

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS VEÍCULOS FLEX-FUEL NO CONSUMO DE
COMBUSTÍVEIS NO BRASIL APLICANDO UMA METODOLOGIA CONJUNTA
DE COINTEGRAÇÃO E FILTRO DE KALMAN

José Manoel Antelo Gomez

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: Luiz Fernando Loureiro Legey

Rio de Janeiro

Abril de 2015

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS VEÍCULOS FLEX-FUEL NO CONSUMO DE
COMBUSTÍVEIS NO BRASIL APLICANDO UMA METODOLOGIA CONJUNTA
DE COINTEGRAÇÃO E FILTRO DE KALMAN

José Manoel Antelo Gomez

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. Luiz Fernando Loureiro Legey, Ph.D.

Prof. Lucio Guido Tapia Carpio, D.Sc.

Prof. André Frossard Pereira de Lucena, D.Sc.

Prof. Virgilio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Prof. Reinaldo Castro Souza, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2015

Gomez, José Manoel Antelo

Impacto dos Veículos Flex-Fuel no consumo de combustíveis no Brasil, aplicando uma metodologia conjunta de Cointegração e Filtro de Kalman/José Manoel Antelo Gomez. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XIII, 87 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luiz Fernando Loureiro Legey

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 79-84.

1. Vetor de Correção de Erros. 2. Filtro de Kalman. 3. Flex-Fuel. 4. Cointegração. 5. Relação Etanol Hidratado-Gasolina C. I. Legey, Luiz Fernando Loureiro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Dedicatória

Queria dedicar esta Tese à minha mãe, Sara, por ter sido uma mãe e um pai ao mesmo tempo, também ao meu pai que Deus o tenha e à minha esposa, Fernanda, que suportou as minhas ausências todos estes anos, não só no Doutorado, mas também no Mestrado.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Legey por todo o suporte e paciência ao longo destes 5 anos e por ter me tornado uma melhor pessoa e um melhor profissional com seus ensinamentos.

Ao professor Guido, pelo incentivo no desenvolvimento da tese e por todas as aulas de modelos que me inspiraram no tema do meu trabalho de Doutorado.

Aos professores André, Vírgilio e Reinaldo por aceitarem participar da banca de defesa desta tese e por permitirem que este trabalho possa avançar ainda mais.

A todos os professores do PPE que me ensinaram muito e me permitiram desenvolver os meus conhecimentos, possibilitando a conclusão desta tese.

Aos amigos da Secretaria, Sandra e Paulo, por toda a ajuda com a questão do desenvolvimento da tese, com a resolução de problemas da matrícula e tudo mais.

Um agradecimento especial aos grandes amigos Juarez e Paschoal, pelos exemplos pessoais e profissionais.

Aos colegas de PPE e Petrobras, Fábio, Marcelo, Renan, Gregório, Andreia, Gil e Monica, que me incentivaram e apoiaram no decorrer de todo o Doutorado.

A todos os meus gerentes na Petrobras, que me permitiram desenvolver da melhor forma possível o Doutorado, liberando para assistir as aulas e me incentivando a nunca desistir.

E a todos os amigos e familiares, muito obrigado por todo o auxílio!

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

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS VEÍCULOS FLEX-FUEL NO CONSUMO DE
COMBUSTÍVEIS NO BRASIL APLICANDO UMA METODOLOGIA CONJUNTA
DE COINTEGRAÇÃO E FILTRO DE KALMAN

José Manoel Antelo Gomez

Abril/2015

Orientador: Luiz Fernando Loureiro Legey

Programa: Planejamento Energético

O objetivo da presente tese é analisar o impacto da tecnologia Flex-Fuel no consumo de combustíveis no Brasil. Aplicando uma metodologia que combina um modelo vetorial de correção de erros (MVCE) com o Filtro de Kalman (FK), analisou-se a influência dos preços relativos de Etanol Hidratado e Gasolina C no consumo desses combustíveis. Foram analisadas possíveis quebras estruturais nas séries temporais, bem como, a evolução dos parâmetros ao longo do tempo. Observou-se que, a introdução da tecnologia Flex-Fuel na frota brasileira de veículos de passageiros e cargas leves, teve um impacto significativo sobre o padrão de demanda por combustíveis no país, em particular: (i) a existência de uma quebra estrutural, nas séries históricas da demanda por Etanol Hidratado e Gasolina C, bem como estimou-se o período de sua ocorrência; (ii) a crescente importância da variável preço relativo “Etanol Hidratado-Gasolina C” devido à evolução da participação da frota Flex-Fuel, mensurada na presente tese; (iii) o parâmetro de preços relativos é variável ao longo do tempo, de acordo com as relações de oferta e demanda entre os combustíveis substitutos, como demonstrado através do estudo da evolução e quantificação da razão dos preços destes combustíveis substitutos.

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

AN ANALYSIS OF THE IMPACT OF FLEX-FUEL VEHICLES ON FUEL
CONSUMPTION IN BRAZIL APPLYING A JOINT METHODOLOGY OF
COINTEGRATION AND THE KALMAN FILTER

José Manoel Antelo Gomez

April/2015

Advisor: Luiz Fernando Loureiro Legey

Department: Energy Planning

The objective of this thesis is to analyze the impact of Flex-Fuel technology on the consumption of fuels in Brazil. A methodology which combines an Error Correction Model (ECM) with the Kalman Filter (KF) was applied to study the influence of the relative prices of Hydrous Ethanol and Gasoline C on the consumption of these fuels. Structural breaks in the time series and the evolution of parameters over periods were analyzed. It was found that the introduction of Flex-Fuel technology into the Brazilian fleet of light passenger and cargo vehicles had a significant impact on the pattern of demand for fuel in the country, in particular: (i) the existence of a structural break in the time series of demand for Hydrous Ethanol and Gasoline C and the period that happened; (ii) the increasing importance of the ‘Ethanol-Gasoline C relative price’ variable, due to the evolution of the participation of Flex-Fuel Fleet, quantified with this thesis; (iii) this parameter varies through time, according to supply and demand relations between the substitute products, it will be presented with the study of the evolution and mensuration of fuels substitutes ratio.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
LISTA DE SIGLAS	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO MERCADO DE COMBUSTÍVEIS NO BRASIL E NO MUNDO	4
3. FATORES CRÍTICOS PARA O BRASIL EM UM CONTEXTO DE BIOCOMBUSTÍVEIS E FLEXIBILIDADE TECNOLÓGICA.....	25
3.1 BALANÇA COMERCIAL BRASILEIRA.....	25
3.2 CENÁRIO MUNDIAL DE BIOCOMBUSTÍVEIS.....	30
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE ESTUDOS EMPÍRICOS SOBRE O MERCADO DE COMBUSTÍVEIS	34
5. TECNOLOGIAS AUTOMOTIVAS	42
5.1 FLEX-FUEL.....	42
5.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS	45
5.2.1 HÍBRIDOS.....	45
5.2.2 BEV	49
5.3 HIDROGÊNIO	51
6. PROPOSTA METODOLÓGICA	53
7. RESULTADOS.....	653
7.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	63
7.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	72
8. CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS	79
ANEXO.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Participação dos Energéticos por Segmento, no Mundo (2012).....	5
Figura 2: Participação e Evolução dos Energéticos na Matriz Energética Mundial.....	6
Figura 3: Consumo Final por Fonte Energética – 2014. Ano-Base: 2013.....	8
Figura 4: Consumo Final por Fonte Energética no Setor de Transportes – 2014. Ano-Base: 2013.....	9
Figura 5: Participação por energético no setor de transportes rodoviários no Brasil (2013).....	9
Figura 6: Participação por energético no setor de transportes rodoviários – Ciclo Otto - no Brasil (2013).....	10
Figura 7: Participação dos Energéticos no Segmento de Transportes, no Mundo (2012).....	12
Figura 8: Participação dos Energéticos no Segmento de Transportes, no Mundo (2040)	12
Figura 9: Consumo de Gasolina C, Etanol Hidratado e Gás Natural Veicular (GNV) em Gasolina C equivalente e a Massa Salarial Real (convertido em US\$); dados extraídos da ANP e IBGE.....	19
Figura 10: Evolução da Produção Brasileira de Etanol Total (Anidro + Hidratado), MM m ³ e Produção Brasileira de Açúcar, MM Tons; dados extraídos do MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento).....	19
Figura 11: Comparação entre os preços reais da Gasolina C, Etanol Hidratado e GNV em R\$/km; dados da ANP.....	21
Figura 12: Evolução da Frota Brasileira de Veículos de Passageiros e Comerciais Leves, por tipo de Combustível (em milhares de veículos).....	23
Figura 13: Comparativo entre os preços reais (média Brasil) de Gasolina C e Etanol Hidratado.....	24
Figura 14: Exportação de Gasolina no período de janeiro de 2007 a dezembro de 2013.....	26
Figura 15: Importação de Gasolina no período de janeiro de 2007 a dezembro de 2013.....	27
Figura 16: Exportação de Etanol no período de janeiro de 2007 a dezembro de 2013.....	28

Figura 17: Importação de Etanol no período de janeiro de 2007 a dezembro de 2013.....	29
Figura 18: Comparativo entre Consumo de Gasolina C, Massa Salarial Real e Subst (razão entre os preços do Etanol Hidratado e Gasolina C) em número-índice – Julho de 2001=100.....	56
Figura 19: Resíduos das Variáveis do Modelo.....	67
Figura 20: Variação da variável Subst (sv1) no período de amostragem de Julho de 2001 a Junho de 2013 e o intervalo de dois erros quadrados médios (RMSE) do coeficiente (sv1).....	70
Figura 21: Projeções e Realizados – MAPE (de julho de 2013 a junho de 2014).....	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Participação dos Segmentos na Matriz Energética Brasileira e Fluxo Energético – 2014. Consumo e Oferta de Energia. Ano-Base: 2013.	7
Tabela 2: Evolução dos Combustíveis Renováveis, de acordo com o U.S. Energy Independence and Security Act.....	31
Tabela 3: Evolução dos Combustíveis Renováveis “Avançados”, de acordo com o U.S. Energy Independence and Security Act.....	31
Tabela 4: Volume Requerido de Combustíveis Renováveis nos EUA pelo programa original e ajustes anuais já realizados pela EPA. Em bilhões de galões de Etanol-equivalente, exceto o Diesel de biomassa.....	32
Tabela 5: Evolução dos Combustíveis Renováveis, de acordo com a European Environment Agency (EEA), por país da União Européia (UE).....	33
Tabela 6: Sumário das Elasticidades de Longo Prazo da Bibliografia.....	40
Tabela 7: Sumário das Elasticidades de Curto Prazo da Bibliografia.....	41
Tabela 8: Testes de raiz unitária nas variáveis (transformação logarítmica).....	64
Tabela 9: Resultados do teste de Cointegração de Johansen (equação 6).....	64
Tabela 10: Teste de Wald de Exclusão de Defasagens (variáveis em logaritmos).....	65
Tabela 11: Elasticidades de Longo Prazo (equação 6).....	65
Tabela 12: Elasticidades de Curto Prazo (equação 6).....	65
Tabela 13: Teste de White de Heteroscedasticidade.....	68
Tabela 14: Causalidade de Granger (equação 6).....	68
Tabela 15: Teste de Quebra Estrutural de Chow.....	69

LISTA DE SIGLAS

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ATR - Açúcar Total Recuperável

BACEN - Banco Central do Brasil

BEN – Balanço Energético Nacional

BEV – Battery Electric Vehicle

DNC - Departamento Nacional de Combustíveis

DOU - Diário Oficial da União

EEA – European Environment Agency

EIA – Agência de Informações de Energia dos Estados Unidos

EPA - Environmental Protection Agency

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EV – Electric Vehicle

GEE - Gases de efeito estufa

GNV – Gás Natural Veicular

IAGNV - Associação Internacional do GNV

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IEA – International Energy Agency

IPI – Imposto sobre Produtos Industrializados

IPVA – Imposto sobre Propriedade de Veículos Automotores

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MCI – Motor de Combustão Interna

MME – Ministério das Minas e Energia

Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A.

PHEV – Plug-In Hybrid Electric Vehicle

PLANGÁS - Plano Nacional de Gás Natural

PNAD - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios

ProÁlcool – Programa Nacional do Etanol/Álcool

TVP-MCE - Modelo de Correção de Erros com variação dos parâmetros ao longo do tempo

VAR – Vetor Auto Regressivo

VMCE – Vetor de Modelo de Correção de Erros

WEO – World Energy Outlook

1. INTRODUÇÃO

O mercado brasileiro de combustíveis para veículos automotivos passou por diversas transformações ao longo de toda a sua evolução, desde o início do século passado, sujeitando-se a diversos problemas de oferta de energéticos, mudanças de políticas energéticas e impactos externos.

Nos últimos anos, um segmento deste mercado vem passando por transformações mais sensíveis motivadas por uma inovação tecnológica. Os veículos de passageiros e comerciais leves com motores de ignição por centelha, chamados de veículos de Ciclo Otto, sofreram uma transformação relevante no Brasil.

Houve uma mudança permitiu a utilização de mais de um energético por esses veículos, de acordo com as relações de preços entre os combustíveis, graças ao surgimento da tecnologia Flex-Fuel, que será debatida mais à frente no capítulo de Tecnologias Automotivas.

A mudança de paradigma da definição do momento da utilização dos combustíveis do instante em que se adquire o veículo para aquele do abastecimento, trazida pelo motor Flex-Fuel, pode provocar fortes oscilações na demanda dos combustíveis.

Possíveis variações nas relações de preços entre os energéticos substitutos, sem uma razoável previsibilidade, podem impactar de maneira significativa as cadeias de suprimentos de energéticos.

Esta questão da redefinição da competitividade entre os combustíveis traz riscos ainda para a mobilidade dos passageiros no país e para a evolução da economia brasileira, como será discutido no Capítulo de Fatores Críticos para o Brasil em um Contexto de Biocombustíveis e Flexibilidade. Essa competitividade, no entanto, permite a escolha daquele combustível que tenha uma melhor relação custo-benefício, algo que há pouco mais de uma década não era possível, devido a restrições tecnológicas.

O objetivo deste estudo é testar os efeitos da tecnologia dos veículos Flex-Fuel sobre a competição entre os combustíveis no mercado brasileiro e seus efeitos sobre a

demanda destes energéticos. A utilização de uma metodologia econométrica híbrida nesta tese permite inovar a fronteira do conhecimento para avaliar os efeitos dessa tecnologia disruptiva sobre o mercado de energéticos automotivos brasileiros. Com a utilização de parâmetros variáveis, algo que não havia sido utilizado em nenhum outro estudo ao redor do mundo, permite-se observar a evolução a cada instante ao longo do período analisado da relação de preços entre Etanol Hidratado e Gasolina C.

A compreensão dos efeitos da evolução da participação dos veículos Flex-Fuel sobre o mercado brasileiro de combustíveis, nos últimos anos, permite identificar fatores que possam impactar o mercado de energéticos automotivos brasileiros e outros segmentos relacionados e desenvolver políticas de minimização destes impactos.

No decorrer do desenvolvimento deste estudo optou-se por uma análise do mercado mundial e nacional de combustíveis para compreender de forma relevante e robusta o comportamento do consumo destes energéticos de maneira mais abrangente possível. O WEO (2014) e o BEN (2014) foram os principais instrumentos para esta avaliação.

Assim foi realizada uma avaliação da literatura disponível, no país e no exterior, sobre este tema, que no geral é bem limitada, tantos em termos de mercados brasileiro e mundiais de energéticos, quanto em termos de modelagem econométricas modernas, para saber com o quê esta tese poderia contribuir em termos de novidades e avanços na fronteira do conhecimento.

A contribuição deste trabalho foi a mensuração do impacto da introdução da tecnologia veicular Flex-Fuel, que flexibiliza o consumo de combustíveis, podendo escolher entre Gasolina C e Etanol Hidratado, de forma quantitativa e qualitativa, analisando questões de disponibilidade de produto, problemas de financiamento, competitividade de preços, entre outras. Esta mensuração foi realizada através da utilização de uma técnica econométrica que permite avaliar se a elasticidade de preços relativos entre Etanol Hidratado e Gasolina C é fixa ou variável ao longo do tempo, de acordo com relações de oferta e demanda desses produtos substitutos.

Houve a utilização de uma modelagem composta entre a técnica de Cointegração, normalmente vista em vários estudos de demanda de combustíveis, com outra técnica de espaço de estado, com a utilização do algoritmo do Filtro de Kalman. Esta composição desenvolvendo uma técnica híbrida de análise econométrica permitiu que se quantificasse os efeitos que este novo tipo de equipamento veicular tornou possível ao mudar a hora da tomada de decisão do momento de compra do veículo para aquele de abastecimento do mesmo, aumentando a capacidade de reação do consumidor às diferenças de preços entre os energéticos disponíveis.

Por fim, a modelagem desenvolvida nesta tese permite a flexibilidade de se adequar a novas tecnologias veiculares que possibilitem outras composições de consumo de energéticos. Esta concepção híbrida de modelagem torna este trabalho uma novidade na análise da demanda de combustíveis veiculares no Brasil e no Mundo, podendo ser utilizada em qualquer outro país que apresente semelhanças atuais ou futuras com aquilo apresentado aqui nesta tese.

Esta tese está estruturada da seguinte forma: além da Introdução e da Conclusão, o capítulo 2 discorre sobre o cenário energético mundial e brasileiro comparando-os e apresentando as suas diferenças. Já o capítulo 3 trata de duas questões que são motivadoras para o desenvolvimento desta tese, a primeira versa sobre as conseqüências de problemas na oferta de etanol sobre a balança comercial brasileira e as perspectivas mundiais da evolução dos biocombustíveis. Para o quarto capítulo, há uma revisão da bibliografia dedicada ao tema do comportamento do consumo de combustíveis no Brasil e no Mundo. Em relação ao quinto capítulo, há uma discussão sobre as principais tecnologias existentes no mundo atualmente e aquelas que estão se desenvolvendo com o intuito de avaliar os impactos no mercado de combustíveis semelhantes aos observados com a introdução dos veículos Flex-Fuel e elétricos. No capítulo 6, desenvolveremos uma proposta metodológica que norteia todo o desenvolvimento econométrico da tese e fundamentou todas as análises subjacentes. E, no sétimo capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do modelo descrito no capítulo anterior.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO MERCADO DE COMBUSTÍVEIS NO BRASIL E NO MUNDO

O intuito deste capítulo foi uma revisão dos conhecimentos sobre os mercados brasileiros e mundiais de energéticos para a compreensão das diferentes características e semelhanças entre o Brasil, com seus energéticos disponíveis para o Ciclo Otto, frente ao restante do mundo e possibilitar uma análise profunda da evolução dos combustíveis para veículos de passageiros e comerciais leves e seus impactos no mercado brasileiro de combustíveis.

Há diversos outros relatórios internacionais que debatem a utilização dos diversos energéticos, em diferentes segmentos de consumo. Os principais estudos com relação à projeção de cenários energéticos são o World Energy Outlook (2014), o Annual Energy Outlook 2015 (EIA, 2015), elaborado pela EIA (Administração Americana de Informação de Energia) e o World Oil Outlook (OPEC, 2014), elaborado pela OPEC (Organização dos Países Exportadores de Petróleo).

Adicionalmente, outros estudos como aqueles feitos pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) – Relatório de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) - e o GEA (Global Energy Assessment) - capítulo 9 do relatório Global Energy Assessment – Toward a Sustainable Future (GEA, 2012) - elaboram análises sobre os cenários desenvolvidos pela IEA (Agência Internacional de Energia) e discutem a evolução da matriz energética mundial e seus impactos sobre o meio-ambiente.

O World Energy Outlook (2014) que nos apresenta a utilização dos energéticos na matriz energética mundial e o comparamos com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2014), mostrando a matriz energética do Brasil. Neste relatório observamos que a Matriz Energética Mundial apresenta uma forte participação de combustíveis fósseis destinados a três grandes segmentos (Industrial, Transporte e Residencial/Comercial), conforme depreendemos da Figura 1.

O segmento de transportes representa o terceiro maior consumo energético mundial, atrás dos segmentos residencial/comercial e industrial, com 28,0%, conforme o Figura 1, a seguir.

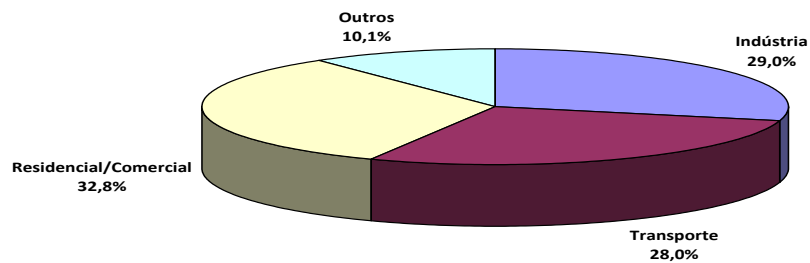


Figura 1: Participação dos Energéticos por Segmento, no Mundo (2012).

Fonte: WEO (2014).

Em relação à matriz energética final mundial, esta é constituída basicamente por derivados de petróleo, gás natural e carvão, como pode ser visto na Figura 2, abaixo. Estes combustíveis fósseis detêm uma participação de 80%, em 2012 (WEO, 2014).

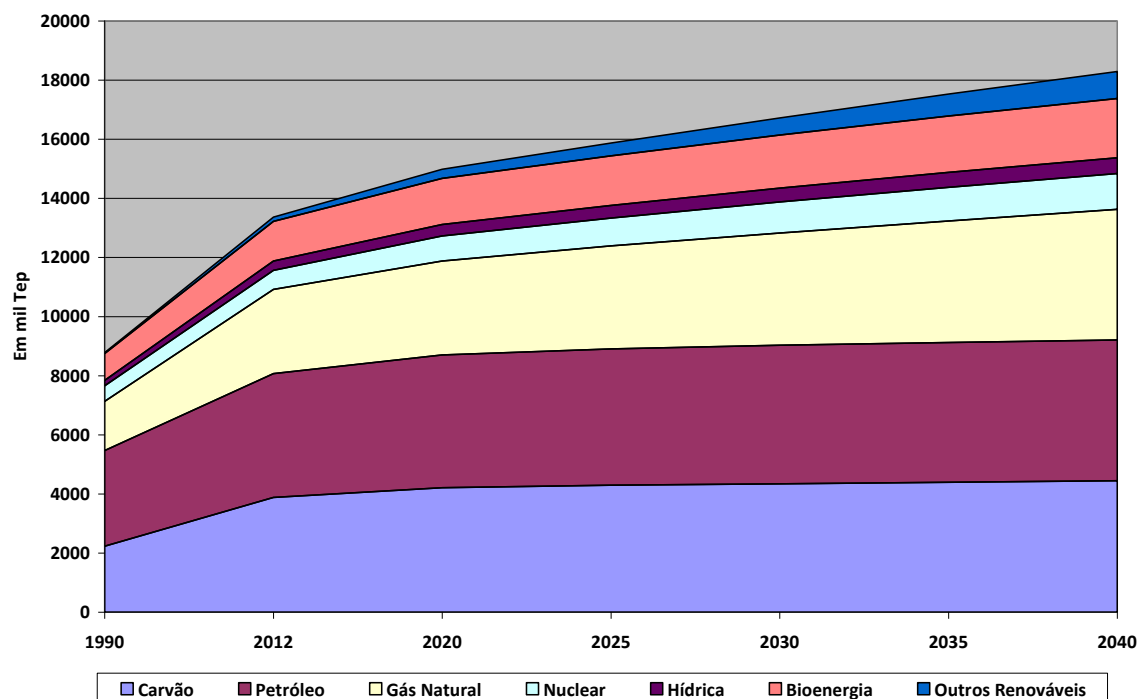


Figura 2: Participação e Evolução dos Energéticos na Matriz Energética Mundial.

Fonte: WEO (2014)

Em virtude da elevada presença de combustíveis de origem fóssil na matriz energética mundial e da crescente preocupação da sociedade com o meio-ambiente, estes combustíveis se constituem em um problema, por serem extremamente poluentes e responsáveis por emissões de gases causadores do efeito estufa (WEO, 2014). Dessa forma, influenciam negativamente a qualidade de vida da população, o que poderá impactar os custos de saúde dos orçamentos governamentais e empresariais, entre outras implicações.

No Brasil, o segmento de transportes é o segundo maior consumidor de energia, com 28,1% do total (BEN, 2014), ou seja, possui uma relevância expressiva no consumo da matriz energética brasileira, como podemos observar na tabela 1. Ao contrário da matriz de energéticos no mundo, o principal segmento consumidor no Brasil é o industrial. Enquanto isso, o segmento residencial/comercial no nosso país representa apenas 10,7% do consumo total, enquanto na matriz energética mundial representa 32,8%.

Tabela 1 – Participação dos Segmentos na Matriz Energética Brasileira e Fluxo Energético – 2014 – Consumo de Energia e Oferta de Energia. Ano-Base: 2013.

Segmento	Consumo Final (em 10 ⁶ tep)	%
Industrial	88,3	29,8
Transportes	83,1	28,1
Perdas na Transformação	27,3	9,2
Setor Energético	26,1	8,8
Residencial	23,7	8,0
Usos Não-Energéticos	16,3	5,5
Agropecuário	10,7	3,6
Outras Perdas	8,7	2,9
Comercial	8,1	2,7
Público	3,9	1,3
Total	296,2	

Segmento	Oferta Final (em 10 ⁶ tep)	%
Petróleo e Derivados	116,5	39,3
Produtos da Cana	47,6	16,1
Gás Natural	37,8	12,8
Geração Hidrelétrica	37,1	12,5
Lenha e Carvão Vegetal	24,6	8,3
Carvão Mineral e Derivados	16,5	5,6
Outros	12,3	4,2
Urânio e Derivados	3,9	1,3
Total	296,2	

Fonte: BEN (2014)

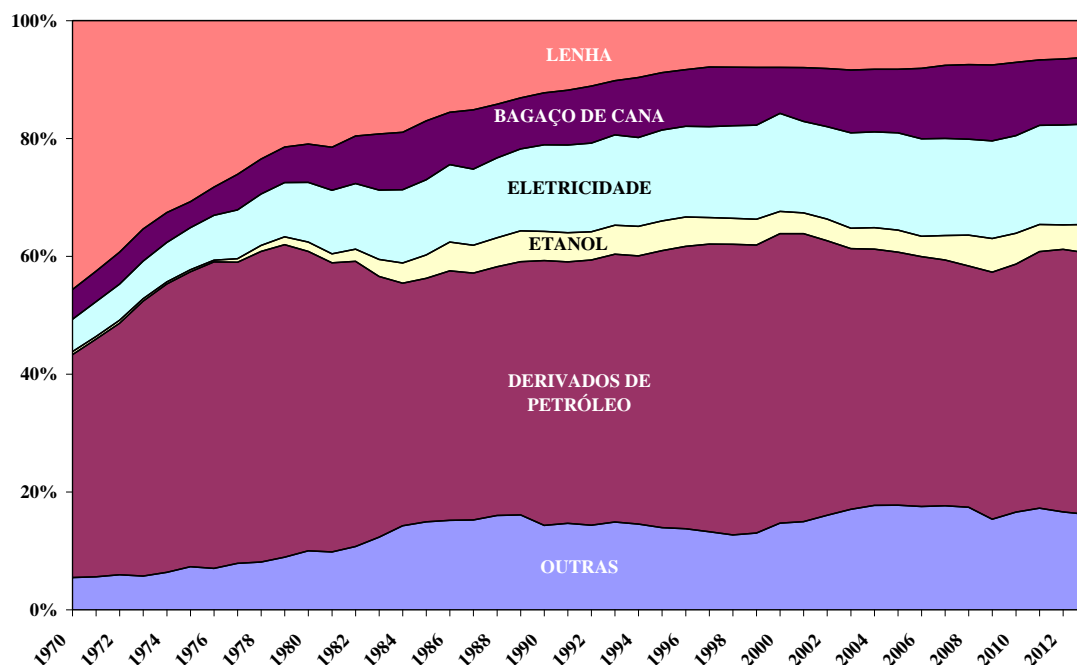


Figura 3 – Consumo Final por Fonte Energética – 2014. Ano-Base: 2013.

Fonte: BEN (2014)

Assim, como no restante do mundo, os principais energéticos no Brasil são os combustíveis fósseis, com cerca de 60% do total consumido no país (WEO, 2014 e BEN, 2014). Mas, as fontes renováveis possuem uma participação bem elevada, acima de 40%, como pode ser observado na Figura 3.

Em relação ao mercado brasileiro de transportes rodoviários, há dois tipos de motorização: o Ciclo Otto e o Ciclo Diesel, que possuem diferentes finalidades de uso. O primeiro voltado principalmente para o transporte particular de passageiros e cargas leves que nos apresenta o segmento que trabalharemos de forma relevante nesta tese e o segundo para o transporte público de passageiros e de cargas pesadas, que possui uma relevância expressiva no consumo de combustíveis no Brasil. Abaixo, as Figuras 4 e 5 nos mostram como se dá o consumo no setor de transportes rodoviários mostrando que a presença da Gasolina ao longo dos últimos quarenta anos já foi superior, mas vem ganhando espaço nos últimos anos e, em seguida, na Figura 6 analisaremos a situação atual do primeiro segmento, que é o objetivo primordial do nosso estudo.

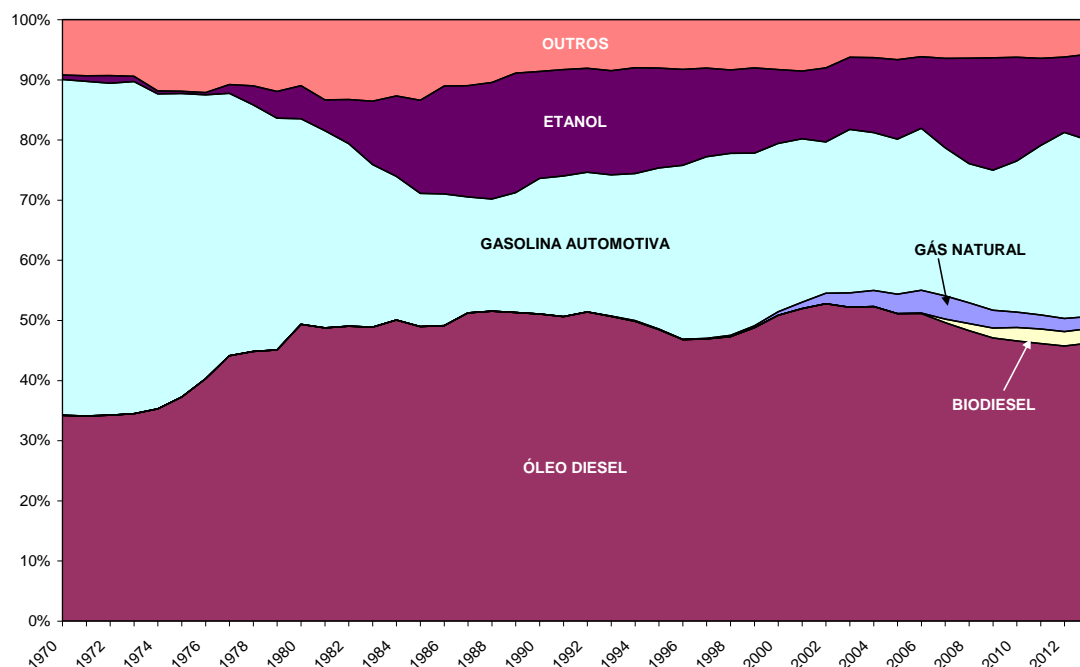


Figura 4 – Consumo Final por Fonte Energética no Setor de Transportes – 2014. Ano-Base: 2013.

Fonte: BEN (2014).

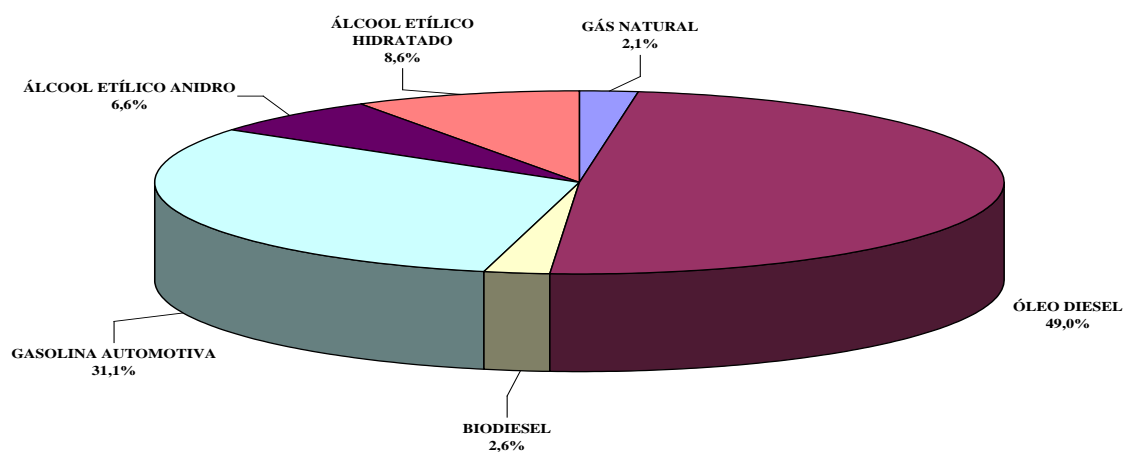


Figura 5: Participação por energético no setor de transportes rodoviários no Brasil (2013).

Fonte: BEN (2014).

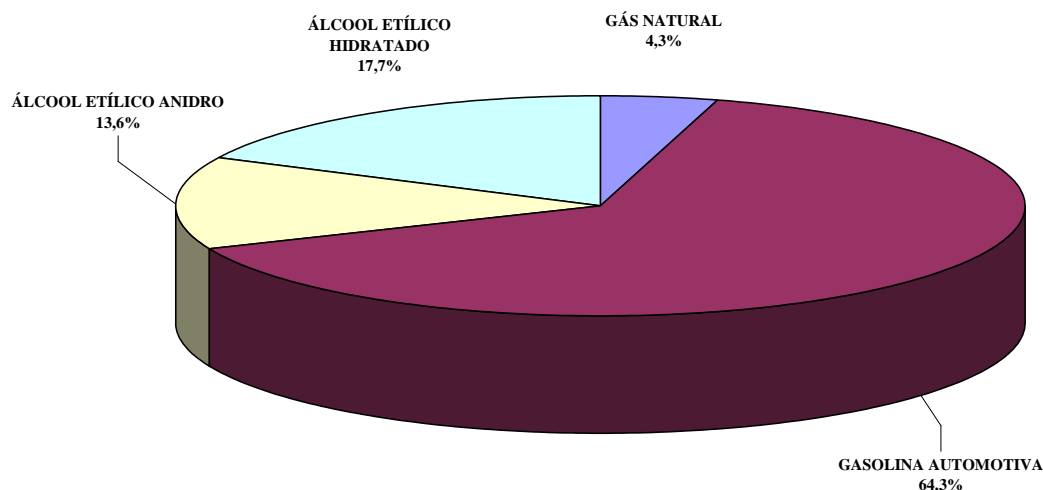


Figura 6: Participação por energético no setor de transportes rodoviários – Ciclo Otto - no Brasil (2013).

Fonte: BEN 2014

Como pode ser observado na Figura anterior – Figura 6 -, o consumo de energéticos renováveis no Ciclo Otto é expressivo, representando 31,3% do total.

O mercado de combustíveis brasileiro para automóveis de passageiros, comerciais leves e motocicletas, que utilizam motores do tipo Ciclo Otto (Gasolina C – uma composição de Gasolina Pura com Etanol Anidro-, Etanol Hidratado e GNV – Gás Natural Veicular), está passando por uma grande transformação tecnológica com o advento dos veículos Flex-Fuel. A decisão sobre o combustível que movimentará o veículo não é definida à época da fabricação, mas sim no momento em que o usuário o abastece, considerando, sobretudo, as relações de eficiência e preços entre as alternativas de Etanol Hidratado e Gasolina C. Mais à frente, serão detalhadas as características de cada um destes produtos.

A tecnologia “Flex-Fuel”, que teve início em março de 2003 com o lançamento do VW Gol 1.6 Total Flex, permite que através de um sensor eletrônico seja possível informar à unidade de comando do sistema de injeção eletrônica qual a composição de energéticos

presentes no tanque de combustível e otimizar a combustão, o que torna possível a utilização de Gasolina C ou Etanol Hidratado, em qualquer proporção, de acordo com o desejo do consumidor. Além disso, com uma adaptação no sistema de motorização e o acréscimo de um tanque de armazenamento pode-se ainda utilizar o GNV – gás natural veicular. O surgimento dos motores Flex-Fuel tem implicações que são capazes de alterar a dinâmica de competitividade entre os energéticos, principalmente do ponto de vista microeconômico, pois tornaram os produtos substitutos quase perfeitos, o que anteriormente não acontecia, já que havia a necessidade de adaptações para a utilização de um ou outro produto nos motores.

A questão da substitutabilidade Etanol Hidratado/Gasolina C pode ser impactada por alguns aspectos como a questão de que o consumidor necessita dirigir-se mais vezes ao posto para o abastecimento, assim perdendo tempo de trabalho ou lazer, por hábito ou desconfiança não abasteça com um ou outro produto e, por fim, por questões ambientais prefira o etanol.

Com o intuito de compreender os papéis desempenhados pelos programas de desenvolvimento dos mercados de Etanol e GNV - gás natural veicular- ao longo dos anos, discorre-se nos próximos parágrafos sobre a evolução da participação destes combustíveis no mercado brasileiro de energéticos e seus impactos sobre a matriz energética do Brasil.

A matriz energética para veículos leves de passeio e carga, que se congrega no Ciclo Otto, possuiu em 2013 elevada participação de um combustível renovável – Etanol (31,3%), como pode ser visto na Figura 6, bem superior à participação comparada de combustíveis renováveis na matriz energética mundial de transportes atual (2,4%), como visto na Figura 7.

Em contraponto à situação atual, o World Economic Outlook (2014) traz a perspectiva de que haja um aumento na participação dos biocombustíveis na matriz energética de transporte mundial até 2040 para cerca de 6%, conforme Figura 8 (WEO, 2014).

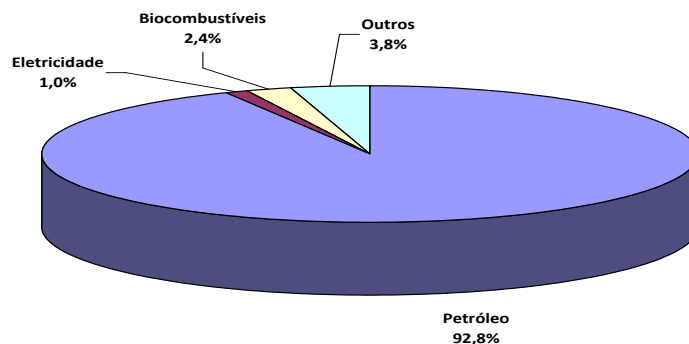


Figura 7: Participação dos Energéticos no Segmento de Transportes, no Mundo (2012).

Fonte: WEO (2014).

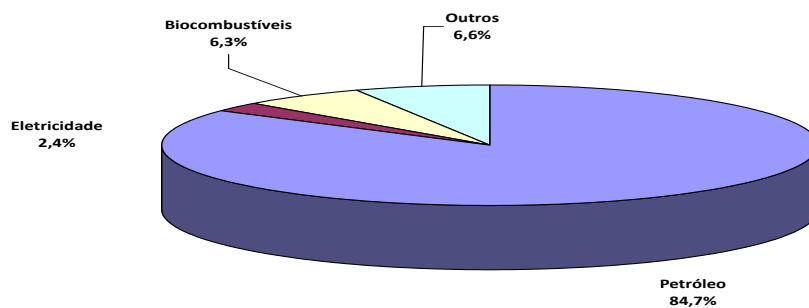


Figura 8: Previsão da participação dos Energéticos no Segmento de Transportes, no Mundo (2040).

Fonte: WEO (2014).

Discutiremos primeiramente os fatores relevantes para a criação e o desenvolvimento do mercado de GNV como um substituto da Gasolina C, suas vantagens e desvantagens, além das estratégias governamentais em favor do consumo deste energético no segmento de transporte rodoviário. Hoje a sua representatividade é pequena, mas em função de alguma política governamental ou expansão da substitutabilidade dos motores Flex-Fuel pode vir a se tornar relevante. Em seguida, comentaremos o surgimento do

Etanol como um combustível concorrente da Gasolina C no Brasil, a sua inserção no mercado brasileiro de combustíveis e o papel governamental como agente indutor desta mudança na matriz energética de transportes de automóveis de passageiros e veículos leves. Por fim, discorreremos sobre a evolução do consumo da Gasolina nos últimos quarenta anos, suas inflexões e as incertezas para os próximos anos.

A busca pelo gás natural no mundo, sobretudo na Europa, foi devido à elevação dos preços dos combustíveis líquidos em decorrência dos choques do petróleo, obrigando governos, sociedade e fabricantes de motores e veículos, a acelerar a busca de alternativas energéticas técnico-econômicas viáveis. O GNV foi a opção que obteve os melhores resultados operacionais e econômicos ao redor do mundo (Irã, Paquistão, Argentina, Itália, entre outros), de acordo com a IANGV (2014). No Brasil, em particular, a fim de reduzir a dependência e o impacto do aumento dos preços do petróleo no mercado internacional sobre a economia brasileira, o governo através da Comissão Nacional de Energia lançou o Plano Nacional de Gás Natural – PLANGÁS (2007). Este teve início em 1987 com o objetivo de substituir ou deslocar o consumo de Diesel (utilizado no transporte rodoviário de cargas e passageiros, principalmente nos grandes centros urbanos, onde começavam a se tornar relevantes os problemas ambientais decorrentes da poluição por este combustível). Mas dito objetivo não teve sucesso devido a alguns motivos: i) Escassez de postos de abastecimento; ii) Baixa autonomia e elevado tempo para reabastecimento do gás; iii) Diferença entre custo dos combustíveis não ser significativa; iv) Baixo valor de revenda do caminhão; e v) O motor a gás natural é mais caro que o motor a Diesel, elevando o preço final do veículo, o que no caso dos ônibus provavelmente elevaria a tarifa de transporte, impactando negativamente a popularidade do governante (IANGV, 2014).

Em relação ao Etanol, no Brasil existem dois tipos de alcoóis combustíveis: Etanol Anidro (com até 0,5% de água que é adicionado à Gasolina por obrigação de lei e tem como ponto positivo o aumento de octanagem, atuando como antidetonante, para que a Gasolina possa ser comprimida no pistão do motor ao máximo e não entre em combustão antes de acionada a vela do motor) e Etanol Hidratado (com até 5,5% de água – que é vendido separadamente nos postos de abastecimento).

No início dos anos 70, o país passava por um extraordinário crescimento econômico. O Brasil vivia o chamado “milagre econômico”. A demanda por energéticos no país estava em acelerada elevação. O petróleo já representava aproximadamente 46% da oferta interna de energia, segundo o Balanço Energético Nacional do Ministério das Minas e Energia (BEN 2014), num processo de substituição do carvão vegetal e da lenha. Neste período, o Brasil importava cerca de 80% da sua demanda de petróleo e derivados.

No ano de 1973, a eclosão da 4ª Guerra árabe-israelense (Guerra do Yom Kippur) e a derrota dos países árabes provocou uma retaliação por parte dos mesmos contra o Ocidente (em especial Estados Unidos e Europa, acusados de auxiliar militar e economicamente os israelenses na guerra), com uma expressiva elevação dos preços do barril de petróleo de cerca de US\$ 2 para quase US\$ 11 no período de um ano (uma elevação de aproximadamente 450%), no que foi chamado de o 1º Choque do Petróleo, que acarretou uma mudança da estrutura de custos de toda a economia mundial. Esse acontecimento motivou uma alteração no comportamento de todos os países no sentido de procurar uma maior eficiência na utilização dos produtos derivados de petróleo e também o desenvolvimento de energéticos alternativos (Alves, 2003).

No caso do Brasil houve a implementação no governo Geisel do ProÁlcool, em 1975 (Alves, 2003). O objetivo deste programa governamental era obter economia de divisas pela menor importação de petróleo e a conseqüente redução da dependência de fontes de energia em relação a outros países. No entanto, também havia outra função para os incentivos dados por este programa, que seria incrementar uma forma alternativa de utilização da Cana-de-Açúcar, visto que os preços internacionais do Açúcar estavam em baixa nesta mesma época. No primeiro período, que se estende até 1979, houve um aumento gradual da mistura de Etanol Anidro na Gasolina (cabe ressaltar que havia variações significativas deste percentual, dada a disponibilidade de Etanol em cada um dos estados brasileiros). Além disso, o governo brasileiro atuou como incentivador através de algumas medidas: i) preços atrativos; ii) garantia de compra do combustível pela Petrobras; e iii) amplo financiamento público para a construção de usinas. Isso fez com que a produção de Etanol Anidro crescesse cerca de 50% a.a. entre 1975 e 1979 (Schünemann, 2007).

Em 1979, com a eclosão da Revolução Iraniana e o início da Guerra Irã-Iraque ocorreu o 2º Choque do Petróleo com a duplicação dos preços do petróleo de um patamar de US\$ 15 para US\$ 30/barril. A estratégia tomada pelo governo militar da época foi acelerar o ProÁlcool, vista a intensificação dos riscos corridos pela economia brasileira, em termos de balança de pagamentos (no ano de 1979 o país apresentou um déficit em transações correntes da ordem de US\$ 10,8 bilhões) e também a oportunidade de desenvolvimento econômico de certos setores da agroindústria nacional (Alves, 2003).

A partir do final da década de 70 e início da década de 80, a proposta para combater essa elevação dos preços internacionais do hidrocarboneto consistia em propor a substituição de veículos movidos à Gasolina por outros movidos a Etanol Hidratado (basicamente, da forma como ele é extraído no processo produtivo de uma usina/destilaria de Cana-de-Açúcar, já que o Etanol Anidro utilizado na composição com a Gasolina, formando a Gasolina C passa por um processo de desidratação, onde se retira a água do Etanol Hidratado produzido). As vantagens oferecidas para essa troca de motorização da frota brasileira se deram através de benefícios fiscais (reduções de alíquotas de IPI, ICMS e IPVA) e garantia da manutenção de preços ao consumidor atrativos para os motores de Ciclo Otto movido a Etanol (este produto possui um rendimento inferior ao da Gasolina C). O primeiro veículo a Etanol lançado foi o Fiat 147, em 1978. A frota estimada de veículos a Etanol Hidratado cresceu aproximadamente 129% a.a. entre 1979 e 1985 (Schünemann, 2007).

Em 1985, com a diminuição dos preços do petróleo, chamado de contra-choque do petróleo, fruto de uma redução da atividade econômica mundial, observamos uma menor dependência externa do petróleo. Além disso, com o sucesso na exploração de petróleo por parte da Petrobras, somados ao advento das moratórias dos países emergentes e a redução dos recursos governamentais disponíveis para alocação no estímulo ao desenvolvimento do mercado de Etanol, a premência da manutenção de fortes subsídios para o ProÁlcool se mostrou desnecessária.

Para o consumidor ainda se manteve a política de veículos subsidiados, além do preço mais vantajoso deste produto sobre o da Gasolina C. Com isso, houve uma continuidade na evolução da demanda pelo energético, descasada da oferta do mesmo que ficou

estagnada. Some-se a isso, a forte evolução dos preços do Açúcar fazendo com que as usinas destinassem uma parcela maior da sua produção para este produto em detrimento do Etanol. A diminuição da produção do energético implica, em 1989, numa crise de desabastecimento e, mesmo quando havia a disponibilidade do produto, seu preço atingia valores superiores aos economicamente viáveis para competir com a Gasolina C (Schünemann, 2007).

A perda de credibilidade no suprimento levou a uma drástica redução do número de veículos vendidos, assim como no consumo do combustível. Acrescentando mais um ingrediente complicador para a situação do Etanol como um substituto para a Gasolina, observamos a redemocratização e a abertura da economia, a partir dos anos 90, com uma conseqüente redução da intervenção do estado, em função das seguintes medidas: i) abandono da política de subsídio a substituição de importações; ii) a remoção, gradual, das proteções aos produtos brasileiros; e iii) a privatização e liberalização dos mercados, graças à pressão de organismos financeiros multilaterais (Alves, 2003).

A partir desse momento, observamos um retorno ao consumo de Gasolina C, fruto dos problemas de suprimento de Etanol e da diminuição dos preços internacionais do hidrocarboneto. O processo de conversão de veículos a Etanol para Gasolina C, apesar de este ser um procedimento de elevado custo era a alternativa menos desfavorável economicamente para o proprietário do veículo, pois, praticamente, não se dispunha de Etanol Hidratado no mercado. Na década de 90 com a estabilização econômica e o aprofundamento da abertura de mercado, o número de carros a Gasolina cresceu de maneira relevante em detrimento do mercado de veículos a Etanol. Somente a partir de 2003, com o advento dos carros Flex-Fuel e a elevação dos preços do hidrocarboneto, o Etanol se tornou um substituto viável para a Gasolina, com um crescimento de 277% (entre dezembro de 2003 e dezembro de 2009), sendo que a partir de 2010, com problemas de produção de Etanol (problemas climáticos) e/ou econômicos das companhias de Açúcar e Etanol, houve uma redução significativa da disponibilidade, com uma conseqüente elevação de preços, e das vendas do energético, de aproximadamente 45% entre dezembro de 2009 e dezembro de 2013.

O último combustível do Ciclo Otto é a Gasolina C, que é uma mistura de Gasolina A (pura) e Etanol Anidro. Além dos hidrocarbonetos e dos oxigenados, a Gasolina contém compostos de enxofre, compostos de nitrogênio e compostos metálicos, todos estes em baixas concentrações. A Gasolina no Brasil, até os anos 70, era o combustível dominante para o transporte rodoviário, no âmbito de veículos de passageiros e de carga leve. Mas com a ocorrência dos choques de petróleo já mencionados anteriormente, que provocaram desequilíbrios na balança comercial e a conseqüente necessidade de alternativas à gasolina. Assim, no segmento de transporte público de passageiros e de cargas pesadas, a gasolina perde espaço para o Diesel e, no segmento de veículos leves, para o Etanol e, posteriormente, para o GNV.

A partir da crise de desabastecimento de Etanol no final dos anos 80, houve um retorno ao consumo de Gasolina durante os anos 90, mas no final desta década começou um novo declínio. Isto é fruto de uma nova elevação dos preços do combustível, da presença de novos players no mercado, que de forma irregular adicionavam maiores teores de Etanol Anidro na Gasolina C ou acrescentavam solventes na mistura¹. E, por fim, a entrada em cena do GNV como um substituto de grande atratividade. Mas, nos últimos anos (2010 a 2013), a Gasolina C vem crescendo, principalmente, em função dos fatos ocorridos com o Etanol (problemas de safra e/ou econômicos) que o tornaram menos competitivo, como demonstra o aumento de vendas de 45% para a Gasolina, entre dezembro de 2009 e dezembro de 2013 (Anfavea, 2014).

De 2002 a 2013, o consumo agregado de todos os combustíveis do Ciclo Otto aumentou a uma taxa de 6,1% aa, enquanto a massa salarial real (calculada em moeda brasileira) aumentou a uma taxa de 4,0% a.a. O fato de que o consumo de combustível evoluiu a uma taxa maior do que os salários reais (quando calculado em moeda local) foi devido à redução das taxas de juros pelo governo brasileiro durante este período, com o objetivo de estimular a atividade econômica, aliada à introdução de políticas fiscais e de crédito que favoreceram a compra de veículos (Fonte: IBGE e ANP).

¹ Os solventes são hidrocarbonetos que estão na mesma faixa de corte do petróleo que a Gasolina, ou seja, possuem as mesmas características. Entretanto, têm um preço final ao consumidor menor, por serem considerados itens de uso não supérfluo, pagando assim menos impostos, ao contrário da Gasolina, que é tratada como um bem supérfluo.

Em relação ao Etanol Hidratado, pode ser visto que, após uma rápida expansão do seu consumo (Figura 9) e na produção de Etanol – Anidro + Hidratado - (Figura 10) entre 2002 e 2009, não emerge nenhum padrão claro. A falta desse padrão é particularmente marcada após 2010. Possíveis explicações para esse fato incluem: (1) os impactos da crise financeira de 2008, o que levou a uma redução do capital disponível para investimento e financiamento das atividades sucroalcooleiras, com o fechamento de várias usinas produtoras de Etanol e Açúcar (Conab, 2010); (2) o aumento do preço do Açúcar no mercado internacional, o que levou a torná-lo mais atraente financeiramente do que o Etanol (Conab, 2010); e (3) os problemas climáticos que afetaram a produção da principal matéria-prima para o Etanol (Cana-de-Açúcar) (Conab, 2010). Estes fatores, em conjunto, levaram a uma redução da disponibilidade de Etanol Hidratado, dado que o Etanol Anidro era obrigatoriamente adicionado à Gasolina e possuía preços atrativos.

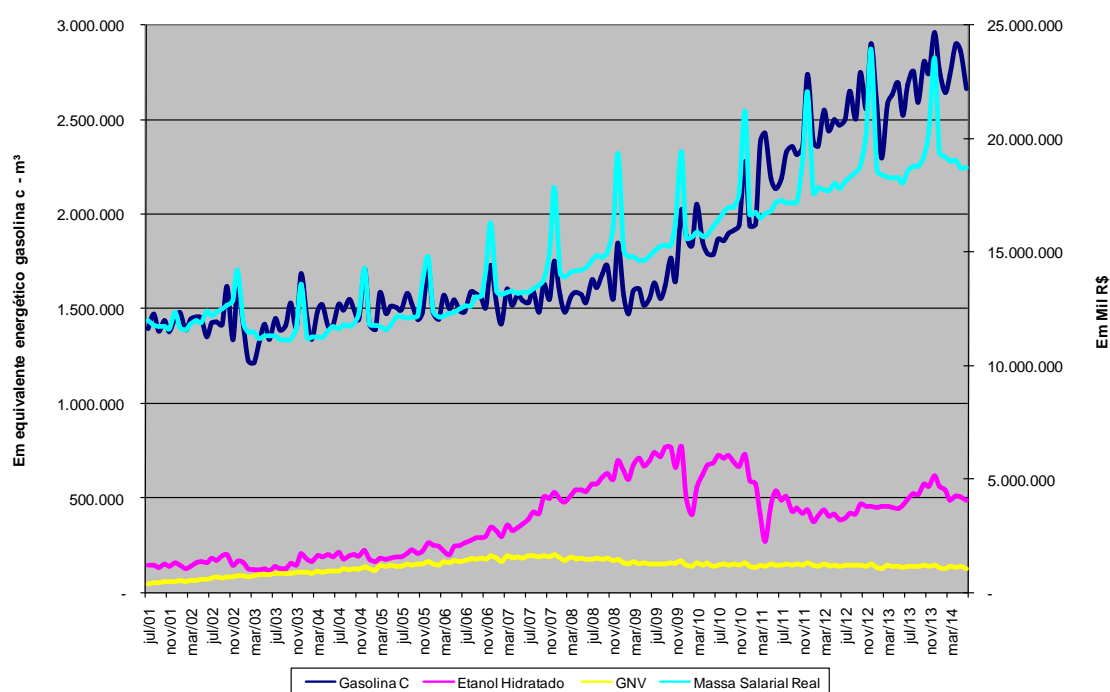


Figura 9: Consumo de Gasolina C, Etanol Hidratado e Gás Natural Veicular (GNV) em Gasolina C equivalente e a Massa Salarial Real (convertido em US\$).

Fonte: ANP e IBGE

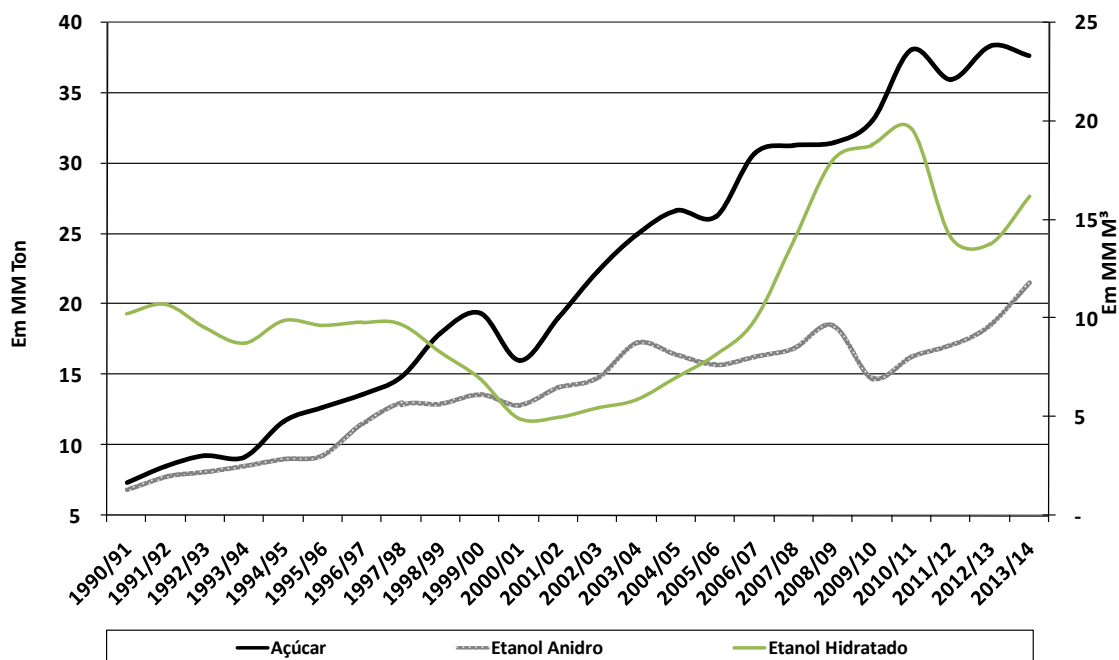


Figura 10: Evolução da Produção Brasileira de Etanol Anidro e Hidratado, em MM m³ e Produção Brasileira de Açúcar, em MM Tons.

Fonte: MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento)

Os problemas climáticos a que se refere o ponto (3) acima podem ser relacionados aos seguintes acontecimentos: (1) Precipitação anormalmente elevada (que, apesar de estimular o desenvolvimento vegetativo, dificulta a concentração de sacarose na Cana-de-Açúcar), durante a maior parte do ciclo de cultivo, particularmente na Região Centro-Sul, que é responsável por cerca de 90% da produção brasileira de Cana-de-Açúcar; (2) A colheita de Cana-de-Açúcar em níveis abaixo da capacidade instalada das usinas, levando a perdas para os agricultores, devido à diminuição da produção de Açúcar e de Etanol durante este período; (3) As fortes precipitações significam que uma quantidade significativa de Cana-de-Açúcar não poderia ser colhida (porque as máquinas utilizadas para a colheita não podem ser utilizadas em campos muito úmidos, já que podem causar o atolamento das mesmas). Esta Cana-de-Açúcar permanece no campo, aumentando a quantidade de raízes aéreas, que por sua vez reduzem o Açúcar Total Recuperável (ATR), afetando o desempenho deste agronegócio; (4) na região Nordeste (responsável por aproximadamente 10% da produção brasileira de Cana-de-Açúcar) a precipitação foi inferior à média, tanto durante a fase de desenvolvimento

vegetativo, quanto na fase de colheita, o que prejudicou o desenvolvimento da Cana-de-Açúcar como sementes para a próxima temporada de colheita (CONAB, 2009).

A safra 2009/10 foi dominada pelo aumento na demanda por Açúcar, em função da quebra de safra nos principais países produtores de Açúcar. A Índia, por exemplo, deixou de exportar e começou a importar Açúcar. A pressão sobre a oferta abriu oportunidades de comércio para o Brasil e levou a aumentos recordes de preços. De fato, o preço do Açúcar aumentou 80%, em média, em comparação com a colheita anterior (CONAB, 2009). Esses fatores consolidados induziram um aumento considerável na produção brasileira de Açúcar de 2010/2011, em detrimento do Etanol (Figura 10). Houve então menor disponibilidade de Etanol Hidratado e preços mais elevados. A partir das safras 2012/2013 e 2013/2014, houve uma estabilização e pequena retomada na oferta de Etanol Hidratado, em função das menores intempéries climáticas e, principalmente, da menor atratividade do Açúcar no mercado internacional.

O consumo de Gasolina C cresceu minimamente entre 2002 e 2009. Isto foi, em grande parte, devido ao fraco desempenho da economia brasileira até 2003. A introdução de veículos Flex-Fuel, em março de 2003, permitiu que o consumidor decidisse qual o combustível a ser usado conforme relação de custo-benefício que, durante este período, favoreceram o uso do Etanol. Pode ser visto na Figura 9 que houve, no entanto, um aumento marcado (mais de 45%) no consumo de Gasolina C entre o final de 2009 e o final de 2013. Neste período, os preços da Gasolina C, no mercado interno brasileiro, não aumentaram no mesmo ritmo que os preços da Gasolina no mercado internacional (ANP, 2015). Isto se deve à política de preços da empresa petrolífera estatal Petrobras (que é o maior produtor de derivados de petróleo no Brasil e que detinha 99% do mercado, neste período). As ações da Petrobras foram destinadas a reduzir o impacto no mercado interno da volatilidade dos preços internacionais.

Em relação ao GNV, este tem uma parcela relativamente pequena do mercado Ciclo Otto (aproximadamente 4% do total). Houve um crescimento acelerado do consumo deste combustível até 2007, seguido por um declínio acentuado até 2013. Isto foi

causado por turbulências no fornecimento de gás natural da Bolívia² (o país forneceu 57% do gás natural disponível no Brasil em 2007). Em 2013, a participação do gás boliviano no consumo brasileiro tinha caído para, aproximadamente, 45% (MME, 2014).

Na verdade, o uso do GNV tem várias desvantagens, tais como a necessidade de equipamentos de conversão (que se tornaram mais caros, após a introdução de normas de segurança mais rigorosas); redução do desempenho do veículo; autonomia limitada e a redução do valor de revenda do veículo. Estas limitações diminuem o interesse do consumidor pelo GNV, que acaba sendo mais comumente consumido por veículos de uso intensivo, tais como táxis.

A Figura 11 apresenta a competitividade relativa da Gasolina C, Etanol Hidratado e GNV, com base em um índice de eficiência energética (R\$/Km) entre os três combustíveis obtidos a partir das conversões estabelecidas pelo (BEN, 2014) e do preço dos combustíveis domésticos multiplicados pelo câmbio do dólar mensal.

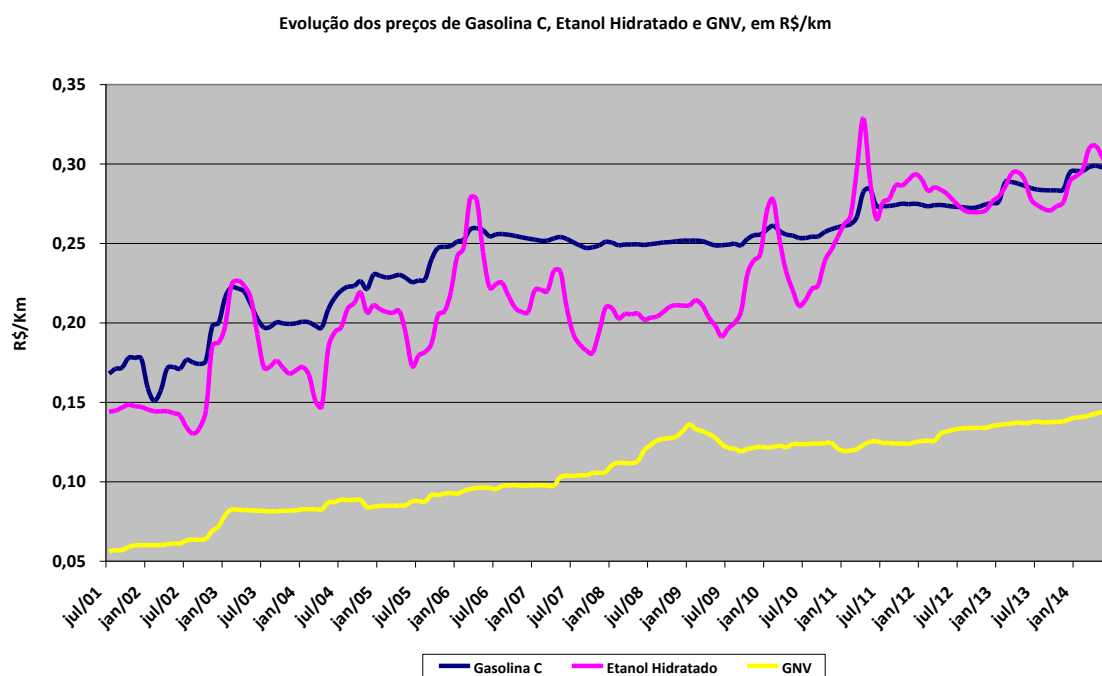


Figura 11: Comparação entre os preços reais da Gasolina C, Etanol Hidratado e GNV em R\$/km. Fonte: ANP

² Os problemas com a Bolívia levaram a um aumento no preço do GNV que praticamente foi o dobro do aumento do preço da Gasolina C, no mesmo período.

Os preços do GNV aumentaram a um ritmo superior aos preços da Gasolina C, de 2007 até 2013 (os preços do GNV cresceram 5% aa e os preços da Gasolina C aumentaram 2,2% aa), de modo que as razões para a redução do consumo de GNV durante este período foram os fatores acima referidos, somando-se ao aumento diferenciado de preços entre os combustíveis. Durante o mesmo período, o preço do Etanol Hidratado aumentou 5,3% ao ano. E no período anterior de 2002 a 2007, os preços da Gasolina C aumentaram 2,5% aa, enquanto os preços do GNV cresceram 4,4% a.a. e, por fim, os preços do Etanol Hidratado cresceram 1,2% a.a.

Como pode ser observado na Figura 11, o preço do Etanol Hidratado é competitivo, em grande parte do país, principalmente São Paulo, e isso pode explicar o sucesso de veículos Flex-Fuel, que responderam por 80,7% das vendas totais de veículos entre 2003 e 2013. Em 2013, os veículos Flex-Fuel respondiam por 61% da frota total de veículos de passageiros e comerciais leves, como pode ser visto na Figura 12.

Cabe mencionar que baseamos nossas estimativas sobre a evolução da frota (estabelecido na Figura 12) no estudo realizado por Mattos & Correia (1996). Este estudo utilizou dados relativos à venda de veículos, correlacionada com o tipo de combustível utilizado (ANFAVEA, 2014), em conjunto com uma curva tipo Gompertz de sucateamento de veículos, com base em dados de 1988 da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

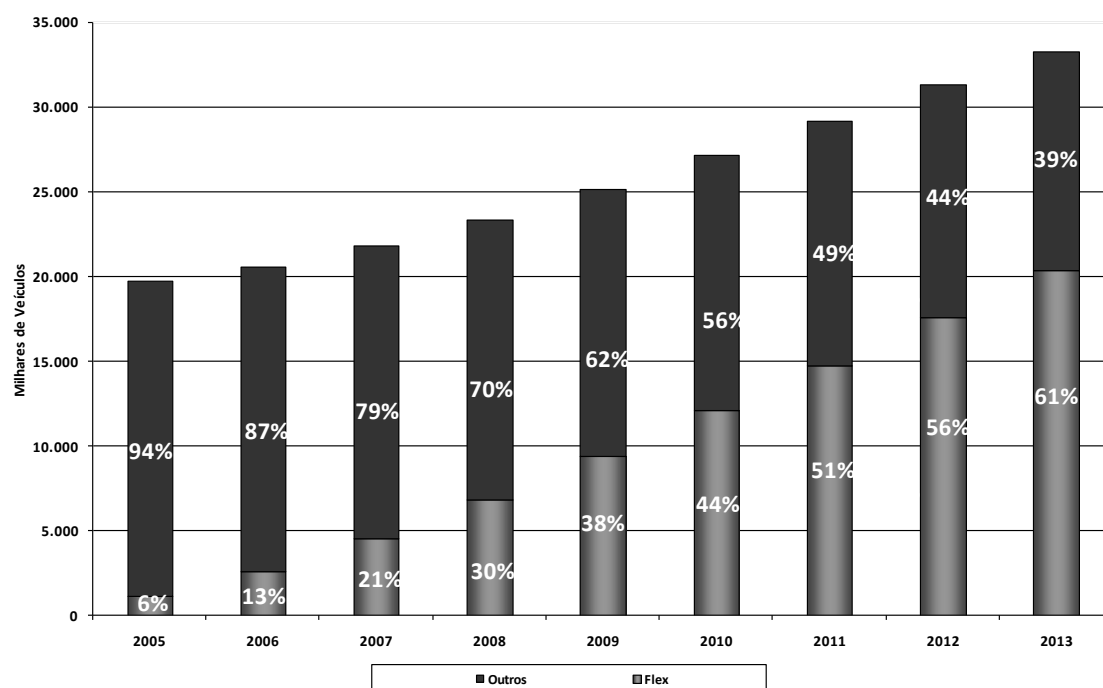


Figura 12: Evolução da Frota Brasileira de Veículos de Passageiros e Comerciais Leves, por tipo de Combustível (em milhares de veículos). Fonte: Anfavea (2014), Correia e Mattos (1996).

Segundo Anfavea, 2014, em razão do menor poder calorífico do Etanol Hidratado em relação à Gasolina C, para se tornar uma alternativa atraente, é necessário que o preço do Etanol Hidratado esteja abaixo de 70% do preço da Gasolina C. A Figura 13 apresenta a relação do preço desses combustíveis no período de julho 2001 a dezembro 2013. É possível observar que nos últimos períodos da série, o referencial de 70% foi ultrapassado na maior parte do tempo, prejudicando assim a competitividade do Etanol Hidratado.

Esta situação de menor competitividade do Etanol frente à Gasolina C nos últimos períodos foi um dos causadores da elevada volatilidade da elasticidade relativa entre os preços do Etanol Hidratado e a Gasolina C que será apresentada, discutida e mensurada em capítulos posteriores, de forma bem aprofundada.

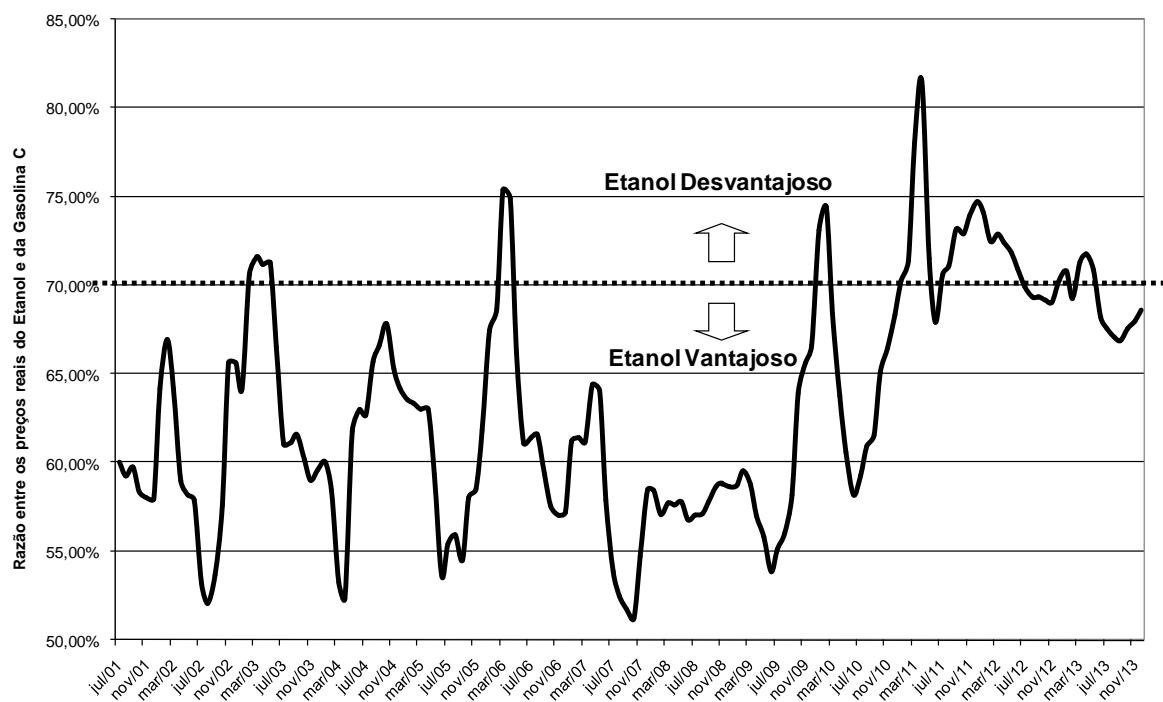


Figura 13: Comparativo entre os preços reais (média Brasil) de Gasolina C e Etanol Hidratado

Fonte: Elaboração do autor, com base em dados da ANP

3. FATORES CRÍTICOS PARA O BRASIL EM UM CONTEXTO DE BIOCOMBUSTÍVEIS E FLEXIBILIDADE TECNOLÓGICA

A motivação deste capítulo surge da necessidade de analisarmos os impactos que a tecnologia Flex-Fuel trouxe para alguns aspectos da economia e do meio-ambiente brasileiros em termos de uso de combustíveis, em função do seu desenvolvimento ao longo dos últimos anos e possíveis implicações para o horizonte de planejamento energético do país, levando em consideração a balança comercial brasileira e a política de biocombustíveis.

Analisaremos abaixo estes dois pontos que são parte da motivação para a realização desta tese, o primeiro tem como objetivo mostrar as implicações dos problemas de oferta de Etanol sobre a balança comercial brasileira, impactando a situação das contas externas do país, pois os superávits neste item da balança de pagamentos são de suma importância para garantir divisas para o país saldar seus compromissos em moedas estrangeiras resultante das importações e/ou pagamento de juros e amortizações de empréstimos contraídos no exterior

Enquanto o segundo procura analisar o cenário mundial de evolução dos biocombustíveis, do ponto de vista de possíveis impactos sobre o futuro do mercado brasileiro de combustíveis, como mudanças das normativas de adição de combustíveis renováveis aos combustíveis fósseis, que possam afetar a capacidade de suprimento de algum dos energéticos utilizados por estes veículos.

3.1 BALANÇA COMERCIAL BRASILEIRA

A análise a seguir relaciona a questão dos efeitos na balança comercial (déficit/superávit de combustíveis) e na economia brasileira como um todo, decorrente da exportação/importação de Etanol e Gasolina, de forma detalhada cada fluxo para que se possa analisar de forma criteriosa os motivadores da evolução das exportações e importações de cada um dos produtos. Este é um tema relevante já mencionado por Alves e Bueno (2003).

Segundo Cavalcanti (2011), num ambiente de livres preços de mercado, uma possível elevação da tributação sobre o Etanol no Brasil não é capaz de compensar integralmente a perda de arrecadação fiscal devido à substituição do consumo de Gasolina por Etanol, sem tornar o Etanol inviável economicamente. Isto ocorre porque, mesmo com o Brasil possuindo o menor custo de produção de Etanol, não é possível mantê-lo competitivo e compensar parte da perda de arrecadação fiscal por intermédio de maior tributação.

Considerando um possível impacto positivo na balança comercial trazido pelo estímulo à produção de Etanol em detrimento de importações de Gasolina, como pode ser visto abaixo na análise da variação da balança comercial de Gasolina e Etanol entre os anos de 2007 e 2013, no Figura 14.

Caso o Brasil exportasse em 2013 o mesmo volume de Gasolina que em 2007 (3,7 bi de litros) e utilizando o preço médio da Gasolina exportada em 2013 (US\$ 693,33/litro), teríamos um resultado líquido positivo (já descontando o pequeno volume exportado em 2013 de 332 milhões de litros) de aproximadamente US\$ 2,3 bi.

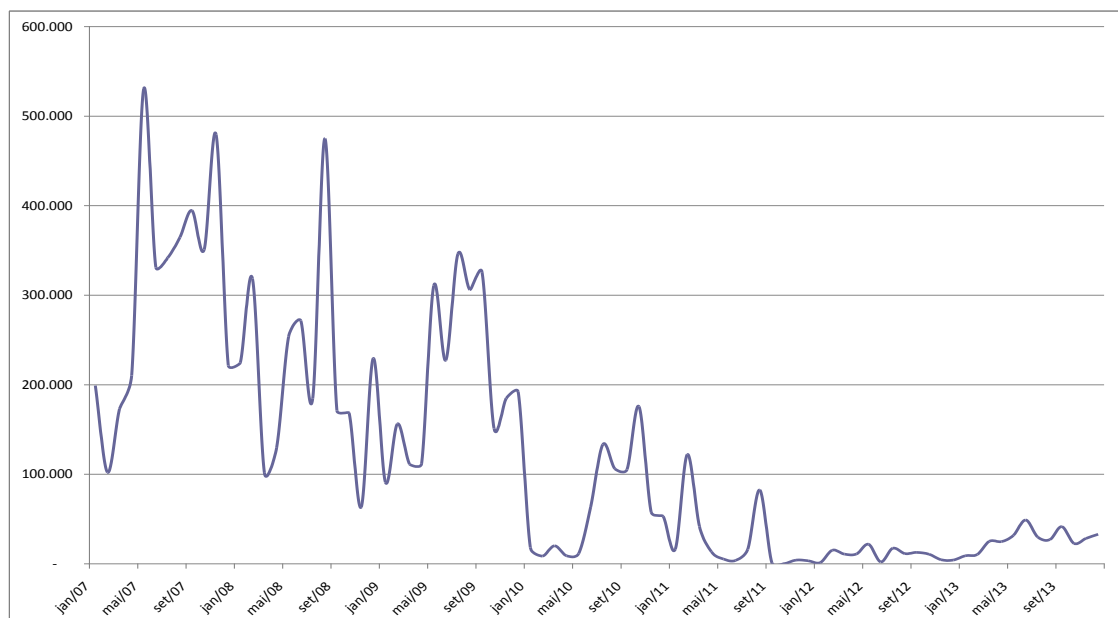


Figura 14: Exportação de Gasolina no período de janeiro de 2007 a dezembro de 2013
(em litros)

Fonte: ANP

Além disso, houve a necessidade de importação de Gasolina, em 2013, de aproximadamente 2,9 bi de litros, por um valor aproximado de US\$ 2,1 bi, conforme observado na Figura 15 abaixo. Enquanto em 2007 houve a importação de 10 milhões de litros de Gasolina.

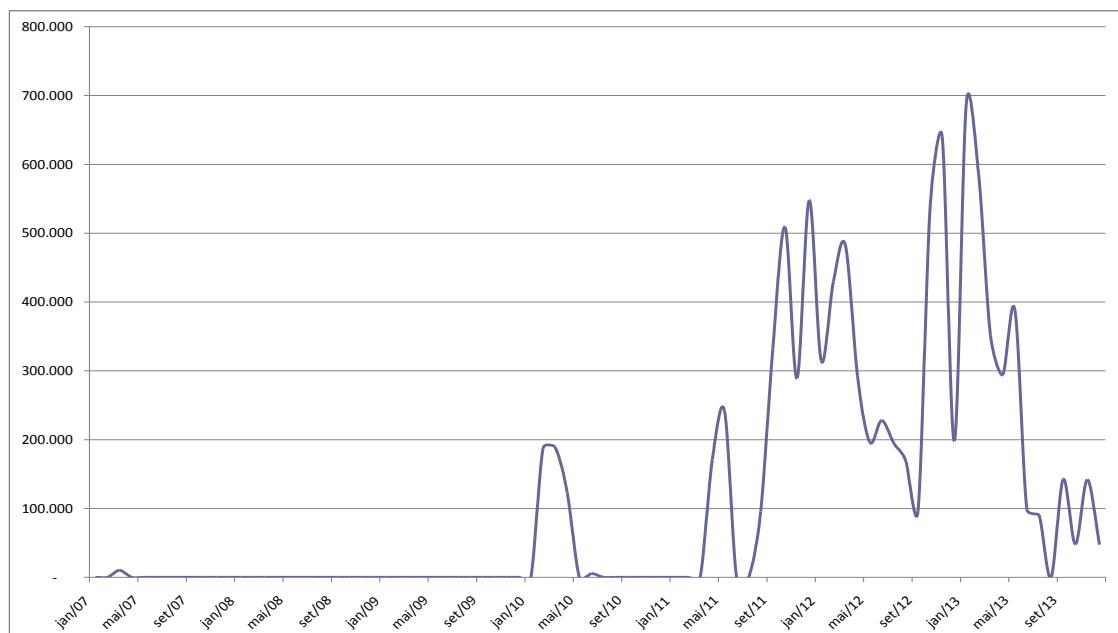


Figura 15: Importação de Gasolina no período de janeiro de 2007 a dezembro de 2013 (em litros).

Fonte: ANP

Ou seja, se as condições de 2007 fossem mantidas, haveria um saldo positivo de cerca de US\$ 4,4 bi (2,3 mais 2,1 bilhões de dólares) na conta de Gasolina.

Por fim, as exportações de Etanol caíram em cerca de 510 mi de litros, em relação a 2007, e este volume com preços de 2013 traria um resultado de US\$ 395 mi.

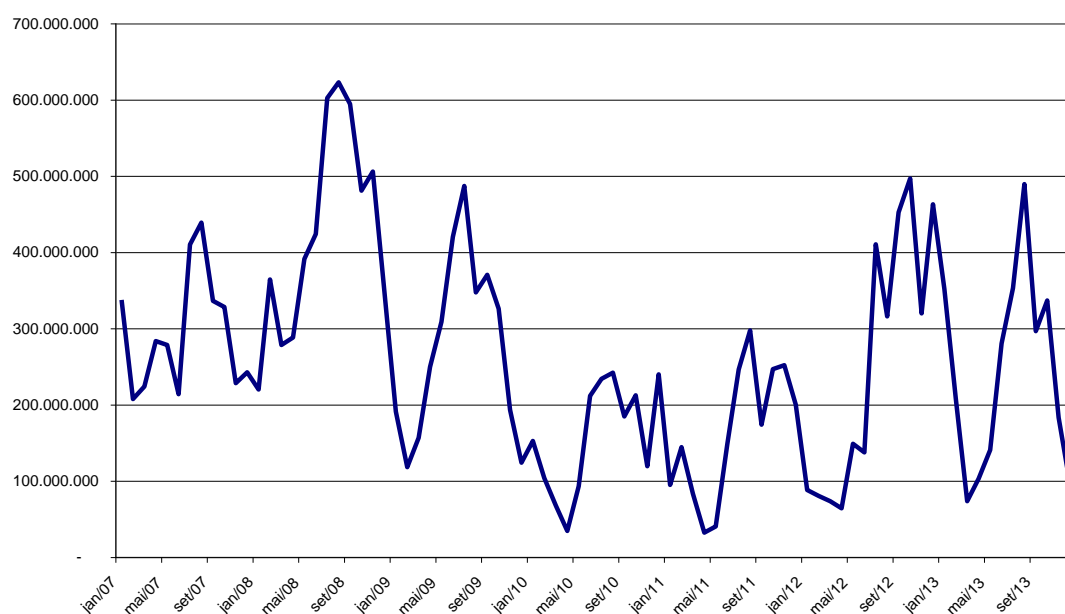


Figura 16: Exportação de Etanol no período de janeiro de 2007 a dezembro de 2013 (em litros)

Fonte: ANP

E as importações aumentaram cerca de 125 milhões de litros, resultando num valor de US\$ 89 mi. A conta do Etanol resultou, portanto, num valor total perdido de 395 mais 89 milhões de dólares, ou seja, US\$ 484 mi.

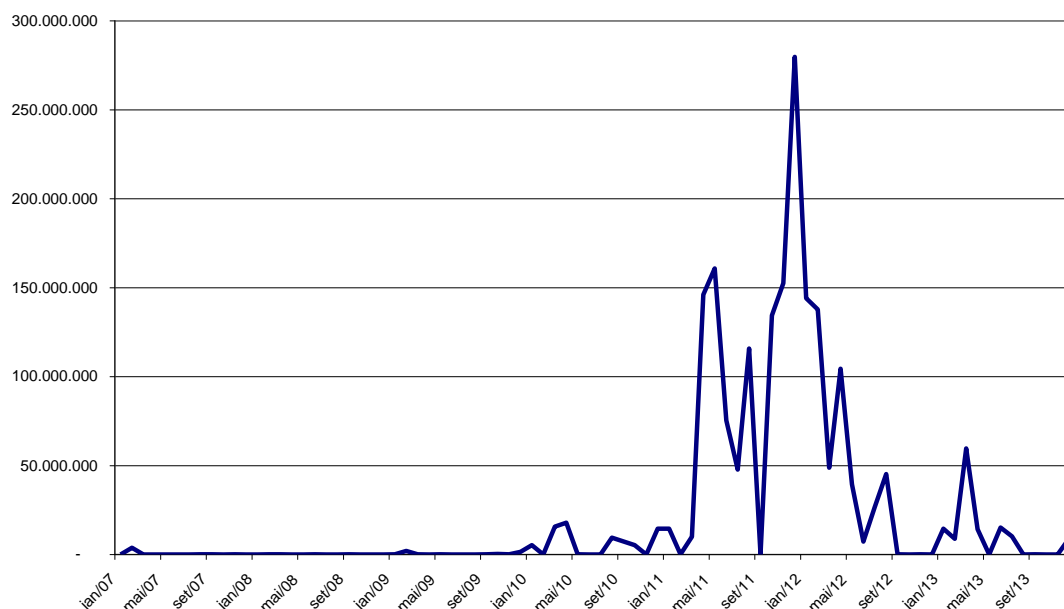


Figura 17: Importação de Etanol no período de janeiro de 2007 a dezembro de 2013 (em litros)

Fonte: ANP

Como conclusão, temos uma perda estimada de US\$ 4,9 bi, entre os picos de exportação de Gasolina e baixa importação de Etanol, no ano de 2007, contra o vale na exportação de Gasolina e elevação da importação de Etanol, em 2013. Este valor implica numa perda extremamente relevante de divisas para o país, visto que somos um país que necessita de poupança externa para o seu desenvolvimento.

Além disso, deve-se considerar o fato de que neste período o saldo volumétrico entre importações e exportações de petróleo passou de um saldo negativo de aproximadamente 925 mil m³, em 2007, para um valor superior a 1,4 milhões de m³, em 2013. Ressalte-se o fato de que esse valor deve-se também ao aumento do consumo de outros derivados de petróleo, além da Gasolina. E a balança comercial de petróleo passou de um saldo negativo de US\$ 3,1 bi para US\$ 3,5 bi.

3.2 CENÁRIO MUNDIAL DE BIOCOMBUSTÍVEIS

O objetivo deste subcapítulo é apresentar políticas públicas dos Estados Unidos e da Europa sobre o consumo de combustíveis em veículos, considerando incentivos ou diretrizes para o consumo de combustíveis alternativos, em especial os renováveis, que possam impactar o mercado brasileiro de combustíveis para veículos integrantes do Ciclo Otto, que está sob influência da evolução dos motores Flex-Fuel e afetar a capacidade de suprimento de algum dos energéticos utilizados por estes veículos.

As políticas analisadas neste subcapítulo avaliam as normativas atuais e futuras de adição de combustíveis renováveis aos combustíveis fósseis existentes nestes dois pólos (Estados Unidos e Europa), servindo como benchmarking para a evolução dos percentuais de participação na formulação dos energéticos no Brasil, os quais podem impactar as relações de preços entre Etanol Hidratado e Gasolina C, além de afetar a produção agrícola brasileira e a própria balança comercial brasileira, através de menores ou maiores exportações/importações de combustíveis para suprir a demanda nacional.

A demanda por combustíveis renováveis e renováveis “avançados” (ver tabelas 2, 3 e 4), originada pela política americana de redução da dependência de petróleo e, principalmente, em função da quebra da safra de milho, nos EUA — com o conseqüente aumento no custo da matéria-prima do Etanol americano — contribuíram para elevar o comércio do Etanol brasileiro para aquele país.

Tabela 2: Evolução dos Combustíveis Renováveis, de acordo com o U.S. Energy Independence and Security Act

Ano	Volume de Combustíveis Renováveis (em bilhões de galões)
2006	4,0
2007	4,7
2008	9,0
2009	11,1
2010	12,95
2011	13,95
2012	15,2
2013	16,55
2014	18,15
2015	20,5
2016	22,25
2017	24,0
2018	26,0
2019	28,0
2020	30,0
2021	33,0
2022	36,0

Fonte: Environmental Protection Agency (EPA, 2007)

Tabela 3: Evolução dos Combustíveis Renováveis “Avançados”, de acordo com o U.S. Energy Independence and Security Act

Ano	Volume de biocombustíveis “avançados” (em bilhões de galões)
2009	0,6
2010	0,95
2011	1,35
2012	2,0
2013	2,75
2014	3,75
2015	5,5
2016	7,25
2017	9,0
2018	11,0
2019	13,0
2020	15,0
2021	18,0
2022	21,0

Fonte: Environmental Protection Agency (EPA, 2007)

Tabela 4: Volume Requerido de Combustíveis Renováveis nos EUA pelo programa original e ajustes anuais já realizados pela EPA. Em bilhões de galões de Etanol-equivalente, exceto o Diesel de biomassa.

Ano	Combustíveis Renováveis em bilhões de galões equivalentes					
	Total ^a	Biocombustíveis Avançados				Biocombustíveis Convencionais ^{b,c}
		Total de Avançados ^a	Biocombustíveis Celulósicos ^a	Diesel de Biomassa ^{a,d}	Outros Avançados ^b	
2008	9,0	-	-	-	-	9,0
2009	11,1	0,6	-	-	0,1	10,5
2010	12,95	0,95	0,0	0,5	0,2	12,0
2011	13,95	1,35	0,3>0,01 ^d	0,7	0,1>0,4	12,6
2012	15,2	2,0	0,5>0,01 ^d	1,0	0>0,5	13,2
2013	16,55	2,75	1,0>0,01 ^d	≥1,0>1,3	0,3>0,8	13,8
2014 (e)	18,15>15,21	3,75>2,19	1,8>0,02	≥1,0>1,3	0,1>1,8>0,3	14,4>13,0
2015	20,5	5,5	3,0	≥1,0>1,3	1,5>?	15,0>?
2016	22,25	7,25	4,3	≥1,0	2,0	15,0>?
2017	24,0	9,0	5,5	≥1,0	2,5	15,0>?
2018	26,0	11,0	7,0	≥1,0	3,0	15,0>?
2019	28,0	13,0	8,5	≥1,0	3,5	15,0>?
2020	30,0	15,0	10,5	≥1,0	3,5	15,0>?
2021	33,0	18,0	13,5	≥1,0	3,5	15,0>?
2022	36,0	21,0	16,0	≥1,0	4,0	15,0>?

Fonte: Environmental Protection Agency (EPA, 2007), elaboração própria do autor.

Notas:

^a valores descritos na Lei Federal: U.S. Energy Independence and Security Act, de 2007;

^b obtidos por diferença entre o mandato total e os demais mandatos;

^c Etanol de milho;

^d Biodiesel equivale a 1,5 Etanol-equivalente, ou 1,6/1,7, dependendo do tipo de Diesel renovável.

Esta redução nos mandatos de combustíveis renováveis deve-se a três fatores: i) o consumo de Etanol ter atingido uma participação próxima de 10% do mercado de Gasolina e de haver barreiras à rápida expansão do E15³ (o chamado “blend-wall”⁴ do E10); ii) o mercado do ciclo Otto americano estar apresentando tendência declinante desde 2007; e iii) não existirem políticas efetivas para viabilizar o uso do E85 em frotas Flex-Fuel (EPA, 2007).

³ E15 é o combustível com 15% de percentual de etanol na sua composição.

⁴ A indústria automobilística americana tem sido firme na sua posição de que uma mistura superior a 10 por cento de etanol tem potencial para danificar os veículos de vários fabricantes, o “blend-wall”. Isto apesar de o Departamento de Energia sustentar que misturas de combustíveis que contêm aproximadamente 15 por cento de etanol não causem danos significativos para os veículos fabricados a partir de 2001. Além disso, os veículos flex fuel que podem queimar até 85 por cento de etanol como o E85 já estão disponíveis há anos, mas respondem por apenas 3 por cento da frota de veículos leves americana. Além disso, apenas 10 por cento dos veículos flex fuel realmente utilizam o E85.

Também a União Europeia possui uma política de aumento gradual da participação de combustíveis renováveis na matriz energética de transportes (ver tabela 6), conforme Diretiva 2009/28/EC do Parlamento e do Conselho Europeu, de 23 de abril de 2009.

Tabela 5: Evolução dos Combustíveis Renováveis, de acordo com a European Environment Agency (EEA), por país da União Europeia.

Países	Participação de combustíveis renováveis no consumo energético bruto final, em 2005	Participação de combustíveis renováveis no consumo energético bruto final, em 2020
Bélgica	2,2%	13%
Bulgária	9,4%	16%
República Checa	6,1%	13%
Dinamarca	17,0%	30%
Alemanha	5,8%	18%
Estônia	18,0%	25%
Irlanda	3,1%	16%
Grécia	6,9%	18%
Espanha	8,7%	20%
França	10,3%	23%
Itália	5,2%	17%
Chipre	2,9%	13%
Letônia	32,6%	40%
Lituânia	15,0%	23%
Luxemburgo	0,9%	11%
Hungria	4,3%	13%
Malta	0,0%	10%
Holanda	2,4%	14%
Áustria	23,3%	34%
Polônia	7,2%	15%
Portugal	20,5%	31%
Romênia	17,8%	24%
Eslovênia	16,0%	25%
Eslováquia	6,7%	14%
Finlândia	28,5%	38%
Suécia	39,8%	49%
Reino Unido	1,3%	15%

Fonte: European Environment Agency (EEA, 2006)

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE ESTUDOS EMPÍRICOS SOBRE O MERCADO DE COMBUSTÍVEIS

Neste Capítulo discutiremos alguns estudos dentre vários que mais se assemelham e conseguem contribuir para o desenvolvimento desta tese. Estes trabalhos permitem a avaliação das elasticidades preços e renda dos combustíveis automotivos, em especial daqueles que são integrantes do Ciclo Otto, em vários países ao redor do mundo e também no Brasil. Além disso, apresentam as principais técnicas econométricas hoje existentes para avaliar os impactos sobre os mercados de combustíveis, assim como análises sobre os resultados obtidos.

No sentido de inovação em relação a outros estudos de análise econômico/estatístico para avaliação do mercado de combustíveis, esta tese traz uma evolução das técnicas econométricas atualmente em uso, com a utilização de uma modelagem composta entre a técnica de Cointegração, normalmente vista em vários estudos de demanda de combustíveis, em conjunto com outra técnica de espaço de estado, através da utilização do algoritmo do Filtro de Kalman.

Esta metodologia híbrida permite a avaliação das elasticidades, fazendo com que as mesmas variem ao longo do tempo, avançando nos limites do conhecimento atual frente àquilo que se utiliza nos estudos correntes que são os parâmetros fixos. O primeiro estudo que será analisado se refere a Polemis (2006) que tem como objetivo determinar as variáveis que impactam a demanda por energia para transporte terrestre na Grécia. A demanda por combustíveis para transporte na Grécia cresceu entre 1990 e 2002 cerca de 44%. E o consumo de Gasolina se elevou ao redor de 4% a.a. no período de 1988 a 2001. O autor utiliza técnicas de cointegração para capturar as dinâmicas de curto e longo prazo para Gasolina e Diesel. O período amostral é de 1978 a 2003, com dados em base anual. Há a utilização de duas equações log-log tendo como variáveis independentes: o PIB per capita (PIB), os preços reais de Gasolina e Diesel e a frota de veículos per capita. Além disso, há a inserção de uma variável de tendência para captar possíveis avanços tecnológicos no modelo de estimação da Gasolina. As elasticidades obtidas para o modelo da Gasolina foram de: 0,79 para o PIB, -0,38 para elasticidade-preço da Gasolina e 0,10 para a elasticidade-preço cruzada Gasolina-Diesel, no longo

prazo. Procurou-se observar a existência de quebras estruturais com a utilização de Mínimos Quadrados Ordinários Recursivos (testes de CUSUM, Resíduos Recursivos, Teste de um passo à frente e Coeficientes Recursivos). E a seguir foi realizado o VECM, que obteve uma elasticidade de 0,36 para a 1ª diferença do GDP, enquanto que para as 1ª diferenças da elasticidade-preço da Gasolina, do Diesel foram de -0,10 e 0,00, no curto prazo, respectivamente e de -0,24 para a velocidade de ajustamento. A posteriori foram realizados vários outros testes (LM Test, ARCH Test, White, Chow Test, IRF e VDC). Pelos resultados obtidos, a demanda por Gasolina no longo prazo é inelástica ao preço e à renda, enquanto que a demanda pelo Diesel no longo prazo é inelástica ao preço, mas elástica à renda. Também se pôde observar o baixo nível de substitutabilidade entre os energéticos, devido ao baixo coeficiente de elasticidade cruzada entre os derivados de petróleo.

Eltony e Al Mutairi (1995) buscam determinar as variáveis que impactam a demanda por Gasolina no Kuwait. Os autores utilizam técnicas de cointegração para capturar as dinâmicas de curto e longo prazo para esse combustível. O período amostral é de 1970 a 1989, com os dados distribuídos em base anual. Há a utilização no modelo proposto, como variáveis independentes, o preço real da Gasolina e a renda, ambas na forma logarítmica. Os testes indicaram a presença de raiz unitária no nível e a rejeição desta hipótese quando se tomou a primeira-diferença de todas as séries. Para o modelo do Kuwait, a elasticidade-preço da Gasolina foi de -0,46 e 0,92 para a elasticidade-renda, no longo prazo. E a seguir foi realizado o VECM, obtendo as seguintes elasticidades para as 1ª diferenças: -0,37 para a elasticidade-preço da gasolina e 0,47 para a elasticidade-renda, no curto prazo. A velocidade de ajustamento foi de 0,52. Pelos resultados obtidos, a demanda por Gasolina é inelástica ao preço no curto e longo prazo. Mas com relação à renda é inelástica no curto prazo, mas elástica (próxima a 1) no longo prazo. Isto sugere que a demanda por Gasolina responde mais fortemente no longo prazo do que no curto a uma mudança do nível de renda. E com um rápido ajustamento de 52% no prazo de um ano.

Bentzen (1994) busca determinar os fatores que afetam o consumo de Gasolina na Dinamarca, utilizando técnicas de cointegração para o período amostral de 1948 a 1991. O modelo proposto tem como variáveis independentes o preço real da Gasolina,

tendência, frota de veículos per capita na forma logarítmica. Para o modelo da Dinamarca, as elasticidades obtidas foram de -0,41 para o preço da Gasolina, 0,92 para a frota per capita e -0,01 para a tendência, no longo prazo. E a seguir foi realizado o VECM, que obteve as elasticidades -0,32 e 0,89, no curto prazo, respectivamente para o preço e para a frota e -0,67 para a velocidade de ajustamento. Pelos resultados obtidos, a demanda por Gasolina é inelástica ao preço no curto e no longo prazo. Mas com relação à frota per capita é quase elástica tanto no curto quanto no longo prazo. Uma elasticidade próxima de 1 pode ser explicada pelo simples fato de que uma mudança no curto prazo na frota de veículos deve ter um efeito semelhante no consumo de Gasolina. As estimativas de Bentzen (1994) sugerem que há uma grande velocidade de ajustamento da demanda no período de um ano (-0,67) se o consumo de Gasolina estiver fora do nível de demanda de longo prazo.

Alves e Bueno (2003) utilizam uma base de dados do Brasil e buscam os determinantes da demanda por Gasolina no Brasil. Análises já realizadas anteriormente são expandidas através da estimação elasticidade-preço cruzada entre Gasolina e Etanol. Vale ressaltar que os autores citados utilizam as mesmas técnicas de cointegração já mencionadas anteriormente para capturar as dinâmicas de curto e longo prazo para Gasolina. O período amostral é de 1974 a 1999, com os dados distribuídos em base anual. Somente o preço real do Etanol tem o período amostral de 1984 a 1999. O modelo tem como variáveis o preço real da Gasolina, o preço real do Etanol, o PIB per capita e o consumo de Gasolina per capita. Estas variáveis foram testadas para verificar a estacionariedade das séries, tendo sido encontrado que todas continham raiz unitária, de ordem 1. Os autores indicam que havia a necessidade da inclusão de tendência quadrática na regressão para melhorar o ajuste do modelo. Por fim, com a realização dos testes de cointegração puderam rejeitar a hipótese nula de raiz unitária nos resíduos do modelo. Para o modelo do Brasil, as elasticidades obtidas foram de 0,12 para a renda, -0,46 para o preço da Gasolina e 0,48 para o preço do Etanol, no longo prazo. E a seguir foi realizado o VECM, que obteve as seguintes elasticidades 0,12, -0,09, 0,23, respectivamente para a renda, o preço da Gasolina e o preço do Etanol, no curto prazo e -1,48 para a velocidade de ajustamento. Pelos resultados obtidos, a demanda por Gasolina é inelástica à renda e aos preços de gasolina e etanol, no curto prazo. A velocidade de ajustamento de -1,48 é significativa, mas segundo os autores pode ser

resultado de um “dumped effect”⁵ que se propaga ao longo dos anos, com um sinal contrário e não está sendo captado em sua extensão pelo relativamente pequeno tamanho da amostra utilizado na estimação do modelo. A utilização de tendência quadrática no modelo se dá em função de o consumo de Gasolina ter uma trajetória de repetidos ajustes da economia brasileira devido aos choques de petróleo nos últimos 30 anos. A elasticidade-preço da Gasolina é inelástica no longo prazo e completamente inelástica no curto prazo. A elasticidade-preço cruzada entre Etanol e Gasolina é positiva, confirmando que eles são substitutos, mas não perfeitos, pois o seu valor é inferior a 1.

Ramanathan (1999) propõe uma modelagem para a determinação das variáveis que impactam a demanda por Gasolina na Índia e seus efeitos sobre a balança de pagamentos, o crescimento econômico e o déficit fiscal. Nesse país, o consumo de Gasolina, no período de 1981 a 1994, aumentou cerca de 7% a.a. Este autor usa basicamente a mesma metodologia anteriormente citada para determinar as elasticidades de curto e longo prazo. O período amostral é de 1972 a 1994, com os dados distribuídos em base anual. O modelo utiliza como variáveis o preço real da Gasolina, o PIB per capita e o consumo de Gasolina per capita na forma logarítmica. Foram realizados testes de estacionariedade que indicaram a presença de raiz unitária no nível e testes de cointegração que rejeitaram a hipótese nula de raiz unitária nos resíduos do modelo. As estimativas sugerem as seguintes elasticidades: 2,68 para a renda e -0,32 para o preço, no longo prazo. E a seguir foi realizado o VECM, que obteve as seguintes elasticidades de 1,18 e -0,21, para a renda e preço da Gasolina, respectivamente, no curto prazo e 0,28 para a velocidade de ajustamento. Pelos resultados obtidos, a elasticidade-preço da Gasolina é inelástica no curto e longo prazo. E a velocidade de ajustamento da demanda por Gasolina é de 28% no primeiro ano em direção ao equilíbrio de longo prazo.

Comparando-se as elasticidades-preço de curto e longo prazo entre os estudos estrangeiros, elas são menores na Índia do que na Dinamarca e no Kuwait, enquanto a elasticidade renda é muito maior na Índia. Isto se deve aos baixos níveis de consumo de

⁵ Efeito da manutenção de baixos preços da Gasolina C ao longo de boa parte do período da amostra que provavelmente afetou os parâmetros obtidos no modelo.

Gasolina e ao forte crescimento da economia nesse último país. A elasticidade-renda é maior no longo do que no curto prazo e elástica em ambos os prazos.

Schünemann (2007) também estuda o caso brasileiro de consumo de gasolina e sugere uma análise através de técnicas de cointegração pela metodologia de Engle e Granger (1987) utilizando as seguintes variáveis: frota per capita, idade média e eficiência média da frota, além dos preços dos combustíveis, do PIB per capita e do consumo dos combustíveis para o período de 1970 a 2005. Os resultados obtidos mostram que a frota e o PIB são variáveis explicativas significativas para os modelos desde que não utilizadas conjuntamente, somando-se a isso o fato de que o efeito da variável eficiência já é captado pela variável idade. Os preços do Etanol Hidratado e do GNV não se mostraram significativos nas regressões e obteve-se significância para o impacto dos carros Flex-Fuel no consumo de Gasolina. As elasticidades-preço e renda da Gasolina são de -0,49 e 0,86, respectivamente, no curto prazo. Por fim, o pequeno período de existência dessa evolução tecnológica (Flex-Fuel) ainda não permitiu afirmar de forma categórica, que houve uma mudança nos parâmetros de consumo da Gasolina. Enquanto que no longo prazo, as elasticidades-renda e preço da Gasolina são de 1,84 e -0,22 respectivamente. Isto nos indica que o coeficiente de longo prazo da renda é elástico, ao contrário do mesmo para o curto prazo. E a redução de consumo em função de variações no preço é maior no longo do que no curto prazo, embora para ambos os períodos os coeficientes sejam inelásticos.

Por fim, Santos (2013) desenvolve estudo sobre a demanda de combustíveis utilizando a técnica de painel associada à metodologia de cointegração para o período de julho de 2001 a dezembro de 2010. As variáveis utilizadas estão em bases trimestrais e são as seguintes: consumo de Gasolina, consumo de Etanol, consumo de GNV, preços reais de Gasolina, preços reais de Etanol, preços reais de GNV e o PIB. O resultado deste trabalho observou que após a introdução dos veículos Flex-Fuel houve uma mudança na sensibilidade dos consumidores a alterações de preços dos combustíveis e também que o GNV se tornou um produto pouco relevante no mercado dos veículos do Ciclo Otto. Outra conclusão obtida é que a elasticidade de longo prazo do preço da Gasolina no valor de -1,19 implica que os consumidores são elásticos ao preço neste horizonte. Já para as elasticidades preço cruzada em relação ao Etanol e elasticidade PIB temos

valores de 0,29 e 0,52, respectivamente, ou seja, inelásticos, no longo prazo. Enquanto que para a elasticidade de curto prazo do preço de Gasolina observamos o valor de - 0,40, enquanto para as elasticidades de curto prazo do preço cruzado em relação ao Etanol e a elasticidade relativa ao PIB observamos os valores de 0,10 e 0,18, respectivamente.

A partir de toda a literatura de estudo do consumo de combustíveis ao redor do mundo e no Brasil, pode-se depreender que a demanda por energéticos é influenciada pela renda e pela sua evolução ao longo do tempo, de forma positiva, com uma elasticidade maior no longo do que no curto prazo, ou seja, as mudanças são mais significativas em períodos mais distantes do que em um curto período de tempo, como era de se esperar, assim como os preços dos energéticos considerados afetam negativamente o seu consumo numa intensidade maior no longo do que no curto prazo.

Por fim, como os preços dos energéticos substitutos possuem uma elasticidade positiva maior no longo prazo do que no curto prazo, as características mencionadas tanto neste parágrafo, quanto no anterior, fazem sentido, pois os consumidores levam um tempo até que se adaptem às mudanças de condição do ambiente.

Esta tese não se propôs a contrapor esta avaliação, apenas a corroborou. A virtude desta tese foi a proposição de que a evolução da elasticidade dos preços relativos dos energéticos não se dá de forma estanque comparando-se os curto e longo prazos, com a definição de um valor para a elasticidade de curto prazo e outro valor para a elasticidade de longo, sem que haja uma evolução do valor entre estes dois tempos.

A elasticidade cruzada entre os preços dos combustíveis alternativos se move de forma errática, sem uma tendência definida entre o curto e longo prazo, mas sim de acordo com questões de oferta e demanda dos energéticos que vão ocorrendo ao longo do tempo, graças ao advento do surgimento e desenvolvimento dos veículos Flex-Fuel, que permitem a utilização de um ou outro combustível.

Esta tese permite uma análise mais profunda dos eventos que impactam o consumo dos energéticos integrantes do Ciclo Otto, fazendo com que os agentes envolvidos em toda a

cadeia de suprimento de combustíveis possam minimizar os impactos sobre os consumidores de alterações na disponibilidade dos mesmos, em função de problemas na safra de cana-de-açúcar, mudanças nos preços relativos entre açúcar e etanol, entre outros.

Estas mudanças na oferta de energéticos podem ser simuladas, com a utilização dos resultados da análise empreendida neste estudo. Assim, podem ser desenvolvidos planos de abastecimento de combustíveis que atendam eventuais restrições de ofertas de um ou outro energético.

A seguir são apresentados dois sumários com as elasticidades obtidas em cada um dos artigos analisados, o primeiro para o longo prazo e o segundo para o curto prazo.

Tabela 6: Sumário das Elasticidades de Longo Prazo da Bibliografia

Autor	País	Período de Estimação	PIB	Preço da Gasolina	Preço do Diesel	Preço do Etanol	Tendência	Frota
Polemis	Grécia	1990:2002	0,79	-0,38	0,10	-	0,03	-
Eltony	Kuwait	1970:1989	0,92	-0,46	-	-	-	-
Bentzen	Dinamarca	1948:1991	-	-0,41	-	-	-0,01	0,92
Alves	Brasil	1974:1999	0,12	-0,46	-	0,48	-	-
Ramanathan	Índia	1981:1994	2,68	-0,32	-	-	-	-
Schünemann	Brasil	1970:2005	1,84	-0,22	-	-	-	-
Santos	Brasil	2001:2010	0,52	-1,19	-	0,29	-	-

Tabela 7: Sumário das Elasticidades de Curto Prazo da Bibliografia

Autor	País	Período de Estimação	PIB	Preço da Gasolina	Preço do Etanol	Frota	Velocidade de Ajustamento
Polemis	Grécia	1990:2002	0,36	-0,10	-	-	-0,24
Eltony	Kuwait	1970:1989	0,47	-0,37	-	-	0,52
Bentzen	Dinamarca	1948:1991	-	-0,32	-	0,89	-0,67
Alves	Brasil	1974:1999	0,12	-0,09	0,23	-	-1,48
Ramanathan	Índia	1981:1994	1,18	-0,21	-	-	0,28
Schünemann	Brasil	1970:2005	0,86	-0,49	-	-	-0,09
Santos	Brasil	2001:2010	0,18	-0,40	0,10	-	-

5. TECNOLOGIAS AUTOMOTIVAS

Este Capítulo desenvolve uma análise sobre as tecnologias automotivas existentes e aquelas em desenvolvimento, no Brasil e no mundo. O objetivo é apresentar um panorama do que já aconteceu e daquilo que pode vir a acontecer nesse setor, causando impactos no mercado de combustíveis semelhantes aos observados com a introdução dos veículos Flex-Fuel e do GNV, através de motorizações híbridas que permitam o consumo de outros energéticos, além de Gasolina C e Etanol Hidratado, encaminhando este segmento para uma análise de competitividade entre vários produtos substitutos e não apenas os dois combustíveis analisados nesta tese.

5.1 FLEX-FUEL

Os veículos Flex-Fuel são equipados com motores de combustão interna a quatro tempos (Ciclo Otto) com capacidade de serem reabastecidos e funcionarem com mais de um tipo de combustível, misturados no mesmo tanque e queimados na câmara de combustão simultaneamente. O tipo mais comum disponível no mercado mundial utiliza Etanol como segundo combustível. Um sensor detecta a mistura do combustível e ajusta a injeção de acordo com a mistura. Assim pode-se usar tanto Etanol quanto Gasolina, ou uma mistura dos dois em qualquer proporção.

Os automóveis convencionais, tanto aqueles puramente a Gasolina, quanto os Flex-Fuel, fazem a conversão dos combustíveis líquidos em energia mecânica e cinética, através de motores de combustão interna. São veículos extremamente ineficientes, uma vez que apenas entre 16-17% da energia química contida no combustível é utilizada para movimentar o veículo — no caso do Ciclo Otto, ignição por centelha. Considerando-se que parte da energia é dissipada por: (i) atrito das partes móveis; (ii) perdas aerodinâmicas que ocorrem quando do bombeamento do ar pelo motor; e (iii) perdas na forma de calor, mais de 60% da energia do combustível se perde neste tipo de motor (Petrobras, 2002).

O modelo Ford T, produzido desde 1908 até 1927, foi o primeiro veículo comercial de combustível flexível (Hunt, 1981). O automóvel era fabricado com um carburador de

injeção ajustável que permitia o uso de Gasolina, Etanol ou uma mistura de ambos. Outros fabricantes americanos de veículos também ofereceram motores para operar com Etanol. Henry Ford advogou pelo uso do Etanol como combustível para os automóveis ainda durante a época da Lei Seca. Porém, o combustível que prevaleceu foi a Gasolina devido ao baixo custo do petróleo, até a crise do petróleo de 1973, que resultou em preços altos e desabastecimento de Gasolina em vários países, criando assim consciência sobre os perigos da dependência do petróleo. Posteriormente, o uso do Etanol foi estimulado com o objetivo de melhorar a qualidade do ar (Petrobras, 2002).

A crise do petróleo abriu uma nova oportunidade tanto para o Etanol combustível, como para outros combustíveis alternativos, como o metanol combustível, os combustíveis gaseificados como o gás natural veicular (GNV) e o gás liquefeito de petróleo (GLP), e também para as células combustíveis de hidrogênio. O Etanol, o metanol e o gás natural veicular (GNV) são os três combustíveis alternativos que receberam maior apoio governamental, permitindo assim o desenvolvimento de tecnologias, veículos e adaptações comercialmente viáveis em vários países do mundo (Petrobras, 2002).

O desenvolvimento de combustíveis líquidos teve preferência sobre os gasosos, não apenas porque têm maior densidade de energia (quantidade de energia por volume) como também porque são mais compatíveis com os sistemas existentes de distribuição de combustível e os motores convencionais. Ou seja, permitem maior aproveitamento da tecnologia veicular e da infraestrutura existentes (Petrobras, 2002).

Nos EEUU, a Califórnia foi o estado que liderou a busca por alternativas sustentáveis, com particular interesse no metanol. Em 1981, a Ford entregou 40 veículos Escort que funcionavam com metanol puro (M100) ao Condado de Los Angeles. Entretanto, apenas quatro postos de abastecimento foram habilitados (Petrobras, 2002).

O maior desafio para o desenvolvimento da tecnologia de veículos com Etanol como combustível foi confeccionar os materiais que proporcionassem uma operação mais eficiente e segura dos motores. O metanol foi um desafio ainda maior que o Etanol, mas, a experiência prévia do Brasil na produção de veículos que utilizavam Etanol puro como combustível, foi transferida ao metanol. O êxito da pequena frota experimental de

veículos M100 levou o estado da Califórnia a solicitar mais veículos, principalmente para a frota estatal. Em 1983, a Ford construiu 582 veículos M100, dos quais 501 foram para a Califórnia e o restante para Nova Zelândia, Suécia, Noruega, Reino Unido e Canadá (Nichols, 2003).

Desde a segunda metade da década de 70, e como resposta à primeira crise do petróleo, o governo brasileiro implementou o Programa Proálcool, uma iniciativa de alcance nacional financiada pelo governo visando uma redução progressiva de todos os veículos que utilizavam combustíveis derivados de petróleo e incentivando a substituição da Gasolina pelo Etanol produzido a partir da Cana-de-Açúcar. A primeira medida foi estabelecer a mistura de Etanol Anidro com a Gasolina convencional, a chamada Gasolina C. Esta mistura é utilizada desde então, e o conteúdo de Etanol está determinado por lei entre 18% e 25% (ou E-18 e E-25), estando agora em vigência (desde novembro de 2013) a mistura E-25. Em Julho de 1979 e como resposta à segunda crise do petróleo, foi fabricado o primeiro veículo com combustível de Etanol puro (Etanol Hidratado), o Fiat 147 (Petrobras, 2002).

O governo brasileiro impulsionou a indústria do Etanol como combustível mediante três medidas importantes: compras garantidas do Etanol produzido pela Petrobras; empréstimos com juros subsidiados para as empresas do setor agroindustrial de Etanol; e preços fixos para a Gasolina e o Etanol. Depois de alcançar uma frota de quase nove milhões de veículos operando com Etanol puro, ao final dos anos 80, o uso de veículos E-100 começou a diminuir bruscamente devido ao aumento dos preços do Açúcar, que provocou a escassez do Etanol. Além disso, o contrachoque do petróleo, em 1986, reduziu os preços do petróleo no mercado internacional (Petrobras, 2002).

No que tange aos veículos bi-combustíveis, o VW Gol 1.6 Total Flex modelo 2003 foi o primeiro veículo de combustível flex produzido e comercializado no Brasil, com capacidade para operar com qualquer mistura de Gasolina e Etanol.

Em termos ambientais, através de simulações de Melo (2012) sobre o consumo de veículos Flex-Fuel observou-se que o Etanol Hidratado reduziu Hidrocarbonetos Totais (THC) e Monóxido de Carbono (CO) – um dos poluentes primários, que afeta

diretamente a saúde das pessoas -, mas elevou as emissões de Dióxido de Carbono (CO₂) – um dos gases causadores do efeito estufa -, aldeídos e resíduos de Etanol não queimados (T.C. Melo et al., 2012).

5.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS

Um veículo elétrico (EV) usa um ou mais motores elétricos para tração. Os três principais tipos de veículos elétricos existentes são: (i) aqueles que estão diretamente ligados a uma fonte de eletricidade externa; (ii) aqueles que são alimentados por eletricidade armazenada originalmente de uma fonte externa; e (iii) aqueles que são alimentados por um gerador elétrico a bordo, como um motor de combustão interna (um veículo elétrico híbrido) ou uma célula de combustível de hidrogênio.

Durante as últimas décadas, o impacto ambiental da infraestrutura de transporte à base de petróleo, juntamente com o pico dos preços do petróleo, levou a um interesse renovado em uma infra-estrutura baseada no transporte elétrico. Os veículos elétricos (em inglês, Electric Vehicles ou EV) diferem dos veículos movidos a combustíveis fósseis porque a origem da energia não é necessariamente proveniente de uma fonte primária fóssil, mas de uma ampla variedade de fontes, incluindo a energia nuclear e fontes renováveis, como a energia das marés, solar, eólica ou qualquer combinação dessas. Além disso, os EVs possuem a vantagem de permitir a frenagem regenerativa (usada para recarregar as baterias do veículo) e a capacidade de trocar energia com a rede elétrica, permitindo a redução dos picos da curva de carga.

5.2.1 HÍBRIDOS

O princípio de funcionamento dos automóveis híbridos é bem diferente dos automóveis convencionais. Os híbridos utilizam um motor elétrico movido pela energia armazenada em baterias, além do motor de combustão interna. Há basicamente três tipos de sistemas nos automóveis híbridos comercializados atualmente (Baran, 2012):

- i) O sistema híbrido em série, em que um motor de combustão interna aciona um gerador que alimenta o motor elétrico;

- ii) O sistema híbrido em paralelo, em que o motor de combustão interna é auxiliado pelo motor elétrico nas situações que exijam mais potência; e
- iii) O sistema misto, em que dois motores elétricos atuam, sendo um em série e outro em paralelo ao MCI (Motor de Combustão Interna).

O primeiro sistema apresenta um modo de controle que estabelece a demanda de energia a ser fornecida pelo gerador como um percentual da carga em regime permanente, com a demanda restante e os transitórios sendo supridos pelo banco de baterias. A configuração de veículo híbrido em série possui como principal vantagem a possibilidade de se operar com o motor a combustão interna em um ponto de operação otimizado, contribuindo para maior economia de combustível.

Outra vantagem é que não há conexões mecânicas entre o motor de combustão interna e as rodas (I.Taymaz & M. Benli, 2014). Todavia, o sistema híbrido em série possui baixo rendimento para altas rotações, sendo indicado para veículos de grandes portes, como, por exemplo, ônibus (Borba, 2012).

O segundo tipo é o sistema híbrido paralelo, em que o motor de combustão interna e o motor elétrico atuam de forma independente no acionamento das rodas do veículo, e o regime de funcionamento destas duas fontes de potência varia segundo a solicitação de carga do veículo, ou seja, nos veículos híbridos em paralelo, os dois sistemas, o elétrico e a combustão interna, podem entregar energia diretamente ao eixo do veículo, conjuntamente ou de forma independente, conforme as solicitações de carga e/ou tipo de percurso. De modo geral, a fonte principal do sistema é o motor de combustão interna e o este tipo de motorização usa o motor elétrico enquanto houver carga na bateria e durante percursos em baixa velocidade. O Toyota Prius, por exemplo, é um híbrido paralelo e, por isso, é mais econômico na cidade (quando usa o motor elétrico) do que na estrada (quando é necessário usar o MCI, o motor elétrico é usado somente para auxiliar na aceleração ou em subidas). Este tipo é bastante usado em automóveis de pequeno porte (Borba, 2012).

Neste sistema apresenta-se um sistema mecânico mais complexo, sendo maiores as exigências também no sistema de controle, comparando-os à topologia do modelo

híbrido em série. Para os veículos híbridos em paralelo, as vantagens apresentadas são a não necessidade de um gerador e menor dimensionamento do conjunto motor de combustão interna/motor elétrico. O motor elétrico pode funcionar como gerador para carregar a bateria, quer em frenagem regenerativa quer quando a potência fornecida pelo motor de combustão interna é superior à necessária à tração. Mas o motor de combustão interna funciona em ciclos similares aos veículos convencionais, por isso, possui um consumo maior do que o sistema híbrido em série (I.Taymaz & M. Benli, 2014).

O terceiro é o sistema híbrido misto, que combina aspectos do sistema em série com o sistema paralelo, que tem como objetivo maximizar os benefícios de ambos. Este sistema permite fornecer energia para as rodas do veículo e gerar eletricidade simultaneamente, usando um gerador, diferentemente do que ocorre na configuração paralela simples. É possível usar somente o sistema elétrico, dependendo das condições de carga. Também é permitido que os dois motores atuem de forma simultânea (Borba, 2012).

Estes veículos são aproximadamente 260 kg mais pesados que os veículos convencionais, em virtude dos sistemas adicionais. Todos os veículos híbridos mistos são mais econômicos do que os veículos convencionais, embora utilizem quase a mesma energia. Alguns estudos indicam que as emissões de CO₂ são reduzidas em cerca de 30% por veículos elétricos híbridos mistos (I.Taymaz & M. Benli, 2014).

Nos três sistemas supracitados, as baterias são recarregadas também por um sistema de frenagem regenerativa, e o MCI é desligado quando o veículo fica parado no trânsito por muito tempo (Baran, 2012).

As maiores vantagens dos veículos híbridos elétricos são estender, de forma relevante, a autonomia do veículo entre duas a quatro vezes a capacidade original de um veículo elétrico e permitir o reabastecimento tradicional por Gasolina (I.Taymaz & M. Benli, 2014).

O veículo elétrico híbrido é uma solução que se encontra comercialmente disponível e permite economias de combustível entre 10 e 50%, quando comparado com o seu equivalente convencional com motor de combustão interna. As emissões de dióxido de carbono (CO₂) são reduzidas em até 50% e as emissões de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NO_x) são reduzidas em até 90% .

De uma perspectiva de saúde pública, os poluentes das usinas de geração de energia elétrica são menos ameaçadores que as emissões de um veículo, pois as últimas são liberadas nas proximidades dos grandes centros urbanos, com menor controle ambiental. Se utilizado apenas o modo de operação elétrico, os veículos híbridos não produzem emissões diretamente. Emissões indiretas são provenientes do tipo de geração, transmissão e distribuição dos sistemas de energia elétrica. Entretanto, estas emissões representam uma porcentagem muito menor do que aquelas advindas de veículos operando apenas com combustíveis derivados de petróleo (S.Amjadet al., 2010).

O veículo híbrido plug-in (em inglês, Plug-in Hybrid Electric Vehicle ou PHEV) difere de um veículo híbrido convencional, pois possui uma bateria com maior capacidade de armazenamento, podendo ser carregada diretamente da rede elétrica por meio de uma tomada (plug). Por outro lado, os veículos híbridos plug-in diferem de um veículo elétrico puro, pois ele usa outras fontes de energia além de energia elétrica e a bateria normalmente tem uma capacidade menor.

Como comparação aos demais EV híbridos, um PHEV oferece redução de 25-55% em NO_x, redução de 35-65% nos gases de efeito estufa e redução de 40-80% no consumo de Gasolina. Além disso, uma das grandes vantagens dos PHEVs é que a energia usada para movimentar o veículo pode vir de qualquer combinação de fontes energéticas, incluindo carvão, gás natural, nuclear, óleo ou fontes renováveis, tais como hídrica, solar ou eólica (S.Amjadet al., 2010).

5.2.2 BEV

Os veículos elétricos a bateria (em inglês, Battery Electric Vehicle ou BEV) possuem como única fonte de energia as baterias para acionar um ou mais motores elétricos. Tipicamente, um único motor elétrico está ligado ao eixo dianteiro através de uma caixa de marchas com apenas um ou dois estágios, mas existem várias outras possíveis variações nas arquiteturas do sistema propulsor. Uma variação significativa é a utilização de quatro pequenos motores em cada roda, em vez de um único motor de acionamento.

Uma importante vantagem dos carros elétricos é a menor complexidade do mecanismo de funcionamento, em comparação com os automóveis com MCI, sem a existência, por exemplo, de caixa de marchas, motor de arranque e de equipamentos do sistema de exaustão como o escapamento e catalisador, e até mesmo de sistema de arrefecimento como radiador, bomba de água, entre outros elementos (Borba, 2012).

Outra importante vantagem comparativamente ao veículo a MCI é o alto rendimento do motor elétrico, usualmente superior a 90%, o que, juntamente com a frenagem regenerativa, tornam a eficiência dos BEVs maior do que as outras categorias de veículos. Cabe ainda destacar o baixo nível de ruído do e a pouca vibração veículo (Borba, 2012).

Para auxiliar no sistema de regeneração (onde o motor elétrico passa a atuar como gerador elétrico nos momentos de frenagem ou desaceleração), podem-se utilizar ultra-capacitores com a finalidade de absorver rapidamente a energia regenerada, já que nem sempre uma bateria consegue fazê-lo em curtos períodos de tempo. Os ultra-capacitores podem ainda disponibilizar esta energia de forma rápida, auxiliando numa rápida aceleração do veículo. Todavia, as principais desvantagens são os custos elevados, a baixa autonomia e o tempo de recarga da bateria (Baran, 2012). Para aumentar a autonomia do veículo existe a necessidade de utilizar grandes bancos de baterias ocasionando grande espaço ocupado e excesso de peso.

O problema das baterias dos veículos elétricos está associado às deficiências do armazenamento eletroquímico de energia. Em relação aos combustíveis convencionais, a bateria dos BEVs possui baixa energia específica em termos de volume e massa, e baixa taxa de reabastecimento/recarga (Bradley e Frank, 2009). Para superar essa questão no curto prazo, os veículos plug-in utilizam tanto o armazenamento eletroquímico de energia quanto combustíveis convencionais. Entretanto, os PHEVs são vistos como uma tecnologia intermediária, que tende a desaparecer no longo prazo, em função dos avanços nos sistemas de armazenamento eletroquímico. Ou seja, os PHEVs são mais promissores para melhorar a sustentabilidade de curto prazo do setor de transportes (Bradley e Frank, 2009), enquanto que os BEVs possivelmente responderão por um novo quadro estrutural, de longo prazo.

Outra questão associada ao uso de eletricidade pelo setor de transportes está relacionada ao aumento da demanda elétrica e a conseqüente necessidade de aumento da capacidade de geração. Mais do que isso, a penetração dos veículos elétricos no sistema elétrico pode ocasionar sobrecarga em transformadores e linhas de distribuição e, principalmente, dependendo do momento e forma da recarga, um sobrepico no sistema elétrico (Kiviluoma e Meibom, 2011; Green II et al., 2011).

Por outro lado, as vantagens dos BEVs e PHEVs em relação aos veículos convencionais incluem a não (ou baixa) produção direta de gases de exaustão, operação com pouco ruído e, freqüentemente, possuem maior eficiência do tanque à roda (tank-to-wheel) devido à maior eficiência do motor elétrico. Mais do que isso, a existência de uma tomada para carregar tanto os veículos elétricos como os PHEVs abre um leque de opções para modificações no setor energético. Os possíveis benefícios mais amplos envolvidos com a utilização de eletricidade pelo sistema de transportes vão desde a redução da dependência do petróleo pelo setor, incluindo redução das emissões de poluentes locais e dióxido de carbono, até possíveis melhorias na geração de energia elétrica (Bradley e Frank, 2009).

Tendo em vista que não há disponível uma rede consolidada de abastecimento para os veículos elétricos, torna-se fundamental considerar também os custos indiretos do veículo, associado à infraestrutura. O aumento do custo de aquisição dos veículos BEVs

e PHEVs em comparação com um automóvel convencional está principalmente relacionado com o custo da bateria. Embora a potência e a energia por unidade de volume da bateria tenham melhorado ao longo dos últimos dez anos, as baterias continuam caras e grandes. É de se esperar que a fabricação em escala resulte em reduções de custo, mas a extensão destas reduções dependerá do volume de produção. Ademais, deve-se ter em mente que os custos de produção da bateria são sensíveis aos preços das commodities dos metais constituintes, que introduzem incerteza adicional em projeções de longo prazo (Kiviluoma e Meibom, 2011; Green II et al., 2011).

Existem basicamente duas categorias de baterias. As baterias primárias são aquelas que não podem ser recarregadas. Produzem a sua energia a partir de uma reação eletroquímica, geralmente irreversível, o que as inutiliza. As baterias secundárias são aquelas que podem ser recarregadas por uma fonte de alimentação externa. Uma bateria secundária pode ser carregada e descarregada muitas vezes. As principais tecnologias de baterias recarregáveis resumem-se a baterias de chumbo-ácidas (Pb), níquel cádmio (Ni-Cd), hidreto metálico de níquel (Ni-Mh) e íon de lítio (Li-ion) (Borba, 2012).

Segundo (IEA, 2011), a energia limpa advinda de eletricidade possui três grandes barreiras: o alto custo dos veículos, um baixo nível de aceitação pelos consumidores e a falta de pontos de recargas e estações de reabastecimento. As propostas para a expansão deste tipo de veículo se direcionam para reduzir estas barreiras, como redução dos custos das baterias, expansão dos pontos de reabastecimento e apoio governamental para viabilização dos veículos elétricos.

O principal concorrente para o armazenamento eletroquímico é a utilização do hidrogênio como vetor energético, que será detalhado na seção seguinte.

5.3 HIDROGÊNIO

Um veículo a hidrogênio usa este energético como força motriz, através da sua conversão. As máquinas dos referidos veículos convertem a energia química de hidrogênio em energia mecânica pela queima de hidrogênio num motor de combustão

interna ou por reação do hidrogênio com o oxigênio numa célula de combustível para acionar os motores elétricos.

O hidrogênio combustível não ocorre naturalmente na Terra. É frequentemente produzido a partir do metano ou outros combustíveis fósseis, mas pode ser produzido usando outras fontes (como a eólica, solar ou nuclear).

Embora tecnicamente viável, todo o processo é bem menos eficiente do que a rota de bateria de íon de lítio, a tecnologia mais utilizada em veículos elétricos, e com questões de segurança de manipulação de um gás inodoro e altamente explosivo. Outro aspecto negativo do hidrogênio é a baixa eficiência dos processos de produção deste combustível e a falta de infraestrutura para seu transporte e armazenamento, enquanto a eletricidade se beneficia de uma infraestrutura consolidada em grandes centros urbanos.

As consequências ambientais da produção de hidrogênio a partir de fontes de energia fósseis incluem a emissão de gases de efeito estufa. Entretanto, estudos comparando as consequências ambientais da produção de hidrogênio e sua utilização em veículos movidos a células de combustível sobre o refino de petróleo e a combustão em motores de automóveis convencionais trazem uma redução líquida dos efeitos sobre a camada de ozônio e na geração de gases de efeito estufa em favor de hidrogênio. A produção de hidrogênio utilizando fontes de energia renováveis não iria criar tais emissões ou, caso fosse utilizada a biomassa, as emissões líquidas seriam próximas a zero. Além disso, os veículos a hidrogênio possuem uma eficiência três vezes superior aos motores de combustão interna (Schultz, M.G. et al., 2003).

6. PROPOSTA METODOLÓGICA

Este trabalho teve como principal motivação a necessidade de compreensão dos impactos da evolução da participação dos veículos Flex-Fuel sobre o consumo de combustíveis por veículos de passageiros relacionados ao Ciclo Otto no Brasil e outros segmentos relacionados (balança comercial brasileira e política nacional de biocombustíveis, por exemplo) deste novo tipo de consumo, que é flexível.

A relevância deste trabalho foi a quantificação do impacto da introdução da tecnologia veicular Flex-Fuel, que flexibiliza o consumo de combustíveis, podendo escolher entre Gasolina C e Etanol Hidratado, através da utilização de uma técnica econométrica composta entre a Cointegração, normalmente vista em vários estudos de demanda de combustíveis, com outra técnica de espaço de estado, com a utilização do algoritmo do Filtro de Kalman.

Abaixo realizamos considerações que nortearam as especificações do modelo que será proposto tendo como referência toda a discussão realizada nos capítulos anteriores e a proposição de séries temporais para utilização no desenvolvimento do modelo de referência deste estudo:

1. As variáveis de consumo, preços e massa salarial – *proxy* da renda - estão de acordo com estudos anteriores realizados no Brasil e no exterior e são apresentadas no gráfico 11 (Bentzen 1994; Eltony e Al Mutairi 1995; Ramanathan 1999; Alves Bueno e 2003; Polemis 2006; Schünemann 2007; e Santos 2013).
2. A variável "preço do GNV" não foi considerada devido às peculiaridades do GNV (ver a Introdução) e também por causa de sua importância relativamente pequena no mercado de combustíveis para os veículos do Ciclo Otto (menos de 5% do total).
3. O modelo emprega uma variável relacionada à renda, que chamamos de Massa, (multiplicação dos salários reais pela população ocupada) e não o tamanho da frota que, embora seja um indicador bem conhecido e utilizado com frequência, é baseado em uma pesquisa feita há mais de 25 anos, baseada na PNAD de 1988 (Mattos & Correia,

1996) e não reflete as flutuações de curto prazo no consumo de combustível - em especial para o mês de dezembro -, que são capturadas pela variável de Massa. Além disso, os dados de salários médios reais mensais e população ocupada são resultados de pesquisas atualizadas regularmente pelo IBGE. Portanto, eles são mais adequados para a modelagem desenvolvida do que um modelo baseado em uma estimação de uma variável do tamanho da frota.

4. Os níveis de renda da população brasileira são consideravelmente mais baixos do que os dos países desenvolvidos, o que implica comparativamente numa maior elasticidade-renda da Gasolina C no Brasil.

5. As variáveis instrumentais não foram utilizadas no modelo, porque o nosso principal objetivo foi avaliar o comportamento ao longo do tempo da elasticidade cruzada da razão de preços entre Etanol Hidratado e Gasolina C, bem como o seu impacto sobre o consumo de Gasolina C. As variáveis instrumentais, provavelmente, explicariam as mudanças de consumo, mas não a evolução da elasticidade cruzada de preços. Daí a nossa decisão de usar a abordagem TVP-MCE.

6. Os efeitos das variações de preços globais de combustíveis no mercado internacional estão presentes nos preços da Gasolina C, Etanol Hidratado e também de Açúcar. Em particular, uma vez que o Açúcar e o Etanol são substitutos quase perfeitos em termos de produtos da Cana de Açúcar, as suas produções totais variam de acordo com os seus preços relativos nos mercados internacionais. Assim, a influência dos mercados mundiais de combustível está (indiretamente) presente no modelo.

7. No entanto, ao longo dos últimos 5 anos, o preço doméstico da Gasolina tem evoluído em ritmo mais lento do que os preços do Etanol Hidratado e do Açúcar, como resultado da política de preços da Petrobras e do governo brasileiro, que é o principal player no mercado de combustíveis no Brasil. A Petrobras tem procurado proteger este mercado da volatilidade internacional, com vistas a reduzir o impacto sobre a inflação, o que está em contraste com o que acontece em outros países, como por exemplo os EUA, onde os preços nos postos de Gasolina são fortemente influenciados pelas flutuações diárias no preço internacional do petróleo. Tal política causa uma disparidade acentuada

entre as flutuações dos preços internacionais e suas contrapartes brasileiras. Por esta razão, decidimos não incluir, explicitamente, indicadores dos preços internacionais no modelo.

O modelo linear proposto como referência inicial para esta tese que será desenvolvido até a especificação de MVCE e posteriormente será confrontado no Anexo com modelos alternativos é o seguinte:

$$Cgc_t = \beta_1 + \beta_2 Subst_t + \beta_3 Massa_t + u_t \quad \text{equação 1}$$

Onde:

- Cgc_t é o consumo de Gasolina C, em m³, no tempo t ;
- $Subst_t$ é a razão de preço entre Etanol Hidratado e o preço da Gasolina C, no tempo t ;
- $Massa_t$ é o produto dos salários médios, em termos reais, pela população ocupada, em moeda corrente nacional, no tempo t ;
- u_t é o vetor de erro, no tempo t .

Na figura 18 apresentou-se a evolução das variáveis que compõem o modelo proposto na equação 1. Nessa figura são usados números-índices devido a que as variáveis em análise possuem distintas unidades e objetivou-se uma mesma base de comparação para uma avaliação coerente e robusta. Este gráfico nos leva à consideração que posteriormente será confirmada através dos testes de Cointegração, através da Metodologia de Johansen, de que estas variáveis se integram. Apesar de visualmente não parecer, principalmente porque nos últimos períodos, há um descolamento entre as três variáveis propostas no modelo.

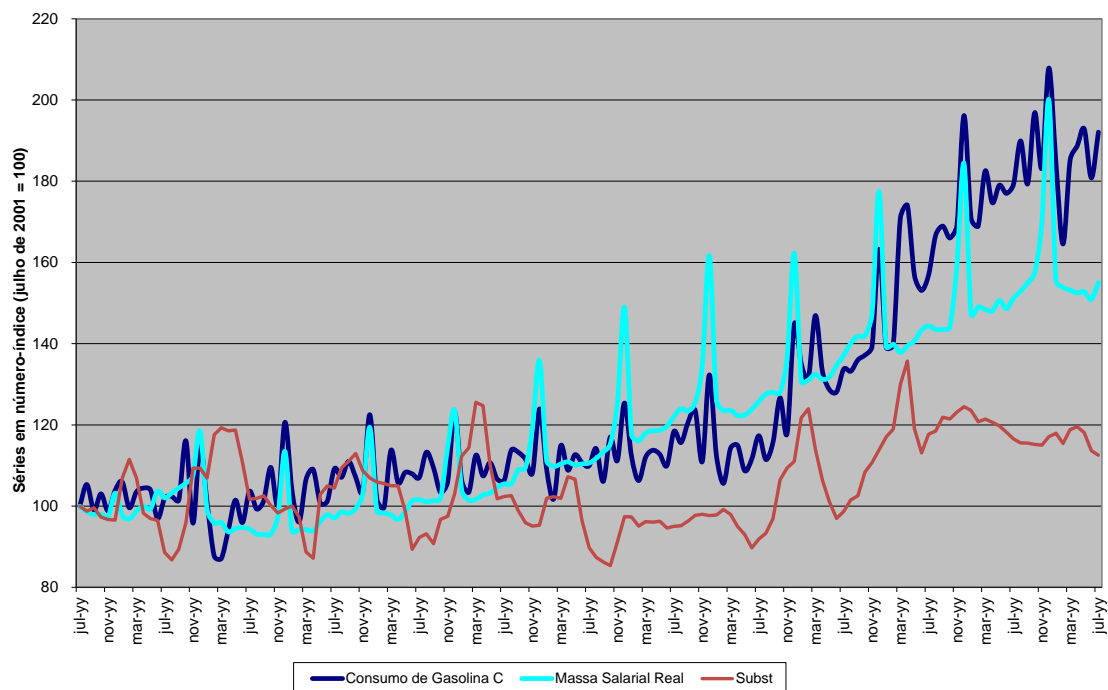


Figura 18: Comparativo entre Consumo de Gasolina C, Massa Salarial Real e Subst (Razão entre os preços do Etanol Hidratado e Gasolina C) em números-índices:

Julho de 2001 = 100

Fonte: ANP e IBGE

E o mesmo modelo em VAR (Vetor Auto-Regressivo) que também precede toda a discussão a posteriori que será desenvolvida, mas já evolui em relação ao modelo linear proposto na equação anterior.

$$Cgc_t = \beta_1 + \beta_2 Subst_{t-1} + \beta_3 Massa_{t-1} + \beta_4 Cgc_{t-1} + u_t \quad \text{equação 2}$$

No presente trabalho será utilizada a metodologia de Johansen (1988), seguindo a descrição de Enders (2004).

Além disso, a metodologia de Johansen permite analisar o parâmetro da velocidade de ajustamento das relações entre o curto e o longo prazo das séries para verificar a relação de causalidade entre as variáveis do modelo, foi utilizado o Teste de Causalidade de Granger (Wooldridge, 2002), que procura determinar o sentido causal entre duas

variáveis, estipulando que X "Granger-causa" Y se valores passados de X ajudam a prever o valor presente de Y.

O objetivo da análise de Causalidade de Granger foi a busca pela compreensão dos efeitos de uma variável sobre a outra e com isso reforçar a questão da robustez deste modelo frente aos modelos alternativos. A obtenção de uma relação evidente de causalidade entre variáveis proporciona uma segurança no desenvolvimento do modelo, visando a superação das limitações do uso de simples correlações entre variáveis. Essa distinção é de fundamental importância porque correlação não implica por si só em causalidade (relação de causa e efeito).

Considere o vetor autoregressivo abaixo:

$$y_t = a(L)y_{t-1} + b(L)x_{t-1} + \delta_t \quad \text{equação 3}$$

$$x_t = c(L)y_{t-1} + d(L)x_{t-1} + v_t \quad \text{equação 4}$$

A definição acima implica que x_t Granger-causa y_t , se $b(L) \neq 0$. A forma mais simples de testar causalidade de Granger é através do teste F. A não rejeição da hipótese nula implica que y não Granger causa x .

$$x_t = \delta + \alpha_1 x_{t-1} + \alpha_2 x_{t-2} + \dots + \alpha_p x_{t-p} + \beta_1 y_{t-1} + \beta_2 y_{t-2} + \dots + \beta_p y_{t-p} + u_t \quad \text{equação 5}$$

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_p = 0$$

O conceito de causalidade proposto por Granger é motivado pela intuição de que causa deve vir primeiro que efeito. Assim, se x causa y , então x deve preceder y . Entretanto, esse conceito de causalidade não funciona tão bem com dados econômicos e financeiros. Causalidade de Granger não é exatamente causalidade num sentido mais fundamental da palavra. Causalidade no sentido de Granger reflete causalidade preditiva, e não causa e efeito.

Em seguida, foi analisada a possibilidade de quebra estrutural na série de consumo de Gasolina C utilizando as técnicas de Chow (Chow, 1960) e o Filtro de Kalman (Kalman, 1960), por intermédio da metodologia proposta por Hall (Hall, 1993), que será detalhada a partir da equação 6.

Na abordagem desta tese, utiliza-se um Modelo de Correção de Erros com variação dos parâmetros ao longo do tempo (TVP-MCE), que permite analisar tanto a relação de longo prazo entre as variáveis como a dinâmica de curto prazo de forma flexível (Carlos, 2009). Duas equações são estimadas simultaneamente, pelo algoritmo de espaço de estado do Filtro de Kalman: a equação de observação/correção e a equação de estado. Essa última mostra a evolução ao longo do tempo dos parâmetros da primeira equação.

O Filtro de Kalman é um procedimento recursivo para o cálculo do estimador ideal do vetor de estado dado todas as informações disponíveis no momento t (Arisoy & Ozturk, 2014). A estimativa recursiva do parâmetro desconhecido do vetor a partir da informação atualizada disponível em cada instante de tempo t, é feito através das equações do Filtro de Kalman. A representação de espaço de estado permite que as variáveis não observadas sejam incluídas e estimadas conjuntamente com as variáveis observadas (Durbin & Koopman, 2001).

A especificação do modelo de Vetor de Correção de Erros (MVCE), que se configura na equação de observação da nossa metodologia de espaço de estado é a seguinte:

$$\Delta Cgc_t = \beta_1 + \beta_2 \Delta Subst_{t-1} + \beta_3 \Delta Massa_{t-1} + \alpha (Cgc_{t-1} + sv1_t Subst_{t-1} + \beta_4 Massa_{t-1} + \beta_5) + u_t$$

equação 6

Equação de Estado do modelo de espaço de estado:

$$sv1_t = Tsv1_{t-1} + v_t$$

equação 7

Onde:

- Cgc_t é o consumo de Gasolina C, em m^3 , no tempo t ;
- α é o coeficiente de ajuste entre o curto e o longo prazo;
- $Subst_t$ é a razão de preço entre Etanol Hidratado e o preço da Gasolina C, no tempo t ;
- $Massa_t$ é o produto dos salários médios, em termos reais, pela população ocupada, em moeda corrente nacional, no tempo t ;
- $\Delta Subst_t$ é a primeira diferença da série $Subst_t$;
- $\Delta Massa_t$ é a primeira diferença da série $Massa_t$;
- $sv1_t$ é o parâmetro (variável) da razão entre o preço do Etanol Hidratado e da Gasolina C, no tempo t ; e
- v_t e u_t são os vetores de erro, no tempo t .

As estimativas do modelo - apresentadas na próxima seção - seguirão o procedimento passo-a-passo sugerido por Carlos et al. (2009), com adaptações para a utilização do Filtro de Kalman, como descrito abaixo:

- 1) Verificar se as séries temporais são estacionárias por meio de testes de raiz unitária, em especial, o teste ADF;
- 2) Se as séries são não-estacionárias da mesma ordem, utilizar a abordagem de Cointegração de Johansen para o Vetor de Correção de Erros (VEC), como segue:
 - a) Especificar um modelo VAR com as variáveis escolhidas, definindo o número ótimo de defasagens com a ajuda de um critério de informações, como o Máximo Auto-Valor, apresentada na equação 7, em detrimento da Estatística do Traço, apresentada na equação 6, em virtude da sugestão de Enders (2004) comentando que a estatística do

Máximo Auto-Valor é preferível porque sua hipótese nula é específica, ao contrário da estatística do Traço que tem uma alternativa não especificada;

Assim, a estatística do traço é definida pelas seguintes equações:

$$\lambda_{traces}(r) = -T \sum_{i=r+1}^n \ln(1 - \hat{\lambda}_i) \quad \text{equação 8}$$

Onde:

A estatística do traço testa a hipótese nula de r relações de cointegração contra a hipótese alternativa de k relações de cointegração, onde k é o número de variáveis endógenas, para $r = 0, 1, \dots, k - 1$.

- Hipótese nula: o número de equações de cointegração $\leq r$
- Hipótese alternativa: o número de equações de cointegração $> r$

Já a estatística do máximo auto-valor é definida por:

$$\lambda_{max}(r, r + 1) = -T \ln(1 - \hat{\lambda}_{r+1}) \quad \text{equação 9}$$

Onde:

- Hipótese nula: o número de equações de cointegração $= r$
- Hipótese alternativa: o número de equações de cointegração $= r + 1$

b) Usar essas defasagens para fazer o teste de Cointegração;

c) Se as variáveis integradas de ordem 1 - ou $I(1)$ variáveis - têm uma relação de cointegração, então seus respectivos parâmetros correspondem aos Parâmetros de longo prazo;

d) Para encontrar os Parâmetros de curto prazo, especificar um modelo de correção de erros (esses parâmetros, no entanto, são por hipótese constantes ao longo do tempo).

3) Para testar a existência de causalidade preditiva entre as variáveis independentes e a variável dependente, utilizar o Teste de Causalidade de Granger (Wooldridge, 2002);

4) Para testar a existência de quebra estrutural nos parâmetros da equação VECM, utilizar o teste de Chow (Chow, 1960);

O teste de Chow é um procedimento realizado para verificar a quebra numa tendência estável de uma série histórica. Aplica-se o teste F nos coeficientes das dummies, seguindo a equação 8 abaixo

$$y_t = \alpha + \beta x_t + \gamma_0 D_t(\tau) \cdot \alpha + \gamma_1 D_t(\tau) \cdot x_t + \varepsilon_t \quad \text{equação 10}$$

$$H_0 = \gamma_0 = \gamma_1 = 0$$

$$H_1 = \gamma_0 \neq 0 \text{ ou } \gamma_1 \neq 0$$

5) Se houver uma ruptura do comportamento da série, a fim de analisar a dinâmica da elasticidade de curto prazo do parâmetro correspondente, especificar o seguinte modelo de espaço estado:

(i) definir a equação VECM como a equação das observações/correções de um Filtro de Kalman; e

(ii) definir a equação de estado, tomando o parâmetro do VECM como variável dependente e seu valor defasado como a variável independente;

6) Para verificar a precisão das previsões do modelo, usar o MAPE (Erro Médio Percentual Absoluto) para medir desvios fora da amostra entre as previsões e os valores realizados.

7) Análise de resíduos

Para investigar a adequabilidade de um modelo de regressão com base nos resíduos.

A ideia básica da análise dos resíduos é que, se o modelo for apropriado, os resíduos devem refletir as propriedades impostas pelo termo de erro do modelo. Tais suposições são: 1) Os erros tenham média e variância constante, ou sejam, sejam tenham distribuição normal; 2) Independentes entre si; e 3) Não existam “outliers” relevantes.

7. RESULTADOS

7.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste Capítulo, vamos apresentar os resultados obtidos com a aplicação do modelo descrito no Capítulo anterior e no Anexo estão dois modelos alternativos ao utilizado como referência nesta tese, devido a sua maior robustez obtida no teste SIC (Schwarz Information Criteria) que compara as diversas modelagens. As Tabelas 8 e 9 apresentam, respectivamente, os resultados dos testes de raiz unitária para as diversas variáveis analisadas e os resultados dos testes de cointegração (traço e máximo autovalor) entre as variáveis do modelo, com um nível de significância de 5%. Todos os testes e estimativas foram obtidas por meio do software EViews (EViews, 2014).

Pode ser visto a partir da tabela 8, que, com a exceção do preço do Etanol Hidratado, não é possível rejeitar a hipótese da existência de uma raiz unitária em qualquer série, portanto as séries são não estacionárias. A Tabela 9, por sua vez, indica que há apenas um vetor de cointegração entre as variáveis do modelo, ou seja, as séries possuem o mesmo grau de integração; em outras palavras, há uma relação de equilíbrio de longo prazo entre as variáveis (razão dos preços do Etanol Hidratado e da Gasolina C), massa salarial real mensal e o consumo de Gasolina C. Isso significa que é apropriado usar o método dos mínimos quadrados ordinário (OLS) para estimar os parâmetros das equações 6 e 7.

Tabela 8: Testes de raiz unitária nas variáveis (transformação logarítmica)

Variável	Defasagem Ótima	t-stat (Valores Críticos: 5%: -3.445877 1%: -4.032498)	Primeiras Diferenças	p-value
Consumo de Gasolina C	12	1.492819	0.0042	0.9993
Consumo de Etanol Hidratado	1	-1.569279	0.0000	0.4957
Consumo de GNV	13	-1.566802	0.1825	0.4966
Preço real da Gasolina C	1	-1.680278	0.0000	0.4391
Preço real do Etanol Hidratado	3	-4.885187	0.0000	0.0001
Massa Salarial Real	12	0.367067	0.0413	0.9809
Subst	6	-2.238794	0.0000	0.1937

Tabela 9: Resultados do teste de Cointegração de Johansen (equação 4)

Estatísticas do Traço e do Auto-Valor Máximo

Teste de Posto Irrestrito de Cointegração (Traço)				
Número de Equações de Cointegração	Auto-Valor	Estatística do Traço	0.05 Valor Crítico	Prob.
Nenhum	0.146325	36.16358	29.79707	0.0081
Pelo menos 1	0.093569	13.85664	15.49471	0.0870
Pelo menos 2	3.32E-05	0.004680	3.841466	0.9445
Estatística do Traço indica 1 eq. de cointegração ao nível de 5%.				
Teste de Posto Irrestrito de Cointegração (Auto-Valor máximo)				
Número de Equações de Cointegração	Auto-Valor	Estatística do Auto-Valor Máximo	0.05 Valor Crítico	Prob.
Nenhum	0.146325	22.30694	21.13162	0.0340
Pelo menos 1	0.093569	13.85196	14.26460	0.0580
Pelo menos 2	3.32E-05	0.004680	3.841466	0.9445
Estatística do Auto-Valor Máximo indica 1 eq. de cointegração ao nível de 5%.				

A defasagem ótima para a modelagem em VAR é de ordem 1, de acordo com o Teste de Wald de Exclusão de Defasagens, abaixo apresentado na Tabela 10, que colabora para a análise de robustez do modelo e sua posterior avaliação em termos de modelo MVCE combinando com a forma de Espaço de Estado, como proposto nesta tese.

Tabela 10: Teste de Wald de Exclusão de Defasagens (variáveis em logaritmos)

Defasagem 1	Consumo de Gasolina C	Massa Salarial Real	Subst	Variáveis em Conjunto
Defasagem 1	854,8953	668,0000	634,1400	1688,1400
Valor-p	[0.000000]	[0.000000]	[0.000000]	[0.000000]
Graus de Liberdade	3	3	3	9

Nas Tabelas 11 e 12 estão os parâmetros de longo e curto prazo para a equação 6, respectivamente.

Tabela 11: Parâmetros de Longo Prazo (equação 6)

Cgc_t	β_5	$Subst_{t-1}$	$Massa_{t-1}$
1.00000	2.533924	1.468786	0.774583
		[-5.83697]	[-5.73139]

Observação: Os números nos colchetes se referem às estatísticas-t dos parâmetros estimados.

Tabela 12: Parâmetros de Curto Prazo (equação 6)

ΔCgc_{t-1}	$\Delta Subst_{t-1}$	$\Delta Massa_{t-1}$	β_1	α
-0.733713	0.057497	0.343945	0.007712	-0.014033
[-7.66275]	[0.45873]	[3.75481]	[1.48576]	[-0.26289]

Observação: Os números nos colchetes se referem às estatísticas-t dos parâmetros estimados.

Os resultados dos parâmetros estimados para o curto e o longo prazo apresentaram os sinais teóricos esperados, conforme a literatura apresentada nesta tese. Foram também

estatisticamente significantes. A elasticidade-preço de longo prazo da variável $Subst_{t-1}$ foi positiva e superior a 1,46, o que significa que um aumento da razão entre o preço do Etanol Hidratado e da Gasolina C que leva a um aumento superior no consumo de Gasolina C. Da mesma forma, o coeficiente da variável massa salarial real indica que as alterações nesta variável afetam o consumo de Gasolina C no mesmo sentido, embora com menos intensidade do que as mudanças na elasticidade-preço.

O coeficiente de ajuste entre o curto e o longo prazo foi relativamente pequeno, indicando um ajuste lento entre os parâmetros de curto e longo prazo. Este resultado pode ser um reflexo da política de preços de combustível de longo prazo adotada no Brasil, que restringe a variação dos preços dos combustíveis (em especial para os combustíveis derivados de petróleo) para pequenos ajustes, mesmo frente a grandes oscilações no mercado internacional, especialmente desde 2007. O objetivo desta política, como dito acima, é proteger os consumidores domésticos dos efeitos da volatilidade dos preços internacionais e seus efeitos potencialmente inflacionários.

E, por fim, a análise de resíduos, apresentada na Figura 19 abaixo, nos mostra que os mesmos são estacionários através do teste de White de Heteroscedasticidade, apresentado na tabela 13. Estes resultados nos levam a acreditar que o modelo tenha robustez e é mais um indicativo de que as séries se integram e a equação resultante é integrada de ordem zero, obtido através do teste de Cointegração de Johansen, observado na Tabela 9.

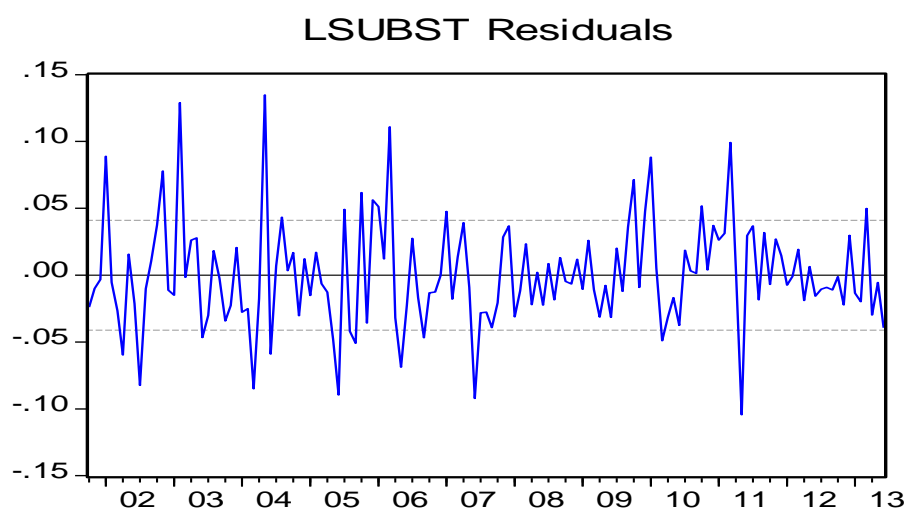
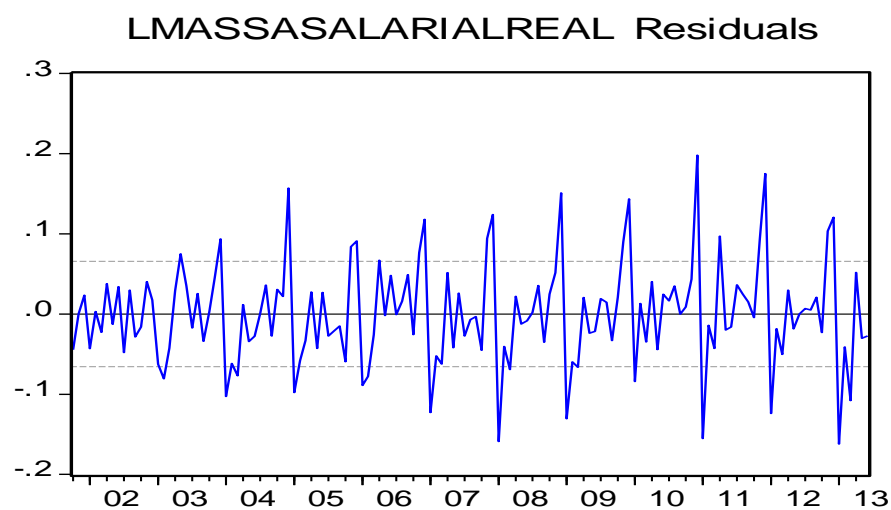
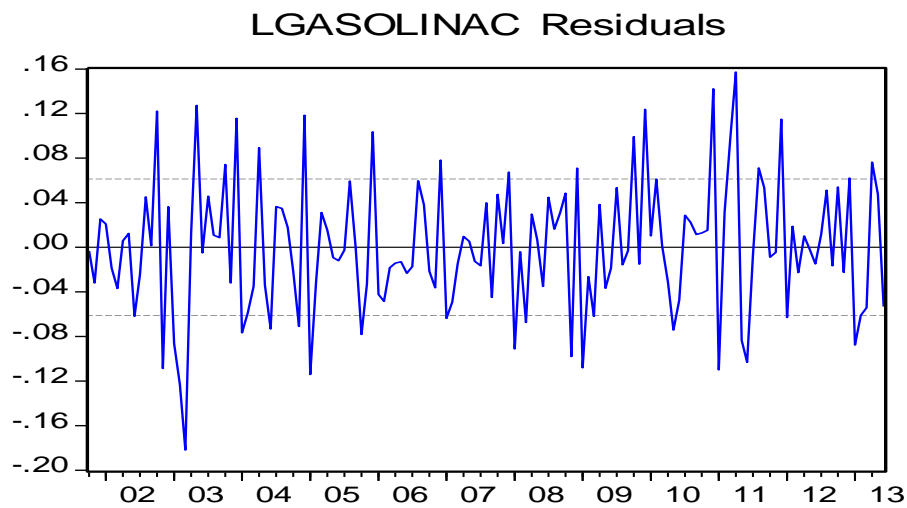


Figura 19: Resíduos das Variáveis do Modelo

Tabela 13: Teste de White de Heteroscedasticidade

Teste Conjunto das Variáveis		
Chi-Quadrado	Graus de Liberdade	Probabilidade
343,3151	210	0,0000

É possível perceber, nos resultados dos testes de Causalidade de Granger (Granger, 1969), estabelecidos na tabela 14, uma influência bi-direcional entre massa salarial real e o consumo da Gasolina C. Em outras palavras, essas duas variáveis Granger causam uma à outra, como se poderia esperar.

Tabela 14: Causalidade de Granger (equação 4)

Variável Dependente: $\Delta(\text{LGASOLINAC})$			
Exclusive	Chi-sq	df	Prob.
$\Delta(\text{LSUBST})$	1.064460	2	0.5873
$\Delta(\text{LMASSASALARIALREAL})$	26.25594	2	0.0000
Todos	26.85225	4	0.0000
Variável Dependente: $\Delta(\text{LSUBST})$			
Exclusive	Chi-sq	df	Prob.
$\Delta(\text{LGASOLINAC})$	3.870103	2	0.1444
$\Delta(\text{LMASSASALARIALREAL})$	0.709929	2	0.7012
Todos	5.183112	4	0.2690
Variável Dependente: $\Delta(\text{LMASSASALARIALREAL})$			
Exclusive	Chi-sq	df	Prob.
$\Delta(\text{LGASOLINAC})$	31.84895	2	0.0000
$\Delta(\text{LSUBST})$	0.662525	2	0.7180
Todos	32.03102	4	0.0000

Por outro lado, nem o preço de Etanol Hidratado, nem o preço da Gasolina C são Granger causados por um aumento na massa salarial real ou pelo aumento no volume de Gasolina C. A explicação para esta ocorrência pode ser a influência da oferta reduzida de Etanol Hidratado, devido à mudança do uso da Cana-de-Açúcar para a produção de Açúcar, dado que o preço de exportação deste último aumentou 109% (2008-11) em relação à média de preços comparáveis entre 2008 e 2011 (MAPA, 2012). Além disso, todos os problemas nas safras observados no período entre 2012 e 2013 também contribuíram para uma redução na disponibilidade de Etanol no mercado.

Pode ser visto na Figura 9, na Introdução, que o consumo de Gasolina C entre dezembro de 2009 e dezembro de 2013 aumentou cerca de 45%. Isto sugere uma possível

mudança nos valores dos parâmetros estimados para a equação que descreve o consumo de Gasolina C. Analisamos essa possível quebra estrutural através da aplicação de um teste de Chow (Chow, 1960), tendo Janeiro de 2010 como o mês de referência, pois a partir de uma análise gráfica visualizamos uma ruptura no comportamento da série de Etanol Hidratado neste mês.

Como pode ser visto na tabela 15, o teste de Chow indicou a rejeição da hipótese nula de não existência de uma quebra estrutural para o mês de janeiro de 2010. No entanto, com o objetivo de avaliar se houve quebras estruturais em outros períodos, realizamos o teste de Chow para os meses de janeiro de 2008 e janeiro de 2009. Os resultados mostraram a não rejeição da hipótese nula de não-existência de uma quebra estrutural para esses meses. A quebra estrutural em Janeiro de 2010 é uma consequência dos veículos Flex-Fuel. Sem eles, a indisponibilidade de Etanol Hidratado durante este período não teria causado uma quebra estrutural no consumo de Gasolina C. Na verdade, se os veículos não fossem Flex-Fuel, mas supridos apenas por Etanol Hidratado, sua escassez teria causado uma crise de combustível - como ocorreu no final dos anos 80 e início dos anos 90 - e não uma quebra estrutural.

Tabela 15: Teste de Quebra Estrutural de Chow – Consumo de Gasolina C – Janeiro/2010

Teste de Quebra Estrutural de Chow: 2010M01			
F-statistic	11.37733	Prob. F(5,116)	0.0000
Log likelihood ratio	50.27979	Prob. Chi-Square(5)	0.0000
Wald Statistic	56.88665	Prob. Chi-Square(5)	0.0000

Com o objetivo de analisar a influência da introdução de veículos Flex-Fuel, aplicou-se a estes parâmetros variáveis uma metodologia proposta por Hall (1993), com base no filtro de Kalman (Kalman 1960). Os resultados da aplicação da metodologia de Hall são apresentados na Figura 20, que demonstra a evolução do parâmetro de longo prazo da variável *Subst* (preço do Etanol Hidratado/preço da Gasolina C) provocada pela introdução de veículos Flex-Fuel na frota brasileira de veículos de passageiros e cargas leves. Pode-se ver que houve variações significativas na magnitude do parâmetro, em

particular a partir de 2010. Observa-se no Figura 12 que a frota Flex-Fuel estimada para este ano foi de 45% da frota total e com uma tendência de aumento. Em outras palavras, o impacto dos veículos Flex-Fuel sobre o consumo de Gasolina C é cada vez mais significativo. Em 2013, o total estimado de veículos Flex-Fuel alcançou o percentual de 61%.

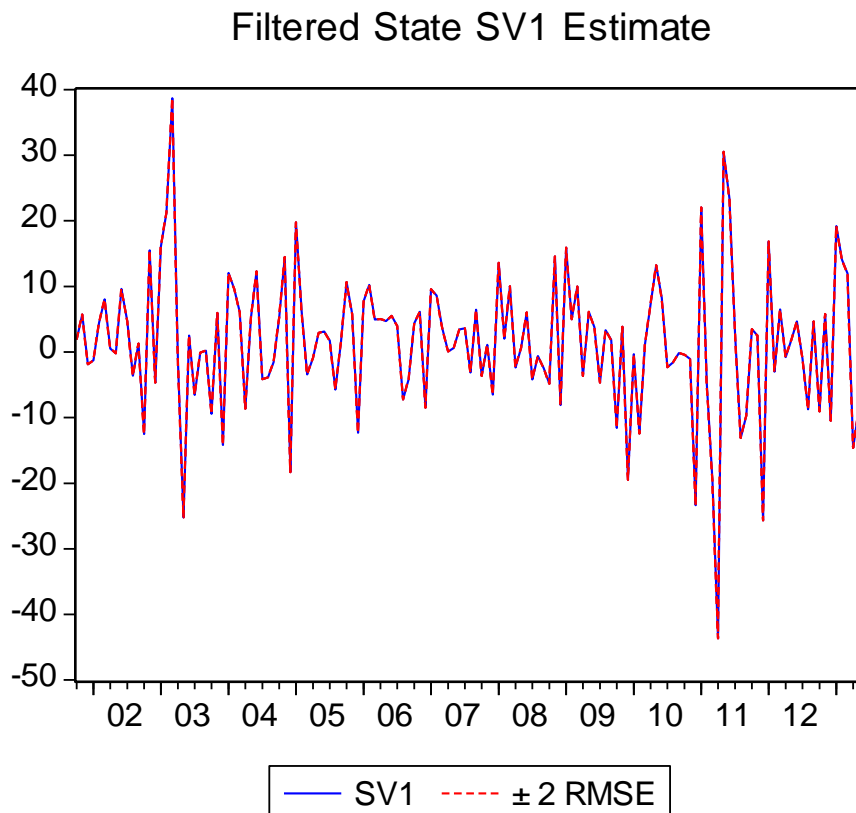


Figura 20: Variação da variável *sv1* no período de amostragem de Julho de 2001 a Junho de 2013 e o intervalo de dois erros quadrados médios (RMSE) do coeficiente (*sv1*).

O valor final do parâmetro de longo prazo da variável *Subst* foi de 12,49582 que é 8 vezes maior do que o valor estimado para julho de 2001 a junho de 2013 (1,46). Em janeiro de 2011, o valor do parâmetro atingiu cerca de -45, provavelmente devido à falta do Etanol Hidratado no mercado de veículos Flex-Fuel. Por isso, é razoável concluir que os veículos Flex-Fuel, que utilizam tecnologia que permite ao consumidor tirar proveito da relação preço do Etanol Hidratado e Gasolina C, têm um impacto significativo sobre o mercado brasileiro de combustíveis. Esta conclusão nos mostra

quantitativamente o que nenhum outro estudo desenvolvido havia apresentado, que os veículos flexíveis podem proporcionar impactos sensíveis na demanda de combustíveis.

Parece que não há nenhuma razão para que a elasticidade da demanda de combustíveis se mantenha constante, quando a proporção de veículos Flex-Fuel na frota é significativa. Ao invés disso, a relação de demanda e elasticidade preço entre os combustíveis pode variar em resposta à evolução tecnológica. Portanto, o valor da elasticidade de demanda é pouco provável que se mantenha constante ao longo do tempo, por causa da influência de problemas de disponibilidade de Etanol.

A fim de verificar a qualidade das projeções do modelo da equação 4 foi realizada uma projeção para o período de julho de 2013 a junho de 2014, com base no ajuste do modelo usando dados de julho de 2001 a junho de 2013. Utilizou-se o MAPE (Mean Absolute Percentage Error) para medir desvios entre os valores previstos e os efetivamente observados. O resultado foi um valor de 3,50%, apresentado através da Figura 21.

Seguem os resultados obtidos:

Análise do MAPE						
Meses	Projetado (em mil m ³)	Realizado (em mil m ³)	Realizado-Projetado = Erro (em mil m ³)	Erro/Realizado	Valor Absoluto do Erro	Σ Acum dos Valores Absolutos do Erro
jul/13	3.421.569,77	3.482.417,77	60.848,00	1,7%	1,7%	
ago/13	3.427.802,69	3.581.284,70	153.482,00	4,3%	4,3%	3,0%
set/13	3.376.229,12	3.368.155,46	-8.073,66	-0,2%	0,2%	2,1%
out/13	3.473.245,44	3.643.353,44	170.108,00	4,7%	4,7%	2,7%
nov/13	3.469.253,50	3.563.702,08	94.448,58	2,7%	2,7%	2,7%
dez/13	3.458.653,81	3.845.838,40	387.184,58	10,1%	10,1%	3,9%
jan/14	3.505.031,27	3.589.557,27	84.526,00	2,4%	2,4%	3,7%
fev/14	3.511.767,39	3.434.568,77	-77.198,62	-2,2%	2,2%	3,5%
mar/14	3.507.134,92	3.556.685,89	49.550,97	1,4%	1,4%	3,3%
abr/14	3.555.939,99	3.765.528,78	209.588,79	5,6%	5,6%	3,5%
mai/14	3.554.802,27	3.718.407,95	163.605,68	4,4%	4,4%	3,6%
jun/14	3.555.122,22	3.458.309,83	-96.812,39	-2,8%	2,8%	3,5%

Figura 21: Volumes projetados e realizados de Consumo de Gasolina C– MAPE (de julho de 2013 a junho de 2014)

Para avaliar ainda mais a confiabilidade dos resultados deste estudo, analisamos os dados do MAPE de pesquisas relevantes contidas na literatura especializada de mensuração de projeções, de forma a comparar esses dados com a nossa leitura de MAPE de 3,50%. Estes artigos não foram agregados no capítulo bibliográfico, pois não tratavam do tema de demanda de combustíveis. Nestes estudos de medição de projeções, não conseguimos encontrar qualquer métrica de projeção para o segmento de combustíveis e, portanto, foram analisados estudos para outros segmentos, especialmente o setor elétrico. Notamos, em particular, os seguintes estudos: Li (2013) que propôs um modelo para a projeção do consumo de energia elétrica na Região Nordeste dos Estados Unidos e obteve um MAPE de 5,60% para a temporada de inverno, que na verdade era inferior ao MAPE obtido em projeções para outras estações. Conejo (2005) realizou um estudo semelhante para a Espanha, obtendo um MAPE de 4,78% para a temporada de inverno (o que, mais uma vez, foi menor do que o MAPE de outras épocas) e Lora (2007), que novamente examinou o consumo de eletricidade na Espanha, obtendo um MAPE de 8,45%. O objetivo destas comparações foi mostrar que os MAPEs obtidos em outros estudos são mais elevados do que aquele encontrado no presente estudo. Assim, consideramos o MAPE do nosso modelo, que teve um valor de 3,50%, como um indicador positivo de sua robustez para previsão.

7.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos neste Capítulo mostram o impacto sobre o mercado brasileiro da penetração dos veículos Flex-Fuel. Esse impacto pode ser avaliado quantitativamente pela variação do coeficiente de longo prazo para os preços relativos entre Etanol e Gasolina C, que tinham um valor final superior a 12, enquanto o valor médio estimado para o período de análise – julho de 2001 a junho de 2013 – foi de 1,46. As prováveis causas desta variação são os seguintes pontos apresentados durante o desenvolvimento deste estudo no capítulo 2: (1) a falta de Etanol Hidratado devido a condições climáticas adversas que afetam a produção da Cana; (2) a maior demanda por Açúcar no mercado internacional, reduzindo ainda mais a disponibilidade de Cana-de-Açúcar para produção de Etanol; (3) problemas econômico-financeiros encontrados por produtores de Etanol; e (4) a perda da competitividade do Etanol Hidratado contra a Gasolina C (cujo preço se manteve relativamente estável, sobretudo quando comparado com os fortes aumentos no

preço do Etanol Hidratado nos últimos anos). Esses problemas, que afetaram a disponibilidade de Etanol Hidratado, têm uma relevância crescente, dado o crescimento da proporção de veículos Flex-Fuel na frota de veículos de passageiros e comerciais leves. Além disso, na elaboração desta tese proporciona-se um avanço em relação ao conhecimento disponível até o momento no Brasil e no mundo sobre a disponibilidade de energéticos e seus efeitos sobre a elasticidade preço relativo entre combustíveis para o mercado de transporte de passageiros, permitindo afirmar que não são parâmetros fixos, mas sim variáveis, ao contrário de todos os trabalhos desenvolvidos até este momento, estas análises nos levam à possibilidade de avaliação de cenários para o impacto do desenvolvimento das tecnologias, mencionadas no Capítulo 5, sobre o consumo de energéticos no Brasil e no mundo, considerando equipamentos flexíveis, ou seja, que permitam a utilização de mais de um combustível para o seu funcionamento.

A partir de toda a literatura de estudo do consumo de combustíveis automotivos ao redor do mundo e no Brasil, em especial daqueles integrantes do Ciclo Otto, pode-se avaliar que a demanda por energéticos é influenciada pela renda e pela sua evolução ao longo do tempo, de forma positiva, com uma elasticidade maior no longo do que no curto prazo, ou seja, as mudanças são mais significativas em períodos mais distantes do que em um curto período de tempo, como era de se esperar, assim como os preços dos energéticos considerados afetam negativamente o seu consumo numa intensidade maior no longo do que no curto prazo.

Assim sendo, como os preços dos energéticos substitutos possuem uma elasticidade positiva maior no longo prazo do que no curto prazo, as características mencionadas tanto neste parágrafo, quanto no anterior, fazem sentido, pois os consumidores levam um tempo até que se adaptem às mudanças de condição do ambiente.

Além disso, a literatura apresenta as principais técnicas econométricas hoje existentes para avaliar os impactos sobre os mercados de combustíveis, assim como análises sobre os resultados obtidos, mas os resultados são apresentados apenas de forma estanque (curto e longo prazo) sem a evolução ao longo do tempo como demonstrado neste estudo.

No sentido de inovação, além do já mencionado no parágrafo anterior, esta tese traz uma evolução das técnicas econométricas atualmente em uso, com a utilização de uma modelagem composta entre a técnica de Cointegração, normalmente vista em vários estudos de demanda de combustíveis, com outra técnica de espaço de estado, com a utilização do algoritmo do Filtro de Kalman permitindo a avaliação das elasticidades, em termos de sua variação ao longo do tempo, avançando nos limites do conhecimento atual frente àquilo que se utiliza que são os parâmetros fixos.

Esta tese não se contrapõe a esta avaliação de elasticidades maiores no longo do que no curto prazo. Um dos principais valores desta tese foi a proposição de que a evolução da elasticidade dos preços relativos dos energéticos não se dá de forma estanque comparando-se os curto e longo prazos. Esta elasticidade cruzada entre os preços dos combustíveis alternativos se move de forma errática, de acordo com questões de oferta e demanda dos energéticos, graças ao advento do surgimento e desenvolvimento dos veículos Flex-Fuel, que permitem a utilização de um ou outro combustível. Esta tese permite uma análise mais profunda dos eventos que impactam o consumo dos energéticos integrantes do Ciclo Otto, fazendo com que os agentes envolvidos em toda a cadeia de suprimento de combustíveis possam minimizar os impactos sobre os consumidores de alterações na disponibilidade dos mesmos, influenciadas por possíveis problemas na safra de cana-de-açúcar ou nas relações de preços entre Etanol Hidratado e Gasolina C.

8. CONCLUSÃO

O objetivo desta tese foi avaliar o impacto da introdução e a evolução de veículos Flex-Fuel no consumo de combustíveis no Brasil. Conclui-se, a partir dos resultados obtidos que tem havido um impacto significativo sobre a demanda de Gasolina C e Etanol Hidratado. Isto é principalmente devido ao fato de que os veículos Flex-Fuel permitem que o consumidor possa escolher qual combustível comprar e que, na maioria dos casos, irá basear a sua decisão considerando a relação custo-benefício. Em algumas (limitadas) áreas do país é uma prática comum o uso de cartazes para divulgar a relação de preços entre Etanol Hidratado e Gasolina C. No entanto, na maior parte dos locais, os consumidores têm de fazer este cálculo por si só, no momento da compra.

Os resultados obtidos mostram o impacto sobre o mercado brasileiro da penetração dos veículos Flex-Fuel, que atingiram uma taxa de cerca de 60% até o final de 2013, como observado na Figura 4. Esse impacto foi analisado durante o desenvolvimento do Capítulo de Resultados, onde se avaliou que o coeficiente de longo prazo dos preços relativos entre Etanol Hidratado e Gasolina C possui uma elevada volatilidade, e expôs os 4 principais motivos que são mais críveis para esta elevada variação.

No capítulo 2 fornecemos detalhes sobre as possíveis causas para a variação dos coeficientes de longo prazo para os preços relativos entre Etanol Hidratado e Gasolina C, de acordo com as explicações (1) e (2) acima. Quanto aos problemas econômico-financeiros mencionados no ponto (3), o principal responsável é a crise econômica internacional que irrompeu em 2008, levando a um aumento nas taxas de juros e menor disponibilidade de linhas de crédito bancárias. Este aperto de crédito criou dificuldades financeiras para vários grupos econômicos e, particularmente, para as empresas - como a indústria brasileira de Açúcar e Etanol - que tinham assumido um montante de dívida desproporcional aos seus ativos, em uma tentativa de acelerar o aumento da produção e aumentar a sua participação de mercado. No caso da Cana-de-Açúcar, previsões de preços foram influenciadas pelos retornos positivos das safras de 2005-6 e 2006-7, o que deu origem a expectativas muito otimistas e um pouco irrealistas quanto ao futuro próximo (CONAB, 2010).

Finalmente, em termos da competitividade mencionada em (4), é importante observar que o preço de Etanol é influenciado não só pela oferta, mas também pela política de preços da Gasolina C, que, como explicado anteriormente, representam um teto para o preço do Etanol Hidratado. Como tal, os preços do Etanol Hidratado e Anidro são afetados pela política do governo em manter a estabilidade dos preços da Gasolina C (ETENE/BRB, 2013).

Os resultados obtidos sugerem que o mercado brasileiro de combustíveis foi mais instável em períodos recentes, principalmente entre 2010 e 2012, do que anteriormente e que isto é, provavelmente, devido ao avanço dos veículos Flex-Fuel na frota brasileira. Esta análise fica corroborada pela análise do comportamento da razão de preços entre o Etanol Hidratado e a Gasolina C apresentada na Figura 3. Na verdade, a participação percentual das vendas de mercado detidas por esses veículos tem sido superior a 80% desde julho de 2008 e, atualmente, correspondem a mais da metade da frota total de veículos de passageiros e cargas leves. Esta tese nos traz uma avaliação de forma mais significativa de todos os acontecimentos que impactaram ou viriam a impactar o consumo de combustíveis do Ciclo Otto, levando a que os agentes de toda a cadeia de suprimento procurem a minimização dos impactos aos consumidores de mudanças nas ofertas dos energéticos.

Além disso, este estudo traz uma evolução das técnicas econométricas atualmente em uso, com a utilização de uma modelagem composta entre a técnica de Cointegração, normalmente vista em vários estudos de demanda de combustíveis, com outra técnica de espaço de estado, utilizando o algoritmo do Filtro de Kalman, que permite a avaliação das elasticidades, em termos de variação ao longo do tempo, e não apenas como dois momentos (curto e longo prazo) avançando no conhecimento atual frente àquilo que se comumente se utiliza que são os parâmetros fixos.

Adicionalmente, como prova de robustez do modelo proposto como referência deste estudo e que foi apresentado na Figura 19, o valor obtido com o MAPE (3,50%) para a projeção do consumo de Gasolina C para o ano seguinte indica que o modelo proposto é confiável e é comparável com outros estudos semelhantes (Conejo, 2005; Lora de 2007 e Li, 2013).

Os resultados reforçam a necessidade de os planejadores brasileiros do setor de energia adotarem estratégias de longo e curto prazo para lidar com o impacto de novas tecnologias sobre o mercado de combustíveis. Há necessidade de uma ação do governo para constituição de estoques e previsão da possibilidade de financiamento à produção de Etanol Hidratado, dada a volatilidade da oferta como uma resultante do impacto na produção causadas por fatores climáticos. Além disso, há uma necessidade para o desenvolvimento de novas variedades de Cana-de-Açúcar, que são mais produtivas em termos de rendimento de Etanol Hidratado e mais resistentes a fatores climáticos adversos. Isto é particularmente relevante tendo em conta as crescentes incertezas decorrentes da aparente mudança nos padrões climáticos e dificuldades relacionadas de antecipar com precisão as condições climáticas com mais de quinze dias de antecedência.

As companhias de petróleo desenvolvem projeções de suprimento de combustível com antecedência. Assim, qualquer evento climático adverso imprevisto que afete a produção de Etanol Hidratado, pode conduzir a uma mudança no planejamento da produção e importação de Gasolina A. É improvável, porém, que tal estratégia de curto prazo seja capaz de compensar adequadamente as alterações no consumo. Isto sugere a necessidade de estocar Gasolina A e ou Etanol, que por sua vez envolve os custos significativos de armazenamento.

O modelo foi utilizado para estudar a dinâmica de transformação no mercado brasileiro de combustíveis, provocada pela introdução da tecnologia Flex-Fuel que pode ser tomada como um exemplo de análise de outras inovações tecnológicas no setor dos transportes - como o desenvolvimento de veículos plug-in híbridos.

Vale ressaltar que em 2013, os veículos elétricos e híbridos representaram apenas 0,03% das vendas totais (Anfavea, 2014). Será necessário adaptar esses veículos na modelagem para refletir a concorrência de preços entre os combustíveis atualmente disponíveis e a eletricidade. A introdução de uma nova tecnologia pode alterar de forma significativa os padrões de consumo de energia em vários países do mundo, o que representa grande desafio para as empresas que operam no suprimento de combustíveis.

O modelo adotado nesta tese pode ser uma ferramenta relevante na maior investigação sobre tais mudanças, tanto no Brasil quanto no exterior.

REFERÊNCIAS

- Alves, D.; Bueno, R (2003). *Short-run, long-run and cross elasticities of Gasoline demand in Brazil*. Energy Economics. Nº 25. 191-199. 2003.
- Amjadet, S. et al. (2010). *Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 1104-1110.
- ANFAVEA (National Association of Automobile Manufacturers) - (2014). *Brazilian Automobile Industry Yearbook 2014*.
- ANP (2015). Consulta ao site da ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), em 10/02/2015.
- Arisoy, I.; Ozturk, I. (2014). *Estimating Industrial and Residential electricity demand in Turkey: A time varying parameter approach*. Energy 66 (2014) 959-964.
- Baran, R. (2012). *A introdução de veículos elétricos no Brasil: avaliação do impacto no consumo de Gasolina e eletricidade*. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Planejamento Energético, da UFRJ.
- BEN (National Energy Balance) – (2014). *Access to the site of the Ministry of Mines and Energy (MME)* on January 18, 2015.
- Bentzen, J. (1994). *An empirical analysis of Gasoline demand in Denmark using Cointegration techniques*. Energy Economics. Nº 16(2). 139-143. 1994.
- Borba, B. S. M. C. (2012). *Modelagem Integrada da Introdução de Veículos Leves conectáveis à rede elétrica no sistema energético brasileiro*. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Planejamento Energético, da UFRJ.

- Bradley, T.H. & Frank, A.A. (2009). *Design, demonstrations and sustainability impact assessments for plug-in hybrid electric vehicles*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 115–128.
- Carlos, A. P. (2009). *Brazilian Electricity Demand Estimation: What has changed after the rationing in 2001? An Application of Time Varying Parameter Error Correction Model*. Getulio Vargas Foundation, Graduate School of Economics, Rio de Janeiro, Brazil. Available at:
<http://bibliotecadigital.fgv.br/ocs/index.php/sbe/EBE09/paper/download/993/345>
- Cavalcanti, M.C.B. (2006). *Análise dos Tributos Incidentes sobre os Combustíveis no Brasil*. Tese de Mestrado apresentada ao Programa de Planejamento Energético, da UFRJ.
- Chow, G. (1960). *Tests of Equality Between Sets of Coefficients in Two Linear Regressions*. Econometrica, Vol. 28, N° 3 (Jul., 1960), pp. 591-605.
- CONAB (2009). *Acompanhamento de safra brasileira: Cana-de-Açúcar, terceiro levantamento, dezembro/2009* - Companhia Nacional de Abastecimento – Brasília: Conab, 2009.
- CONAB (2010). *Os fundamentos da crise do setor do setor sucroalcooleiro no Brasil*. Superintendência de Informações do Agronegócio (Abr., 2010), Technical Authority: Ângelo Bressan Filho (CONAB).
- Conejo, A. J. (2005). *Day-Ahead Electricity Price Forecasting using the wavelet transform and Arima Models*. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, N° 2, May/2005
- Durbin, J.; Koopman, S.J. (2001). *Time Series Analysis by State Space Models*. Oxford University Press, 2001.

- EIA (2015). *Annual Energy Outlook 2015*. U.S. Energy Information Administration, 2015.
- Eltony, M.; Al-Mutairi, N. (1995). *Demand for Gasoline in Kuwait: An empirical analysis using Cointegration techniques*. Energy Economics. Nº 17. 249-253. 1995.
- Enders, W. (2004). *Applied Econometric Time Series (3rd Edition)*. University of Alabama.
- Engle, R. & Granger, C. (1987). *Cointegration and Error-correction: Representation, Estimation and Testing*, Econometrica, vol 55, p. 251-276.
- ETENE/BRB (2013). *Informe Rural do ETENE (Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste/Banco de Brasília) – Produção Nordestina de Açúcar e Álcool*. Ano VII, nº 4, dezembro de 2013. Technical Authority: Maria de Fátima Vidal.
- EViews (2014). Available at: <http://www.eviews.com/home.html>.
- Kahn Ribeiro, S., M. J. Figueroa, F. Creutzig, C. Dubeux, J. Hupe and S. Kobayashi, 2012: Chapter 9 - Energy End-Use: Transport. In *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, pp. 575-648.
- Granger, CWJ (1969). *Econometrica*, Vol. 37. P. 424-438 (1969).
- Green II, R. C. et al. (2011). *The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: A review and outlook*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 544-553.

- Hall, S. (1993). *Modelling Structural change using the Kalman Filter*, Economics of Planning, 26, 1-13.
- Harvey, A.C. 1989. *Forecasting, structural time series models and the Kalman Filter*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hendry,D.; Juselius, K. (2000). *Explaining Cointegration analysis: Part I*, The Energy Journal, vol 21, N° 1, p. 1-42.
- Hendry,D.; Juselius, K. (2001). *Explaining Cointegration analysis: Part II*, The Energy Journal, vol 22, N° 1, p. 75-120.
- Hunt, V.D. (1981). *The Gasohol Handbook*, Industrial Press Inc., 1981, pp 9, 420, 421, 442.
- IANGV (2014). Consulta ao site da Associação Internacional de Gás Natural Veiculares, em 10/02/2015.
- IEA (2011). *World Energy Outlook 2011*. International Energy Agency, 2011.
- IEA (2014). *World Energy Outlook 2014*. International Energy Agency, 2014.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014 - Mitigation of Climate Change*. International Panel on Climate Change, 2014.
- Johansen, S. (1988). *Statistical Analysis of Cointegrating Vectors*, Journal of Economic Dynamics and Control, vol 12, p. 231-54.
- Kalman, R.E. (1960). *A new approach to linear filtering and prediction problems*. Journal of Basic Engineering 82 (1): 35.45.

- Kiviluoma, J. & Meibom, P. (2011). *Methodology for modelling plug-in electric vehicles in the power system and cost estimates for a system with either smart or dumb electric vehicles*. Energy 36 (2011) 1758-1767.
- Li, X.R. et al. (2013). *Day-ahead electricity price forecasting based on panel Cointegration and particle filter*. Electric Power Systems Research 95 (2013) 66-76.
- Lora, A. T. et al. (2007). *Electricity Market Price Forecasting Based on Weighted Nearest Neighbors Techniques*. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, N° 3, Agosto/2007.
- MAPA - Brazilian Ministry of Agriculture - (2013). *Statistical Yearbook of Agrienergy 2012*.
- Mattos, J.A. Bastos & Correia, E. Luiz (1996). *Uma nova estimativa da frota de veículos automotivos no Brasil*. Em: Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia, 1996, p. 1267.
- Melo, T.C. et al. (2012). *Hydrous ethanol-gasoline blends - Combustion and emission investigations on a Flex-Fuel Engine*, Fuel 97 (2012) 796-804.
- MME - Brazilian Ministry of Mines and Energy – N° 94 Monthly Bulletin of Natural Gas Industry, November/2014.
- Nichols, R. J. (2003). *The Methanol Story: A Sustainable Fuel for the Future*. “Journal of Scientific & Industrial Research” Vol. 62, Janeiro-Fevereiro 2003, pp. 97-105.
- OPEC (2014). *World Oil Outlook 2015*. Organization of the Petroleum Exporting Countries, 2014.

- Petrobras (2002). Livro de Especificações e Funcionamento de Combustíveis. Curso de Formação de Analista de Comércio e Suprimento, 2002.
- PLANGÁS – Plano de Antecipação da Produção de Gás. Apresentação na 3ª Conferência Anual de Mercado de Gás. 2007. Acesso ao site no dia 10/02/2015.
- Polemis, M. (2006). *Empirical Assessment of the determinants of road energy demand in Greece*. Energy Economics. Nº 28. 385-403. 2006.
- Ramanathan, R. (1999). *Short- and long-run elasticities of Gasoline demand in India: An empirical analysis using Cointegration techniques*. Energy Economics. Nº 21. 321-330. 1999.
- Santos, Gervasio P. (2013). *Fuel demand in Brazil in a dynamic panel data approach*. Energy Economics 36 (2013) 229-240.
- Schultz, M.G., Thomas Diehl, Guy P. Brasseur, and Werner Zittel (2003). *Air Pollution and Climate-Forcing Impacts of a Global Hydrogen Economy*, Science, October 24, 2003 - 302: 624-627.
- Schünemann, L. (2007). *Dissertação de Mestrado: A Demanda de Gasolina Automotiva no Brasil: O impacto das elasticidades de curto e longo prazo da expansão do CNG e dos carros flex*. IBMEC/RJ.
- Taymaz, I. & Benli, M. (2014). *Emissions and fuel economy for a hybrid vehicle*. Fuel, Volume 115, January 2014, Pages 812-817.
- World Energy Outlook (WEO, 2014). Uma publicação da International Energy Agency (IEA, 2014).
- Wooldridge, J. M. (2002). *Introdução à Econometria - Uma abordagem moderna*. Ed. Thomson, 4ª ed., 2002.

ANEXO

Em função da indisponibilidade de dados em bases mensais de vendas de veículos por tipo de combustível (Anfavea, 2014). Estes dados só se encontram habilitados em bases anuais como apresentado na Figura 12 desta tese.

Diante deste fato, optou-se por dois modelos:

- 1) No primeiro constam as seguintes séries: Consumo de Gasolina C, uma variável Dummy representando a frota flex (início em março de 2003), preço real da Gasolina C e preço real do Etanol Hidratado; e

$$\Delta Cgc_t = \beta_1 + \beta_2 \Delta Pgc_{t-1} + \beta_3 Dflex_{t-1} + \alpha_1 (Cgc_{t-1} + sv1_t Pgc_{t-1} + \beta_4 Dflex_{t-1} + \beta_5) + u_t$$

Equação 9

$$sv1_t = Tsv1_{t-1} + v_t$$

Equação 10

- 2) No segundo modelo constam as seguintes séries: Consumo de Gasolina C, Massa Salarial Real, preço real da Gasolina C e preço real do Etanol Hidratado.

$$\Delta Cgc_t = \beta_1 + \beta_2 \Delta Pgc_{t-1} + \beta_3 \Delta Massa_{t-1} + \beta_4 \Delta Peh_{t-1} + \alpha_1 (Cgc_{t-1} + sv1_t Pgc_{t-1} + \beta_5 Peh_{t-1} + \beta_6 Massa_{t-1} + \beta_7) + u_t$$

Equação 11

$$sv1_t = Tsv1_{t-1} + v_t$$

Equação 12

Onde:

- Cgc_t é o consumo de Gasolina C, em m^3 , no tempo t ;
- α é o coeficiente de ajuste entre o curto e o longo prazo;
- Pgc_t é o preço da Gasolina C, no tempo t ;
- Peh_t é o preço do Etanol Hidratado, no tempo t ;
- $Dflex_t$ é uma Dummy que representa a entrada dos veículos flex no mercado de veículos e tem valor 1 a partir de março de 2003, no tempo t ;
- $Massa_t$ é o produto dos salários médios, em termos reais, pela população ocupada, em moeda corrente nacional, no tempo t ;
- $\Delta Massa_t$ é a primeira diferença da multiplicação dos salários médios, em termos reais, pela população ocupada, no tempo t ;
- $sv1_t$ é o parâmetro (variável) da razão entre o preço do Etanol Hidratado e da Gasolina C, no tempo t ; e
- v_t e u_t são os vetores de erro, no tempo t .

A comparação entre o modelo de referência adotado e estes dois modelos alternativos foi feita utilizando o critério de Schwarz (SIC – Schwarz Information Criteria) que é uma estatística frequentemente utilizada para a escolha da especificação ótima de uma equação de regressão no caso de alternativas não aninhadas (Wooldridge, 2002). Ela impõe uma penalidade maior pela inclusão de coeficientes adicionais a serem estimados frente a outros critérios de informação.

A modelagem proposta pela tese, através da equação 4, apresentou melhores resultados para o critério de Schwarz (SIC – Schwarz Information Criteria) frente aos dois

modelos aqui apresentados no anexo, o que nos leva a acreditar que seja uma modelagem mais robusta frente a estas duas propostas agora.

Os resultados obtidos foram os seguintes para o modelo de referência, onde o critério de qual modelo é o melhor se refere a quanto menor o valor do SIC, melhor é a robustez do modelo. Para o modelo de referencia, obtivemos o valor de -2,525967, enquanto para o modelo 1 obtivemos o valor de -2,338102 e para o modelo recebemos o valor de -2,487276 como resultado.

Face ao exposto acima, acreditamos que a modelagem proposta pela tese identificou o melhor modelo, no momento atual, com as restrições existentes.