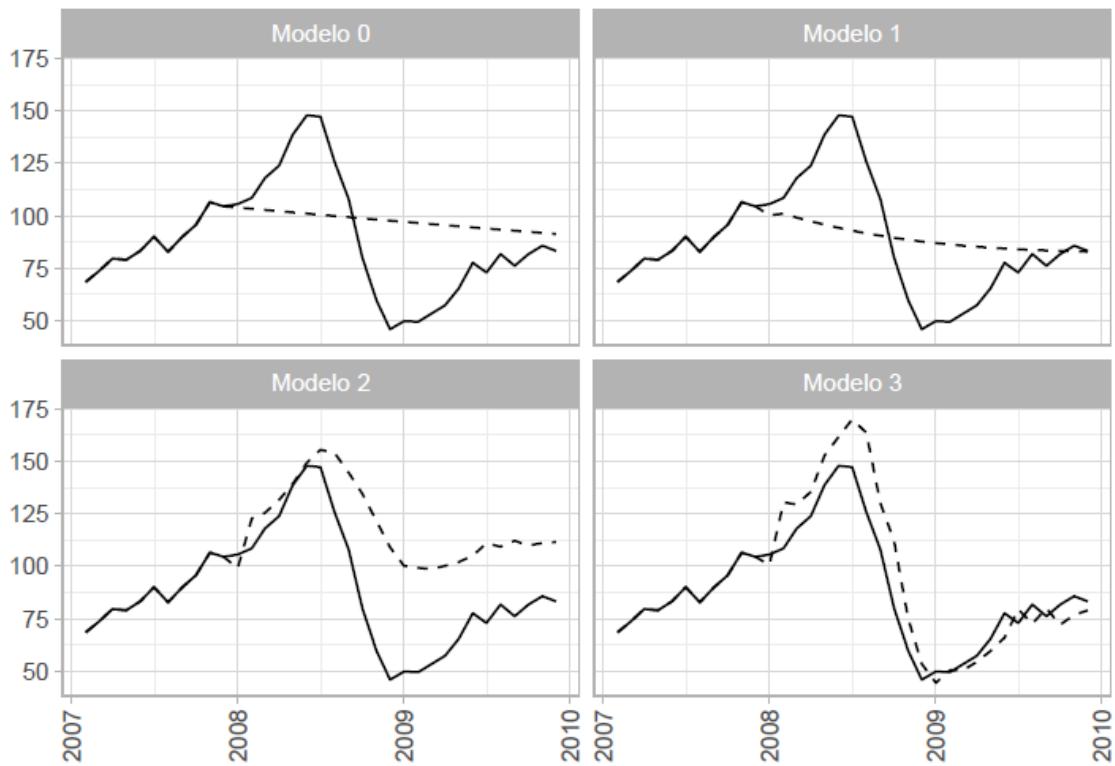


Figura 16 Valores simulados (linha tracejada) para o período que compreende os meses de jan/2008 a dez/2009 – Modelos 1 a 3

Como é possível observar dos gráficos acima, os três modelos (e até mesmo o Modelo 0) apresentam resultados razoáveis se levarmos em consideração de 1 a 3 meses após a data inicial do início da simulação. Com o alongamento da janela de simulação, contudo, é possível observar as diferenças mais profundas entre os modelos. O Modelo 1 apresenta apenas um leve aprimoramento em relação ao Modelo 0, na medida em que a média móvel tende a não mais acompanhar o movimento dos preços em períodos de forte elevação e de forte queda dos preços.

Os Modelos 2 e 3, por sua vez, em que os agentes fundamentalistas formam suas expectativas com base em fundamentos de mercado, mostraram uma capacidade maior de mimetizar o comportamento observado pelos preços do petróleo no período. Em ambos os modelos, a trajetória de alta observada até a metade de 2008 e a queda decorrente da crise econômica mundial foram representadas, de forma limitada no Modelo 2 e de forma um pouco mais acentuada no Modelo 3.

A Figura 17 mostra a participação dos agentes com comportamento fundamentalista em acordo com a simulação para cada um dos Modelos em comparação com o que foi estimado a partir dos dados realizados. Em todos os modelos, os valores simulados mostraram uma tendência similar à observada na

estimativa a partir dos dados realizados. Os três modelos indicaram uma redução do papel do comportamento fundamentalista ao longo de 2008 e 2009, com valores próximos de zero para o Modelo 1 e valores permanentemente acima de 50% para o Modelo 3.

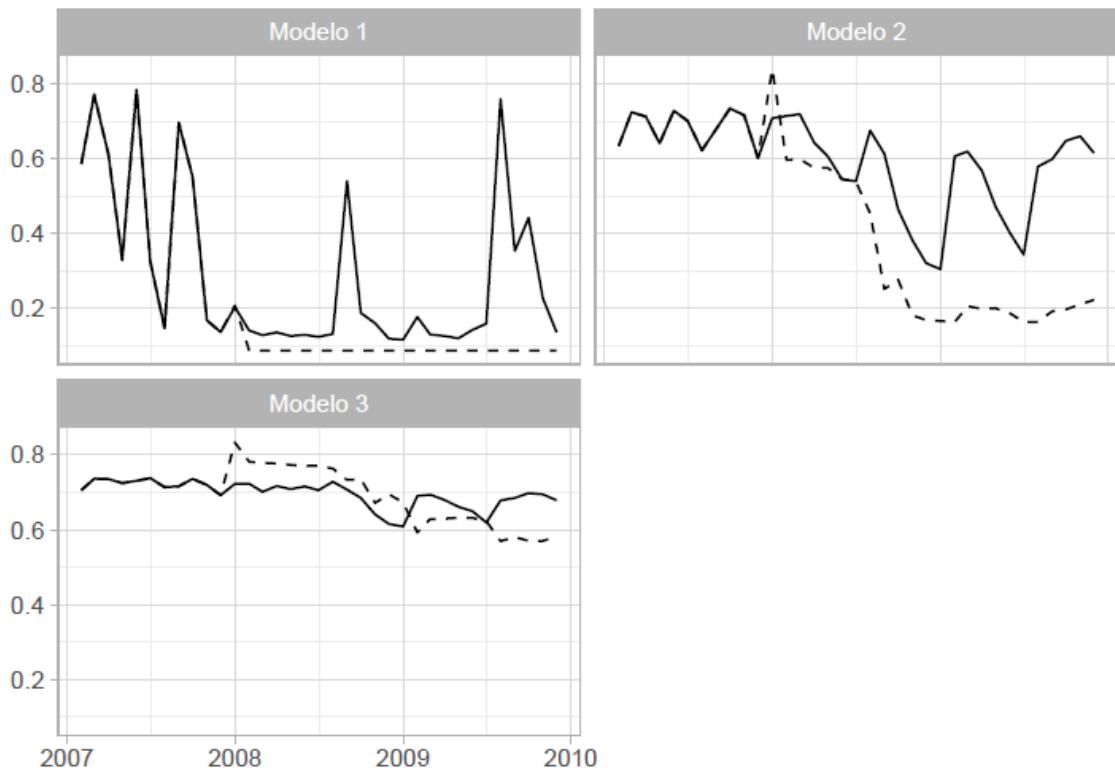


Figura 17 Valores simulados (linha tracejada) para a participação dos agentes com comportamento fundamentalista no período que compreende os meses de jan/2008 a dez/2009 – Modelos 1 a 3

Quando se trata dos Modelos 4 a 6, aqueles em que a formação de expectativas dos agentes fundamentalistas utiliza variáveis relacionadas aos fundamentos de mercado também mostraram maior capacidade de mimetizar os preços realizados. Comparando modelos com o método similar de formação de expectativas, é possível observar que o Modelo 5 mostrou uma trajetória simulada mais próxima do realizado do que o Modelo 2. Entre os Modelos 3 e 6 e entre os Modelos 1 e 4, as diferenças foram menos significativas. Assim como ocorre com o Modelo 1, o Modelo 4 representa pouco ou nenhum aprimoramento em relação ao Modelo 0 em termos de simulação. A Figura 18 mostra um painel com o resultado da simulação dos Modelos 4 a 6 para o período mencionado.

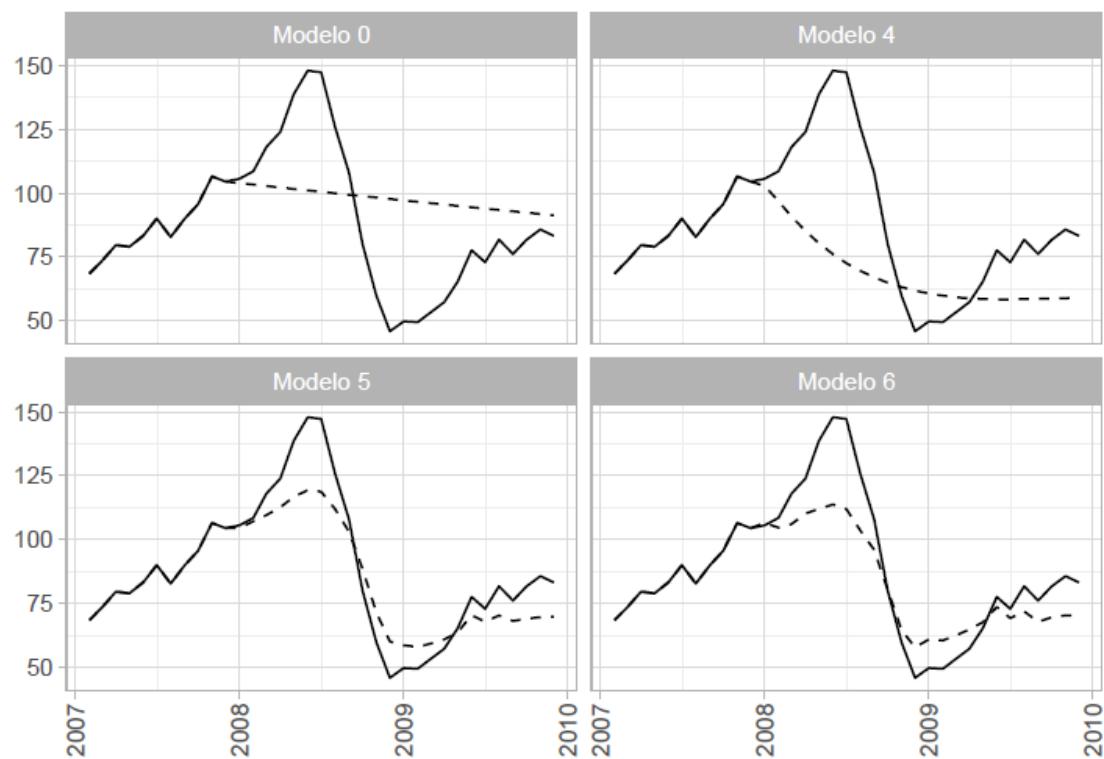


Figura 18 Valores simulados (linha tracejada) para o período que compreende os meses de jan/2008 a dez/2009 – Modelos 4 a 6

Quando se observa o comportamento dos agentes, os valores simulados apresentam um comportamento bastante distinto do que foi estimado a partir dos dados realizados. Como o mecanismo de mudança de comportamento é determinado pela distância entre a expectativa dos fundamentalistas e o valor simulado do período anterior, o coeficiente elevado para o parâmetro beta1 em nos Modelos 5 e 6 faz com que as simulações iniciais se aproximem do valor fundamentalista, justificando uma redução da participação dos agentes com comportamento fundamentalista. Em ambos os modelos, observa-se que o valor tende a se estabilizar próximo do nível mínimo, sugerido pelo valor do parâmetro alfa. No caso do Modelo 4, onde o parâmetro beta1 possui uma magnitude menor, o mesmo fenômeno não é observado. A Figura 19 mostra um painel com a fração dos agentes que adotaram um comportamento fundamentalista em acordo com a simulação para cada um dos Modelos em comparação com o que foi estimado a partir dos dados realizados.

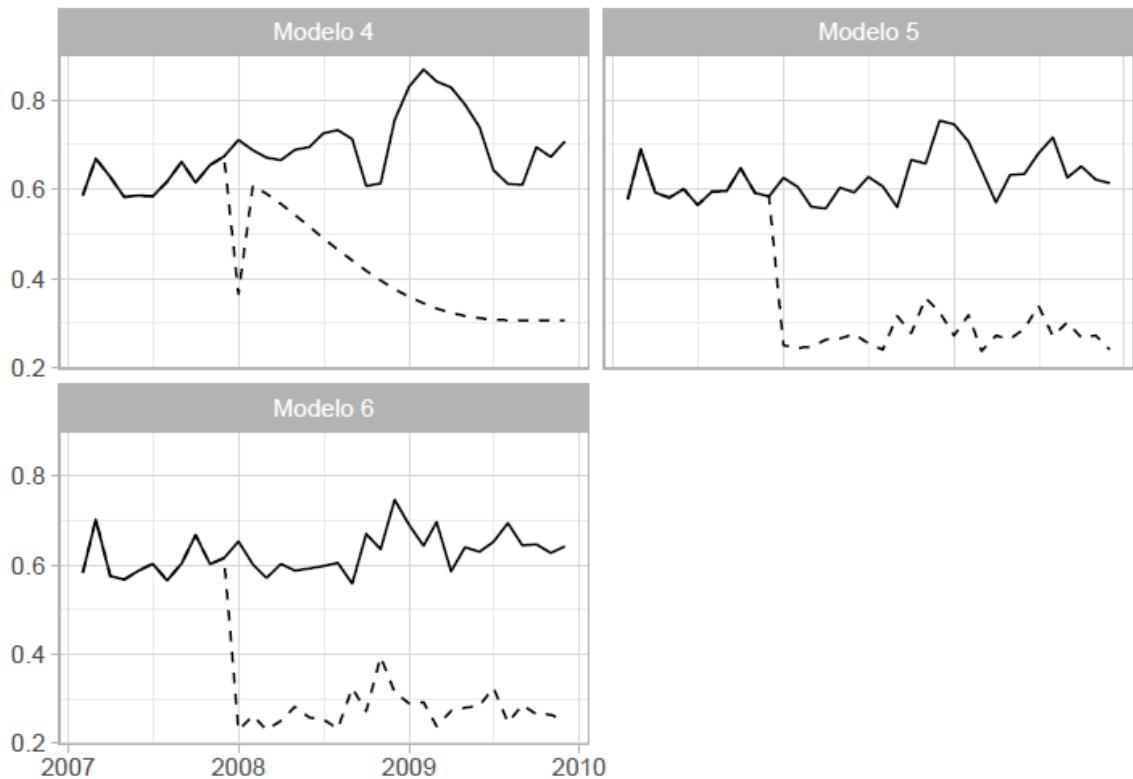


Figura 19 Valores simulados para a participação dos agentes com comportamento fundamentalista no período que compreende os meses de jan/2008 a dez/2009 – Modelos 4 a 6

5.2.3.1 - Simulação para os anos 2014 a 2015

O segundo dos períodos analisados se inicia em janeiro de 2014 e se estende até dezembro de 2015. Depois de 3 anos com o preço do Brent em um patamar acima dos US\$ 100/bbl, houve uma queda acentuada dos preços no ano de 2014. Tendo como explicação principal o excesso de oferta decorrente da crescente produção não convencional americana, a queda dos preços observada nesse ano é comparável à que ocorreu em 2009. Apesar da magnitude similar, a motivação é distinta daquela, que tinha uma natureza mais econômica. Ao longo de 2015, apesar de um breve momento de recuperação, o preço do petróleo continuou sua trajetória de queda até atingir o menor patamar da série histórica recente em janeiro de 2016. A Figura 20 mostra um painel com o resultado da simulação dos Modelos 1 a 3 para o período mencionado.

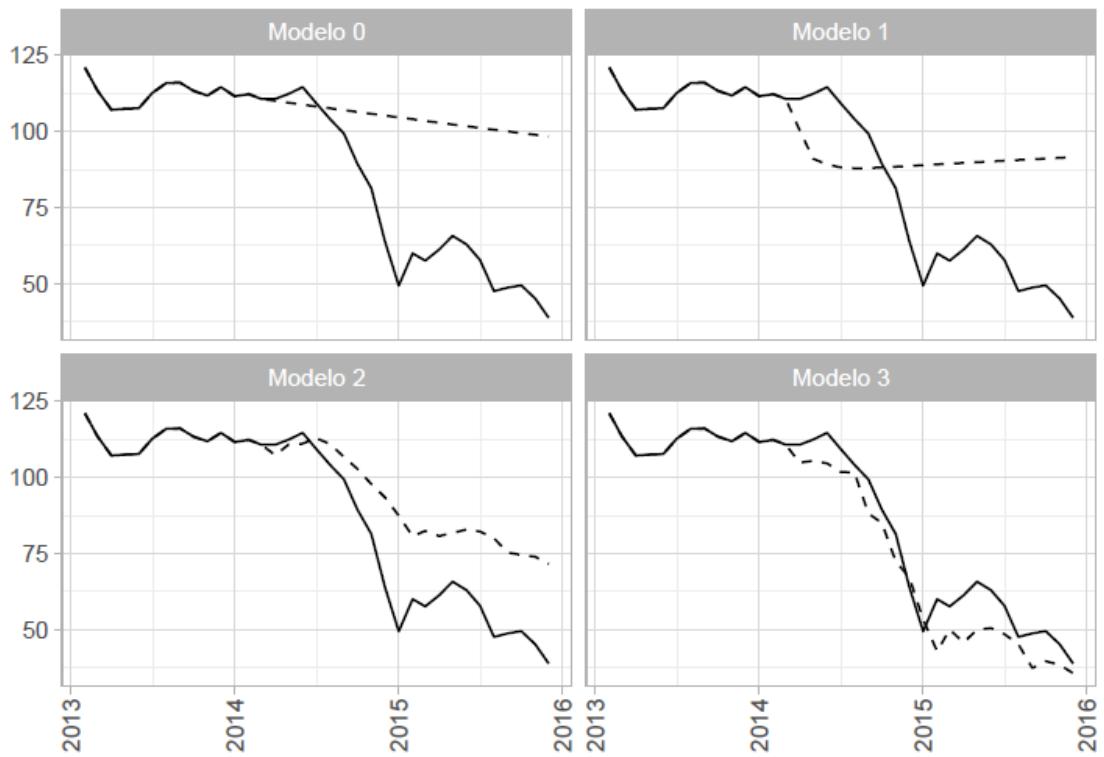


Figura 20 Valores simulados (linha tracejada) para o período que compreende os meses de jan/2014 a dez/2015 – Modelos 1 a 3

Assim como ocorreu no período anterior, os Modelos que utilizaram algum tipo de variável de mercado na formação das expectativas dos agentes com comportamento fundamentalista mostraram uma melhor capacidade de mimetizar o comportamento dos preços. Com graus diferentes de precisão, os Modelos 2 e 3 conseguiram capturar a ideia de que os dois anos analisados foram anos de queda dos preços. Enquanto o Modelo 2 representou uma queda mais branda dos preços, o Modelo 3 foi além e representou preços inferiores aos realizados em todo o ano de 2015. O Modelo 1, por sua vez, mostrou um rápido movimento de queda ainda em 2014 e se estabilizou em um patamar abaixo do ponto de partida representando uma melhoria limitada em relação ao Modelo 0.

No que diz respeito à simulação da evolução da fração dos agentes que adotaram um comportamento fundamentalista, a evolução nesse novo período apresentou trajetória também similar. A Figura 21 a seguir mostra essa evolução em acordo com a simulação para cada um dos Modelos em comparação com o que foi estimado a partir dos dados realizados.

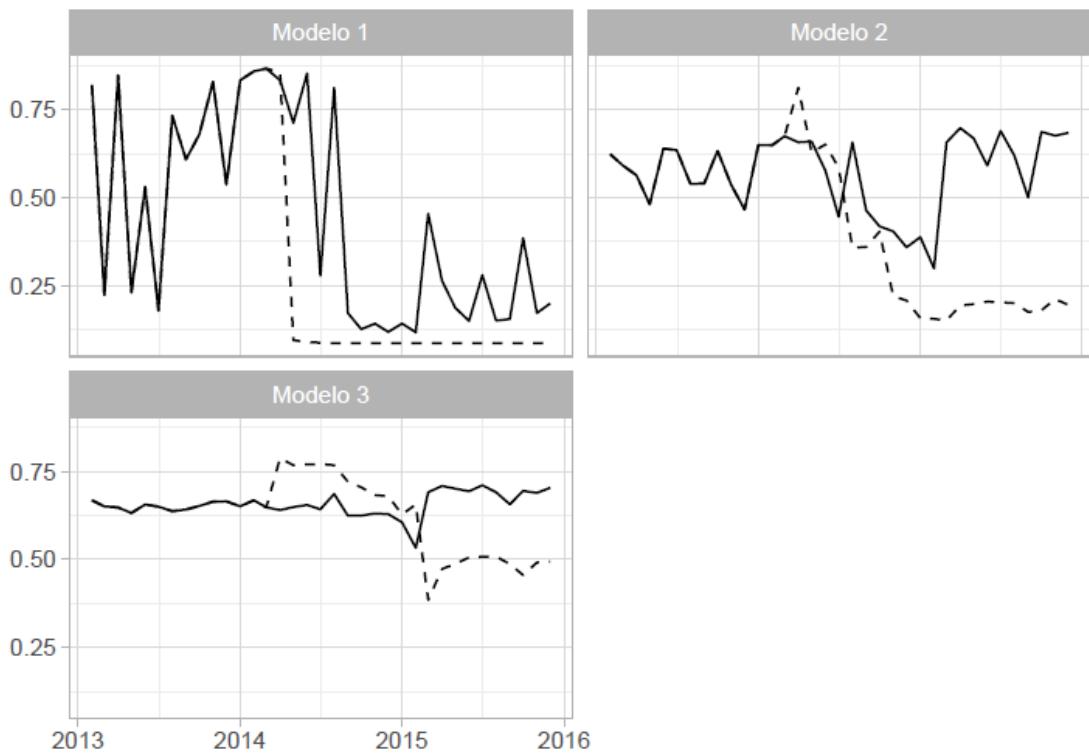


Figura 21 Valores simulados (linha tracejada) para a participação dos agentes com comportamento fundamentalista no período que compreende os meses de jan/2014 a dez/2015 – Modelos 1 a 3

Repetindo o resultado do outro período, os Modelos analisados apresentam um comportamento simulado qualitativamente diferente do que é possível observar nos dados estimados a partir dos dados realizados. No caso dos Modelos 1 e 2, ocorre uma redução na fração dos agentes que adota um comportamento fundamentalista, que se estabiliza em patamares inferiores a 50% em praticamente todo o período simulado. Nos valores estimados, a redução é menos acentuada no Modelo 1 e nem chega a ocorrer no Modelo 2. No Modelo 3, por sua vez, apesar da tendência de queda, essa fração permanece próxima dos 50% em todo o período. Tal queda não é observada nos valores estimados a partir dos dados realizados.

Quando se comparam as simulações entre si, a diferença entre os valores para a fração dos agentes que adota um comportamento fundamentalista nos Modelos 2 e 3 mostra que ambos os modelos representam de forma diferente a magnitude da queda dos preços do petróleo nos anos de 2014 e 2015. No Modelo 3, os coeficientes de baixa magnitude para os parâmetros β_2 e β_3 e participação próxima dos 50% em todo o período indicam uma predominância do comportamento fundamentalista sobre os preços. Já no Modelo 2, a baixa participação dos agentes fundamentalistas e o

coeficiente mais elevado para beta3 (assimétrico em relação a beta2) indicam um papel maior do comportamento grafista no movimento de queda dos preços.

Analizando o resultado das simulações para os Modelos 4 a 6, é possível observar que os Modelos 5 e 6, em que os agentes com comportamento fundamentalista utilizam variáveis de mercado na formação das suas expectativas, são aqueles que melhor mimetizam a trajetória dos preços realizados, ainda que a queda de preços simulada em ambos tenha sido menos intensa do que aquela que de fato ocorreu. No caso do Modelo 4, o movimento de declínio foi observado também com ganhos limitados em relação ao Modelo 0. A Figura 22 mostra um painel com o resultado da simulação dos Modelos 4 a 6 para o período mencionado.

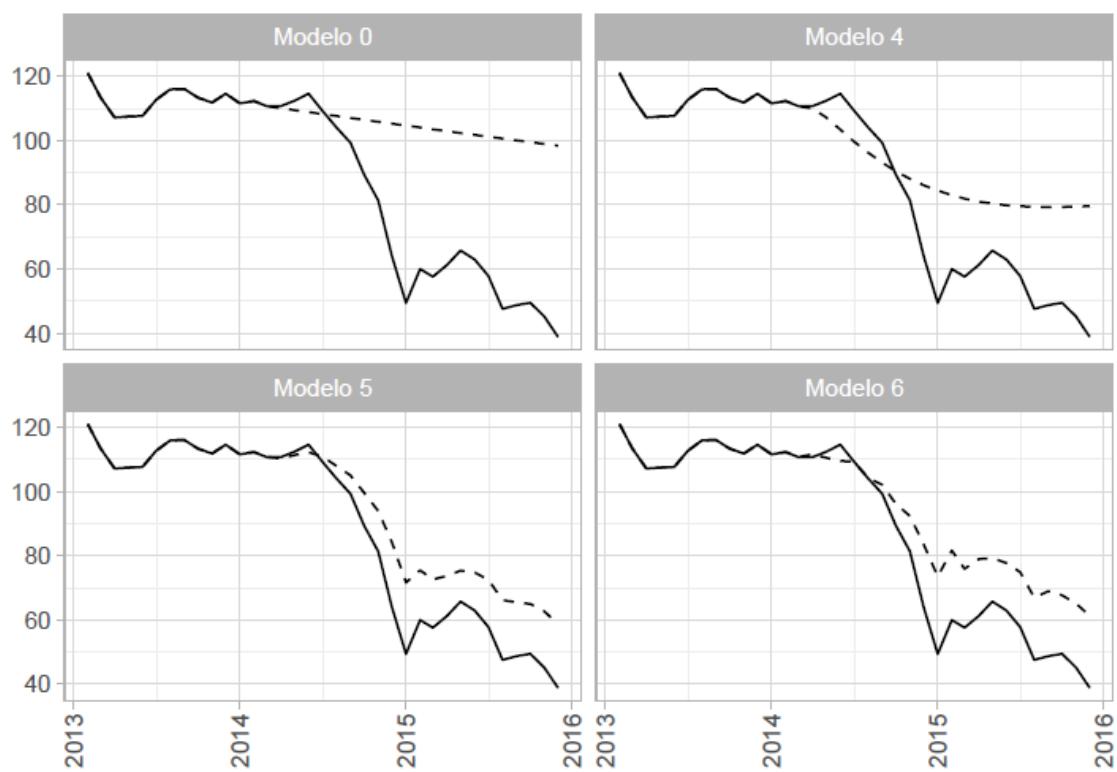


Figura 22 Valores simulados (linha tracejada) para o período que compreende os meses de jan/2014 a dez/2015 – Modelos 4 a 6

No que diz respeito à fração dos agentes que adotou um comportamento fundamentalista foi observado, pelas mesmas razões já indicadas na análise do período anterior, que há uma tendência de estabilização próxima do patamar mínimo indicado pelo parâmetro alfa nos Modelos 5 e 6. Como o coeficiente para os parâmetros beta2 e beta3 não possuem uma magnitude elevada em relação ao parâmetro beta1 nesses modelos, a influência do comportamento fundamentalistas na formação dos preços não pode ser ignorada, mesmo com a participação próxima do limite mínimo. A Figura 23 a

seguir mostra a participação dos agentes com comportamento fundamentalista em acordo com a simulação para cada um dos Modelos, em comparação com o que foi estimado a partir dos dados realizados.

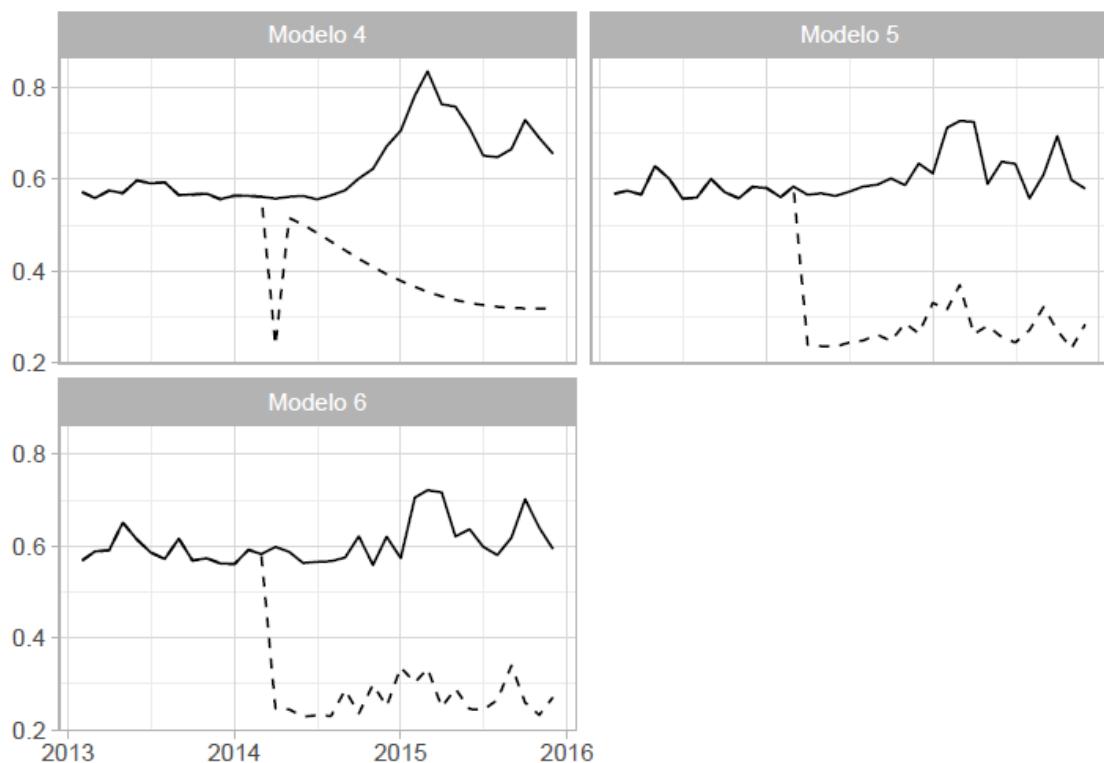


Figura 23 Valores simulados (linha tracejada) para a participação dos agentes com comportamento fundamentalista no período que compreende os meses de jan/2014 a dez/2015 – Modelos 1 a 3

A trajetória resultante da simulação a partir do Modelo 4 também foi equivalente ao observado nas simulações do período anterior. Da mesma forma, o menor valor para o beta1 e a menor correspondência entre o valor simulado e o valor fundamentalista faz com que a convergência entre eles seja mais lenta, também tornando mais gradativa a redução da participação dos agentes fundamentalistas ao longo do tempo.

5.2.4 - Discussão dos Resultados

Como foi possível observar na análise dos resultados nas seções anteriores, é possível corroborar a constatação existente na literatura analisada no Capítulo 3, que defende o uso de Modelos de Agentes Heterogêneos como uma alternativa válida para a modelagem do mercado de petróleo. Os resultados empíricos mostrados na presente Tese indicaram que, do ponto de vista estatístico, todos os seis Modelos propostos

foram capazes de explicar uma quantidade maior de variações nos preços do petróleo do que um modelo de passeio aleatório seria.

Como visto nos Capítulos 3 e 4, a literatura geralmente utiliza alguma forma de média móvel como uma maneira simplificada de representar o comportamento dos agentes fundamentalistas. FRITZ et al. (2015), por sua vez, se destacam por mostrar que a forma como os agentes fundamentalistas formam suas expectativas é determinante para o resultado das estimativas empíricas de modelos de agentes heterogêneos. Em seu artigo os autores assumem que os agentes com comportamento fundamentalista podem formar suas expectativas com base em uma média móvel, uma tendência quadrática de longo prazo ou uma regressão linear simples em que o preço do petróleo é função das importações da China, da relação Reserva/Produção e a razão entre a produção não OPEP e a demanda⁴³.

Seguindo essa mesma linha de argumentação, a presente Tese também propôs diferentes abordagens para a formulação de expectativas dos agentes fundamentalistas e mostrou que existem mudanças significativas nos resultados em função da hipótese assumida. Ampliando a proposta de FRITZ et al. (2015), foram testadas duas diferentes hipóteses para o processo de formação de expectativas dos agentes usando variáveis baseadas nos fundamentos de oferta e demanda. A primeira delas, mais parcimoniosa do que a utilizada pelos autores e a segunda baseada na construção de um modelo VAR com múltiplas variáveis, em linha com a literatura recente relacionada à modelagem do mercado de petróleo. Os resultados mostraram significativas diferenças entre essas formulações e uma formulação baseada na média móvel e também mostraram significativas diferenças entre si, corroborando e expandindo os achados da literatura nesse tema.

De uma forma geral, foi possível observar, nos resultados em que o comportamento fundamentalista dos agentes usou algum tipo de variável associada aos fundamentos do mercado de petróleo (ainda que de forma simplificada), que os modelos apresentaram resultados superiores em termos de ajuste aos dados. Essa superioridade se expressou tanto do ponto de vista da análise dos critérios de informação associados aos diferentes modelos, quanto do ponto de vista da capacidade de simulações baseadas nesses modelos mimetizarem razoavelmente o comportamento dos preços do petróleo em momentos relevantes do histórico recente.

⁴³ Embora essa variável possua um intervalo de valores possíveis distinto, o seu comportamento é similar ao do *Call-on-OPEC*, que corresponde à demanda mundial subtraída da produção não OPEP.

A análise dos resultados mostrou a necessidade de se separar duas características importantes de cada um dos modelos: a intensidade da resposta dos preços do petróleo ao comportamento dos agentes e a flutuação nas participações relativas dos tipos de comportamento ao longo do tempo.

Os parâmetros beta, que representam essa intensidade de resposta, por sua vez, agregam informações a respeito de duas variáveis de comportamento dos agentes. A primeira delas diz respeito à rapidez com que os agentes ajustam as suas demandas à uma divergência entre os preços correntes e os preços esperados. A segunda diz respeito ao quanto rápido os preços do petróleo respondem a flutuações nas demandas dos agentes. Por dificuldades na identificação⁴⁴ das contribuições relativas a partir dos dados existentes, a estimativa de ambos os efeitos foi realizada de forma agregada através do parâmetro beta.

Assim, olhando para as estimativas do parâmetro beta, que agregam os dois efeitos, foi possível observar que os valores para o beta1 (que acompanha os agentes com comportamento fundamentalista), foi consideravelmente mais elevado nos Modelos 2, 3, 5 e 6. Entre os possíveis significados desse resultado está a possibilidade de que a intensidade de reação da demanda dos agentes com esse tipo de comportamento a uma divergência entre os preços esperados e os preços correntes seja superior quando os agentes demonstram uma capacidade razoavelmente superior de antecipar os preços.

Como interpretação adicional desses resultados, é razoável supor que os valores superiores a 1 da mediana dos parâmetros nos Modelos podem sugerir alguma forma de *overshooting* no comportamento desses agentes. Tal característica não pode, contudo, ser atribuída de forma categórica aos agentes com comportamento fundamentalista, uma vez que a tendência ao overshooting também pode ser algo decorrente da intensidade de resposta dos preços a flutuações na demanda e não exclusivo a esse tipo de comportamento.

Entre os parâmetros beta2 e beta3, por outro lado, o baixo valor da mediana em todos os modelos, torna mais difícil supor que os agentes com comportamento grafista

⁴⁴ Os novos parâmetros incorporados em uma tentativa de segregar os dois efeitos apresentaram uma correlação elevada com os parâmetros já existentes, impossibilitando a convergência das cadeias de Markov utilizadas para a simulação das distribuições à posteriori. Mesmo em modelos de otimização como aqueles utilizados na literatura, a existência de dois parâmetros que aparecem de forma multiplicativa na equação de formação de preços resultaria em soluções múltiplas para o problema de otimização, exigindo algum tipo de restrição adicional. Em função dessas razões, optou-se por estimar um parâmetro único que agregou os dois efeitos.

adotem algum tipo de comportamento de *overshooting*. Pelo contrário, a alta probabilidade de valores negativos observadas nos Modelos 3 e 6, pode ser um indicativo de que eles adotem um comportamento de contrariar a tendência de evolução dos preços ao invés de extrapolá-la. É importante ressaltar que, caso seja esse o caso, os agentes decidem adotar o comportamento grafista em função de uma performance superior do comportamento extrapolativo em relação ao fundamentalista e, ainda assim, decidem adotar um comportamento contrário à tendência quando a métrica de performance é desfavorável à expectativa fundamentalista. Dado o caráter contraintuitivo dessa hipótese, é mais razoável supor que a menor probabilidade de um parâmetro com valor positivo signifique uma baixa influência do comportamento extrapolativo no processo de formação de preços.

Ainda no caso dos parâmetros beta2 e beta3, um ponto adicional a ser analisado é a possibilidade teórica de assimetria entre eles admitida na especificação dos modelos. Em maior ou menor grau, os resultados dos seis Modelos indicam a existência dessa assimetria, em que a resposta dos preços às decisões dos agentes que adotam o comportamento grafista é diferente se os preços estão em um movimento de queda ou em um movimento de alta. Contudo, a significativa probabilidade de que os parâmetros beta2 e beta3 possuam valor inferior a zero nos seis Modelos limitam a assertividade desta indicação. Também de forma unânime entre os modelos está o fato de que o valor do parâmetro foi superior em movimentos de queda dos preços (beta3). Mesmo de forma limitada a assimetria indicada é consistente com o resultado de ELLEN e ZWINKELS (2010), que indicam um parâmetro maior e significativo para o comportamento grafista em movimentos de queda dos preços.

Do ponto de vista do comportamento dos agentes, a referida assimetria pode ser interpretada como uma evidência adicional para o fenômeno identificado por KAHNEMAN e TVERSKY (1979)⁴⁵ de que a aversão aos riscos de perder e ganhar se dá de forma assimétrica. De acordo com os autores, os agentes econômicos são mais propensos a tomar uma atitude e ajustar suas posições no mercado em face de um risco de redução de riqueza. Os resultados para os parâmetros beta2 e beta3 nos diferentes modelos indicam a possibilidade dessa ideia.

No que tange à volatilidade da flutuação nas participações, as diferenças entre os Modelos 1 a 3 dependem fortemente do valor do parâmetro alfa, que mede indiretamente a “memória” dos agentes ao indicar que resultados passados possuem

⁴⁵ Tal hipótese já foi levantada previamente na literatura por ELLEN e ZWINKELS (2010) e também corroborada pelos resultados do estudo.

um efeito relevante sobre a decisão em um dado momento. Enquanto o Modelo 1, com um resultado para alfa que sugere uma tomada de decisão com base nos últimos 4 meses se aproxima de outros resultados da literatura, que apontam para uma janela pregressa da ordem de 1 a 6 meses, o Modelo 3, que apresentou o maior valor, sugere que os agentes podem olhar para um longo período de tempo antes de tomar a sua decisão.

Como resultado prático, a maior “memória” dos agentes no Modelo 3 faz com que as frações dos agentes que adotam comportamentos fundamentalistas e grafistas apresentem pouca flutuação ao longo do ano evidenciando uma ênfase maior na tomada de decisão com base em informações do longo prazo. Embora não seja possível afirmar muito a respeito de uma causalidade, é possível identificar uma relação entre uma maior capacidade dos agentes com comportamento fundamentalista de antecipar os preços de petróleo e a necessidade por parte desses mesmos agentes de uma evidência de longo prazo mais robusta para orientar uma eventual decisão de mudança de comportamento.

O outro parâmetro que afeta a volatilidade da flutuação nas participações dos dois tipos de comportamento entre os agentes é o parâmetro teta, que mede a fração dos agentes que vai mudar de comportamento a partir de um indicador de performance desfavorável. Diferente do alfa, que olha para o processo individual dos agentes de mensuração da sua performance pregressa, o parâmetro teta busca quantificar a sensibilidade do comportamento dos agentes à métrica de performance. Neste caso os Modelos 1 a 3 mostraram uma grande incerteza para a estimativa desse parâmetro. Não obstante, as medianas elevadas e distantes do valor zero afastam a hipótese de que os agentes apresentam total insensibilidade à métrica de performance.

Em termos práticos, o valor estimado para teta é uma indicação de que os agentes não apresentam uma inércia excessiva para mudar de comportamento em face de uma performance passada ruim. Por outro lado, o fato de que o parâmetro não apresenta um valor elevado, indica algum grau de restrição para que o comportamento dos agentes se altere, sugerindo a existência de algum tipo de custo de transação, ou mesmo viés comportamental. Com base no fato de que os fatores supracitados, que podem eventualmente influenciar o valor de teta, não são diretamente observáveis a partir de preços realizados ou fundamentos de mercado, é possível concluir que os dados utilizados na estimação contribuíram com pouca informação para a estimação da distribuição do parâmetro justificando a sua ampla incerteza.

Comparando o comportamento dos agentes nos Modelos 1 a 3 com os diferentes momentos dos preços do petróleo, é possível observar que, em diferentes graus de magnitude, a participação dos agentes com comportamento grafista aumentou nos principais momentos de queda dos preços em 2009 e 2014. Tal resultado sugere que os três modelos indicaram um aumento do número de agentes que passaram a adotar um comportamento extrapolador de tendência em momentos de crise. Apesar disso, essa não foi uma tendência permanente, uma vez que a proporção de agentes que adotaram uma posição fundamentalista aumentou antes de os preços atingirem os seus menores patamares durante esses momentos de queda.

No caso particular do Modelo 1, o aumento da participação dos agentes com comportamento grafista também foi observado durante o movimento de alta de preços em 2008. Tal resultado sugere que, em um contexto onde os agentes com comportamento fundamentalista não utilizam diretamente as informações dos fundamentos de mercado, o movimento de alta de preços observado ao longo de 2008 antes da crise econômica global foi resultado das ações de agentes com um comportamento extrapolativo⁴⁶. Tal resultado é consistente com o observado em TOKIC (2011), que considera a elevação dos preços em 2008 como uma bolha e atribui a sua ocorrência à entrada de agentes com um comportamento extrapolativo.

Os resultados para os Modelos 2 e 3, por sua vez, contrariam a evidência mencionada, sugerindo que a alta de preços observada em 2008 tenha sido provocada, majoritariamente, pelo comportamento fundamentalista, com um papel mais limitado para os agentes com um comportamento extrapolativo. Tal resultado é compatível com a evidência encontrada em GONÇALVES (2017), que identificou empiricamente que a elevação dos preços nesse período pode ser atribuída a uma combinação de fatores ligados aos fundamentos e fatores ligados à especulação financeira.

Quando se analisam os Modelos 4 a 6, as diferenças entre eles são menos marcantes, apesar da sua distinção em comparação com os Modelos 1 a 3. O parâmetro alfa, que possui significado distinto do observado nos Modelos 1, 2 e 3, mede a participação mínima dos agentes com comportamento fundamentalista. A participação mínima dos agentes com comportamento fundamentalista, necessária como elemento estabilizador para os Modelos que usam esse tipo de mecanismo de mudança de comportamento, ficou similar entre os três modelos no ponto médio do intervalo teórico proposto para a estimação. A amplitude da distribuição nos três modelos,

⁴⁶ No modelo, os agentes com comportamento grafista formam as suas expectativas usando técnicas de extração de tendência.

aproximadamente uniforme, evidencia que os dados não trouxeram informação suficiente para auxiliar na identificação de um intervalo mais restrito para essa variável.

Além da pouca flutuação para o parâmetro alfa, também há pouca divergência para o parâmetro teta entre os modelos. Embora não seja diretamente comparável, o parâmetro teta possui significado similar ao observado nos Modelos 1 a 3 na medida em que também mede a fração dos agentes que responderá a um indicativo de mudança de comportamento. Em função da construção do mecanismo, erros progressos da expectativa fundamentalista resultarão em aumento da participação fundamentalista no período seguinte. Dessa forma, é possível deduzir que, nos Modelos 4 a 6, a participação dos agentes com comportamento fundamentalista permanentemente acima do nível mínimo requerido estimado por alfa e também do patamar de 50% indica que, em nenhum momento houve uma convergência plena entre os preços praticados e a expectativa fundamentalista. Por outro lado, o fato de que a participação dos agentes com comportamento fundamentalista nunca atinge o patamar de 100% é um indicativo de que o potencial desestabilizador dos agentes com comportamento grafista não foi suficiente para provocar tal fenômeno.

Comparando com os preços realizados, assim como foi feito com os Modelos 1 a 3, não é possível associar de forma clara uma movimentação de preços específica ao padrão de flutuação das participações dos agentes nos Modelos 5 e 6. O Modelo 4, por outro lado, é o único que mostra uma flutuação mais acentuada na participação dos agentes com comportamento fundamentalista, possibilitando relacionar os picos em sua participação com dois momentos de recuperação de preços, logo após às quedas de 2009 e 2014. Tal comportamento pode ser enxergado como um movimento de entrada dos agentes com esse tipo de comportamento ao perceberem que o movimento de queda de preços ultrapassou algum tipo de “piso” fundamentalista de preços. É uma evidência de que a atuação desses agentes como estabilizadores do mercado está presente nesse modelo, tornando-se evidente apenas após movimentos mais extremos de queda dos preços.

Tal dinâmica de comportamento dos agentes, observada de forma bastante discreta nos Modelos 4 a 6, é consistente com a ideia defendida por FATTOUH (2011) de que o movimento dos preços é limitado por batentes superiores e inferiores indicados pelas alternativas de que os agentes dispõem. A maior participação dos agentes com comportamento fundamentalista, observada após os eventos de quedas acentuadas dos preços em 2009 e 2014, pode sugerir ser esse o mecanismo por trás da existência dos referidos batentes. A inexistência desses eventos até 2008 também é corroborada

pelo autor na medida em que, em sua argumentação, a forte elevação dos preços entre 2000 a 2008 é atribuída à inoperância dessa dinâmica de comportamento.

Em resumo, no que tange à mudança de comportamento dos agentes, é possível observar tanto a influência da forma como os agentes com comportamento fundamentalista formam as suas expectativas como também, principalmente, do mecanismo utilizado para a seleção do seu comportamento. Embora os Modelos tenham sido unânimes em mostrar alguma flutuação nas participações ao longo do tempo e percentuais de participação significativos para os dois tipos de agentes em todo o horizonte analisado, o resultado observado certamente não é homogêneo entre os modelos.

Esse comportamento pode ser considerado como uma decorrência negativa de uma das principais qualidades dos Modelos de Agentes Heterogêneos, a saber, a sua flexibilidade. Ao permitir a construção de modelos em que é possível representar explicitamente os seus mecanismos de funcionamento, os Modelos de Agentes com Comportamentos Heterogêneos abrem a possibilidade para a exploração de diferentes hipóteses teóricas de forma transparente. Tal fato, que é extremamente benéfico quando se possui um modelo teórico com as hipóteses a serem adotadas já bem definidas, pode resultar em uma indefinição quando o referido modelo teórico não contém hipóteses para todos os seus componentes.

Um dos propósitos da presente Tese ao flexibilizar duas importantes hipóteses teóricas para a construção de um Modelo de Agentes Heterogêneos para o mercado de Petróleo foi o de explorar como as diferentes alternativas impactam os resultados obtidos e, com sorte, identificar uma ou mais alternativas que se destacam significativamente das outras. No caso do mecanismo de formação de expectativas dos agentes com comportamento fundamentalista é possível afirmar, com segurança, que tal propósito foi atingido. Os modelos que utilizaram fundamentos do mercado de petróleo no processo de formação de expectativas desse tipo de agente apresentaram resultados superiores aos modelos baseados em média móvel, seja para a estimativa dos parâmetros, seja para as simulações dentro da amostra.

No que tange ao mecanismo de mudança de comportamento dos agentes, tal constatação não pode ser realizada com segurança. Comparando os modelos aos pares (1 e 4; 2 e 5; 3 e 6) com o mesmo mecanismo de formação das expectativas dos agentes com comportamento fundamentalista para isolar os seus efeitos, não foi possível observar uma diferença significativa de performance da estimação, tampouco nos resultados para as simulações dentro da amostra. Ainda assim, o resultado para as

participações relativas dos agentes proporcionados pelos dois mecanismos foi significativamente diferente.

Uma possível explicação para essa constatação, diz respeito à dificuldade encontrada em se obter estimativas razoáveis para os parâmetros que constituem os mecanismos de comportamento. Em todos os modelos a distribuição *a posteriori* do parâmetro teta foi significativamente ampla e nos Modelos 4 a 6 a distribuição do parâmetro alfa pode ser considerada aproximadamente uniforme dentro do universo de valores admissíveis teoricamente.

Essa dificuldade, por sua vez, pode ser razoavelmente atribuída à insuficiência de informações que possibilitem a identificação de características adicionais do comportamento dos agentes nos dados utilizados. É importante ressaltar que o uso da inferência bayesiana para a estimação dos modelos foi benéfico no processo de exploração das diferentes alternativas, na medida em que ofereceu as ferramentas e resultados que possibilitaram identificar de forma explícita a referida dificuldade.

6 - Conclusões

A revisão da literatura a respeito do processo de formação da atual arquitetura de funcionamento do mercado de petróleo mostrou uma maior relevância do setor financeiro no processo de formação de preços. Por exemplo, FATTOUH (2011) chegou a essa conclusão ao mostrar que o processo de formação de preços dos petróleos marcadores estava cada vez mais relacionado a mercados financeiros de derivativos, com alguns agentes relevantes já utilizando preços de contratos futuros como referencial para seus contratos de compra e venda de petróleo. GKANOUTAS-LEVENTIS (2013), por sua vez, identificou uma série de modificações técnicas e institucionais que levaram a uma maior importância do setor financeiro no mercado de petróleo. Entre esses fatores destacam-se a ascensão do *trading* eletrônico e mudanças na legislação americana em favor de uma maior liberdade para os agentes financeiros operarem nos mercados futuros e de outros derivativos. SILVERIO (2012) abordou a questão do ponto de vista empírico mostrando as contribuições relativas das esferas física e financeira no processo de *price discovery* nos mercados dos marcadores Brent e WTI.

A mesma revisão de literatura mostrou que a constatação desse movimento de maior relevância do setor financeiro está na origem da hipótese de que os preços do petróleo foram influenciados significativamente pela especulação financeira ao longo da década de 2000. Como discutido no Capítulo 2, a literatura que se ocupou do teste dessa hipótese utilizou de diferentes estratégias para testá-la. Entre elas destacaram-se os esforços empíricos de verificar a relação entre os tipos de agentes participantes no mercado de petróleo e o comportamento dos preços, a busca por evidências empíricas que permitissem a identificação dos efeitos do comportamento especulativo sobre os preços (como a formação de estoques em um momento de alta de preços, por exemplo) e a tentativa de demonstrar a existência da especulação financeira a partir da limitação de um modelo baseado puramente em fundamentos de oferta e demanda.

Como foi possível depreender das diferentes definições de especulação financeira apresentadas por SZADO (2011), a maior parte delas tinha em comum o fato de que a especulação decorria de um comportamento dos agentes, seja do seu processo de formação de expectativas, seja do seu apetite ao risco. Embora não tenham ignorado a natureza comportamental da especulação financeira, todas as estratégias mencionadas no parágrafo anterior analisaram a questão de forma indireta, atribuindo uma correspondência biunívoca entre os tipos e os comportamentos dos agentes ou

tentando identificar os efeitos desses comportamentos sobre variáveis do mercado de petróleo, como os estoques.

Nesse contexto destaca-se o estudo de TOKIC (2011), que estudou o problema de forma qualitativa, desenvolvendo uma teoria baseada na evolução do comportamento dos agentes para explicar o surgimento de uma bolha especulativa no mercado de petróleo. Ao associar o comportamento especulativo com a adoção de uma estratégia de *feedback* positivo por parte dos agentes, o autor propôs a ideia de que todos os grupos de agentes, em algum momento a adotaram, sugerindo uma limitação das abordagens empíricas que olharam para a questão do comportamento dos agentes de forma indireta. A análise desse debate contribuiu para evidenciar a necessidade de desenvolvimento de um modelo do mercado de petróleo com foco no comportamento dos agentes.

Com base nessas evidências, a presente Tese propôs a releitura do problema da especulação financeira como um problema mais amplo, de análise do comportamento dos agentes. O objetivo foi o de construir um modelo empírico em que o comportamento dos agentes tivesse um papel central no momento de explicar a evolução dos preços do petróleo nos últimos anos, contribuindo com uma nova possibilidade para essa literatura. De forma incidental, a modelagem proposta ainda possibilitou um aporte empírico para o estudo qualitativo de TOKIC (2011).

Partindo desse ponto, o Capítulo 3 fez uma revisão da literatura teórica que fundamenta os modelos tradicionais dedicados ao problema de precificação de ativos em sua primeira seção. Essa revisão mostrou que tais modelos eram apoiados em dois pressupostos fundamentais: o de racionalidade dos agentes e o da existência de um agente cujo comportamento representaria um sumário do comportamento de todos os agentes (agente representativo).

Embora tenham fundamentado muito da literatura em precificação de ativos financeiros até o momento, a segunda seção do Capítulo 3 mostrou que tais pressupostos eram inadequados para os objetivos pretendidos na presente Tese. Ao recorrer à modelagem de um único agente representativo, não seria possível representar agentes com comportamentos distintos em um modelo. Em se tratando do problema da especulação financeira, a análise do problema se beneficia de uma modelagem em que parte dos agentes adota um comportamento especulativo enquanto a outra parte adota um comportamento não-especulativo. No que diz respeito à questão da racionalidade perfeita dos agentes, a sua adoção como pressuposto teórico também iria contra os objetivos de modelagem da presente Tese. Na presença de informação

perfeita e total racionalidade, não é razoável supor que os agentes adotem métodos distintos de formação de expectativas futuras.

Em linha com as críticas a esses dois pressupostos fundamentais, a presente Tese propôs o uso dos modelos de Agentes Heterogêneos (HMs) como ferramenta para uma modelagem do mercado de petróleo baseada no comportamento dos agentes. Os HMs, que foram descritos na terceira seção do Capítulo 3, surgiram na literatura ainda nos anos 1970 com o estudo de ZEEMAN (1974) e vêm sendo estudados de forma sistemática desde o início dos anos 1990. Apenas na década de 2000, contudo, foram realizados os primeiros esforços para a estimativa empírica dos parâmetros desse tipo de modelo com base em dados do mercado. Até então, apenas as características analíticas desse modelo tinham sido estudadas. REITZ e SLOPEK (2008) aparece como um dos primeiros exemplos do uso desse tipo de modelo para o estudo do mercado de petróleo.

Conforme visto em LEBARON (2006) e HOMMES (2005), os modelos de Agentes Heterogêneos fazem parte de um espectro mais amplo de modelos baseados em agentes. O posicionamento dos modelos de Agentes Heterogêneos dentro desse espectro está vinculado ao número de agentes/comportamentos representados e à complexidade das relações. Baseado nas constatações de CHEN et al. (2012) de que um grande número de agentes não representa um benefício em termos da habilidade de o modelo produzir os principais fatos estilizados das séries financeiras, optou-se por um desenho baseado em apenas dois agentes/comportamentos. Dessa forma, o tipo de modelagem proposto na presente Tese possui apenas dois tipos de agentes. Um deles forma suas expectativas com base nos fundamentos do mercado, o “fundamentalista”, enquanto o outro forma suas expectativas a partir da extração dos movimentos passados dos preços, o “grafista”.

O caráter recente da literatura em que modelos similares foram utilizados faz com que inexistam consensos e boas práticas já consolidadas entre os pesquisadores. Na revisão da bibliografia dedicada ao estudo do mercado de petróleo, foi possível identificar duas grandes incertezas de modelagem: o processo de formação de expectativas dos agentes com comportamento fundamentalista e o mecanismo de mudança de comportamento dos agentes. Como forma de contribuir com a literatura, a presente Tese propôs um esforço exploratório de modelagem com a construção de seis modelos que combinam um conjunto de opções possíveis para a representação desses dois pontos.

Para o mecanismo de formação de expectativas dos agentes foram utilizadas 3 possibilidades. A expectativa dos agentes com comportamento fundamentalista poderia ser representada como a média móvel dos últimos 12 meses dos preços, como o resultado de um modelo baseado unicamente no comportamento do balanço entre oferta e demanda do mercado de petróleo ou como o resultado de um modelo VAR do mercado de petróleo, em que são utilizadas informações do balanço entre oferta e demanda, da produção de petróleo em países de dentro e fora da OPEP e de um índice representativo da atividade econômica.

Para o mecanismo de mudança de comportamento dos agentes foram utilizadas 2 possibilidades. A primeira baseada na performance passada de cada comportamento e a segunda baseada no distanciamento entre a expectativa fundamentalista e o preço de fato realizado. Pelo primeiro mecanismo seria esperado um aumento na incidência do comportamento que mais acertou o comportamento passado dos preços. Pelo segundo mecanismo, uma distância entre os preços e o valor fundamentalista resultaria em um incremento da participação dos agentes com comportamento fundamentalista, como forma de estabilizar o mercado.

A primeira constatação a ser feita a partir dos modelos é a de que eles podem ser considerados como opções adequadas para a representação do mercado de petróleo. Comparando estatísticas mais gerais de ajuste, os seis modelos estimados explicaram uma proporção maior das flutuações do preço do petróleo do que um modelo simples de passeio aleatório.

Um dos objetivos de se realizar uma análise exploratória com seis especificações diferentes foi o de identificar algum conjunto de características que apresentasse um desempenho claramente superior aos outros. No que diz respeito ao processo de formação de expectativas dos agentes com comportamento fundamentalista, os resultados mostraram de forma clara que os modelos que utilizaram um mecanismo mais sofisticado de formação de expectativas (Modelos 3 e 6) desempenharam melhor do que os outros.

Quando se faz uma análise similar utilizando como corte o mecanismo de mudança de comportamento dos agentes, não é possível fazer uma afirmativa similar. Comparando a performance dos modelos com relação a essa característica, não foi possível identificar um deles como significativamente melhor do que os outros. Não obstante, os resultados observados para a evolução das participações relativas dos agentes com os dois tipos de comportamento foram consideravelmente diferentes entre os dois mecanismos.

Em geral, os modelos com mecanismo de mudança de comportamento baseados na performance pregressa demonstraram uma participação maior dos agentes com comportamento grafista em momentos de grandes movimentações de preços, como a crise de 2008 e a queda dos preços no segundo semestre de 2014. Entre esses modelos, contudo, foi possível observar diferenças associadas ao mecanismo de formação de expectativas dos agentes. Tomando como exemplo o movimento de elevação dos preços em 2008, o Modelo 1 com um método de formação de expectativa mais simples indicou uma participação maior dos agentes com comportamento grafista no processo de alta de preços do que os Modelos 2 e 3, que possuem um método mais complexo de formação de expectativas.

Entre os Modelos 4 a 6, onde mecanismo de mudança de comportamento se baseia na distância entre o preço realizado e a expectativa fundamentalista, a dinâmica da participação relativa dos agentes indicou a tendência a um incremento da participação dos agentes com comportamento fundamentalista após movimentos extremos de preços. Tal comportamento é compatível com a noção apresentada por FATTOUH (2011) de que o mercado possui batentes superiores e inferiores. Indo além, tal resultado pode ser um detalhamento dessa noção, sugerindo um mecanismo pelo qual esses batentes são efetivos, a saber, por um retorno dos agentes com comportamento fundamentalista ao mercado. Embora existente nos três modelos, tal comportamento é mais visível no Modelo 4, onde os fundamentalistas formam suas expectativas com base na média móvel.

Com relação ao valor dos parâmetros, foi observado um valor mais elevado para o parâmetro da equação de demanda dos agentes que adotam um comportamento fundamentalista, especialmente nos modelos em que o método de formação de expectativas utiliza variáveis associadas aos fundamentos de mercado (Modelos 2, 3, 5 e 6). Dado o fato de que esse parâmetro sumariza duas características do comportamento dos agentes, a rapidez de ajuste da demanda em face de mudanças nas expectativas de preços e a resposta dos preços ao comportamento desse tipo de agente, a interpretação não é direta. Por um lado, os valores superiores a 1 para a mediana dos parâmetros sugerem que esse tipo de agente adote um comportamento de *overshooting* em resposta a mudanças nas expectativas. Por outro lado, o valor elevado do parâmetro pode representar, também uma resposta mais intensa dos preços ao comportamento desse tipo de agente.

Quando se observa o valor dos parâmetros na equação dos agentes com comportamento grafista, as medianas tendem a ser mais baixas e, em alguns dos

modelos, apresentam probabilidade razoável de serem inferiores a zero. Assim como no caso dos parâmetros para os agentes com comportamento fundamentalista, a magnitude dos parâmetros pode indicar tanto uma baixa resposta desse tipo de agente a mudanças nas expectativas quanto uma baixa resposta dos preços a mudanças em suas decisões.

Em linha com a modelagem adotada em ELLEN e ZWINKELS (2010) foi introduzida uma assimetria entre os efeitos de quedas e elevações dos preços sobre o comportamento grafista. Assim como na referência citada, os resultados indicaram a possibilidade de que exista uma assimetria no comportamento grafistas dos agentes a depender do comportamento progresso dos preços. O movimento foi mais intenso em momentos de queda dos preços, sugerindo a existência de um ajuste nas posições mais ágil em face de uma expectativa de redução do valor dos ativos. A significativa probabilidade de beta2 e beta3 assumirem valores inferiores a zero nos seis Modelos, contudo, limita a assertividade deste resultado.

Quanto aos parâmetros próprios dos mecanismos de comportamento, alfa e teta, os resultados mostram que os dados foram pouco informativos no processo de estimação. Em todos os modelos estes parâmetros apresentaram uma distribuição de probabilidade com uma variância elevada, admitindo valores muito elevados ou muito próximos de zero. Em linha com outros estudos, a mediana do parâmetro teta, que mede a propensão dos agentes a mudarem de comportamento em função de mudanças nas métricas utilizadas para a seleção de comportamento, indica que não existe uma inércia total no comportamento dos agentes, tampouco uma propensão a mudar de forma instantânea a partir de qualquer mudança nas condições de mercado.

Tais resultados nos levam a crer que o uso de modelos de agentes heterogêneos para a modelagem do mercado de petróleo pode ser considerado uma abordagem útil e adequada às características atuais da arquitetura do mercado. No exercício apresentado na presente Tese foi possível identificar conexões entre os resultados observados nos modelos estimados e diferentes constatações realizadas pela literatura a partir de outros métodos e enfoques. Tal constatação é relevante no sentido em que evidencia o caráter geral e a flexibilidade da abordagem de modelagem proposta para a aplicação no mercado de petróleo.

Também vale destacar que o uso do método de inferência Bayesiana contribuiu positivamente com a análise dos modelos. Ao permitir a descrição das distribuições de probabilidade do valor dos parâmetros, o uso da inferência Bayesiana possibilitou identificar o grau de incerteza em parte das estimativas, indicando aqueles parâmetros

para os quais os dados apresentaram uma contribuição menor na identificação do seu valor. Outra vantagem do método foi a possibilidade de construção de intervalos de credibilidade para as séries estimadas da participação relativa dos tipos de comportamento dos agentes. Tal informação possibilitou a observação do impacto das incertezas sobre os parâmetros teta e alfa na incerteza a respeito dessa variável, inspirando cautela nas conclusões a serem derivadas a partir destes resultados. Apesar destes benefícios, o uso da inferência Bayesiana também trouxe desafios. Destacam-se nesse sentido o processo de escolha de distribuições à priori, onde se optou pela escolha conservadora de distribuições pouco informativas para os parâmetros, e o esforço computacional para o cômputo das iterações necessárias para a estimação dos Modelos 0 a 6.

Em resumo, o uso de Modelos de Agentes com Comportamentos Heterogêneos para a representação do mercado de petróleo pode ser considerado um campo de pesquisa promissor. Tal afirmativa está sustentada na constatação de que a flexibilidade de construção desse tipo de abordagem, evidenciada ao longo da análise exploratória empreendida na presente Tese, possibilitou a construção de uma linguagem única sob a qual foi possível reescrever diferentes resultados (até mesmo conflitantes) da literatura recente sobre o mercado de petróleo.

Como todo campo de pesquisa ainda relativamente jovem, a construção de modelos de Agentes com Comportamentos Heterogêneos para a representação do mercado de petróleo possui questões em aberto, que podem ser exploradas em estudos futuros. Entre essas questões, a que mais se destaca diz respeito ao procedimento de pesquisa necessário para a identificação do comportamento dos agentes. Na presente Tese optou-se por uma abordagem exploratória e pelo teste de diferentes especificações para o processo de formação de expectativas dos agentes com comportamento fundamentalista e para os mecanismos de mudança de comportamento já apresentadas na literatura.

Diferente do comportamento fundamentalista, o comportamento “grafista” representado nos seis Modelos explorados na presente Tese limitou-se a representação de um comportamento simples de extração de tendência. Estudos futuros podem se dedicar a uma sofisticação da noção de “extração de tendência” ao assumirem métodos de formação de expectativas baseados em ferramentas mais complexas para o comportamento dos agentes “grafistas”. LO et al (2000), por exemplo, desenvolveram algoritmos que buscam imitar o processo de reconhecimento de padrões em gráficos utilizado por praticantes de análise técnica.

Considerando a complexidade do mercado de petróleo, o esforço de testar exaustivamente todas as possibilidades de modelagem para esse mercado a fim de identificar a mais adequada empiricamente não é razoável. Faz-se necessário aproveitar as ferramentas de pesquisa disponíveis em outros campos de pesquisa, como a economia comportamental, para restringir o universo de possíveis comportamentos dos agentes. Com isso será possível limitar as possíveis hipóteses para a realização de testes empíricos como este no futuro.

O uso da inferência Bayesiana e a possibilidade de estimar distribuições de probabilidade para o valor dos parâmetros tornou evidente a necessidade de mais informações para a estimativa dos parâmetros associados aos mecanismos de mudança de comportamento. Ao utilizar apenas dados históricos de preços e variáveis de mercado, os modelos propostos na presente Tese resultaram na estimação de uma distribuição de probabilidade para os parâmetros teta e alfa com uma amplitude bastante elevada, limitando a capacidade de interpretação dos resultados.

Tomando em consideração a possibilidade de aportes teóricos a partir de outros campos do conhecimento, sobretudo a economia comportamental, estudos futuros podem identificar variáveis representativas de outras condições, tanto individuais quanto ambientais⁴⁷, que influenciam o comportamento dos agentes. A premissa adotada na presente Tese de que o comportamento dos agentes sofre influência apenas de um conjunto limitado de variáveis do mercado e dos preços já realizados representa um avanço em relação a uma parcela da literatura em que esse tipo de modelo foi construído apenas a partir de informações passadas dos preços. Apesar disso, considerando a possível diversidade do comportamento de indivíduos e empresas diante do mercado de petróleo, é bastante razoável supor que estudos futuros possam expandir as contribuições da presente Tese ao formularem e testarem hipóteses em que o comportamento dos agentes esteja relacionado com um conjunto maior de variáveis, contribuindo com a estimação dos parâmetros que o descrevem.

⁴⁷ Do ponto de vista individual é possível sofisticar a representação do comportamento dos agentes através da representação da intensidade de viéses cognitivos como, por exemplo, assimetrias na percepção de risco. Do ponto de vista ambiental, pode ser o caso de verificar se existem variáveis macroeconômicas mais gerais capazes de afetar o comportamento dos agentes, como índices de confiança, por exemplo.

Referências Bibliográficas

- ALLEN, F.; MORRIS, S.; SHIN, H. S. Beauty Contests and Iterated Expectations in Asset Markets. **Review of Financial Studies**, v. 19, n. 3, p. 719–752, 2006.
- ALLEN, H.; TAYLOR, M. P. Charts, noise and fundamentals in the London foreign exchange market. **The Economic Journal**, v. 100, n. 400, p. 49–59, 1990.
- AL-QAHTANI, A.; BALISTRERI, E.; DAHL, C. **Literature review on oil market modeling and OPEC's behavior**. [s.l.] Working paper, Colorado School of Mines, 2008.
- ANDO, T. **Bayesian model selection and statistical modeling**. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- BAUMEISTER, C.; KILIAN, L. **Forecasting the real price of oil in a changing world: A forecast combination approach**. [s.l.] CFS Working Paper, 2013. Disponível em: <<https://www.econstor.eu/handle/10419/87691>>. Acesso em: 28 jan. 2017.
- BERGER, J. O.; BAYARRI, M. J. The Interplay of Bayesian and Frequentist Analysis. **Statistical Science**, v. 19, n. 1, p. 58–80, fev. 2004.
- BIRGIN, E. G.; MARTÍNEZ, J. M.; RAYDAN, M. Nonmonotone spectral projected gradient methods on convex sets. **SIAM Journal on Optimization**, v. 10, n. 4, p. 1196–1211, 2000.
- BLOOMBERG. **Historical Open Interest and Volume Graph for Brent Futures**, 2017a. Acesso em: 21 set. 2017
- BLOOMBERG. **Historical Price Graph Thomsom Reuters CRB Index**, 2017b. Acesso em: 21 set. 2017
- BOONE, E. L.; MERRICK, J. R. W.; KRACHEY, M. J. A Hellinger distance approach to MCMC diagnostics. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 84, n. 4, p. 833–849, 3 abr. 2014.
- BP. **Statistical Review of the World Energy 2017**. [s.l: s.n.].
- BROCK, W. A.; HOMMES, C. H. A Rational Route to Randomness. **Econometrica**, v. 65, n. 5, p. 1059, set. 1997.
- BÜYÜKŞAHIN, B.; HARRIS, J. H. Do speculators drive crude oil futures prices? **The Energy Journal**, p. 167–202, 2011.
- CAVALCANTE, M. **Preços do petróleo e bolhas especulativas: algumas evidências para o mercado de WTI**. [s.l.] University Library of Munich, Germany, ago. 2008. Disponível em: <<http://econpapers.repec.org/paper/pramprapa/28582.htm>>. Acesso em: 30 mar. 2012.

CFTC. Staff report on commodity swap dealers & index traders with commission recommendations. **Washington, DC**, 2008.

CHEN, S.-H.; CHANG, C.-L.; DU, Y.-R. Agent-based economic models and econometrics. **The Knowledge Engineering Review**, v. 27, n. 02, p. 187–219, 2012.

CHEVALLIER, J. Etudes économétriques récentes réalisées à partir des données de la CFTC. 2010.

CHIARELLA, C.; DIECI, R.; HE, X. Heterogeneity, market mechanisms, and asset price dynamics. **Quantitative Finance Research Centre Research Paper**, n. 231, 2008.

CHIARELLA, C.; HE, X.-Z. Heterogeneous beliefs, risk and learning in a simple asset pricing model. **Computational Economics**, v. 19, n. 1, p. 95–132, 2002.

CHIARELLA, C.; HE, X.-Z.; ZWINKELS, R. C. J. Heterogeneous expectations in asset pricing: Empirical evidence from the S&P500. **Journal of Economic Behavior & Organization**, v. 105, p. 1–16, set. 2014.

CHIROMA, H. et al. A Review on Artificial Intelligence Methodologies for the Forecasting of Crude Oil Price. **Intelligent Automation & Soft Computing**, v. 22, n. 3, p. 449–462, 2 jul. 2016.

COCHRANE, J. H. The Dog That Did Not Bark: A Defense of Return Predictability. **Review of Financial Studies**, v. 21, n. 4, p. 1533–1575, jul. 2008.

DAY, R. H.; HUANG, W. Bulls, bears and market sheep. **Journal of Economic Behavior & Organization**, v. 14, n. 3, p. 299–329, 1 dez. 1990.

DOE, U. **STEO Data Browser - 1. U.S. Energy Markets Summary**. Disponível em: <<https://www.eia.gov/outlooks/steo/data/browser/>>. Acesso em: 16 jul. 2017.

DOMANSKI, D.; HEATH, A. Financial investors and commodity markets. **BIS Quarterly Review, March**, 2007.

ELLEN, S. TER; ZWINKELS, R. C. J. Oil price dynamics: A behavioral finance approach with heterogeneous agents. **Energy Economics**, v. 32, n. 6, p. 1427–1434, nov. 2010.

ENDERS, W. **Applied econometric time series**. Hoboken, NJ: Wiley, 2010.

ENERGY INTELLIGENCE. **The International Crude Oil Market Handbook**. [s.l.: s.n.].

FAMA, E. Efficient Capital Markets: A Review of Theory and Empirical Work. **Journal of Finance**, v. 25, n. 2, p. 383–417, 1970.

FAMA, E. F. Random Walks in Stock Market Prices. **Financial Analysts Journal**, v. 21, n. 5, p. 55–59, set. 1965.

FAMA, E. F. **Foundations of Finance: Portfolio Decisions and Securities Prices**. New York: Basic Books, 1976.

FAMA, E. F. Two Pillars of Asset Pricing. **American Economic Review**, v. 104, n. 6, p. 1467–1485, jun. 2014.

FARMER, J. D.; JOSHI, S. The price dynamics of common trading strategies. **Journal of Economic Behavior & Organization**, v. 49, n. 2, p. 149–171, 2002.

FATTOUH, B. Oil Market Dynamics Through the Lens of the 2002-2009 Price Cycle. **OIES WORKING PAPERS WPM**, v. 39, 2010.

FATTOUH, B. An Anatomy of the Crude Oil Pricing System. **OIES WORKING PAPERS WPM**, v. 40, 2011.

FATTOUH, B.; KILIAN, L.; MAHADEVA, L. The Role of Speculation in Oil Markets: What have we learned so Far? **The Energy Journal**, v. 34, n. 3, 2013.

FATTOUH, B.; MAHADEVA, L. **Assessing the financialization hypothesis**. [Oxford]: Oxford Institute for Energy Studies, 2012.

FLORES-MACÍAS, F. J. **Explaining the behavior of state-owned enterprises : Mexico's Pemex in comparative perspective**. Thesis—[s.l.] Massachusetts Institute of Technology, 2010.

FRANKEL, J. A.; FROOT, K. A. Explaining the Demand for Dollars: International Rates of Return and the Expectations of Chartists and Fundamentalists. **Department of Economics, UCB**, 1 jun. 1986.

FRITZ, A. et al. **The Role of Heterogeneous Agents in Fuel Markets: Testing Tales of Speculators in Oil Markets**. [s.l.] University of Duisburg-Essen, Chair for Management Science and Energy Economics, 2015. Disponível em: <http://www.ewi.wiwi.uni-due.de/fileadmin/fileupload/BWL-ENERGIE/Arbeitspapiere/RePEc/pdf/wp1505_TheRoleOfHeterogeneousAgentsInFuelMarketsTestingTalesOfSpeculatorsInOilMarkets.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2015.

GABRIEL, S. A.; KYDES, A. S.; WHITMAN, P. The National Energy Modeling System: a large-scale energy-economic equilibrium model. **Operations Research**, v. 49, n. 1, p. 14–25, 2001.

GARBADE, K. D.; SILBER, W. L. Price movements and price discovery in futures and cash markets. **The Review of Economics and Statistics**, v. 65, n. 2, p. 289–297, 1983.

GELMAN, A. et al. **Bayesian data analysis**. [s.l.] Chapman & Hall/CRC Boca Raton, FL, USA, 2014. v. 2

GEWEKE, J. **Evaluating the accuracy of sampling-based approaches to the calculation of posterior moments**. [s.l.] Federal Reserve Bank of Minneapolis, Research Department Minneapolis, MN, USA, 1991. v. 196

GIGERENZER, G. The adaptive toolbox: Toward a Darwinian rationality. In: FRENCH, J. A.; KAMIL, A. C.; LEGER, D. W. (Eds.). **Evolutionary psychology and motivation**. Volume 47 of the Nebraska symposium on motivation. Lincoln, NE, US: University of Nebraska Press, 2001. p. 113–143.

GIGERENZER, G.; TODD, P. M. **Simple heuristics that make us smart**. New York: Oxford University Press, 1999.

GKANOUTAS-LEVENTIS, A. **The transformation of the oil market: A study of financialisation through crises**. doctoral—[s.l.] City University London, 2013.

GONÇALVES, R. N. C. **REFLEXÕES ACERCA DA INFLUÊNCIA ESPECULATIVA NOS PREÇOS DO PETRÓLEO**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

GREENBERG, E. **Introduction to Bayesian econometrics**. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2008.

HALL, B. LaplacesDemon: An R Package for Bayesian Inference. **R package version**, v. 11, n. 03, 2011.

HAZEWINKEL, M. (ED.). **Encyclopaedia of mathematics: an updated and annotated translation of the Soviet “Mathematical encyclopaedia”**. Dordrecht; Boston: Norwell, MA, U.S.A: Reidel ; Sold and distributed in the U.S.A. and Canada by Kluwer Academic Publishers, 1988.

HE, X.-Z.; WESTERHOFF, F. H. Commodity markets, price limiters and speculative price dynamics. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 29, n. 9, p. 1577–1596, 2005.

HIRSHLEIFER, D. Behavioral Finance. **Annual Review of Financial Economics**, v. 7, n. 1, p. 133–159, 7 dez. 2015.

HOMMES, C. **Heterogeneous Agent Models in Economics and Finance**: Tinbergen Institute Discussion Paper. [s.l.] Tinbergen Institute, 2005.

HOMMES, C. H. Financial markets as nonlinear adaptive evolutionary systems. 2001.

HUNTINGTON, H. et al. Oil Markets and Price Movements: A Survey of Models. 2013.

IEA. **Key World Energy Statistics 2016**. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2016.

INVESTOPEDIA. **Market Maker**. Disponível em: <<https://www.investopedia.com/terms/m/marketmaker.asp>>. Acesso em: 17 dez. 2017.

IRWIN, S. H.; SANDERS, D. R. Index Funds, Financialization, and Commodity Futures Markets. **Applied Economic Perspectives and Policy**, v. 33, n. 1, p. 1–31, 1 mar. 2011.

JOËTS, M. Heterogeneous beliefs, regret, and uncertainty: The role of speculation in energy price dynamics. **European Journal of Operational Research**, v. 247, n. 1, p. 204–215, 2015.

KAHNEMAN, D.; SMITH, V. Foundations of behavioral and experimental economics. **Nobel Prize in Economics Documents**, v. 1, 2002.

KAHNEMAN, D.; TVERSKY, A. Prospect theory: An analysis of decision under risk. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, p. 263–291, 1979.

KAO, C.-W. et al. Nonlinear Oil Price Dynamics and the Impact of Heterogeneous Agents. 2015.

KASS, R. E.; WASSERMAN, L. The selection of prior distributions by formal rules. **Journal of the American Statistical Association**, v. 91, n. 435, p. 1343–1370, 1996.

KAUÊ DAL'MASO PERON, T.; DA FONTOURA COSTA, L.; RODRIGUES, F. A. The structure and resilience of financial market networks. **Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science**, v. 22, n. 1, p. 013117, mar. 2012.

KAUFMANN, R. K. et al. Oil prices: The role of refinery utilization, futures markets and non-linearities. **Energy Economics**, v. 30, n. 5, p. 2609–2622, set. 2008.

KAUFMANN, R. K. The role of market fundamentals and speculation in recent price changes for crude oil. **Energy Policy**, v. 39, n. 1, p. 105–115, 2011.

KILIAN, L. **Not All Oil Price Shocks are Alike: Disentangling Demand and Supply Shocks in the Crude Oil Market**. Rochester, NY: Social Science Research Network, 1 dez. 2006. Disponível em: <<http://papers.ssrn.com/abstract=975262>>. Acesso em: 20 dez. 2015.

KILIAN, L.; MURPHY, D. The role of inventories and speculative trading in the global market for crude oil. 2010.

KIRMAN, A. Ants, rationality, and recruitment. **The Quarterly Journal of Economics**, p. 137–156, 1993.

KIRMAN, A. Heterogeneity in Economics. **Journal of Economic Interaction and Coordination**, v. 1, n. 1, p. 89–117, maio 2006.

KIRMAN, A. P. Whom or what does the representative individual represent? **The Journal of Economic Perspectives**, v. 6, n. 2, p. 117–136, 1992.

KOLODZEIJ, M.; KAUFMANN, R. K. Oil demand shocks reconsidered: A cointegrated vector autoregression. **Energy Economics**, v. 41, p. 33–40, jan. 2014.

KRUSCHKE, J. K.; LIDDELL, T. M. The Bayesian New Statistics: Hypothesis Testing, Estimation, Meta-Analysis, and Planning from a Bayesian Perspective.

Estimation, Meta-Analysis, and Planning from a Bayesian Perspective (April 16, 2016), 2016.

KUKACKA, J.; BARUNIK, J. Estimation of Financial Agent-Based Models with Simulated Maximum Likelihood. 2016.

LEBARON, B. Chapter 24 Agent-based Computational Finance. In: **Handbook of Computational Economics**. [s.l.] Elsevier, 2006. v. 2p. 1187–1233.

LEROY, S. F. Efficient capital markets and martingales. **Journal of Economic Literature**, v. 27, n. 4, p. 1583–1621, 1989.

LEROY, S. F.; PORTER, R. D. The Present-Value Relation: Tests Based on Implied Variance Bounds. **Econometrica**, v. 49, n. 3, p. 555–574, 1981.

LO, A. W.; MAMAYSKY, H.; WANG, J. Foundations of technical analysis: Computational algorithms, statistical inference, and empirical implementation. **The journal of finance**, v. 55, n. 4, p. 1705–1770, 2000.

MABRO, R. **On oil price concepts**. [Oxford]: Oxford Institute for Energy Studies, 1984.

MABRO, R. Netback Pricing and The oil Price collapse of 1986. **OIES WORKING PAPERS WPM**, v. 10, 1987.

MABRO, R. The International Oil Price Regime. **The Journal of Energy Literature**, v. 11, n. 1, p. 3–20, 2005.

MABRO, R.; HORSNELL, P. **Oil markets and prices : the Brent market and the formation of world oil prices**. Oxford: Oxford Univ. Press for the Oxford Inst. for Energy Studies, 1994.

MALKIEL, B. G. The efficient market hypothesis and its critics. **The Journal of Economic Perspectives**, v. 17, n. 1, p. 59–82, 2003.

MAS-COLELL, A. et al. **Microeconomic theory**. [s.l.] Oxford university press New York, 1995. v. 1

MASTERS, M. W.; WHITE, A. K. The accidental hunt brothers—act 2. **Index Speculators Have Been a Major Cause of the Recent Drop in Oil Prices. Special Update September**, v. 10, n. 4, 2008.

MUTH, J. F. Rational Expectations and the Theory of Price Movements. **Econometrica**, v. 29, n. 3, p. 315–335, 1961.

NEAL, R. M. Slice sampling. **Annals of statistics**, p. 705–741, 2003.

NETH, H.; GIGERENZER, G. Heuristics: Tools for an Uncertain World. In: SCOTT, R. A.; KOSSLYN, S. M. (Eds.). **Emerging Trends in the Social and Behavioral Sciences**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2015. p. 1–18.

ORGANIZATION OF PETROLEUM EXPORTING COUNTRIES et al. **World oil outlook 2016**. [s.l: s.n.].

PIERRU, A.; BABUSIAUX, D. Speculation without oil stockpiling as a signature: a dynamic perspective. **OPEC Energy Review**, v. 34, n. 3–4, p. 131–148, 2010.

PURVIN & GERTZ. **The role of WTI as a crude oil Benchmark**. [s.l: s.n.].

REITZ, S.; SLOPEK, U. **Nonlinear oil price dynamics: a tale of heterogeneous speculators?** Frankfurt am Main: Dt. Bundesbank, 2008.

REN, H.; LI, S. A Heterogeneous Agent-based Asset Pricing Model and Simulation. **International Journal of Engineering and Manufacturing**, v. 2, n. 4, p. 9–18, 29 ago. 2012.

ROBERT, C. **The Bayesian choice: from decision-theoretic foundations to computational implementation**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2007.

ROSENBERG, A. From Rational Choice to Reflexivity: Learning from Sen, Keynes, Hayek, Soros, and most of all, from Darwin. **Economic Thought**, v. 3, n. 1, p. 21–41, 2014.

SAMUELSON, P. A. Proof that properly anticipated prices fluctuate randomly. **IMR; Industrial Management Review (pre-1986)**, v. 6, n. 2, p. 41, 1965.

SANDERS, D. R.; IRWIN, S. H. **The Impact of Index and Swap Funds on Commodity Futures Markets**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/the-impact-of-index-and-swap-funds-on-commodity-futures-markets_5kmd40wl1t5f-en>. Acesso em: 27 ago. 2017.

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

SHILLER, R. **The Use of Volatility Measures in Assessing Market Efficiency**. [s.l.] National Bureau of Economic Research, Inc, out. 1980. Disponível em: <<http://econpapers.repec.org/paper/nbrnberwo/0565.htm>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

SHILLER, R. J. Speculative asset prices. **American Economic Review**, v. 104, n. 6, p. 1486–1517, 2014.

SILVERIO, R. **O PAPEL DA ESFERA FINANCEIRA NO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DOS PREÇOS DO PETRÓLEO NO MERCADO INTERNACIONAL: UMA ANÁLISE DE PRICE DISCOVERY DOS MERCADOS BRENT E WTI NO PERÍODO 1990-2011**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

SILVERIO, R.; SZKLO, A. The Effect of the Financial Sector on the Evolution of Oil Prices: Analysis of the contribution of the futures market to the price discovery process in the WTI spot market. **Energy Economics**, 2012.

SIMON, H. A. A BEHAVIORAL MODEL OF RATIONAL CHOICE. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 69, n. 1, p. 99–118, 1955.

SIMON, H. A. Theories of bounded rationality. 1972.

SOROS, G. **The crash of 2008 and what it means: the new paradigm for financial markets**. Oxford ; New York, NY: PublicAffairs, 2009.

ST LOUIS, F. R. B. OF. **Federal Reserve Economic Data | FRED | St. Louis Fed**. Disponível em: <<https://fred.stlouisfed.org/>>. Acesso em: 16 jul. 2017.

STATISTICAT, L. L. C. Bayesian Inference. **Farmington, Connecticut: Statistical Consulting and Support**, 2013.

SZADO, E. **Defining speculation: The first step toward a rational dialogue**. [s.l: s.n.].

TAYLOR, M. P.; ALLEN, H. The use of technical analysis in the foreign exchange market. **Journal of international Money and Finance**, v. 11, n. 3, p. 304–314, 1992.

TIBBITS, M. M. et al. Automated Factor Slice Sampling. **Journal of Computational and Graphical Statistics**, v. 23, n. 2, p. 543–563, 3 abr. 2014.

TOKIC, D. Rational destabilizing speculation, positive feedback trading, and the oil bubble of 2008. **Energy Policy**, v. 39, n. 4, p. 2051–2061, abr. 2011.

WEEKLY, P. I. Brent: Let's Get Physical. **Petroleum Intelligence Weekly**, v. 56, n. 31, p. 8, 7 ago. 2017.

WERKER, C.; BRENNER, T. Empirical calibration of simulation models. [s.l.] Max-Planck-Inst. for Research into Economic Systems, 2004.

ZEEMAN, E. C. On the unstable behaviour of stock exchanges. **Journal of Mathematical Economics**, v. 1, n. 1, p. 39–49, 1 mar. 1974.

Anexo I – Gráficos Traço e de Autocorrelação dos Modelos estimados

O objetivo do presente anexo é apresentar os gráficos traço e de autocorrelação, para cada um dos parâmetros em cada um dos modelos estimados. O gráfico traço representa a realização da cadeia de Markov ao longo das iterações e a estacionariedade é indicada por um comportamento de flutuações constantes ao redor de um valor médio, sem a existência de uma tendência visível. O gráfico de autocorrelação, por sua vez, representa a correlação entre realizações subsequentes da cadeia de Markov. Um gráfico que decai rapidamente para um valor próximo de zero após poucas defasagens é considerado um indicativo de estacionariedade. Seguem abaixo, os gráficos mencionados para cada um dos modelos.

Modelo 0

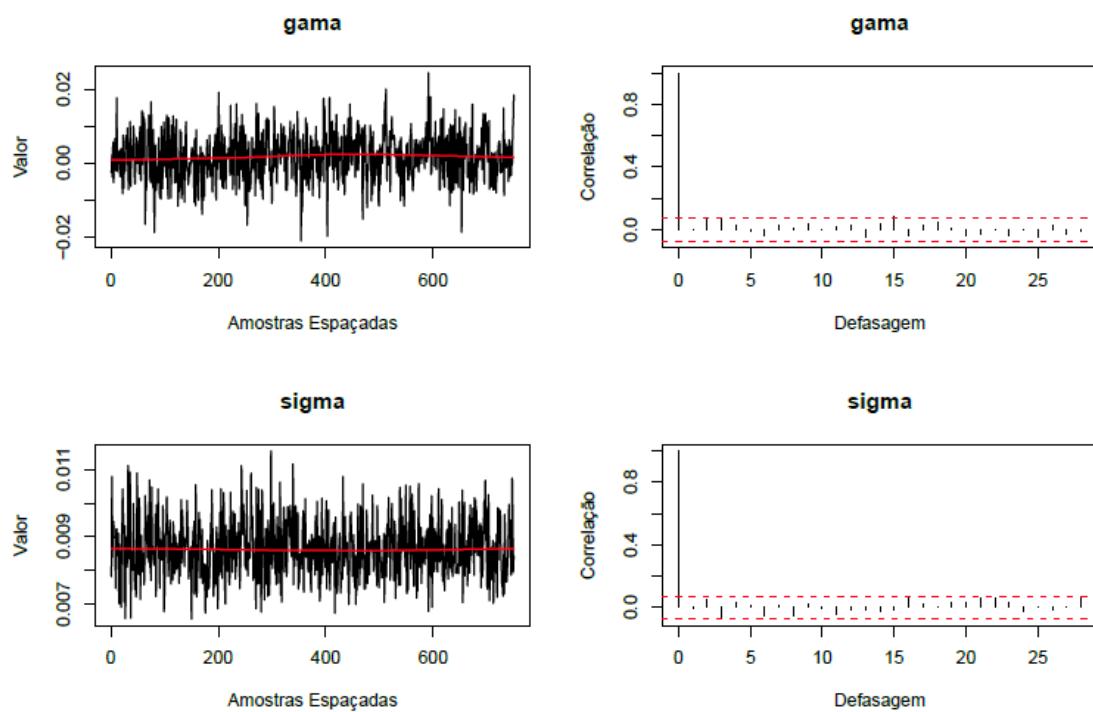


Figura 24 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros gama e sigma

Modelo 1

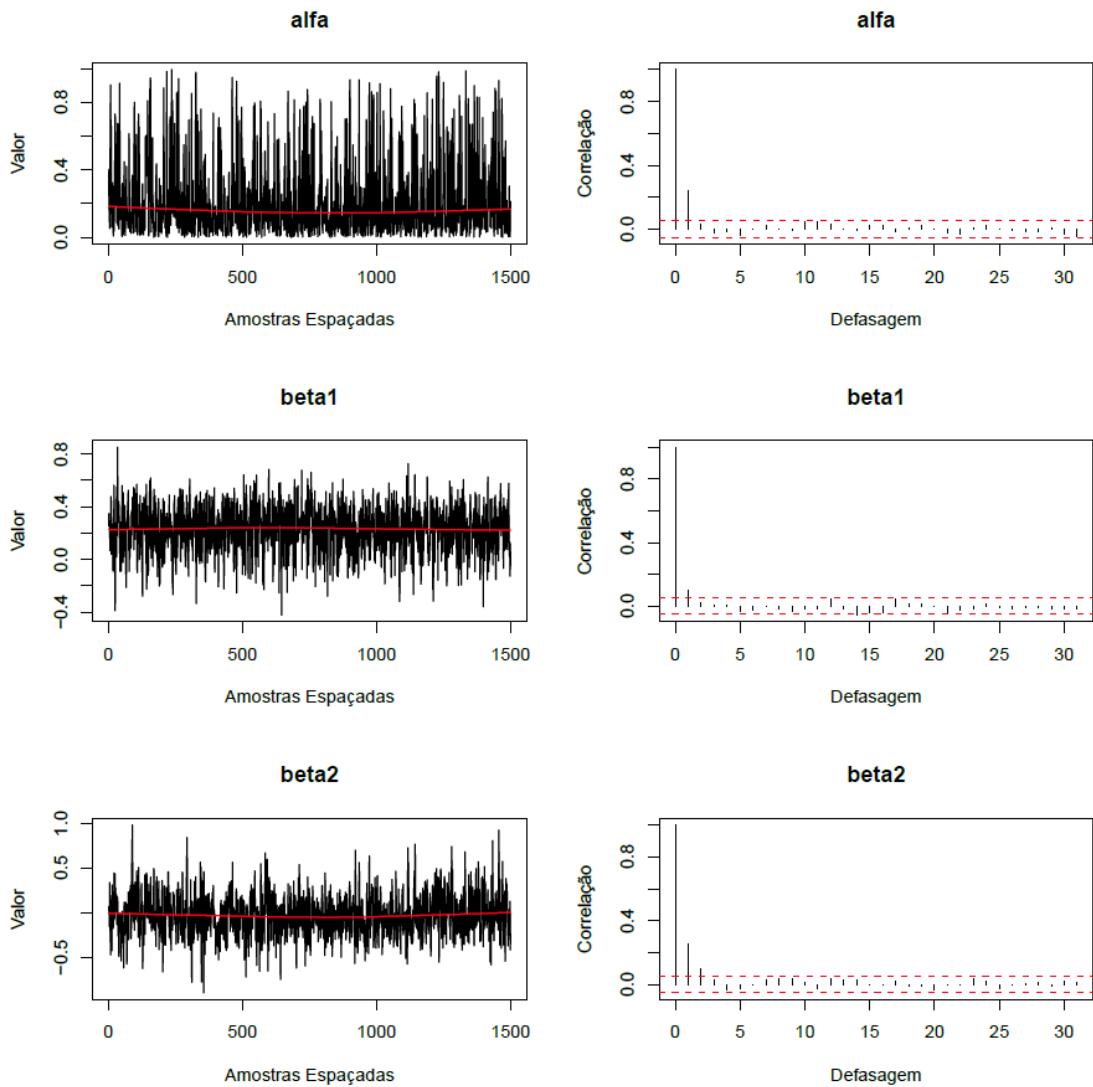


Figura 25 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros α , β_1 e β_2

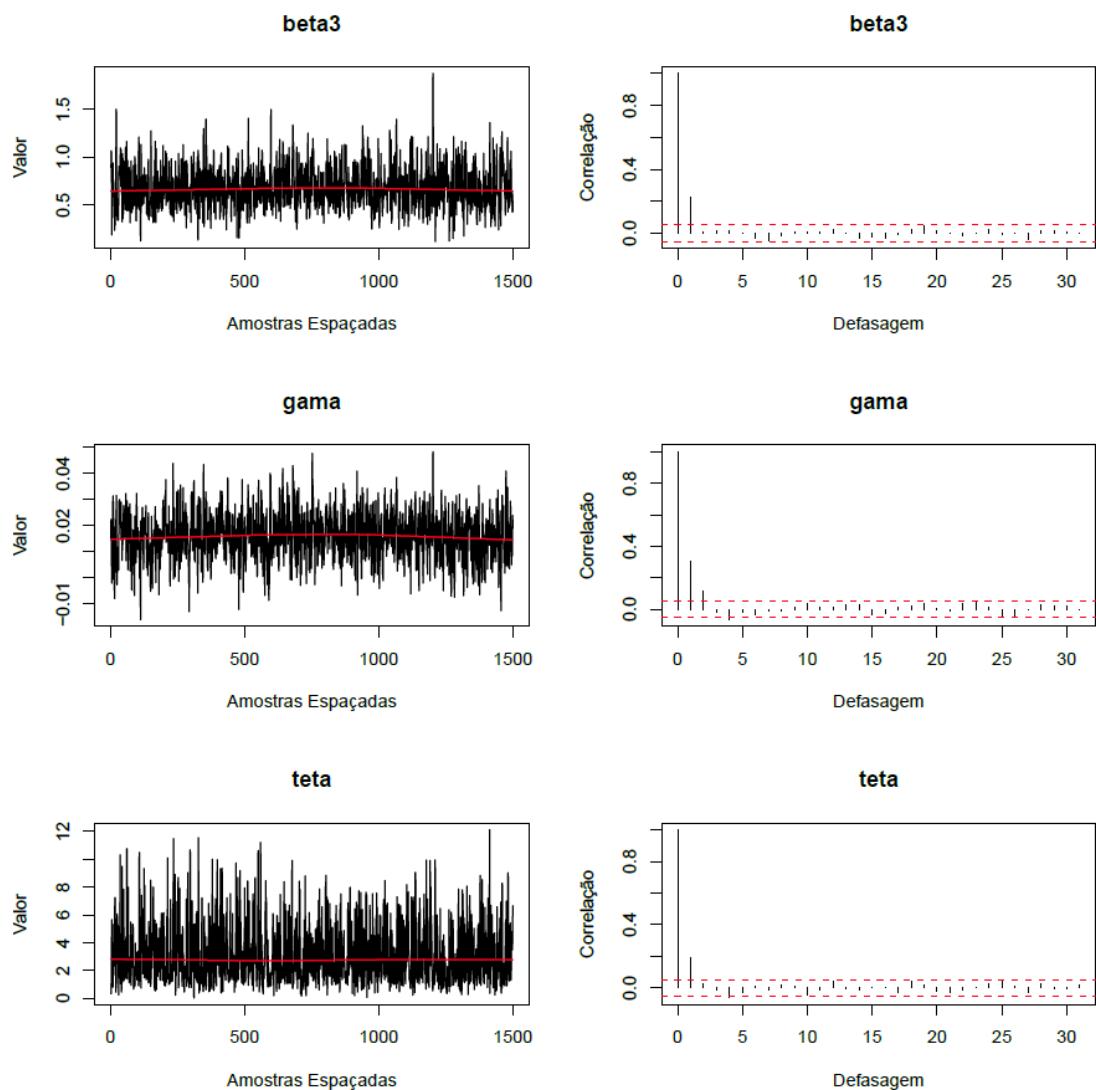


Figura 26 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros β_3 , γ e θ

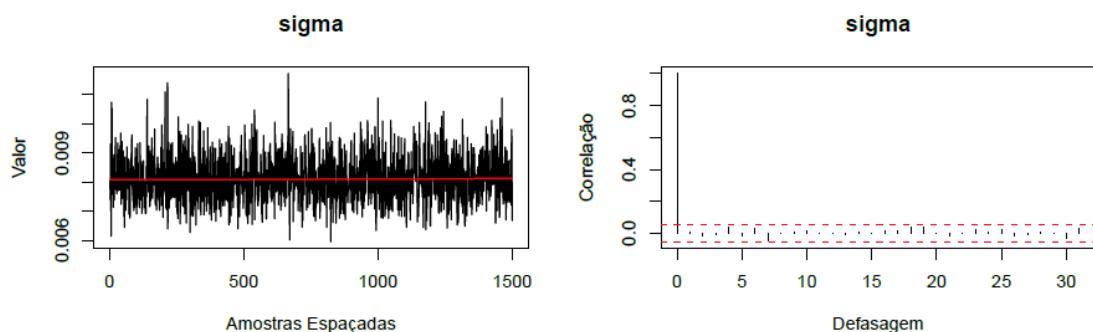


Figura 27 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para o parâmetro σ

Modelo 2

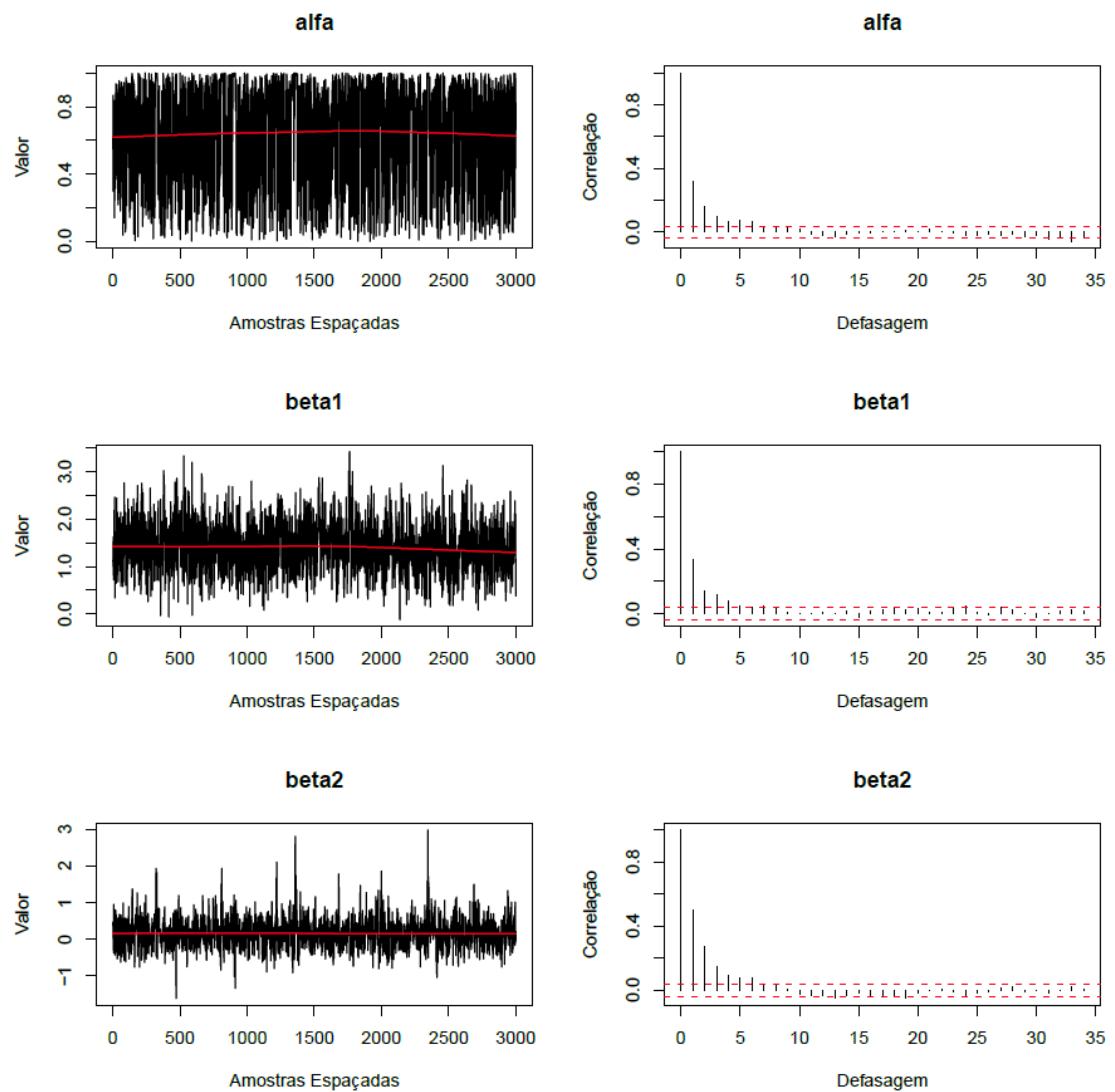


Figura 28 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros alfa, beta1 e beta2

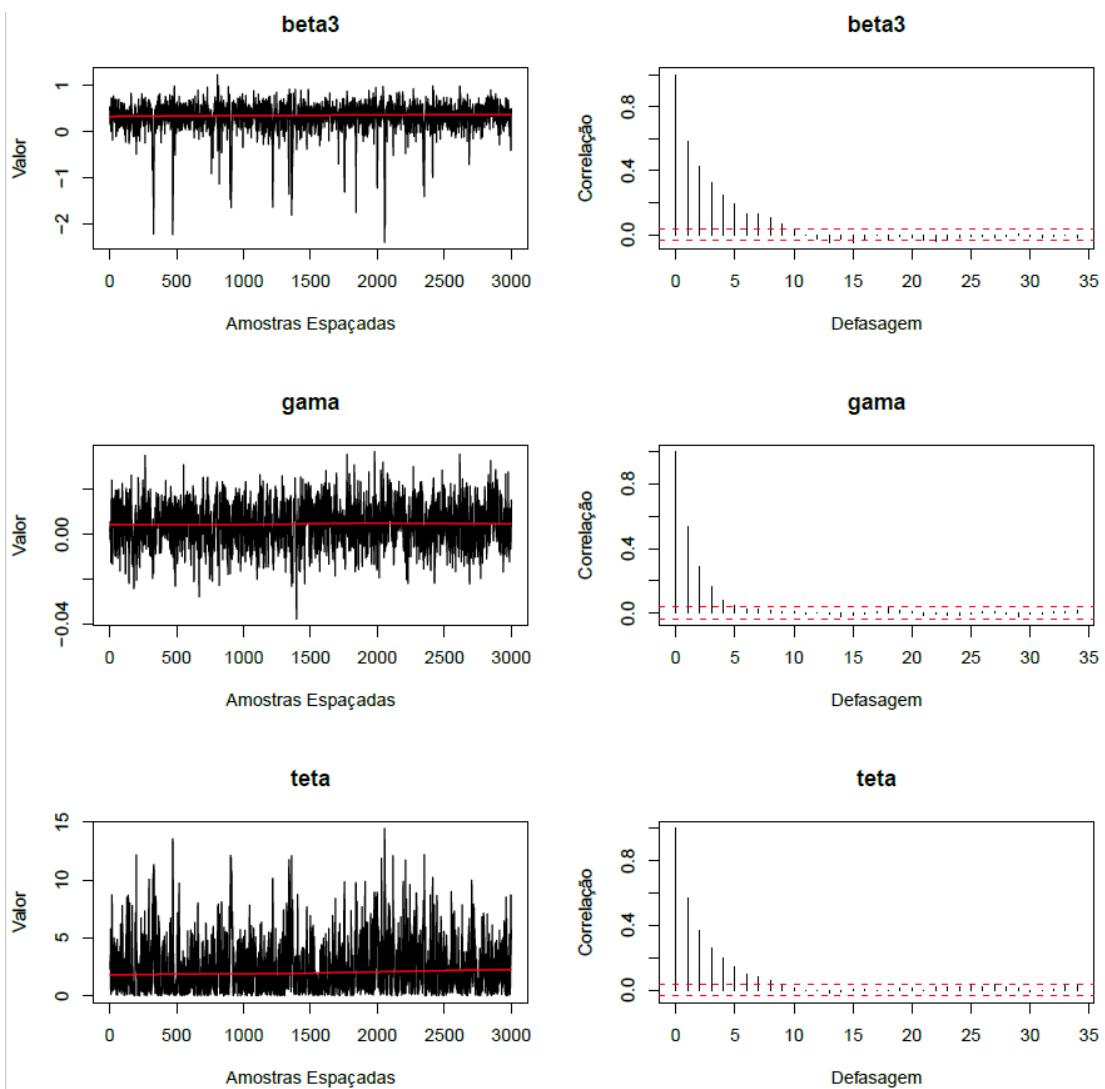


Figura 29 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros beta3, gama e teta

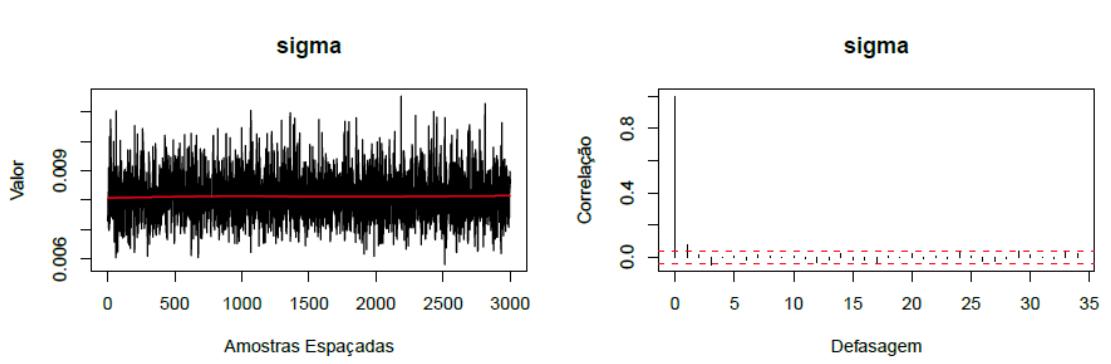


Figura 30 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para o parâmetro sigma

Modelo 3

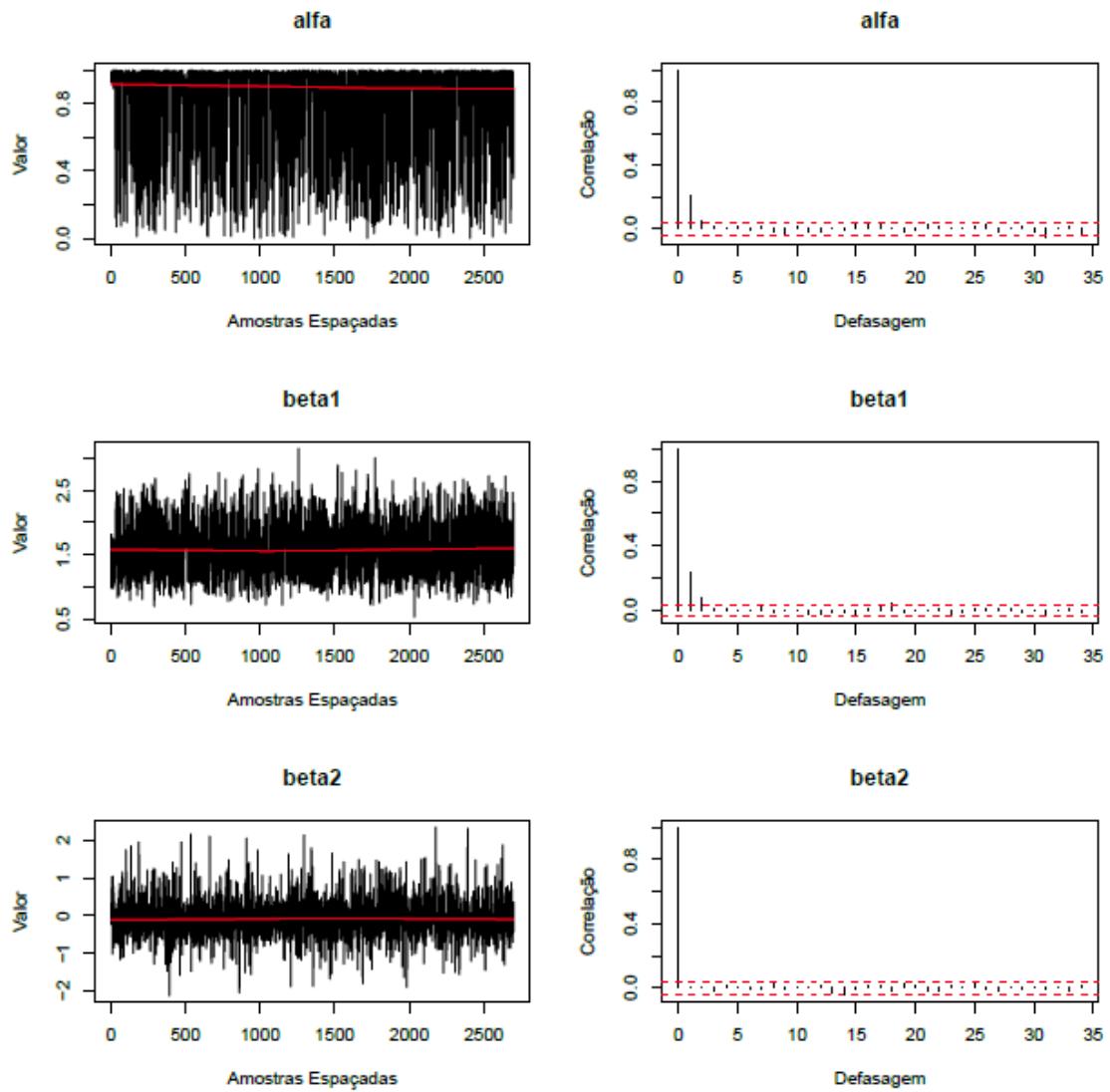


Figura 31 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros α , β_1 e β_2

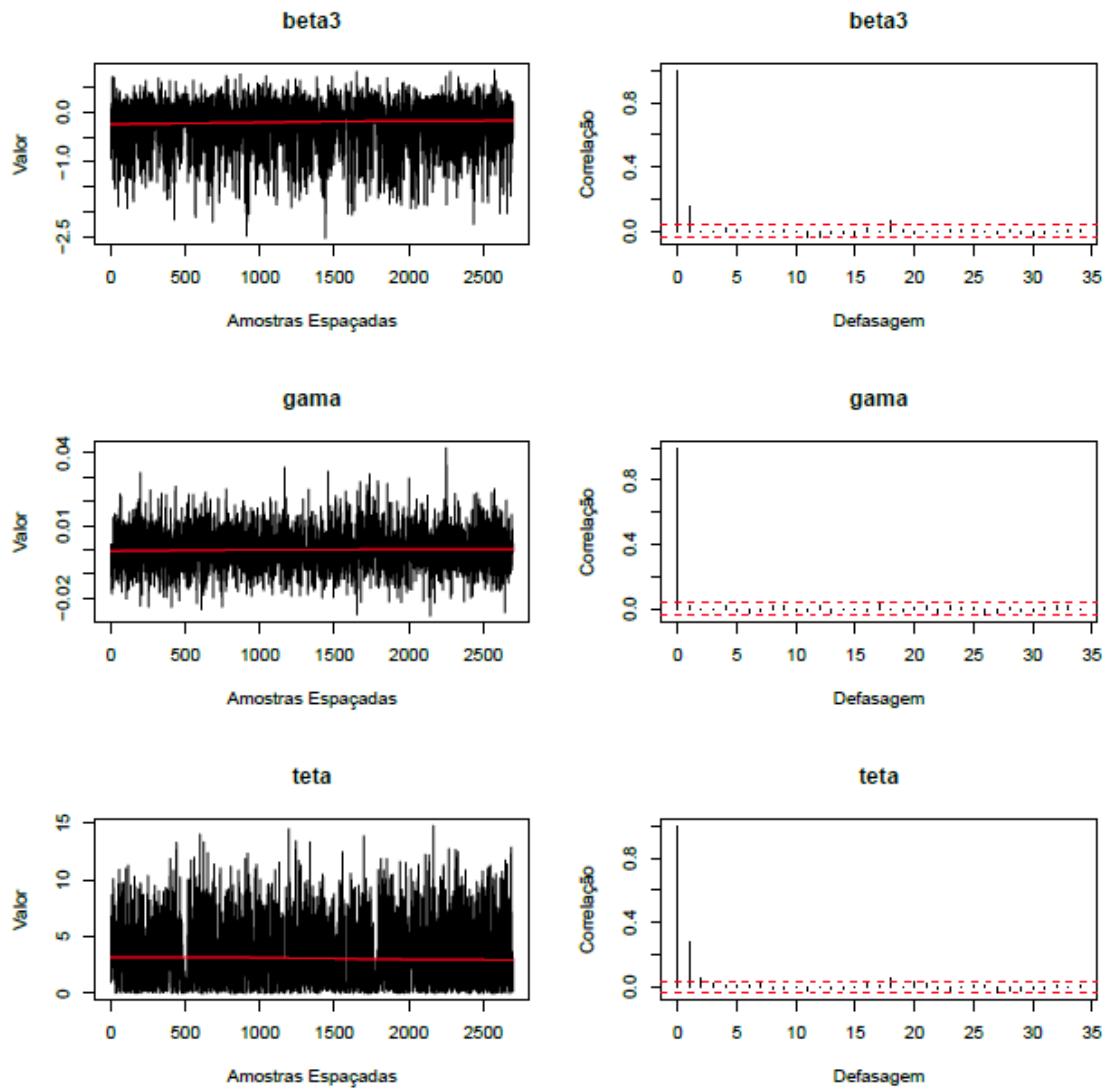


Figura 32 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros beta3, gama e teta

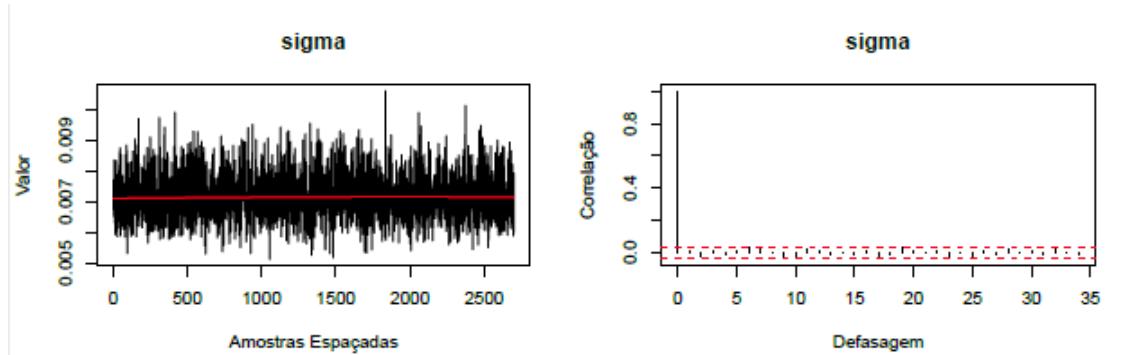


Figura 33 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para o parâmetro sigma

Modelo 4

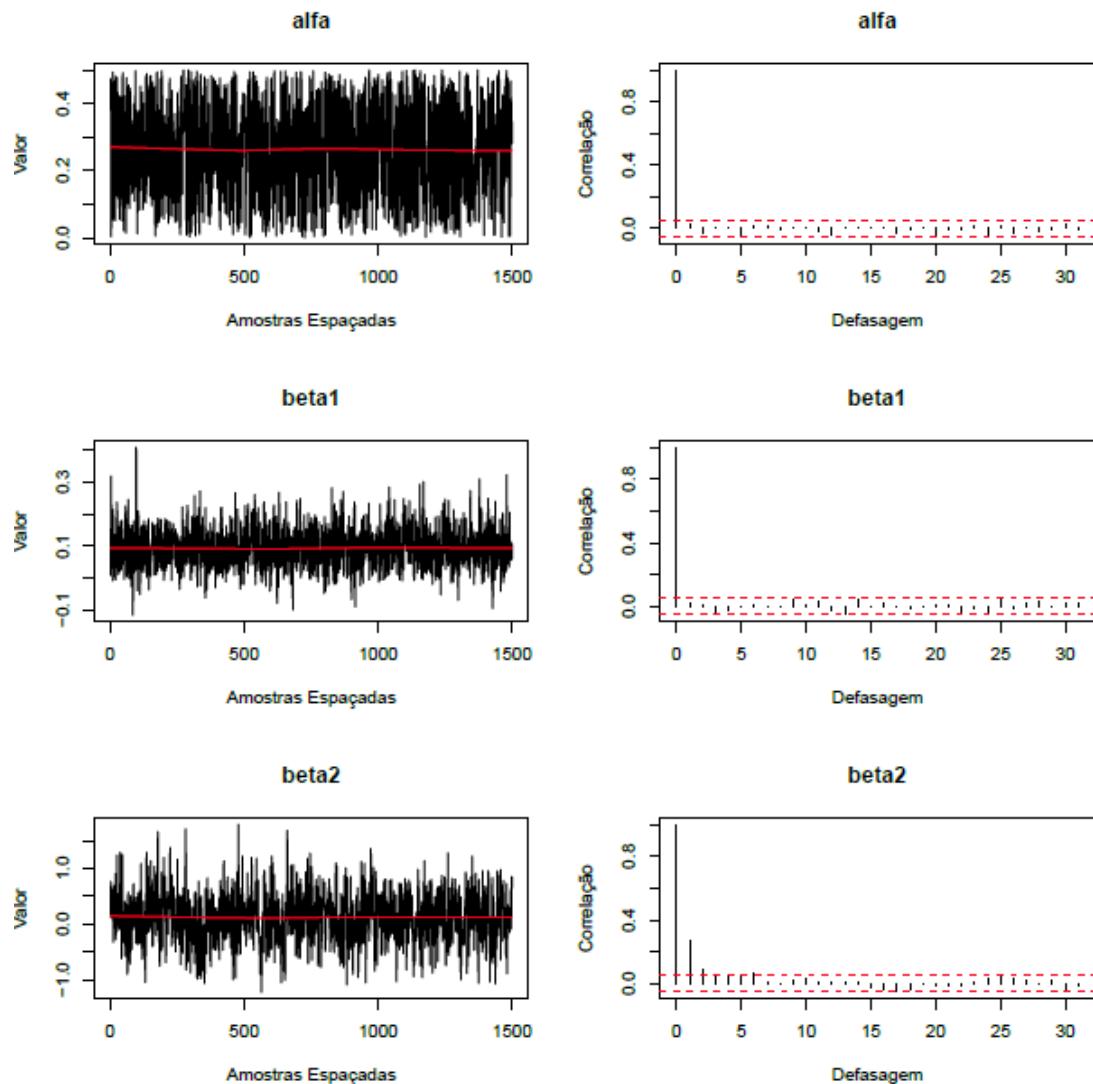


Figura 34 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros alfa, beta1 e beta2

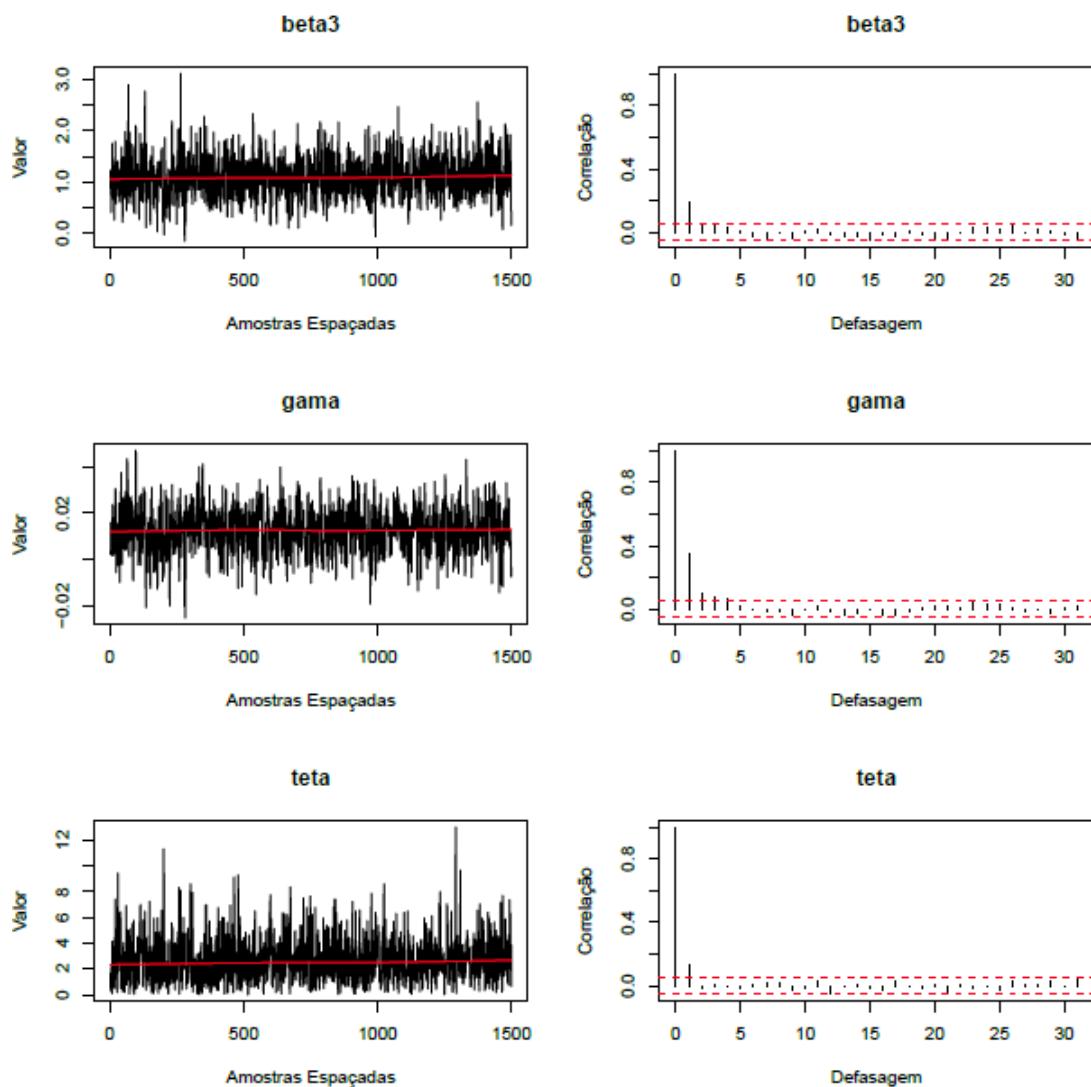


Figura 35 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros beta3, gama e teta

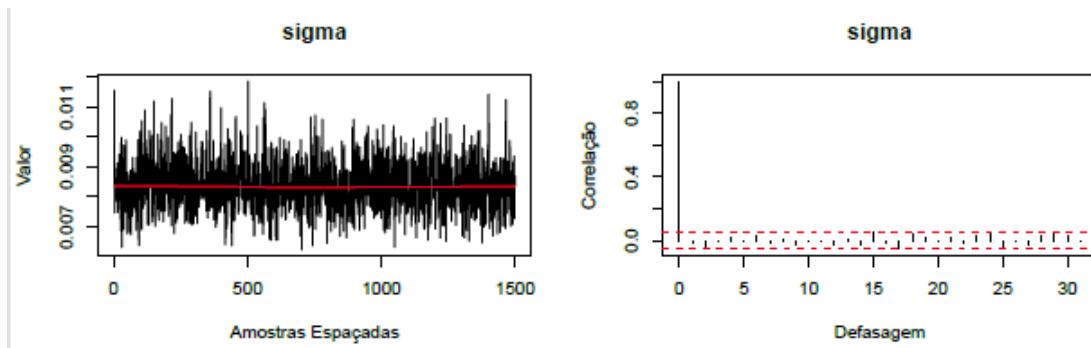


Figura 36 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para o parâmetro sigma

Modelo 5

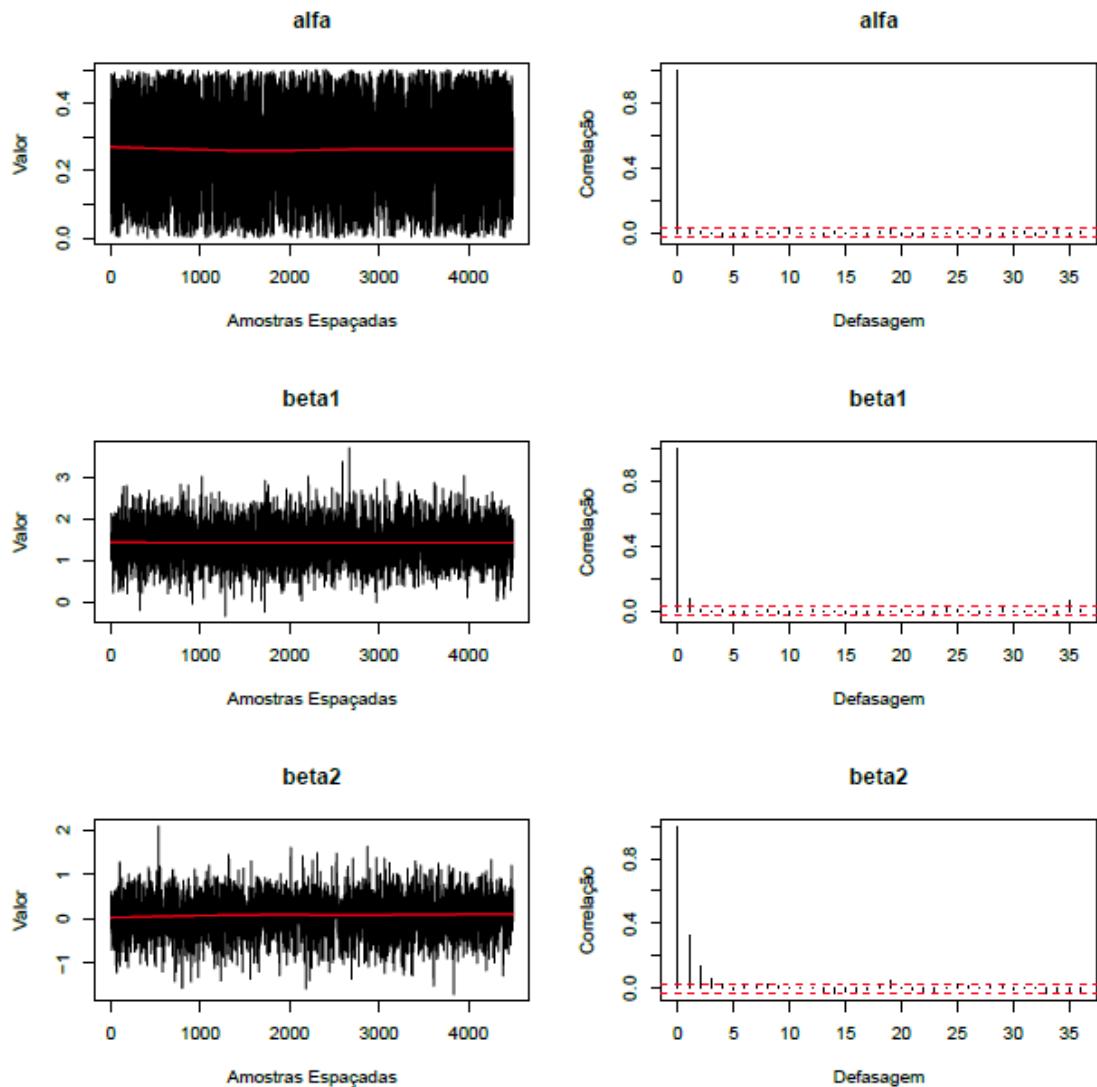


Figura 37 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros α , β_1 e β_2

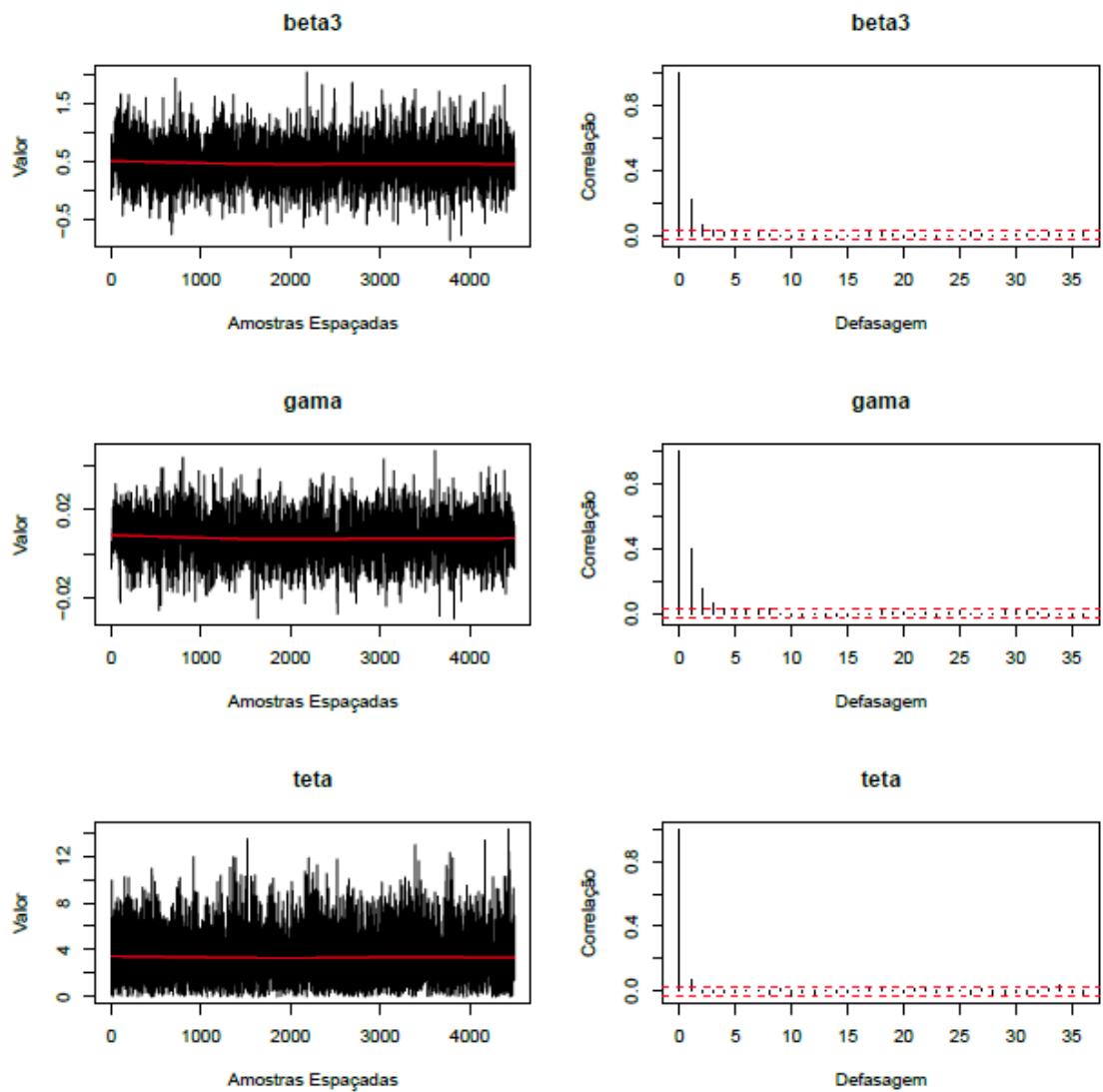


Figura 38 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros beta3, gama e teta

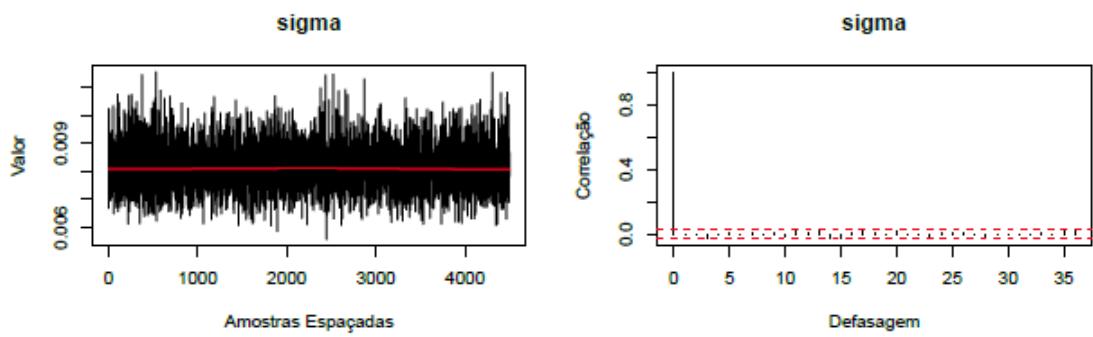


Figura 39 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para o parâmetro sigma

Modelo 6

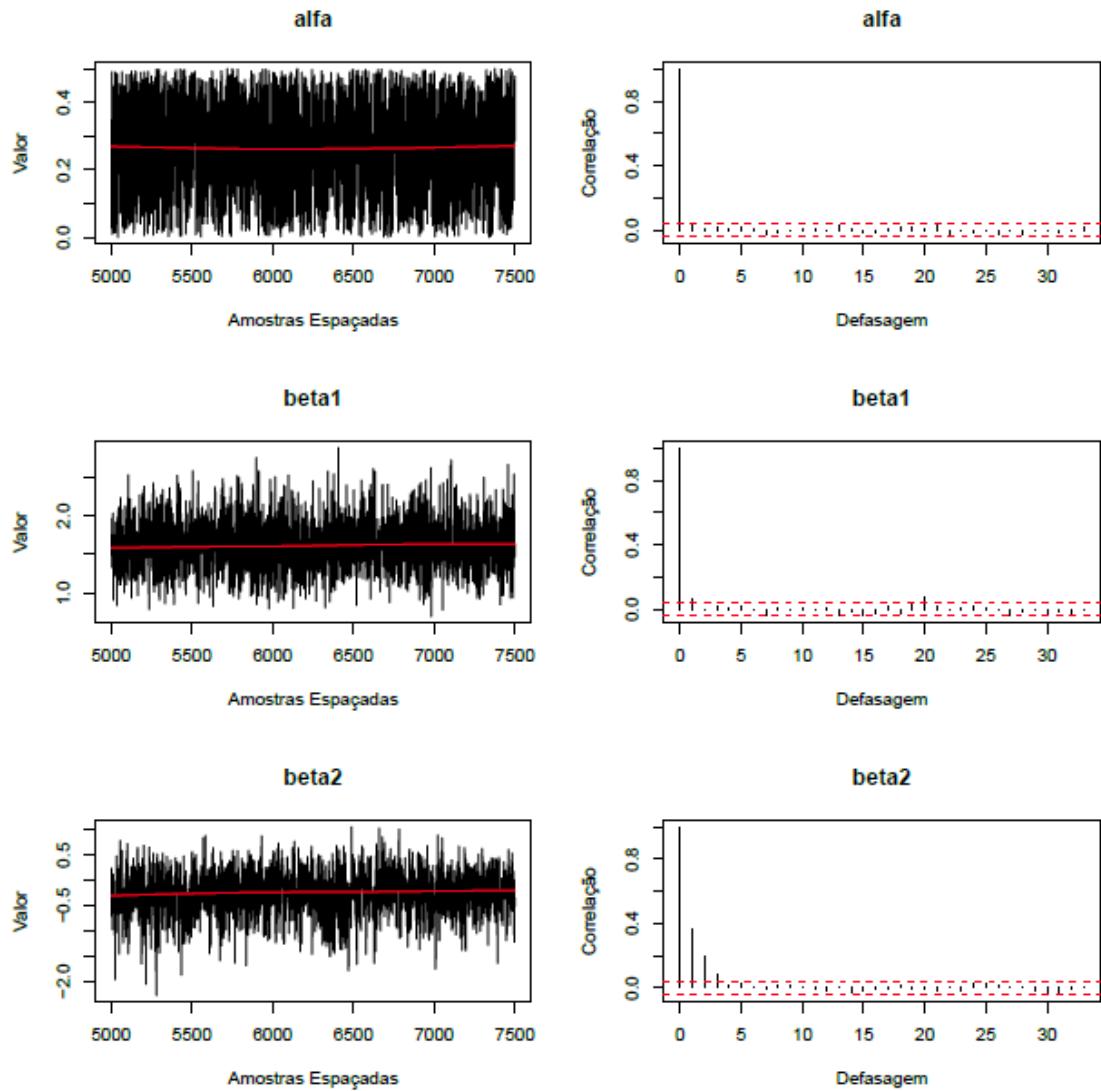


Figura 40 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros **alfa**, **beta1** e **beta2**

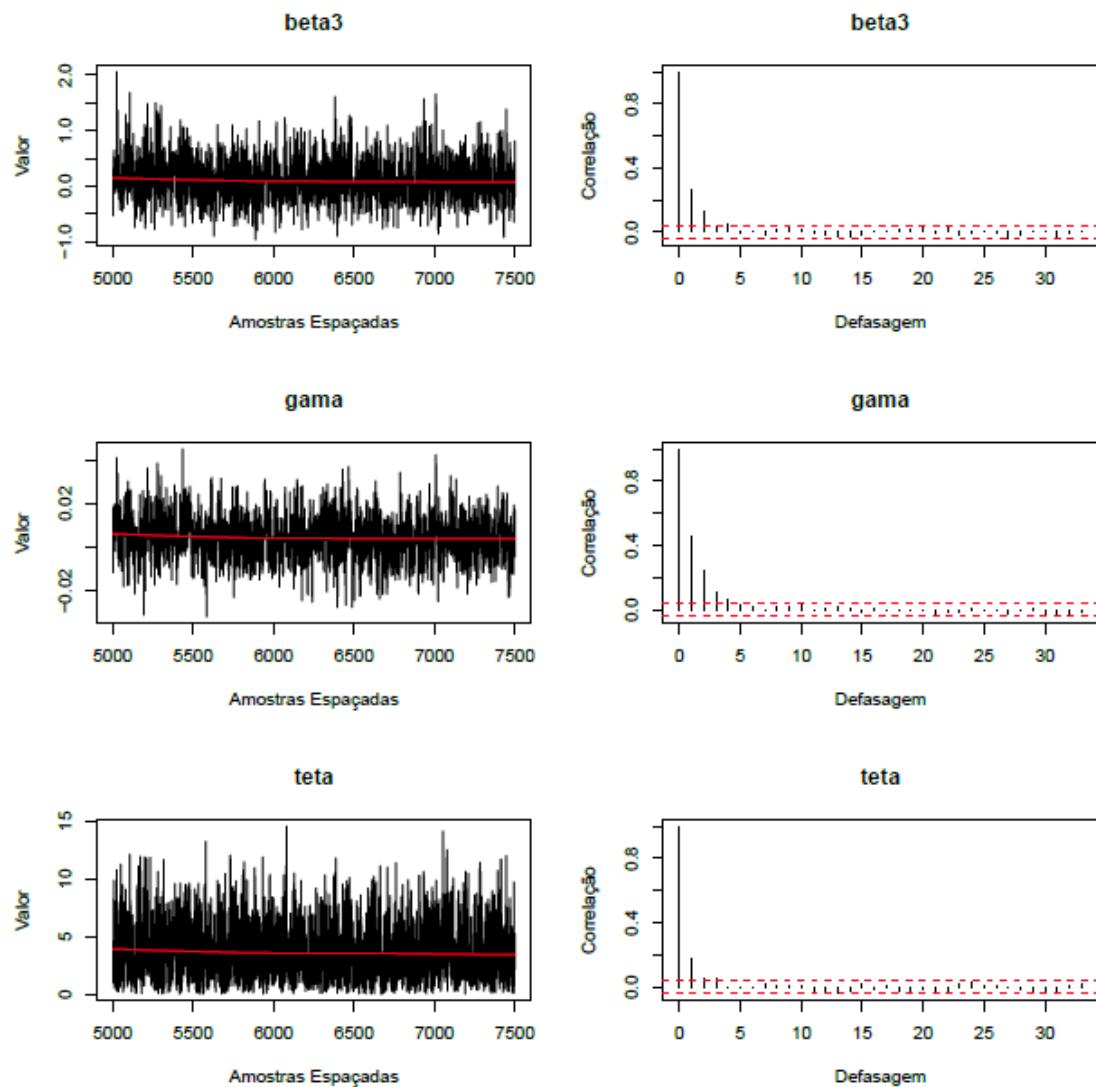


Figura 41 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para os parâmetros beta3, gama e teta

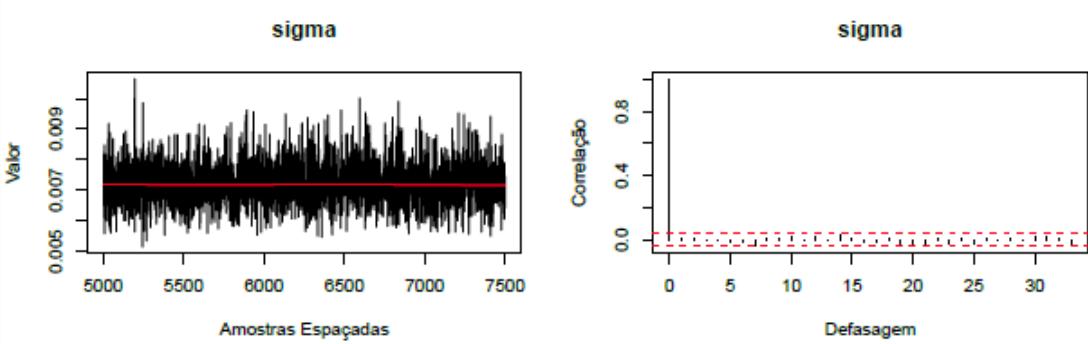


Figura 42 Gráficos Traço (esq.) e de Autocorrelação (dir.) para o parâmetro sigma