

UNIVERSIDADE PAULISTA
PROGRAMA DE DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**CENÁRIO DO ETANOL NO BRASIL: PRODUÇÃO DE AUTOMÓVEIS E
DEMANDA DE COMBUSTÍVEIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de doutor em Engenharia de Produção.

MARCELO KENJI SHIBUYA

SÃO PAULO
2016

UNIVERSIDADE PAULISTA
PROGRAMA DE DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**CENÁRIO DO ETANOL NO BRASIL: PRODUÇÃO DE AUTOMÓVEIS E
DEMANDA DE COMBUSTÍVEIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de doutor em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Gestão de Sistemas de Operação

Linha de Pesquisa: Redes de Empresas e Planejamento da Produção

Projeto de Pesquisa: O Uso da Simulação Dinâmica na Produção do Etanol no Brasil

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Irenilza de Alencar Nääs

MARCELO KENJI SHIBUYA

SÃO PAULO
2016

Shibuya, Marcelo Kenji.

Cenário do etanol no Brasil : produção de automóveis e demanda de combustíveis. / Marcelo Kenji Shibuya. - 2016.
109 f. : il. + CD-ROM.

Tese de Doutorado Apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2016.

Área de Concentração: Gestão de Sistemas de Operação.
Orientadora: Prof.^a Dra. Irenilza de Alencar Nääs.

1. Etanol combustível. 2. Sustentabilidade. 3. Bioenergia.
4. cana-de-açúcar. 5. Energia renovável. I. Nääs, Irenilza de Alencar (orientadora). II. Título.

MARCELO KENJI SHIBUYA

**CENÁRIO DO ETANOL NO BRASIL: PRODUÇÃO DE AUTOMÓVEIS E
DEMANDA DE COMBUSTÍVEIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de doutor em Engenharia de Produção.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

_____/____/
Prof^a. Dr^a. Irenilza de Alencar Nääs – Orientadora
Universidade Paulista – UNIP

_____/____/
Prof. Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar

_____/____/
Prof. Dr. Marcelo Tsuguio Okano
Centro Paula Souza

_____/____/
Prof. Dr. Oduvaldo Vendrametto
Universidade Paulista – UNIP

_____/____/
Prof. Dr. Pedro Luiz de Oliveira Costa Neto
Universidade Paulista – UNIP

DEDICATÓRIA

*A todos aqueles que me fizeram acreditar que eu
poderia chegar até aqui.*

AGRADECIMENTOS

Após quase 40 meses de dedicação a esse trabalho, torna-se uma tarefa um tanto quanto difícil relacionar aqueles que, direta ou indiretamente participaram dessa minha jornada. Corro, portanto, o risco de ser injusto e de antemão, peço desculpas caso alguém fique fora dessa lista.

A todo o corpo docente do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da UNIP: Dr. Oduvaldo Vendrameto, Dra. Irenilza de Alencar Nääs, Dr. Pedro Luiz de Oliveira Costa Neto, Dr. José Benedito Sacomano, Dra. Márcia Terra da Silva, Dr. Rodrigo Franco Gonçalves e Dr. João Gilberto Mendes dos Reis os meus agradecimentos, por terem acreditado em meu projeto e terem me dado, de forma incansável, as orientações necessárias para a conclusão dessa tese.

Aos colegas do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da UNIP pela alegre convivência ao longo dos créditos e as valiosas trocas de experiências e contribuições recebidas nas ocasiões em que tive a oportunidade de apresentar os meus trabalhos.

À minha orientadora, Profa. Dra. Irenilza de Alencar Nääs, agradecer apenas pelo aprendizado, pelas contribuições recebidas e pelas incansáveis correções realizadas em meus artigos e na tese seria muito pouco. Além de toda a orientação recebida, agradeço de coração por ter aprendido nesse tempo de convivência a pensar, enxergar e analisar as coisas pela ótica da pesquisa e da ciência, sem contudo, deixar de enxergar a vida de forma humanística.

À Marcia Nunes, Secretária do Programa de Pós Graduação, minha gratidão pela ajuda recebida nas mais complicadas tarefas administrativas do programa, sempre de forma solícita e cordial.

À Alice, Rafael e Fábio, respectivamente minha esposa e filhos, ficam aqui os meus agradecimentos pelo apoio recebido e também, as minhas desculpas pelos dias, noites e finais de semana que precisei estar ausente, apesar de presente, para me dedicar às atividades dessa pesquisa.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro recebido.

E, finalmente e nem por isso os meus agradecimentos de menor importância, não poderia deixar de dedicar algumas palavras aos meus pais, Sr. Haruo e Dna Olga, que sempre me incentivaram a estudar, me mostraram que o caminho a ser percorrido era árduo porém gratificante e que, por tantas vezes insistiram para que eu fizesse o doutorado, mas infelizmente partiram antes da conclusão desse meu trabalho. Minha eterna gratidão.

EPÍGRAFE

“Por isso, espero ser capaz de alcançar algo de valor por meio de meus estudos atuais ou com qualquer nova ideia que me surja no futuro.” (John Nash)

RESUMO

SHIBUYA, Marcelo Kenji. Cenário do Etanol no Brasil: Produção de Automóveis e Demanda de Combustíveis. Páginas: 109. Tese de doutorado, Universidade Paulista, São Paulo, 2016.

O lançamento dos veículos flexfuel, ocorrido no ano de 2003, deu ao mercado brasileiro de combustíveis uma nova dinâmica, fazendo com que os proprietários desses veículos pudessem optar pelo uso da gasolina ou do etanol hidratado no momento do abastecimento, tendo-se como principal variável de escolha a razão entre o preço dos dois combustíveis. O objetivo deste trabalho foi analisar a demanda do etanol combustível em função da evolução da frota de veículos leves e a variação dos preços dos combustíveis no Brasil. Os estudos foram realizados por meio da pesquisa sistemática e exploratória, buscando as informações necessárias e pertinentes em publicações científicas, bases de dados governamentais e setoriais da área de combustíveis, possibilitando-se assim, coletar as informações e dados para a consecução deste trabalho. Analisando-se as recentes publicações, constatou-se uma crescente preocupação de vários países, tendo destaque para os Estados Unidos da América e União Europeia, com relação ao desenvolvimento e utilização de biocombustíveis para fins veiculares, e diante disso, pode-se considerar que essa tese pesquisou um tema de relevância, principalmente sendo o Brasil um dos maiores produtores mundiais desse combustível. Os resultados obtidos pelos estudos realizados foram publicados sob a forma de artigos científicos. O primeiro artigo analisa, por meio de simulação em dinâmica de sistemas, a previsão da demanda de combustíveis em função da evolução da frota de veículos leves no Brasil, considerando para isso, o período de 2013 a 2020. Por meio desse estudo, foi possível analisar a forte influência dos veículos dotados com a tecnologia *flexfuel* no mercado de combustíveis do Brasil. No segundo artigo, o foco dos estudos foi direcionado para a determinação da demanda de combustíveis consumidos pelos veículos leves, para o período de 2006 a 2014. Dessa forma, buscou-se analisar a demanda ocorrida para a frota de veículos leves, possibilitando-se assim, quantificar para o período considerado, os volumes consumidos de gasolina C (mistura de gasolina pura com etanol anidro) e etanol hidratado. No terceiro e último artigo publicado, analisou-se, com a utilização de simulação, a contribuição que o bagaço de cana e o milho de segunda safra poderiam trazer para a solução da crise *sucroenergética* no país. Os resultados desse estudo apontaram que o uso do milho poderá melhorar a oferta de etanol no país, além de melhorar a produtividade das usinas produtoras. Ao final da tese, concluiu-se que o setor sucroenergético brasileiro deixou de investir em novas usinas desde o ano de 2008, criando-se assim, um descompasso entre a produção e demanda do etanol no país. Nos estudos realizados, constatou-se que o descompasso entre produção e demanda do biocombustível poderia ser evitado, ou mesmo minimizado, caso existissem políticas públicas de longo prazo para o setor de combustíveis no país, possibilitando assim, uma visão ampla para os empresários do setor, e consequentemente, uma maior motivação para a ampliação da produção do biocombustível no país.

ABSTRACT

SHIBUYA, Marcelo Kenji. **Ethanol Scenario in Brazil: Vehicle Production and Fuel Demand.** Pages: 109. Doctoral Thesis, Paulista University, São Paulo, 2016.

The flexfuel vehicles, launched in 2003 in Brazil, gave a new dynamic to the domestic fuel market, giving to the owners of these vehicles the possibility to choose between the gasoline or hydrous ethanol at the time of supply, taking as main factor of choice, the ratio between the price of the two fuels. This study analyzed the demand for ethanol fuel due to the evolution of the light vehicle fleet and the ratio between the prices of the fuels in Brazil. The studies were conducted through systematic and exploratory research, seeking the relevant information in scientific publications, government, and databases from fuel industry, making it possible to collect information and data for the development of this work. In recently analyzed publications it was found that there was an increasing concern in many countries of the world, specifically in the United States and the European Union countries regarding the development and the use of biofuels to supply vehicles. Because of this reason, this study can be considered a relevant topic in the biofuel area, especially being Brazil one of the largest producers of this fuel. The results obtained by the studies were published in the form of scientific articles. The first article analyzes, through simulation in dynamic systems, the forecasting of the consumption of the biofuel-related to the evolution of the light vehicle fleet in Brazil, considering the period from 2013 to 2020. Through this study, we analyze the strong influence of vehicles equipped with *flex-fuel* technology in Brazil's fuel market. In the second article, the focus of the study was aimed to determine the fuel demand by light vehicles for the period from 2006 to 2014. Thus, we could analyze the demand occurred for the fleet of light vehicles, quantifying the volumes consumed of the gasoline C (pure gasoline mixed with anhydrous ethanol) and hydrated ethanol. The third article analyzes through simulation the contribution that the sugarcane bagasse and second crop of corn could improve the solution for the Brazilian fuel crisis. The results of this study showed that the use of corn might improve the supply of ethanol in the country, and improve the productivity of plants that produces ethanol. At the end of the thesis, it was concluded that the Brazilian sugarcane industry failed to invest in new plants since 2008, creating thus a mismatch between production and demand of ethanol in the country. In studies, it was found that the gap between production and demand of biofuel could be avoided or minimized if there were long-term public policies for the fuel sector in the country, thus enabling a broad vision for the business sector, and consequently a greater motivation for the expansion of biofuel production in the country.

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores.
ANP	Agência Nacional do Petróleo e Gás.
APMS	<i>Advances in Production Management Systems</i>
APROSOJA	Associação dos Produtores de Milho e Soja do Estado de Mato Grosso
Bep	Barril equivalente de petróleo.
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CONAB	Companhia Nacional do Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DS	Dinâmica de Sistemas
DDGS	<i>Distillers Dried Grains and Solubles</i>
ENEGET	Encontro Nacional de Engenharia de Produção
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
EUA	Estados Unidos da América
IFIP	International Federation for Information Processing
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MJ	Unidade de energia 10^6 Joule ou mega Joule

MMA	Ministério do Meio Ambiente.
PROALCOOL	Programa Nacional do Álcool
SIMPEP	Simpósio de Engenharia de Produção
SINDIPEÇAS	Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores
U.E.	União Europeia
UNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de combustíveis e evolução da frota de veículos leves	28
Figura 2 – Produção e importação de combustíveis.....	30
Figura 3 – Variação da paridade de preços.....	33
Figura 4 – Previsão da capacidade produtiva e demanda potencial do etanol.....	34
Figura 5 – Consumo de combustíveis e evolução da frota de veículos leves	53
Figura 6 – Capacidade produtiva estimada e demanda potencial do etanol	56
Figura 7 – Diagrama esquemático para a simulação da demanda de combustíveis	59
Figura 8 – Intensidade de uso dos automóveis e comerciais leves	62
Figura 9 – Simulação da demanda de combustíveis no <i>software Insigh Maker®</i> ...	65
Figura 10 – Demanda de combustíveis – paridade 0,6	67
Figura 11 – Demanda de combustíveis – paridade 0,7	67
Figura 12 – Demanda de combustíveis – paridade 0,8	68
Figura 13 – Evolução da frota de veículos no Brasil.....	69
Figura 14 – Intensidade de uso para a frota de veículos	69
Figura 15 – Média de idade da frota de veículos	70
Figura 16 – Demanda de combustíveis e frota de veículos leves no Brasil.....	80
Figura 17 – Gráfico de produção e importação da gasolina A e etanol.....	81
Figura 18 – Intensidade de uso dos automóveis e veículos comerciais leves.....	82
Figura 19 – Variação da frota de veículos em circulação no Brasil.	86
Figura 20 – Consumo de combustíveis pela frota brasileira de veículos leves	87
Figura 21 – Porcentagem de Gasolina C consumido pelos veículos <i>flexfuel</i>	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Usinas, dias médios de operação, segunda safra de milho	37
Tabela 2 – Frota estimada de veículos leves no final do ano de 2012.	54
Tabela 3 – Paridade de preços entre o etanol hidratado e gasolina C.	56
Tabela 4 – Paridade média mensal para período de 2003 a 2012.	60
Tabela 5 – Quantidades mensais de veículos leves licenciados (10 ³ unidades).....	61
Tabela 6 – Funções matemáticas para as intensidades de uso dos veículos.	63
Tabela 7 – Rendimento dos combustíveis para automóveis e comerciais leves.	63
Tabela 8 – Demandas de combustíveis em função da paridade de preços.....	66
Tabela 9 – Comparativo entre a demanda real e demanda estimada.	71
Tabela 10 – Demanda de combustíveis x capacidades produtivas ref. 2013.	72
Tabela 11 – Poder calorífico dos combustíveis (em PCI).	80
Tabela 12 – Produção regional de etanol no Brasil	94
Tabela 13 – Usinas de etanol, dias médios de operação e produção de milho.	95
Tabela 14 – Resultados da simulação para o Cenário 1.	100
Tabela 15 – Resultados da simulação para o Cenário 2.	101

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.1	Questões, objetivos e hipótese de pesquisa	21
1.1.1	Hipótese da pesquisa.....	22
1.1.2	Objetivo Geral	22
1.1.3	Objetivos Específicos.....	23
1.2	Estruturação do trabalho	23
2.	Referencial teórico	25
2.1	A frota de veículos leves e a demanda de combustíveis no Brasil.....	25
2.2	Influência da Paridade de preços na Demanda dos combustíveis	31
2.3	Etanol de milho: a experiência americana e perspectivas para a produção no Brasil.	34
2.4	O futuro dos combustíveis para fins veiculares	38
2.5	Referências Bibliográficas.....	41
3.	Metodologia	46
3.1	Pesquisa sistemática e exploratória	46
3.2	Pesquisa de campo e participação em eventos	47
3.3	Estudo da demanda de combustíveis para veículos leves.....	47
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1	Artigo: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA DEMANDA DO ETANOL E DA GASOLINA EM FUNÇÃO DA EVOLUÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS LEVES NO BRASIL.....	50
4.1.1	Introdução	51
4.1.2	Referencial Teórico	52
4.1.3	Materiais e Métodos.....	58
4.1.4	Resultados	65

4.1.5	Agradecimentos	73
4.1.6	Referências Bibliográficas.....	73
4.2	Artigo: METODOLOGIA NUMÉRICA PARA DETERMINAÇÃO DO CONSUMO VOLUMÉTRICO DE ETANOL HIDRATADO EM VEÍCULOS <i>FLEXFUEL</i>	75
4.2.1	Introdução	76
4.2.2	Revisão Bibliográfica.....	77
4.2.3	Metodologia	82
4.2.4	Resultados e Discussão.....	86
4.2.5	Conclusão	89
4.2.6	Bibliografia	90
4.3	Artigo: PRODUÇÃO FLEXÍVEL DE ETANOL: A ENERGIA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR PODE AUXILIAR NA SUSTENTABILIDADE DOS BIOCOMBUSTÍVEIS.....	92
4.3.1	Introdução	93
4.3.2	Revisão Bibliográfica.....	94
4.3.3	Metodologia	98
4.3.4	Resultados e Discussão.....	100
4.3.5	Conclusão	102
4.3.6	Referências.....	103
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	105
5.1	Conclusões	105
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	109

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A substituição dos combustíveis de origem fóssil pelos biocombustíveis tem sido objeto de crescente interesse mundial. Tal interesse tem sido motivado para prover a segurança energética dos países e por questões ambientais. No primeiro caso, tendo em vista as reservas finitas do petróleo, os países buscam o desenvolvimento de um combustível alternativo, que substitua ou ainda, seja utilizado como aditivo à gasolina ou ao óleo diesel. Referindo-se ao segundo caso, há uma crescente preocupação com o aquecimento global e, portanto, busca-se a redução de gases do efeito estufa.

O Brasil ocupa um papel de destaque no cenário mundial, sendo, de acordo com o Martinez *et al.* (2013), CGEE (2009) e BNDES (2008), o segundo maior produtor em volume desse combustível e tendo em sua cadeia de fornecimento o cultivo da cana-de-açúcar à montante e à jusante, a comercialização de etanol hidratado e anidro.

Viana e Perez (2013) afirmam que a cana-de-açúcar é uma das principais cadeias produtivas do Brasil, tendo como produtos de maior valor agregado, o açúcar, o etanol combustível e a geração de energia elétrica. Consultando-se a UNICA (2015-a), durante a safra de 2014/2015 foram colhidos e moídos 632.127 mil toneladas de cana-de-açúcar que resultaram em 35.548 mil toneladas de açúcar, 12.095 mil metros cúbicos de etanol anidro e 16.300 mil metros cúbicos de etanol hidratado.

Consultando-se Nogueira e Capaz (2013) e Raele *et al.* (2014), a cultura da cana-de-açúcar se iniciou no século XVI no Brasil, trazida pelos colonizadores portugueses e vindo a se estabelecer inicialmente na região nordeste do país, na capitania hereditária de Pernambuco. A migração da cultura da cana-de-açúcar para a região sudeste pode ser atribuída a dois fatores: o primeiro fator está relacionado ao Decreto Lei nº 9.827, de 10 de dezembro de 1946, que dispunha sobre a expansão da produção de açúcar aos estados com *déficit* deste produto, que resultou na elevação da produção de açúcar no estado de São Paulo durante este período. O segundo fator tem uma relação direta com a produtividade da cana-de-açúcar. Consultando o BNDES (2008) e Raele *et al.* (2014), a razão que motivou o

estabelecimento da cultura da cana-de-açúcar na região sudeste foi devido a adequados fatores climáticos, que incluem o ciclo de chuvas, nível de insolação e a qualidade do solo mais favoráveis que os encontrados na região nordeste, onde a cultura da cana se iniciou no Brasil. O BNDES (2008) complementa que as regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, por estarem localizadas em região tropical, reúnem as condições ideais para o cultivo da cana, pois apresentam duas estações distintas: uma quente e úmida, para proporcionar a germinação, a geração de brotos e o desenvolvimento vegetativo; seguida por outra estação fria e seca, que promove a maturação e o acúmulo de sacarose nos colmos da cana-de-açúcar.

A melhor produtividade da região sudeste em comparação com a nordeste pode ser obtida consultando a CONAB (2014). Na safra de 2014, nos estados de São Paulo e Minas Gerais a produtividade média da lavoura de cana-de-açúcar foi de 80 t/ha, ao passo que nos estados de Pernambuco e Alagoas a produtividade média foi de 53 t/ha. Um aspecto que deve ser considerado na análise das áreas de plantio no estado de São Paulo é a gradual ocupação das áreas, que outrora eram ocupadas por pastagens, fruticultura e grãos, pela cultura da cana-de-açúcar. Nogueira e Capaz (2013) comentam que a partir dos anos 2000, as áreas de pastagens e cultivos de menor valor agregado no estado de São Paulo foram gradativamente substituídas pelo cultivo da cana-de-açúcar devido ao aumento do preço das terras nessa região, que foram valorizadas justamente pelo maior valor agregado da produção de cana-de-açúcar, do açúcar e do etanol. É o caso das áreas de pastagens que passaram a migrar para a região Centro-Oeste, cedendo espaço para a cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

Um bom exemplo para a compreensão dos motivos econômicos que fazem com que a cana-de-açúcar ocupe os espaços de outras culturas é dado pelo CGEE (2009): o valor obtido com a produção de cana-de-açúcar, álcool e açúcar por hectare de cana plantada foi de US\$ 5.058,37; o valor da produção da soja, óleo de soja e farelo, por hectare plantado de soja, foi de US\$ 1.167,32; e o valor da produção do gado de corte, da produção de leite e do abate foi de US\$ 222,34 por hectare utilizado de pasto (cotação do dólar referente ao mês de setembro de 2008, sendo US\$ 1 = R\$ 1,799). Analisando-se os valores apresentados por CGEE (2009), pode-se perceber que a cana-de-açúcar e seus principais produtos têm nítida vantagem econômica em termos de valor agregado de produção por área cultivada.

O etanol combustível foi introduzido na matriz energética brasileira em 1975 por meio do Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL), cujo objetivo era a produção em larga escala de combustíveis renováveis para substituição dos combustíveis de origem fóssil causado pela primeira crise do petróleo (BNDES, 2008; HIRA, 2011; CRAGO *et al.*, 2010; SANTOS, 2013). No início desse programa, a produção era focada no etanol anidro, cuja intenção governamental era a sua adição à gasolina pura.

Gomez e Legey (2015) comentam que a tecnologia *flexfuel* foi implementada no Brasil, em escala comercial, a partir de março de 2003. Esta tecnologia permitiu a utilização da mistura de etanol e gasolina em motores chamados de flexíveis, utilizando para tanto, um sistema de sensores eletrônicos, que fazem a leitura do combustível presente no tanque e comandam o ajuste do funcionamento do motor para obtenção do melhor rendimento. Por meio dessa tecnologia, os veículos podem ser abastecidos com gasolina C, etanol hidratado ou a mistura de ambos os combustíveis em qualquer proporção.

Com relação às finalidades do biocombustível na matriz energética brasileira, Melo *et al.* (2012) complementam que o etanol hidratado pode ser utilizado como combustível pelos veículos com motorização dedicadas a etanol ou aos veículos *flexfuel*. O etanol anidro por sua vez, é adicionado à gasolina pura, em proporção que pode variar de 18% a 27%, de acordo com a disponibilidade desse biocombustível no mercado. Coelho *et al.* (2006) e Freitas e Kaneko (2011) acrescentam que o etanol anidro é o mais importante aditivo misturado à gasolina pura, e o etanol hidratado é utilizado no país como um combustível alternativo pelos veículos *flexfuel*. À mistura da gasolina pura com o etanol anidro, de acordo com as especificações legais vigentes no país, dá-se a denominação de Gasolina C (ANP, 2015-a).

Segundo Neves e Trombin (2014), a produção de etanol e açúcar está interligada com a safra da cana-de-açúcar, a principal matéria-prima para a obtenção desses produtos. Na região Centro-Sul, responsável pela maior parcela de produção de etanol e açúcar do Brasil, a safra da cana-de-açúcar se inicia em abril de um determinado ano, finalizando em março do ano seguinte. Para possibilitar uma mensuração da importância do setor sucroenergético brasileiro, os mesmos autores

complementam que na safra de 2013/2014, o PIB do setor foi estimado em US\$ 43,36 bilhões, o que equivale a aproximadamente 2% do PIB nacional do ano de 2013. Relatórios da UNICA (2015-b) adicionam que os resultados obtidos pelo setor sucroalcooleiro representam 31% do PIB da agricultura no país. Tais números mostram a importância da cadeia produtiva da cana-de-açúcar na economia brasileira.

Para delinear um panorama geral do consumo de etanol no Brasil para fins carburantes, faz-se necessário comentar sobre a frota de automóveis no Brasil, especialmente após o surgimento da tecnologia *flexfuel*. Gomez e Legey (2015) comentam que o mercado brasileiro de combustíveis para veículos do ciclo Otto, composto por veículos de passageiros, veículos comerciais leves e motocicletas, passou por uma fase de grande transformação tecnológica e quebra de paradigma com o advento dos veículos *flexfuel*. O tipo de combustível a ser utilizado por esses veículos passou a ser definido pelo proprietário no momento do abastecimento e não mais no momento da compra do veículo, como era feito quando a frota era composta por veículos motorizados para serem abastecidos exclusivamente à gasolina ou etanol hidratado.

Consultando-se a ANFAVEA (2015), constata-se que durante o ano de 2014, o licenciamento de veículos leves totalizou a quantidade de 3.125.349 unidades, sendo que desse total, 184.481 veículos eram motorizados a gasolina, 14 veículos motorizados a etanol e 2.940.494 veículos dotados com a tecnologia *flexfuel*. Portanto, os veículos *flexfuel* representaram, de acordo com os dados consultados, a porcentagem de 94,08% do total da frota licenciada no ano considerado.

1.1 Questões, objetivos e hipótese de pesquisa

Em sua publicação, o BNDES (2008) considera que a tecnologia de produção do etanol com base na cana-de-açúcar alcançou a sua fase de maturidade, não havendo, portanto, margens para significativos ganhos de produtividade, principalmente na fase industrial. Diante disso, novas possibilidades poderiam ser exploradas para aumentar o volume de etanol ofertado pelo mercado produtor, como é o caso da produção do etanol a partir do milho, tecnologia essa atualmente utilizada nos EUA. Hettinga *et al.* (2009) definem que utilizando-se o milho como matéria-prima para a obtenção do etanol pode resultar em aproximadamente 440 litros desse biocombustível para cada tonelada de milho, volume este que poderia auxiliar no aumento da oferta do biocombustível no mercado brasileiro.

Milanez *et al.* (2014) analisaram a possibilidade de incrementar a produção de etanol no Brasil propondo a conversão das usinas, construídas originalmente para a moagem de cana-de-açúcar, para a utilização do milho como matéria-prima alternativa. Tal estudo mostra a possibilidade da produção de etanol utilizando-se a cana-de-açúcar durante a sua respectiva safra e durante a entressafra, assim, a produção do biocombustível seria viabilizada com o uso do milho. Dessa forma, haveria o ganho de produção do biocombustível por meio do total aproveitamento da infraestrutura produtiva, reduzindo-se a ociosidade no período de entressafra da cana-de-açúcar. Além disso, com o uso do milho nas usinas, poderia haver o total aproveitamento do bagaço de cana, atualmente a principal fonte de energia das usinas brasileiras.

Além dos problemas referentes ao aspecto produtivo, a cadeia de fornecimento do etanol no Brasil enfrenta outro problema relacionado à demanda: de acordo com BNDES (2008) e Sousa e Macedo (2010), o etanol hidratado tem se caracterizado no mercado de combustíveis para veículos leves no Brasil como um combustível alternativo à gasolina C. Dessa forma, a demanda do etanol hidratado no Brasil apresenta uma grande sensibilidade à variação de preços da gasolina C, que por sua vez, tem o seu preço governado pela variação internacional do petróleo.

Diante do exposto, define-se como o problema da pesquisa: como o preço relativo entre o etanol hidratado e a gasolina C e a evolução da frota de veículos

leves podem influenciar na variação da demanda de combustíveis para veículos leves no Brasil?

1.1.1 Hipótese da pesquisa

Para o objetivo geral e objetivos específicos propostos, considera-se que um dos fatores que afetam na demanda dos combustíveis utilizados para o abastecimento da frota de veículos leves esteja relacionado com a paridade de preços entre o etanol hidratado e a gasolina praticada nos postos de abastecimento.

Já por sua vez, os preços dos biocombustíveis dependem da produtividade das respectivas cadeias de produção e das políticas públicas que direcionam as práticas do setor. Um dos fatores que corroboram com a falta de investimentos no setor sucroenergético e a baixa oferta do etanol hidratado pode ser explicado por BNDES (2008) e Goldemberg *et al.* (2008), quando a tecnologia empregada para a obtenção do etanol combustível na fase industrial está atualmente na sua fase de maturidade, não havendo, portanto, a possibilidade de aumento significativo dos volumes produzidos, tendo-se como base uma dada quantidade de cana-de-açúcar entrante no sistema produtivo.

Diante do exposto, considera-se como hipótese para a presente pesquisa, que além de questões técnicas e produtivas do setor sucroenergético, a definição de políticas públicas adequadas para o setor de biocombustíveis poderia contribuir para a redução na crise dos combustíveis no Brasil, favorecendo assim a produção e demanda do etanol hidratado no Brasil.

1.1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral, estudar os fatores que afetam o consumo do etanol combustível no Brasil, tendo-se como base, a evolução da frota de veículos leves dotados da tecnologia *flexfuel*, que são capazes de serem

abastecidos com etanol hidratado, gasolina ou a mistura de ambos os combustíveis em qualquer proporção.

1.1.3 Objetivos Específicos

Para responder ao objetivo geral proposto, os seguintes objetivos específicos foram estudados sob a forma de artigos que foram devidamente publicados em revistas e/ou congressos:

1. Analisar o comportamento da demanda de combustíveis para veículos leves no Brasil, levando-se em consideração a variação da paridade de preços dos combustíveis e a evolução da frota de veículos leves.
2. Determinar um método de cálculo para estimar o consumo de combustíveis para veículos leves.
3. Analisar a contribuição que o etanol produzido à partir do milho poderia trazer à oferta desse biocombustível no país.

1.2 Estruturação do trabalho

Esta tese de doutorado está estruturada em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta as **Considerações Iniciais**, descrevendo os conceitos básicos do etanol combustível e os veículos *flexfuel*, a hipótese da pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos.

No segundo capítulo, com o título **Referencial Teórico**, são apresentados os conceitos necessários para o desenvolvimento da tese, tais como a demanda de combustíveis para veículos leves, influência da paridade de preços dos combustíveis na demanda de combustíveis e as perspectivas para a produção do etanol de milho no Brasil.

O terceiro capítulo, sendo a **Metodologia**, descreve a metodologia da pesquisa e seus pressupostos metodológicos, os procedimentos adotados na execução do estudo, definindo os instrumentos e as técnicas de pesquisa utilizadas.

O quarto capítulo com o título **Resultados e Discussões** apresenta em seus subitens os três artigos científicos resultantes deste estudo, sendo eles:

- Artigo: Análise do Comportamento da Demanda do Etanol e da Gasolina em Função da Evolução da Frota de Veículos Leves no Brasil. Publicado pela Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, V. 9, n. 17; p. 3188, Recebido em: 30/09/2013 – Aprovado em: 08/11/2013 – Publicado em: 01/12/2013; ISSN 1809-0583.

- Artigo: Metodologia Numérica para Determinação do Consumo Volumétrico de Etanol Hidratado em Veículos *Flexfuel*. Publicado no IFIP - *International Federation for Information Processing, Springer*, v. 459, p. 243-259, 2015, texto original em inglês com o título “*Numeric Methodology for Determining the Volumetric Consumption of Hydrated Ethanol in Flex-Fuel Vehicles*”, DOI: 10.1007/978-3-319-22756-6_30.

- Artigo: Produção Flexível de Etanol: A Energia do Bagaço da Cana-de-Açúcar pode Auxiliar na Sustentabilidade dos Biocombustíveis. Publicado por IFIP *International Federation for Information Processing, Springer*, v. 459, p. 662-669, 2015, texto original em inglês com o título “*Flexible Ethanol Production: Energy from Sugarcane Bagasse Might Help the Sustainability of Biofuels*”, DOI: 10.1007/978-3-319-22756-6_81.

O quinto capítulo apresenta as **Considerações Finais**, descrevendo as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A frota de veículos leves e a demanda de combustíveis no Brasil

Com o início da produção e comercialização dos veículos *flexfuel* no Brasil, ocorrido à partir do ano de 2003, houve uma mudança significativa na demanda do etanol hidratado e anidro como combustíveis carburantes. De acordo com Freitas e Kaneko (2011) e BNDES (2008), o etanol anidro é o mais importante aditivo adicionado à gasolina pura, e o etanol hidratado se constitui como o principal combustível alternativo utilizado pelos veículos *flexfuel*, que podem ser abastecidos tanto com a gasolina C (mistura da gasolina pura com o etanol anidro), etanol hidratado ou a mistura de ambos os combustíveis em qualquer proporção. A EPE (2013), Gomez e Legey (2015) e Walter *et al.* (2008) complementam que, com a introdução dessa tecnologia nos veículos leves que circulam pelo Brasil, o consumidor ganhou a possibilidade de optar pelo combustível de sua preferência no momento do abastecimento e não mais como era feito antes, quando o consumidor optava pelo combustível a ser utilizado no momento da aquisição do veículo.

BNDES (2008) e Hira (2011) definem que até o ano de 2014, a gasolina C era constituída da mistura do etanol anidro à gasolina pura na proporção de 20 a 25% de acordo com a disponibilidade e preço desse biocombustível no mercado. No entanto, à partir de março de 2015 com a publicação da Lei Federal nº 13.033, a adição do etanol anidro à gasolina pura passou a ser de 27%.

O interesse pela produção e utilização do etanol como combustível veicular é relatado por vários autores, tais como BNDES (2008), Sadeghinezhad *et al.* (2014), Vohra *et al.* (2014), Novo *et al.* (2012), Baeyens *et al.* (2015) Anderson (2012) e Walter *et al.* (2008) citando a preocupação dos países em desenvolver um combustível renovável, que possa substituir os derivados do petróleo e reduzir os gases do efeito estufa.

Em *Biofuels Digest* (2015) está definido que, desde o ano de 2013, o número de países que passaram a utilizar o etanol anidro misturado à gasolina chegou a 60. A proporção desse biocombustível misturado à gasolina, de acordo com a

publicação, pode variar de 2%, como acontece em países como o México, Panamá e Uruguai, podendo chegar a 27% como é o caso do Brasil.

Segundo Nogueira e Capaz (2013), Sadeghinezhad, *et al.* (2014), Soccoll *et al.* (2010), Koizumi (2015), Rovere *et al.* (2011), Santos (2013), Crago *et al.* (2010) e Bake *et al.* (2009), o etanol foi introduzido na matriz energética brasileira no ano de 1975 por meio do programa PROALCOOL (Programa Nacional do Álcool). O objetivo desse programa era a produção em larga escala de combustíveis para a substituição dos combustíveis fósseis utilizados para abastecer a frota brasileira de veículos.

A busca por um combustível alternativo se deveu às crises do petróleo de 1974 e 1975, que elevaram os preços dessa fonte energética e consequentemente o preço da gasolina. Crago *et al.* (2010) acrescentam que além da motivação energética, o PROALCOOL surgiu como uma forma de combater as flutuações internacionais de preços do açúcar, cujos valores estavam em queda no mercado internacional. Portanto, o PROALCOOL tinha na época o objetivo de proteger a indústria sucroalcooleira, cujas unidades eram caracterizadas como usinas anexas, ou seja, instalações capazes de produzir o açúcar e o etanol simultaneamente.

Crago *et al.* (2010) complementam que com a criação do PROALCOOL, o governo brasileiro concedeu incentivos fiscais para a construção de usinas de etanol e desenvolveu a infraestrutura para a distribuição do biocombustível e incentivos fiscais para a indústria automobilística para a produção de veículos com motorização dedicada ao uso de etanol hidratado. Dessa forma, aumentando-se a quantidade de veículos motorizados a etanol hidratado, criava-se a demanda do biocombustível, dando, portanto, a segurança necessária para a expansão do PROALCOOL. Em 1986, de acordo com os mesmos autores, com a queda dos preços internacionais do petróleo e a necessidade cada vez maior de concessão de subsídios governamentais para a manutenção competitiva dos preços do etanol em relação à gasolina, fez com que o PROALCOOL passasse a ser economicamente inviável, obrigando o governo brasileiro a se desinteressar pelo programa de biocombustíveis, decretando assim, o fim desse programa.

Segundo Bake *et al.* (2009) e Crago *et al.* (2010), o declínio do PROALCOOL ocorrido a partir de meados dos anos de 1980, fez com que a crise de abastecimento de etanol ocorresse no país, tendo como efeito imediato no mercado

de veículos a opção pela aquisição de veículos motorizados a gasolina e a consequente redução da fabricação dos veículos com motores dedicados exclusivamente ao etanol hidratado.

Santos (2013) e Gomez e Legey (2015) comentam que no ano de 2003 foi iniciada a fabricação e comercialização dos veículos com motores flexíveis, iniciando-se dessa forma, uma nova fase de utilização do biocombustível em larga escala para fins veiculares. Stattman *et al.* (2013) afirmam que o lançamento de veículos bicombustíveis em 2003 ganhou rápida aceitação pelos proprietários dos automóveis, justamente pela eliminação do risco de desabastecimento, tal como ocorrido com os proprietários de veículos a etanol no período do PROALCOOL. Para os proprietários desses veículos, a maior motivação para o uso do biocombustível era a econômica, pois como o abastecimento poderia ser realizado com a gasolina C ou o etanol hidratado com o melhor preço, podia se optar pelo combustível que apresentasse o melhor custo benefício. Os autores Mollo Neto *et al.* (2010) reforçam que além da redução da dependência do petróleo, o uso do etanol para o abastecimento veicular tem uma proposta de melhoria das emissões veiculares, principalmente no que se refere a emissão de gases que aumentam o problema de efeito estufa (aquecimento global) e a destruição da camada de ozônio.

O CGEE (2009) complementa que o lançamento dos veículos *flexfuel* no mercado automotivo brasileiro teve uma motivação semelhante ao ocorrido durante o lançamento do PROALCOOL, isto é, foi decorrente dos concomitantes aumentos do preço internacional do petróleo a partir do ano 2000. No período posterior ao PROALCOOL e anterior ao lançamento dos veículos *flexfuel*, de acordo com CGEE (2009), a maior parcela de produção do etanol pelas usinas era o anidro, que continuou sendo utilizado para a mistura à gasolina pura.

De acordo com CONAMA (2015), os veículos leves que compõem a frota brasileira de veículos podem ser classificados como os *veículos leves de passageiros* e os *veículos leves comerciais*. Segundo essa publicação, o veículo leve de passageiros se caracteriza como um veículo automotor com massa total máxima de 3856 kg e projetado para o transporte de até 12 passageiros. Já o veículo comercial leve é caracterizado como um veículo automotor não derivado do veículo leve de passageiros, com massa total máxima autorizada de até 3856 kg,

projeto para o transporte de carga ou misto ou seus derivados, ou projetado para o transporte de mais de 12 passageiros.

A ANFAVEA (2015) define que a frota de veículos leves que circulam pelo Brasil é constituída pelos automóveis de passeio e pelos comerciais leves. Fazem parte do grupo de comerciais leves os furgões, caminhonetas e *pick-ups*. Quanto ao abastecimento, a frota de veículos leves é composta por quatro tipos de motorização, ou seja, com motores dedicados exclusivamente à gasolina C, à etanol hidratado, o *flexfuel* e à óleo diesel.

A **Figura 1** mostra a evolução da frota de veículos leves circulantes e a demanda de etanol hidratado e gasolina C, compreendendo o período de 2003 a 2014. É importante observar que no referido gráfico não foram consideradas a demanda do óleo diesel e a evolução dos veículos movidos a esse combustível, por não fazerem parte do escopo da presente pesquisa.

Os dados referentes à frota circulante de veículos leves no Brasil, foram obtidos à partir de MMA (2014). Tais dados consideram a frota estimada à partir de dados oficiais da ANFAVEA e DENATRAN e estimativas do MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia) e SINDIPEÇAS, bem como a equação matemática de sucateamento de veículos em função da idade da frota.

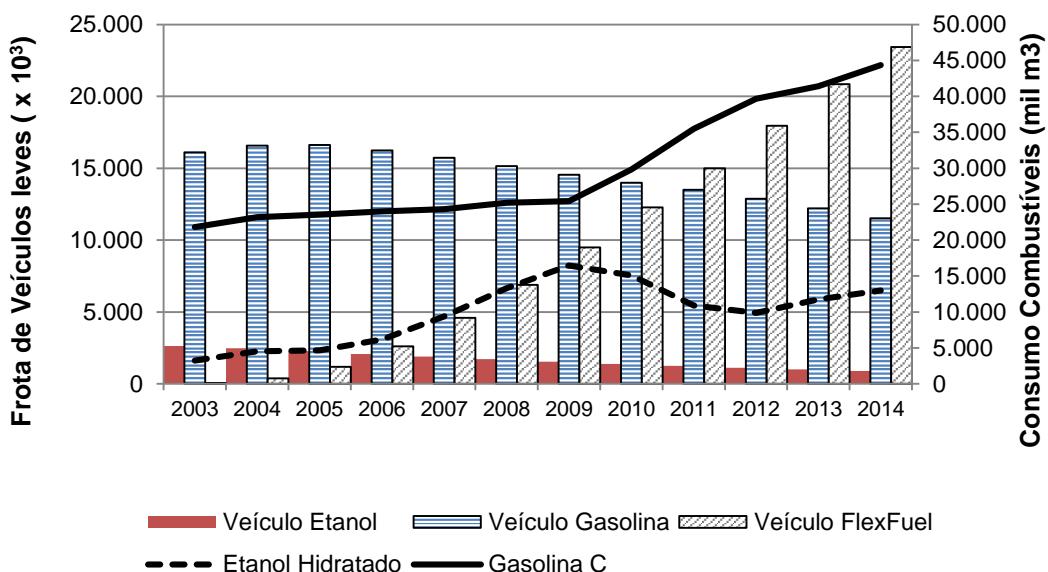


Figura 1 – Consumo de combustíveis e evolução da frota de veículos leves no Brasil
Fontes: Adaptado de ANP (2015-a), MMA (2014) e ANFAVEA (2015).

Na **Figura 1**, pode-se observar nas curvas de demandas de combustíveis o crescimento da demanda de etanol hidratado no período de 2003 a 2009, e respectivo decréscimo a partir de 2009. Com relação à demanda de gasolina C, pode-se visualizar que após o ano de 2009 a inclinação da curva de demanda desse combustível se acentua, mostrando o aumento da taxa de consumo desse combustível.

Milanez *et al.* (2012) comentam que a queda do consumo do etanol hidratado e o consequente aumento do consumo da gasolina se deve ao aumento dos preços médios (em torno de 27%) do etanol hidratado e anidro praticados pelas usinas entre as safras de 2008-2009 e 2010-2011, fazendo com que o consumidor passasse a optar pela gasolina.

Nogueira e Capaz (2013) e EPE (2013), em uma abordagem diferente de Milanez *et al.* (2012), apontam o aumento do consumo do combustível fóssil e a redução da demanda do biocombustível, possível de se visualizar à partir do ano de 2009 na **Figura 1**, como sendo uma fase de estagnação e interrupção da expansão da indústria sucroalcooleira no Brasil. Os mesmos autores complementam que contribuíram para essa fase de estagnação a intervenção governamental nos preços da gasolina ocorrida à partir do ano de 2008, com o intuito de combater a inflação do país, fazendo com que o seu preço comercializado ficasse abaixo do preço do barril do petróleo (aproximadamente US\$ 70,00/barril) nos últimos 5 anos. Além disso, outras causas são comentadas pelos autores, tais como o clima adverso enfrentado pela cultura da cana-de-açúcar, o aumento de custos no plantio e a redução do rendimento da cana-de-açúcar devido à mecanização da colheita.

O gráfico da **Figura 2** mostra, para o período de 2007 a 2013, os volumes anuais de produção da gasolina A (gasolina pura sem nenhuma aditivação), do etanol (incluindo o anidro e o hidratado) e as respectivas importações desses combustíveis. De acordo com o gráfico, constata-se que a partir do ano de 2009 tem-se o aumento da produção de gasolina A e a importação desse combustível, justamente para suprir a elevação da demanda da gasolina C pela frota de veículos leves. No mesmo gráfico pode se observar que a partir do ano de 2010 o Brasil inicia a importação de etanol para suprir a demanda do biocombustível no país, mostrando

assim, que à partir do citado ano a oferta do biocombustível passou a ser insuficiente para atender a demanda desse combustível.

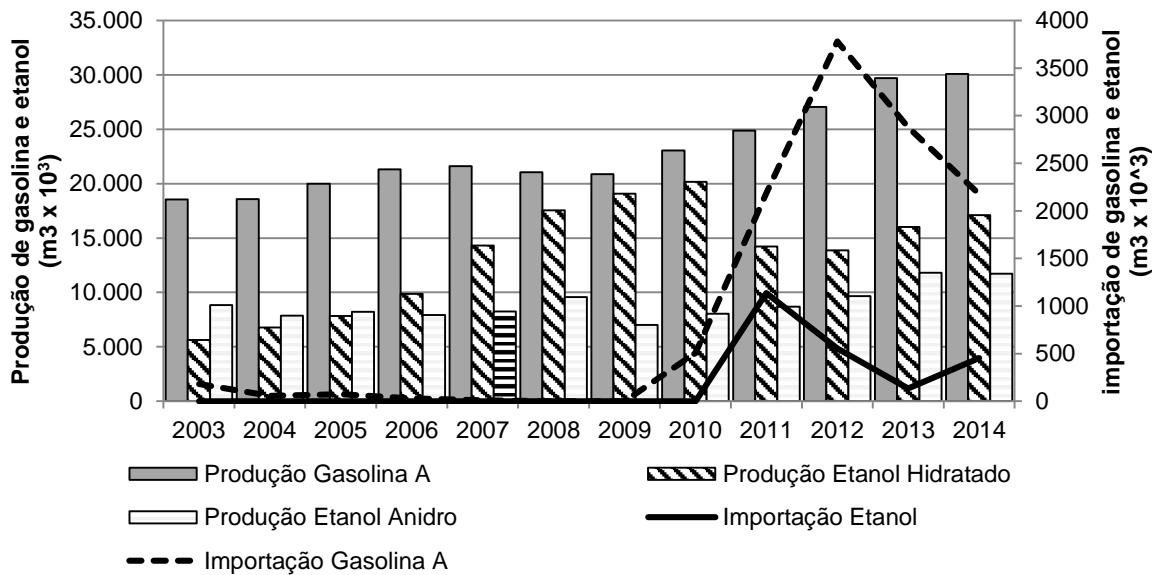


Figura 2 – Produção e importação de combustíveis
Fontes: Adaptado de ANP (2015-a), ANP (2015-b), ANP (2015-c)

MILANEZ *et al.* (2012) afirmam que o fato da existência de um combustível alternativo à gasolina comercializada no país é importante para o equilíbrio da balança comercial brasileira, que ainda importa gasolina para suprir as necessidades internas. PETEAN *et al.* (2011) definem que o petróleo extraído do Brasil é de baixa qualidade para fins de obtenção da gasolina, e a capacidade de refino é ainda deficitária, resultando em necessidade de importação desse combustível em alguns períodos do ano. Sendo assim, o incentivo ao consumo do etanol hidratado, desde que a preços competitivos e atraentes ao consumidor, torna-se um fator benéfico para redução da necessidade de importação do combustível fóssil. De acordo com os mesmos autores, o Brasil importou em 2010 o montante de 505 milhões de litros de gasolina, e a região Nordeste continua importando etanol dos EUA.

PETEAN *et al.* (2011) afirmam que para compensar um aumento da demanda de gasolina C, uma boa alternativa seria aumentar a proporção de etanol anidro na mistura – observe que desde o ano de 2015, tal medida entrou em vigor para reduzir a dependência de importação da gasolina. BNDES (2008) complementa que a mistura do etanol anidro à gasolina, além da função de equilibrar a necessidade de

importação de gasolina, cumpre uma importante função técnica ao motor de ciclo Otto (motor de combustão interna), sendo um aditivo antidetonante a esse combustível.

2.2 Influência da Paridade de preços na Demanda dos combustíveis

A EPE (2013) publicou uma pesquisa realizada em todo o território nacional para analisar o comportamento dos usuários de automóveis *flexfuel*. Além da análise de fatores qualitativos que levam o consumidor a decidir pelo combustível a ser utilizado, como a preocupação com o meio ambiente, o rendimento do motor, a bandeira dos postos de preferência, a pesquisa analisou a porcentagem de volume do etanol utilizado pelos consumidores em função da paridade de preços entre o etanol hidratado e a gasolina.

Entende-se como paridade de preços, o resultado da razão entre os preços do etanol hidratado e da gasolina C praticada nos postos de abastecimento de combustíveis. De acordo com BNDES (2008), considerando-se o poder calorífico do etanol hidratado e da gasolina misturada com etanol anidro (gasolina C), só se constituirá em vantagem econômica para o consumidor, caso o preço do biocombustível seja de até 70% do preço da gasolina C comercializada nas bombas de abastecimento.

Pelos estudos realizados pela EPE (2013), a função matemática que expressa o consumo de etanol hidratado pelos proprietários de veículos leves motorizados com a tecnologia *flexfuel* está descrita na **Equação 1**.

$$\frac{V_e}{V_t} = \frac{1}{1 + 0,001685 \cdot (6567,5754)^{P_e/P_g}} \quad (1)$$

Em que:

V_e = Volume de etanol hidratado.

V_t = Volume total de combustível (soma volumétrica de etanol hidratado e gasolina C).

P_e = Preço do etanol hidratado.

P_g = Preço da gasolina C.

Outro estudo foi realizado por Freitas e Kaneko (2011), onde se demonstrou que o consumo total de etanol está diretamente relacionado com o aumento da frota de veículos *flexfuel*, tendo pouca influência a renda do consumidor na opção pelo combustível a ser abastecido por esses veículos. De acordo com os autores, o crescimento da frota de veículos tem uma correlação direta com o crescimento da demanda por etanol no país, sendo que para cada 1% de crescimento da frota, tem-se um aumento de 4,4% na demanda de etanol. Além disso, de acordo com os mesmos autores, é necessário considerar a capacidade produtiva do etanol, onde espera-se que haja aumento futuro no preço do etanol hidratado para reduzir a demanda por esse produto, equilibrando-se assim a produção e a demanda do biocombustível.

No *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários*, publicado por MMA (2014), foi estimado que a demanda de combustíveis da frota de veículos é função da quantidade de veículos que circulam na frota, da intensidade de uso e do rendimento do combustível. A **Equação 2** mostra a relação entre essas variáveis.

$$D = \frac{Q_{Veículos} \cdot I_{Uso}}{R} \quad (2)$$

Em que:

- | | | |
|----------------|---|--|
| D | = | Demanda de combustível |
| $Q_{Veículos}$ | = | Quantidade de veículos que efetivamente circulam na frota. |
| I_{Uso} | = | Intensidade de uso em km/ano |
| R | = | Rendimento do combustível em km/L |

O MMA (2014) define no mesmo estudo que a taxa de sucateamento e a intensidade de uso dos veículos leves sofrem variações de acordo com a idade da frota. As **Equações 3 e 4** mostram respectivamente as funções matemáticas para a fração de veículos remanescentes (que efetivamente circulam após o início de uso) e a **Equação 5** define a intensidade de uso dos veículos leves para o período de um ano.

$$S_A(t) = 1 - \exp(-\exp(1,798 - 0,137(t))) \quad (3)$$

$$S_C(t) = 1 - \exp(-\exp(1,618 - 0,141(t))) \quad (4)$$

$$I_{uso} = 19.400 - 600(t - 1), \text{ para } t \geq 1 \text{ ou } I_{uso} = 10.000 \text{ para } t < 1 \quad (5)$$

Em que:

S_A = Veículos remanescentes da frota de automóveis

S_C = Veículos remanescentes da frota de veículos comerciais

t = Média de idade da frota considerada de veículos

I_{uso} = Intensidade de uso em km/ano

A **Figura 3** mostra o histórico da paridade mensal entre os preços do etanol hidratado e da gasolina C para todos os estados brasileiros. O período considerado foi entre os anos de 2003 a 2015. Ao analisar esses dados, pode-se verificar que no período entre o ano de 2010 a 2012 a paridade de preços foi favorável para a substituição da gasolina C pelo etanol hidratado, devido à relação de preços entre esses combustíveis estar acima de 70%.

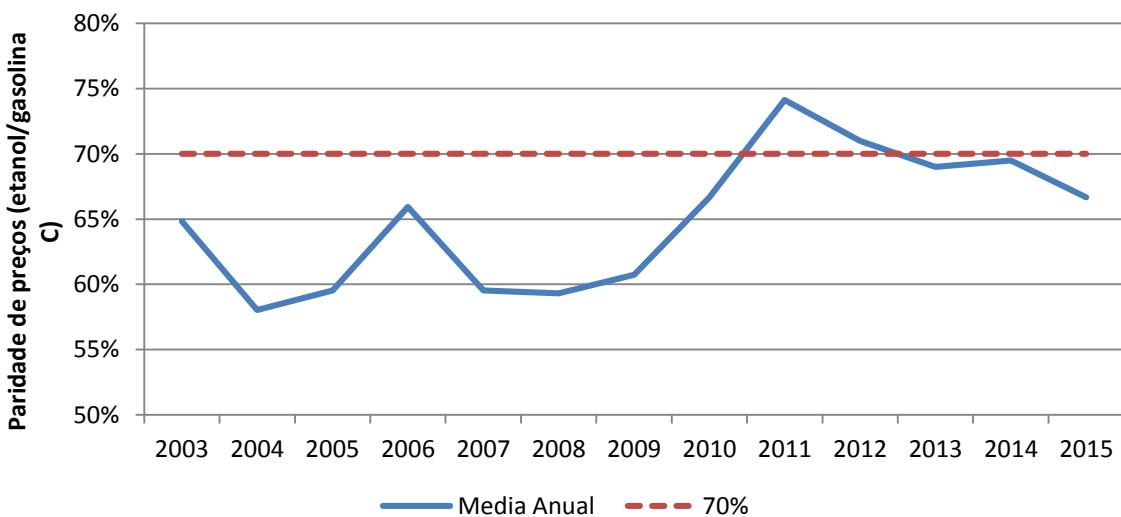


Figura 3 – Variação da paridade de preços entre o etanol hidratado e a gasolina C
Fonte: Adaptado de MAPA (2016), MAPA (2015), MAPA (2014)

A capacidade produtiva do etanol é um dos fatores que pode influenciar na oferta deste combustível e consequentemente no seu preço. Em estudo realizado por Milanez *et al.* (2012), estima-se que a taxa de crescimento da capacidade produtiva do etanol hidratado e anidro das usinas instaladas no país não seja suficiente para atender à demanda desse biocombustível em períodos futuros. A **Figura 4** mostra a previsão de demanda e a capacidade produtiva estimada entre o período de 2011 a 2015.

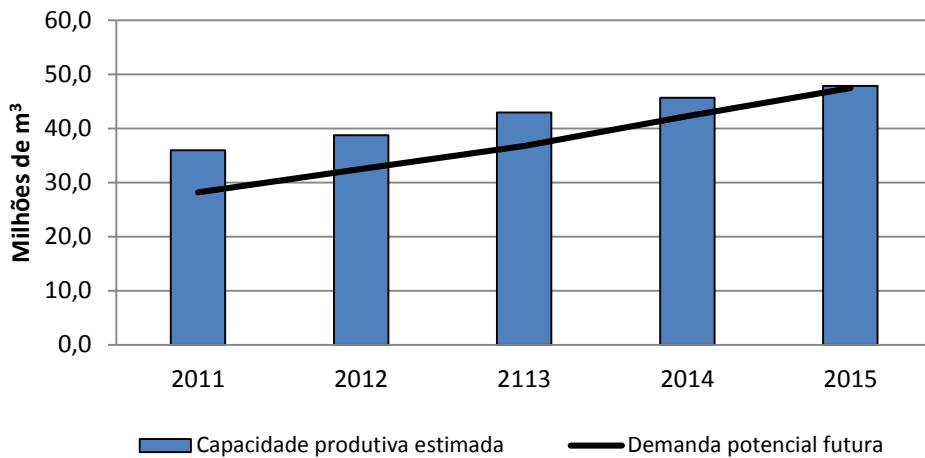


Figura 4 – Previsão da capacidade produtiva e demanda potencial do etanol
Fonte: Adaptado de Milanez *et al.* (2012).

2.3 Etanol de milho: a experiência americana e perspectivas para a produção no Brasil.

A demanda de biocombustíveis nos Estados Unidos tem crescido drasticamente nos últimos anos. Nesse país, o etanol de milho é atualmente o biocombustível predominante, utilizando para isso, a quantidade de 30% da produção total de milho do país. O Brasil, que usa exclusivamente a cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção do etanol, foi o maior produtor desse combustível até o ano de 2005, e é ainda um grande exportador. Enquanto os EUA tem um potencial limitado para expansão da área de plantio e qualquer acréscimo na área de plantio desse grão pode resultar na redução de outras plantações, o Brasil está utilizando apenas 1,6% de sua área total plantada, incluindo as áreas de pastagens (CRAGO *et al.*, 2010). Há, portanto, segundo Coelho *et al.* (2006) e BNDES (2008), uma área considerável no território brasileiro que permite a expansão do plantio e produção de cana-de-açúcar sem que haja a competição com a produção de alimentos.

De acordo com Singh (2012), Hettinga *et al.* (2009), Franceschin *et al.* (2008) e BNDES (2008), são utilizados dois processos para a produção do etanol à partir do milho: por via úmida e via seca, sendo esta última a mais utilizada atualmente para a produção de etanol nos EUA. A produção de etanol pela via úmida proporciona uma maior quantidade de subprodutos, tais como o óleo de milho, gás carbônico, amido e

aproximadamente 440 litros de etanol anidro por tonelada de milho. Por outro lado, a produção de etanol por via seca proporciona a produção média de 460 litros de etanol anidro e 380 kg DDGS (*Distillers Dried Grains and Solubles*) por tonelada de milho processado.

Uma das desvantagens da produção do etanol a partir do milho é o fato de não haver a possibilidade de aproveitamento total da biomassa do milho como fonte de geração de energia, tal qual ocorre com o bagaço da cana-de-açúcar, que é utilizado como fonte de energia para as operações produtivas das usinas brasileiras. BNDES (2008), Hofsetz e Silva (2012) e Crago *et al.* (2010) comentam que a colheita do milho gera palha, colmo, folhas e sabugo, que boa parte devem ser deixados no campo para preservar a fertilidade do solo. Diante disso, nos EUA utilizam-se energias de origem fóssil para a produção do etanol de milho.

Além do aproveitamento do bagaço, a produção de etanol de cana-de-açúcar apresenta outra vantagem em relação à produção do etanol de milho. Goldemberg *et al.* (2008) afirmam que para cada unidade de energia fóssil inserida na citada cadeia produtiva, seja sob a forma de combustível para transporte ou sob a forma de fertilizantes, obtém-se uma quantidade de 8,3 unidades de energia em etanol. Já para a produção americana do etanol de milho, de acordo com BNDES (2008), a relação entre a energia obtida sob a forma de etanol em relação à energia fossil inserida no sistema é de 1,2.

No Brasil, o milho também poderia ser utilizado como matéria-prima para a produção de etanol, tendo em vista ser um grande produtor deste cereal, sendo a região Centro-Oeste a principal produtora. De acordo com o CONAB (2013-a), a produção brasileira tem duas safras anuais de milho, sendo que a colheita da primeira safra ocorre no período de fevereiro a junho, e a colheita da segunda safra, conhecida também como a safra de inverno, ocorre de junho a novembro. De acordo com a mesma fonte, na primeira safra foram colhidos 32,6 milhões de toneladas de milho e na segunda safra, o total de 46,18 milhões de toneladas desse grão, gerando-se portanto, a possibilidade do aproveitamento do milho de segunda safra para a produção de etanol.

Segundo a APROSOJA (2013), em setembro de 2013 a empresa USIMAT, instalada na cidade de Campos de Júlio, em Mato Grosso, anunciou por meio do seu

presidente os resultados obtidos com o início da operação da usina de etanol flexível, que pode operar tanto com a cana-de-açúcar como com o milho para a produção do biocombustível. Para a obtenção desses resultados, a USIMAT investiu o montante de US\$ 8,5 milhões (cotação de R\$2,35/US\$ em 26/09/2013) e pode ser uma alternativa futura para garantir a oferta do etanol. Nessa operação, a citada usina obteve o rendimento de 352,5 litros de etanol por tonelada de milho e o rendimento de 169,5 kg de DDG por tonelada de milho.

A produção do etanol de milho teve como foco principal ocorrer no período de entressafra da cana-de-açúcar, que segundo o BNDES (2014), ocorre no período de dezembro a abril de cada ano. Nesse período, as usinas que operam exclusivamente utilizando a cana-de-açúcar como matéria-prima ficam paradas representando, portanto, um período de ociosidade do negócio.

Consultando-se a UNICA (2015-a), no período de dezembro de 2013 a abril de 2014, foram produzidas em duas usinas do estado do Mato Grosso, convertidas para operarem simultaneamente com a cana-de-açúcar e milho, a quantidade de 0,37 milhões de metros cúbicos de etanol de milho. O cereal utilizado se referia ao excedente da safra de inverno naquele estado. Há que se observar que a utilização do cereal para a produção de etanol ocorreu justamente no período de entressafra da cana-de-açúcar, que ocorre entre dezembro a abril, quando as usinas ficam paradas por falta do produto.

O BNDES (2014) afirma que, uma das desvantagens do uso da cana-de-açúcar na obtenção do etanol é que essa matéria-prima deve ser moída e processada em poucas horas após a colheita, pois caso contrário, haveria a perda da sacarose e consequentemente, a redução do rendimento produtivo de etanol ou açúcar. O milho, no entanto, não passa por este problema, podendo ser armazenado por longos períodos para uso posterior sem a perda da sua qualidade para a obtenção do etanol.

A **Tabela 1** relaciona os estados brasileiros com potencial de aproveitamento da segunda safra do milho, as respectivas usinas instaladas, os dias médios de operação das usinas e as quantidades colhidas na segunda safra de milho com base no ano de 2013. De acordo essa tabela, pode-se observar que nos estados que produzem a segunda safra de milho estão instaladas 331 unidades de usinas

produtoras de etanol à partir da cana-de-açúcar, que representa 82,34% do total de usinas instaladas no Brasil.

Tabela 1 – Número de usinas, dias médios de operação e segunda safra de milho.

Estados	Quant. Usinas	Dias médios de Operação durante o ano	Segunda safra de milho (2012) (10 ³ t)
SP	169	201	1472,3
PR	29	229	10485,9
MG	45	186	617,8
MS	21	222	7451,1
GO	34	183	4017,6
MT	9	173	19357,8
AL	24	185	21,9
Total dos Estados considerados no estudo	331	- x -	43424,4
Total Usinas Brasil	402	- x -	46179,5

Fonte: Adaptado de CONAB (2013-a), CONAB (2013-b).

Fazendo-se a mesma análise com relação à produção de milho de segunda safra, o total produzido pelos estados considerados na **Tabela 1** é de 43.424,4 mil toneladas, o que representa 94% da produção total do Brasil. A combinação das usinas instaladas e a produção de milho de segunda safra habilitam esses estados a produzirem o etanol à partir do milho, bastando para isso, a conversão das usinas para poderem operar com o milho e o excedente de milho.

Um ponto importante a ser observado, principalmente quando deseja-se analisar a sustentabilidade e a competitividade da produção do etanol, é o consumo e a forma de obtenção da energia utilizada nas etapas industriais. Salla e Cabelo (2010) publicaram um estudo que determina que o processamento industrial de uma tonelada de cana-de-açúcar para a obtenção de 85 litros de etanol consome 1.641,56 MJ, ao passo que o processamento de uma tonelada de milho produz 352 litros de etanol e consome 3.882,39 MJ de energia. Esses dados ganham importância, quando colocado em análise o bagaço de cana-de-açúcar que é a principal fonte de energia térmica e elétrica para a produção de etanol nas usinas. De acordo com Lamonica (2007), o processamento de uma tonelada de cana-de-açúcar gera 276 kg de bagaço com potencial energético de 2503,71 MJ e quando a

colheita é mecanizada, pode-se obter a quantidade de 165 kg de palha por tonelada de cana colhida, que tem o potencial energético de 2.143,64 MJ. O mesmo autor complementa que em média, há um excedente de 15% do bagaço de cana-de-açúcar na produção do etanol.

Analizando-se esses dados energéticos e considerando-se perdas de 21% na conversão da queima do bagaço de cana-de-açúcar ou palha para a obtenção de vapor nas usinas de cana-de-açúcar, de acordo com Lamonica (2007), pode-se estimar que ao processar uma tonelada de cana, há a disponibilidade bruta de 2503,71 MJ de energia proveniente do bagaço, perdas de 525,78 MJ, consumo de 1.641,56 MJ de energia no processo industrial de obtenção do etanol, havendo o saldo de 336,37 MJ, que poderia ser aproveitado para o processamento de milho para a obtenção de etanol.

2.4 O futuro dos combustíveis para fins veiculares

O CGEE (2009) indica que nos anos a que o estudo se refere, o aumento da produção e do consumo do etanol combustível tem sido motivado por três fatores: a) a necessidade de mitigação dos gases de efeito estufa iniciada a partir do acordo do protocolo de Quioto, b) o aumento da segurança de suprimento energético e, c) pressões econômicas e sociais voltadas para a promoção do desenvolvimento rural e a criação de empregos, no caso dos países em desenvolvimento, e para a manutenção da renda e da qualidade de vida dos agricultores, no caso principalmente dos Estados Unidos e da União Europeia.

A intenção de redução dos gases de efeito estufa acordada pelos países no Protocolo de Quioto (e novamente tratada no acordo de Paris de 2015), tem feito, segundo o CGEE (2009) e o BNDES (2008), com que novas tecnologias fossem desenvolvidas para fins veiculares. Uma dessas tecnologias foi a utilização de métodos alternativos para a obtenção do etanol, tendo-se como exemplo o etanol de milho americano e o etanol de beterraba dos países da União Europeia (U.E.). Outra tecnologia que tem sido desenvolvida, se refere ao desenvolvimento de veículos elétricos, cujo objetivo principal é zerar as emissões de gases do efeito estufa.

Analizando-se sob o ponto de vista da redução dos gases do efeito estufa, o CGEE (2009) afirma que, em curto prazo, os biocombustíveis apresentam uma substancial vantagem sobre o desenvolvimento de veículos puramente elétricos ou movidos a tecnologias mais recentes, como é o caso da célula de combustível. Tal vantagem tem uma relação direta com a infraestrutura existente em todos os países para o transporte, distribuição e comercialização dos combustíveis derivados do petróleo. Aproveitando-se dessa infraestrutura, os biocombustíveis podem ser utilizados de imediato, sendo a forma mais simples, a sua adição aos combustíveis de origem fóssil.

Consultando-se Castro e Ferreira (2010), CGEE (2009) e Li *et al.* (2013), estão disponíveis três tecnologias para a motorização elétrica em automóveis: veículo com motorização híbrida que utiliza o motor a combustão combinado com o motor elétrico, veículo com motorização elétrica pura e o veículo a célula de hidrogênio que representa a utilização do motor elétrico alimentado por uma célula de hidrogênio que gera eletricidade. Segundo Castro e Ferreira (2010) e Baran e Legey (2010), o veículo híbrido pode ser considerado como uma tecnologia de transição dos veículos a combustão para os veículos puramente elétricos. Essa tecnologia utiliza-se do auxílio de sistemas eletrônicos de controle para buscar o melhor aproveitamento das características do motor a combustão e do motor elétrico. Dessa forma, em baixas velocidades, o motor elétrico é acionado com maior frequência e em velocidades superiores e em regime constante, o motor a combustão é mais frequentemente acionado. Além disso, por meio de sistemas de controles eletrônicos, durante a frenagem desses veículos, a energia cinética é convertida em elétrica permitindo a recarga das baterias.

Li *et al.* (2013) adiciona que o uso células de hidrogênio para a alimentação dos motores elétricos dos veículos, se apresenta como a tecnologia mais promissora para a completa eliminação do uso de derivados do petróleo para a propulsão veicular. No entanto, o mesmo autor alerta que o principal problema para que essa tecnologia se popularize se refere à produção e armazenamento do gás hidrogênio.

O armazenamento e fornecimento de energia para a motorização elétrica, tanto dos veículos elétricos puros, como dos veículos híbridos são realizados por meio de baterias elétricas. EMADI *et al.* (2005) e Castro e Ferreira (2010) definem que uma das barreiras para que esses veículos se tornem competitivos perante os

veículos a combustão pode ser atribuída ao custo das baterias e ainda à baixa capacidade de armazenamento desses dispositivos. O custo das baterias faz com que o veículo elétrico seja comercializado a patamares que chegam a duas vezes o valor de um veículo a combustão de mesma faixa de potência. A baixa capacidade de armazenamento, reduz a autonomia, permitindo a movimentação do veículo com motorização elétrica apenas em pequenas distâncias.

Por conta dessas dificuldades citadas e aliadas a necessidade de uma total mudança da tecnologia baseada nos veículos movidos utilizando-se de combustíveis líquidos, Castro e Ferreira (2010) complementam que se percebe no mercado mundial um movimento ainda pequeno quanto ao lançamento de veículos híbridos (ainda na ordem de 1,23% no ano de 2009 em relação aos veículos a combustão). No caso de veículos puramente elétricos, esse movimento é ainda bastante lento, devido à maioria das montadoras estarem ainda em fase de desenvolvimento de seus veículos. Consultando-se a ANFAVEA (2016), no ano de 2015 um total de 846 veículos elétricos e híbridos foram licenciados no território brasileiro, mostrando que apesar de ainda pequena é uma tendência que pode ser constatada no país.

Um ponto básico a ser discutido com relação à difusão dos veículos puramente elétricos é a geração da energia elétrica, cuja capacidade dos sistemas de geração dos países irá, no futuro, limitar a taxa de crescimento desses veículos. De acordo com as análises realizadas por Castro e Ferreira (2010), a taxa de crescimento dos veículos elétricos estará condicionada às margens de segurança existentes nos sistemas elétricos de cada país.

Castro e Ferreira (2010) complementam que além da necessidade do aumento da capacidade de geração dos sistemas elétricos, os veículos puramente elétricos irão demandar uma completa reestruturação do sistema de distribuição elétrica das cidades, contando com a readequação da geração elétrica, dos transformadores de distribuição e da instalação de pontos de recargas das baterias dos veículos em vias públicas. Tais mudanças significam a completa reestruturação das cidades e a quebra de um paradigma, cujas práticas estão relacionadas com a economia do petróleo. Mudanças dessa natureza envolvem a participação de órgãos governamentais e a iniciativa privada sendo, portanto, medidas que necessitam de uma adequada governança para a implantação da infraestrutura para dar suporte aos veículos elétricos.

2.5 Referências Bibliográficas

- ANDERSON, S. T. **The demand for ethanol as a gasoline substitute**, Journal of Environmental Economics and Management v.63, p. 151-168, 2012.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **BIG: Banco de Informação de Geração**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/>>. Acesso em: abr/2016.
- ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2015**. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/>> Acesso em: out/2015.
- ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2016**. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/>> Acesso em: abr/2016.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, **Anuário Estatístico 2013**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em: nov/2015-c.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, **Anuário Estatístico 2014**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em: nov/2015-b.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo. **Anuário Estatístico 2015**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>> Acesso em: nov/2015-a.
- APROSOJA – Associação dos Produtores de Soja do Estado de Mato Grosso. **I Forum Brasileiro de Etanol de Milho e Sorgo**. Sorriso/MT, 2013.
- BAEYENS, J., KANG, Q., APPELS, J., DEWIL, R., LV, Y., TAN, T. **Challenges and opportunities in improving the production of bio-ethanol**. Progress in Energy and Combustion Science v.47, pp. 60-88, 2015.
- BAKE, J. D. V. D. W., JUNGINGER, M., FAAJI, A., WALTER, A. **Explaining the experience curve: cost reductions of Brazilian ethanol from sugarcane**. Biomass and Bioenergy v.33, p. 644-658, 2009.
- BARAN, R., LEGEY, L. F. L. **Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil**. BNDES Setorial v.33, 2010.
- BIOFUELS DIGEST. **Biofuels mandates around the world**. Disponível em <<http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2014/12/31/biofuels-mandates-around-the-world-2015/>>, acesso em 11/07/2015.
- BNDES. **A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política**. Revista do BNDES v.41, p. 147-208, 2014.
- BNDES. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Organização BNDES e CGE, Rio de Janeiro, 2008.

CASTRO, B. H. R., FERREIRA, T. T. **Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades.** BNDES Setorial v.32, 2010.

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil.** Brasília, 2009.

COELHO, S.T.; GOLDEMBERG, J.; LUCON, O.; GUARDABASSI, P. **Brazilian Sugarcane Ethanol: Lessons Learned.** Energy for Sustainable Development; v.2, 2006.

CONAB - Companhia Nacional do Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar. v. 4 – Safra 2013/2014.** Brasília, 2014.

CONAB – Companhia Nacional do Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira – Grãos; v.1 – Safra 2013/14.** Brasília, 2013-a.

CONAB - Companhia Nacional do Abastecimento. **Perfil do Setor do Açúcar e do Álcool no Brasil; v.5 – Safra 2011/2012.** Brasília, 2013-b.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 15 – Controle da Poluição do Ar – PROCONVE/PROMOT.** Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/areas-tematicas-qa/programa-proconve>>. Acesso em jan/2015.

CRAGO C. L., KHANNA, M., BARTON, J., GIULIANI, E., AMARAL, W. **Competitiveness of Brazilian sugarcane ethanol compared to US corn ethanol.** Energy Policy v.38, p. 7404-7415, 2010.

EMADI. A, RAJASHEKARA, K., WILLIAMSON, S. S., LUKIC, S. M. **Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations.** IEEE Transactions on Vehicular Technology, V. 54, n. 3, 2005.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Avaliação do Comportamento dos Usuários de Veículos Flex-Fuel no Consumo de Combustíveis no Brasil.** Brasília, 2013.

FRANCESCHIN, G., ZAMBONI, A., BEZZO, F., BERTUCCO, A. **Ethanol from corn: a technical and economical assessment based on different scenarios.** Chemical Engineering Research and Design v.86, p. 488-498, 2008.

FREITAS, L. C., KANEKO, S. **Ethanol Demand under the Flex Fuel Technology Regime in Brazil.** Energy Economics v.33, p. 1146-1154, 2011.

GOLDEMBERG, J., COELHO, S. T., GUARDABASSI, P. **The sustainability of ethanol production from sugarcane.** Energy Policy v.36, p. 2086-2097, 2008.

GOMEZ, J. M. A, LEGEY, L. F. L. **An analysis of the impact of Flex-Fuel vehicles on fuel consumption in Brazil, applying Cointegration and the Kalman Filter.** Energy v.81, p. 696-705, 2015.

HETTINGA, W. G.; JUNGINGER, H. M., DEKKER, S. C.; HOOGWIJK, M; MCALOON, A. J.; HICKS, K. B. **Understanding the Reduction in US Corn Ethanol Production Costs: An Experience Curve Approach.** Energy Policy v.37; p. 190-203; 2009.

HIRA, A. **Sugar Rush: Prospects for a Global Ethanol Market.** Energy Police v.39; p. 6925-6935, 2011.

HOFSETZ, K; SILVA, M. A. **Brazilian Sugarcane Bagasse: Energy and Non-energy consumption.** Biomass and Energy v.46; p. 564-573. 2012.

KOIZUMI, T. **Biofuels and food Security.** Renewable and Sustainable Reviews v.52, p. 829-841, 2015.

LAMONICA, H. M. **Produção de Vapor e Eletricidade – A Evolução do Setor Sucroalcooleiro.** Workshop de Gestão de Energia e Resíduos na Agroindústria Sucroalcooleira, 2007.

LI, X., CLARK, C. D., JENSEN, K. L., YEN, S. T., ENGLIH, B. C. **Consumer purchase intentions for flexible-fuel and hybrid-electric vehicles.** Transportation Research, Part D, v.18, p. 9-15, 2013.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Comparativo Etanol Hidratado vs Gasolina no Brasil 2005-2015.** disponível em <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas>, 2016.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Comparativo Etanol Hidratado vs Gasolina no Brasil 2004-2014.** disponível em <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas>, 2015.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Comparativo Etanol Hidratado vs Gasolina no Brasil 2003-2013.** disponível em <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas>, 2014.

MARTINEZ, S. H., EIJCK, J. V., CUNHA, M. P., GUILHOTO, J. J. M., WALTER, A., FAAIJ, A. **Analysis of socio-economic impacts of sustainable sugarcane ethanol production by means of inter-organizational Input-Output analysis demonstrate of North-East of Brazil.** Renewable and Sustainable Energy Reviews v.28; p. 290-316; 2013.

MELO T. C. C., MACHADO, G. B., BELCHIOR, C. R. P., COLAÇO, M. J., BARROS, J. E. M., OLIVEIRA, E. J., OLIVEIRA, D. G. **Hydrous ethanol-gasoline blends – Combustion and emission investigations on a Flex-Fuel engine.** Fuel v.97, pp. 796–804, 2012.

MILANEZ, A. Y., NYKO D., GARCIA, J. L. F., REIS, B. L. S. F. S. **O déficit de produção de etanol no Brasil entre 2012 e 2015: determinantes, consequências e sugestões de política.** BNDES, Rio de Janeiro, 2012.

MILANEZ, A. Y., NYKO D., VALENTE, M. S., XAVIER, C. E. O., KULAY, L. A., DONQUE, C. G., MATSUURA, M. I. S. F., RAMOS, N. P., MORANDI, M. A. B., BONOMI, A., CAPITANI, D. H. D., CHAGAS, M. F., CAVALETT, O. **A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política.** Revista BNDES v.41, 2014.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários.** Brasília/Brasil, 2014.

MOLLO NETO, M., VENDRAMETTO, O., WALKER, R. A. **Is the Development of Brazilian Biofuel Network Sustainable?** International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2010), Vienna, Springer, 2010.

NEVES, M. F., TROMBIN, V. G. **A dimensão do setor sucroenergético – Mapeamento e quantificação da safra 2013/2014.** Ribeirão Preto, Markestrat, Fundace, FEA-RP/USP; 2014.

NOGUEIRA, L. A. H., CAPAZ, R. S. **Biofuel in Brazil: evolution, achievements and perspective on food security.** Global Food Security v.2; pp. 117-125, 2013.

NOVO, A., JANSEN, K., SLINGERLAND, M. **The sugarcane-biofuel expansion and dairy farmers responses in Brazil.** Journal of Rural Studies v.29, pp. 640-649, 2012.

PETEAN, G. H., NORILLER, R. M.; SANTOS, L. C.; CHAEBO, G.; SANCHES, F. T. **Etanol Hidratado no estado de São Paulo: previsão de preços a partir do método de Holt-Winters.** SIMPEP; 2011.

RAELE, R., BOAVENTURA, J. M. G.; FISCHMANN, A. A., SARTURI, G. **Scenarios for the second generation ethanol in Brazil.** Technological Forecasting and Social Change v.87, pp. 205-223, 2014.

ROVERE, E. L., PEREIRA, A. S., SIMÕES, A. F. **Biofuels and Sustainable Development in Brazil,** World Development v.39, pp. 1026-1036, 2011.

SADEGHINEZHAD, E., KAZI, S. N., SADEGHINEJAD, F., BADARUDIN, A., MEHRALI, M., SADRI, R., SAFAEI, M. R. **A comprehensive literature review of biofuel performance in internal combustion engine and relevant costs involvement.** Renewable and Sustainable Energy Reviews v.30, p. 29-44, 2014.

SALLA, D. A., CABELO, C.; **Análise Energética na Produção de Etanol de Mandioca, Cana-de-Açúcar e Milho.** Revista Energia na Agricultura, Botucatu, v. 25, nº 2; p. 32-53, 2010.

SANTOS, G. F. **Fuel Demand in Brazil in a Dynamic Panel Data Approach.** Energy Economics v.36, p. 229-240, 2013.

SINGH, V. **Effect of corn quality on bioethanol production.** Biocatalysis and Agricultural Biotechnology v.1, p. 353-355, 2012.

SOCCOL, C. R., VANDENBERGHE, L. P. S., MEDEIROS, A. B. P., KARP S. G., BUCKERIDGE, M., RAMOS, L. P., PITARELO, A. P., LEITÃO, V. F., GOTTSCHALK, L. M. F., FERRARA, M. A., BOM, E. P. S., MORAES, L. M. P., ARAÚJO, J. A., TORRES, F. A. G. **Bioethanol from lignocelluloses: Status and perspectives in Brazil.** *Bioresource Technology* v.101, p. 4820-4825, 2010.

SOUSA, E. L. L., MACEDO, I. C. **Etanol e Bioeletricidade – A cana-de-açúcar no futuro da Matriz Energética.** UNICA, São Paulo, 2010.

STATTMAN, S. L., HOSPES, O., MOL, A. P. J. **Governing Biofuels in Brazil: a comparison of ethanol and biodiesel policy.** *Energy Policy* v.61, p. 22-30, 2013.

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Notícia: PIB Sucroenergético cresce 44% em 5 anos.** disponível em <<https://www.novacana.com>>, consulta realizada em 16/06/2015-b.

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Relatório de moagem e produção de açúcar e etanol – safra 2014/2015.** disponível em <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php>>, consulta realizada em 12/10/2015-a.

VIANA, K. R. O.; PEREZ, R. **Survey of sugarcane Industry in Minas Gerais, Brazil: Focus on Sustainability.** *Biomass and Energy* v.58, p. 149-157, 2013.

VOHRA, M., MANWAR, J., MANMODE, R., PADGILWAR, S., PATIL, S. **Bioethanol production: Feedstock and current technologies.** *Journal of Environmental Chemical Engineering* v.2, p. 573-584, 2014.

WALTER, A., ROSILLO-CALLE, F., DOLZAN, P., PIACENTE, E., CUNHA, K. B. **Perspectives on fuel ethanol consumption and trade.** *Biomass and Bioenergy* v.32, p. 730-748, 2008.

3. METODOLOGIA

3.1 Pesquisa sistemática e exploratória

Para alcançar os objetivos propostos na presente tese, foram realizadas pesquisas bibliográficas e exploratórias em bases de dados de revistas tais como *Science Direct*, *Scielo* e *Springer Books*. Adicionalmente, utilizou-se informações coletadas em bases de dados de entidades setoriais e governamentais, tais como ANP (Agência Nacional do Petróleo e Gás), ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores), EPE (Empresa de Pesquisas Energéticas), UNICA (União da Indústria de Cana-de-Açúcar), MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), BNDES (Banco Nacional do Desenvolvimento), MMA (Ministério do Meio Ambiente), CONAB (Companhia Nacional do Abastecimento) e APROSOJA (Associação dos Produtores de Milho e Soja do Estado de Mato Grosso).

Pela pesquisa bibliográfica realizada, pode se constatar que publicações referentes à produção e consumo do bioetanol são um assunto de relevância mundial, tendo em vista a preocupação dos países na utilização de combustíveis renováveis e limpos para o abastecimento da frota de veículos leves. Além disso, a existência de uma frota de veículos *flexfuel* e a disponibilidade do etanol hidratado nos postos de abastecimento é um fato existente somente no Brasil, sendo, portanto, objeto de estudos de pesquisadores de vários países. No entanto, constatou-se em pesquisas bibliográficas, que poucas publicações foram dedicadas analisando a influência da paridade de preços entre os combustíveis disponíveis para os veículos leves no Brasil e os respectivos fatores causadores da variação da paridade de preços.

Portanto, a partir da pesquisa exploratória foi possível identificar e analisar questões como a oferta de combustíveis decorrente dos períodos de safra e entressafra da cana-de-açúcar, da preferência de combustíveis no momento do abastecimento pelos proprietários dos veículos *flexfuel* e a influência das políticas públicas na oferta dos combustíveis.

O estudo das variáveis que afetam o fornecimento e demanda do biocombustível pode auxiliar na compreensão dos problemas do setor sucroenergético, indicando sugestões de ordem produtiva, mercadológica e de políticas públicas para buscar-se a manutenção do bioetanol na matriz energética brasileira.

3.2 Pesquisa de campo e participação em eventos

Ao longo do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, buscou-se a participação em congressos, tais como APMS - 2015, ENEGEP - 2013, SIMPEP - 2013, participação em eventos tais como *Ethanol SUMMIT 2014* e visita técnica a uma usina de etanol (Raizen Energia S/A, cidade de Mirandópolis/SP).

Tais atividades possibilitaram a constatação da atual situação de crise de fornecimento do etanol combustível no Brasil, que envolve questões como a produtividade dos canaviais, a falta de infraestrutura para a distribuição do biocombustível e a falta de uma clara visão de longo prazo para o setor sucroenergético influenciada por políticas públicas consideradas como equivocadas, segundo a opinião dos palestrantes nos eventos citados anteriormente.

3.3 Estudo da demanda de combustíveis para veículos leves

O conhecimento da demanda de combustíveis para veículos leves no Brasil, e os seus respectivos fatores causadores irá permitir o estabelecimento de ações estratégicas para a redução da crise do abastecimento do biocombustível. Diante disso, foram necessárias consultas em bases de dados de entidades setoriais ou governamentais (ANP, ANFAVEA, UNICA, MAPA) para a obtenção de dados históricos de consumos de combustíveis, fabricação de veículos leves, fabricação do etanol hidratado e anidro e finalmente, dados referentes à paridade de preços entre o etanol hidratado e a gasolina C.

As funções matemáticas analisadas e posteriormente adaptadas para a execução das simulações de consumo de combustíveis foram obtidas a partir de estudos realizados por MMA (2014) e EPE (2013).

Além disso, foram consultadas diversas publicações em base de dados de revistas científicas para a análise de metodologias aplicadas para a determinação de consumo de combustíveis pelos veículos automotores que incluíram Anderson (2012), Freitas e Kaneko (2011), Gomez e Legey (2015), Melo *et al.* (2012), Santos (2013) e Walter *et al.* (2008).

As simulações permitiram analisar, a previsão de demanda de combustíveis para veículos leves, tendo-se como variáveis a variação da frota circulante de automóveis e veículos comerciais leves, a variação dos preços dos combustíveis em função dos períodos de safra e entressafra da cana de açúcar, o rendimento (em km/L) dos veículos e por final, a variação da idade da frota de veículos. Para a consecução da simulação, utilizou-se o software *Insight Maker®*, que permite programar em cada bloco de funções, as respectivas funções matemáticas das variáveis que afetam no estudo realizado.

Referências Bibliográficas

- ANDERSON, S. T. **The demand for ethanol as a gasoline substitute**. Journal of Environmental Economics and Management v.63, pp. 151-168, 2012.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Avaliação do Comportamento dos Usuários de Veículos Flex-Fuel no Consumo de Combustíveis no Brasil**. Brasília, 2013.
- FREITAS, L. C., KANEKO, S. **Ethanol Demand under the Flex Fuel Technology Regime in Brazil**. Energy Economics v.33, pp. 1146 – 1154, 2011.
- GOMEZ, J. M. A, LEGEY, L. F. L. **An analysis of the impact of Flex-Fuel vehicles on fuel consumption in Brazil, applying Cointegration and the Kalman Filter**. Energy v.81, p. 696-705, 2015.
- MELO T. C. C., MACHADO, G. B., BELCHIOR, C. R. P., COLAÇO, M. J., BARROS, J. E. M., OLIVEIRA, E. J., OLIVEIRA, D. G. **Hydrous ethanol-gasoline blends – Combustion and emission investigations on a Flex-Fuel engine**. Elsevier, Fuel v.97, p. 796–804, 2012.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. Brasília/Brasil, 2014.

SANTOS, G. F. **Fuel Demand in Brazil in a Dynamic Panel Data Approach**. Energy Economics v.36, pp. 229-240, 2013.

WALTER, A., ROSILLO-CALLE, F., DOLZAN, P., PIACENTE, E., CUNHA, K. B. **Perspectives on fuel ethanol consumption and trade**. Biomass and Bioenergy v.32, p. 730-748, 2008.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e as discussões desta tese são apresentados em forma de artigos científicos como segue.

4.1 Artigo: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA DEMANDA DO ETANOL E DA GASOLINA EM FUNÇÃO DA EVOLUÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS LEVES NO BRASIL

Publicado pela Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, V. 9, n. 17; p. 3188, Recebido em: 30/09/2013 – Aprovado em: 08/11/2013 – Publicado em: 01/12/2013; ISSN 1809-0583.

Este artigo busca responder ao objetivo específico 1, que foi analisar o comportamento da demanda de combustíveis para veículos leves no Brasil, levando-se em consideração a variação da paridade de preços dos combustíveis e a evolução da frota de veículos leves.

Resumo: A introdução da tecnologia *flexfuel* determinou uma nova dinâmica na demanda de combustíveis no Brasil. Com a aceitação por parte dos consumidores e a evolução dos veículos *flexfuel* na frota brasileira de veículos, a decisão pelo combustível passou a ser realizada no momento do abastecimento. Dentre os fatores que levam o proprietário dos veículos a decidirem pelo combustível a ser utilizado, pode-se relacionar a paridade de preços entre o etanol hidratado e a gasolina, a autonomia do veículo, a preferência pelo combustível com menor emissão de gases do efeito estufa e a possibilidade de adulteração, conforme apontam estudos realizados pela EPE (Empresa de Pesquisas Energéticas) no ano de 2012. Este artigo apresenta, utilizando-se de técnicas de simulação em dinâmica de sistemas, a análise do comportamento da demanda da gasolina, etanol hidratado e etanol anidro em função da evolução da frota de veículos leves no país para o período de 2013 a 2020. Ao final do artigo, o comportamento da demanda de

combustíveis é analisado, sugerindo-se modificações nas políticas energéticas do país.

Palavras-chave: Biocombustíveis, Dinâmica de Sistemas, Simulação.

4.1.1 Introdução

No Brasil, com o início da fabricação e comercialização dos veículos *flexfuel* em 2003, houve um aumento significativo da utilização do etanol hidratado e anidro como combustíveis carburantes. De acordo com o BNDES (2008), a gasolina comercializada no Brasil possui uma proporção de etanol anidro, que é adicionada na porcentagem de 20% a 25%, cuja função é a de ser um aditivo antidetonante à gasolina pura. De acordo com a ANP (2013-a), no ano de 2012 a produção total de etanol anidro e o hidratado foi de 23,54 milhões de metros cúbicos e a produção de gasolina A (gasolina pura sem adição de etanol anidro) foi de 31,74 milhões de metros cúbicos.

Este trabalho teve como objetivo simular, por meio da *Dinâmica de Sistemas*, a demanda brasileira de combustíveis utilizados na frota de veículos leves, envolvendo o etanol anidro, etanol hidratado e a gasolina C. Para tanto, considerou-se a frota brasileira de veículos automotores leves, constituídos pelos automóveis e comerciais leves. A simulação foi realizada para um período de 96 meses, compreendendo o início da simulação no ano de 2013 e final no ano de 2020. Para a modelagem, foram utilizadas as funções matemáticas inerentes às previsões de demandas publicadas pelos órgãos setoriais, incluindo a evolução da frota de veículos, a paridade entre os preços dos combustíveis durante os meses do ano e da decisão do proprietário de veículos *flexfuel* no momento do abastecimento com relação à escolha do combustível a ser utilizado.

Para fins de análise, o trabalho considerou três cenários para a simulação, considerando a paridade de 60%, que favorece a utilização do etanol hidratado, 70% que seria a razão de preços em que o consumidor possa optar por qualquer um dos combustíveis em questão e a paridade de 80%, que é altamente favorável ao abastecimento com gasolina C.

Ao final do estudo são apresentados os resultados obtidos na simulação e as conclusões que mostram o comportamento da demanda dos combustíveis em cada cenário simulado.

4.1.2 Referencial Teórico

4.1.2.1 Contextualização da demanda de combustíveis no Brasil

A produção e comercialização de veículos *flexfuel*, iniciada à partir do ano de 2003, determinou uma nova dinâmica à demanda de combustíveis no Brasil. De acordo com a EPE (2013), com a introdução da tecnologia *flexfuel*, que permite que os veículos sejam abastecidos com o etanol hidratado, gasolina C, ou a mistura de ambos em qualquer proporção, o consumidor ganhou a possibilidade de optar pelo combustível de sua preferência no momento do abastecimento.

Embora os veículos *flexfuel* possam ser abastecidos com etanol hidratado ou gasolina C, é necessário lembrar que a gasolina C tem um porcentual de etanol anidro, que pode variar de 20% a 25%, conforme apontado pela ANP (2005).

De acordo com BNDES (2008), considerando-se o poder calorífico da gasolina misturada com etanol anidro e do etanol hidratado, só se constituirá em vantagem econômica para o consumidor, caso o preço desse último seja de até 70% do preço da gasolina C comercializada nas bombas de abastecimento.

A **Figura 5** mostra o gráfico da evolução da frota de veículos leves no Brasil no período de 2003 a 2012, onde pode se observar o aumento significativo da frota de veículos *flexfuel* e a redução da frota de veículos à gasolina. No mesmo gráfico, pode-se visualizar a evolução do consumo de etanol hidratado e anidro e gasolina A.

A ANFAVEA (2013-a) classifica os veículos leves em automóveis e comerciais leves, sendo este último constituído pelas vans, camionetas, *pick-ups* e furgões.

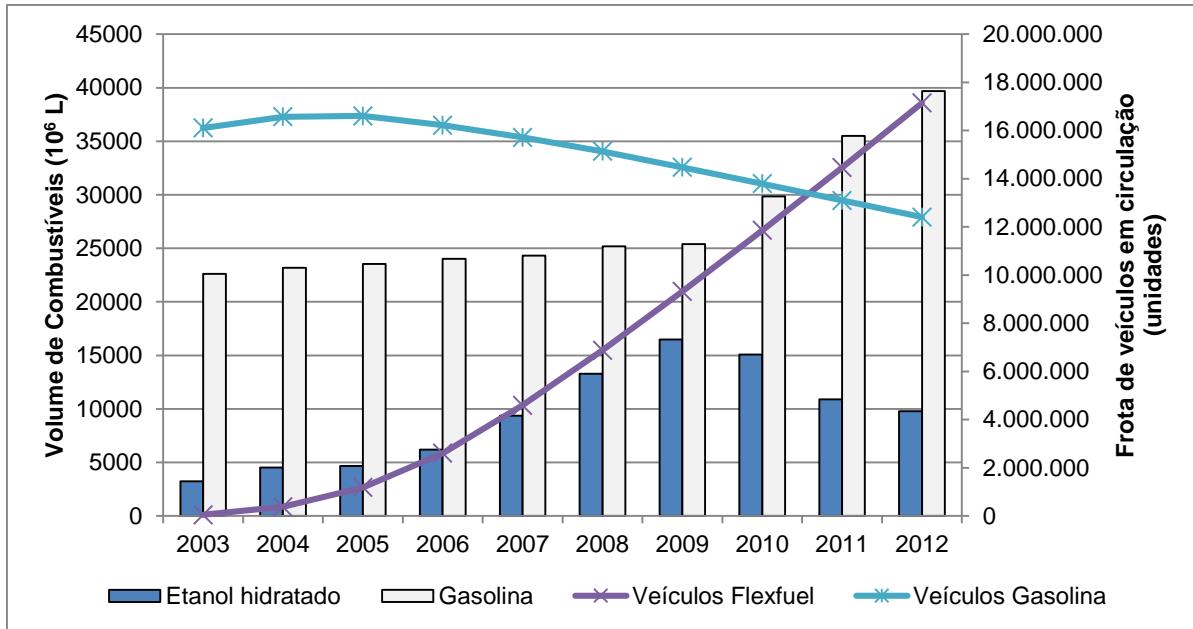


Figura 5 – Consumo de combustíveis e evolução da frota de veículos leves
Fontes: Adaptado de ANP (2013-b) e ANFAVEA (2013-b).

Na **Figura 5** pode-se observar ainda nas curvas de demandas de combustíveis, que apesar do crescente aumento da frota de veículos *flexfuel* no período considerado, à partir do ano de 2009 o consumo de etanol hidratado tem decrescido e o consumo de gasolina A tem aumentado. Milanez *et al.* (2012) comentam que a queda do consumo do etanol hidratado e o consequente aumento do consumo da gasolina se deve ao aumento de preços médios de 27% do etanol hidratado e anidro praticados pelas usinas entre as safras de 2008-2009 e 2010-2011, fazendo com que o consumidor passasse a optar pela gasolina.

A **Tabela 2** relaciona a frota circulante de veículos leves no Brasil, obtida à partir de MMA (2011). Tais dados consideram a frota estimada à partir de dados oficiais da ANFAVEA e DENATRAN e estimativas do MCT e SINDIPEÇAS, bem como a equação matemática de sucateamento de veículos em função da idade da frota, que será utilizada na simulação dinâmica. A **Tabela 2** mostra a frota estimada de veículos leves, cujos valores serão utilizados como quantidades iniciais para a simulação.

Tabela 2 – Frota estimada de veículos leves no final do ano de 2012.

Tipo de Veículo / Combustível	Frota estimada no final do ano de 2012 (unidades)
Automovel / Gasolina C	10.818.489
Automóvel / Etanol Hidratado	1.009.509
Automóvel / <i>Flexfuel</i>	15.321.615
Comercial Leve / Gasolina C	1.587.787
Comercial Leve / Etanol Hidratado	111.065
Comercial Leve / <i>Flexfuel</i>	1.824.110

Fonte: Adaptado de MMA (2011)

Milanez *et al.* (2012) comentam que o fato da existência de um combustível alternativo à gasolina comercializada no país é importante para o equilíbrio da balança comercial brasileira, que ainda importa gasolina para suprir as necessidades internas. Petean *et al.* (2011) define que o petróleo extraído do Brasil é de baixa qualidade e a capacidade de refino é ainda deficitária, resultando em necessidade de importação desse combustível em alguns períodos do ano, sendo então o consumo do etanol hidratado um fator benéfico para evitar a necessidade de importação do combustível fóssil. De acordo com os mesmos autores, o Brasil importou em 2010 o montante de 505 milhões de litros de gasolina e a região Nordeste continua importando etanol dos Estados Unidos.

Petean *et al.* (2011) afirmam que para um aumento do consumo de gasolina, considera-se realizar uma mistura com proporções maiores de etanol anidro (até a proporção de 25%) e vice-versa. BNDES (2008) considera que a mistura do etanol anidro à gasolina, além da função de equilibrar a necessidade de importação de gasolina, cumpre uma importante função técnica ao motor de ciclo Otto (motor de combustão interna), sendo um aditivo antidetonante a esse combustível.

4.1.2.2 Influência da Paridade na Demanda dos combustíveis

A EPE (2013) publicou uma pesquisa realizada em todo o território nacional, para analisar o comportamento dos usuários de automóveis *flexfuel*. Além da análise de fatores qualitativos que levam o consumidor a decidir pelo combustível a ser utilizado, como a preocupação com o meio ambiente, o rendimento do motor, a

bandeira dos postos de preferência, a pesquisa analisou a porcentagem de volume do etanol utilizado pelos consumidores em função da paridade de preços. A função matemática resultante desta análise está descrita na **Equação 6**.

$$\frac{V_e}{V_t} = \frac{1}{1 + 0,001685 \cdot (6567,5754)^{P_e/P_g}} \quad (6)$$

Em que:

V_e = Volume de etanol hidratado.

V_t = Volume total de combustível (soma volumétrica de etanol hidratado e gasolina C).

P_e = Preço do etanol hidratado

P_g = Preço da gasolina C

Outro estudo foi realizado por Freitas e Kaneko (2011), onde se demonstrou que o consumo de etanol está diretamente correlacionado com o aumento da frota de veículos *flexfuel*, tendo pouca influência a renda do consumidor na opção pelo combustível a ser abastecido nesses veículos. De acordo com os autores, o crescimento da frota de veículos tem uma correlação direta com o crescimento da demanda por etanol no país, sendo que para cada 1% de crescimento da frota, há um aumento de 4,4% na demanda de etanol. Além disso, de acordo com os mesmos autores, é necessário considerar a capacidade produtiva do etanol, onde espera-se que haja aumento futuro no preço para reduzir a demanda por esse produto, equilibrando assim a produção e a demanda pelo biocombustível.

A **Tabela 3** mostra o histórico da paridade média mensal para todos os estados brasileiros entre o etanol hidratado e a gasolina C a partir de 2007. Ao analisar os dados, pode-se verificar que desde o ano de 2010, a paridade de preços não tem sido favorável para o abastecimento de etanol hidratado, estando acima de 70%, conforme mostrado nas células preenchidas em cor cinza na referida tabela. Este aumento da paridade ocorrido no período entre 2011 a 2012 explica a queda da demanda do etanol hidratado apresentada anteriormente na **Figura 5**.

Tabela 3 – Paridade de preços entre o etanol hidratado e gasolina C.

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
2007	62,91	63,13	62,99	65,78	65,85	60,11	56,11	54,67	53,93	53,25	56,19	59,46
2008	59,72	58,80	59,14	59,25	59,33	58,50	58,64	58,78	59,23	60,02	60,20	60,22
2009	60,30	61,10	60,44	59,05	57,89	56,13	57,22	57,91	59,74	64,62	66,61	67,78
2010	74,28	76,06	70,58	65,86	62,82	60,56	61,21	62,49	62,98	66,21	67,58	69,55
2011	71,35	72,31	78,92	83,01	74,02	70,03	72,41	72,81	73,16	72,91	73,93	74,73
2012	74,15	72,49	72,88	72,43	71,87	70,96	69,95	69,36	69,34	69,13	69,02	70,30

Fonte: Adaptado de MAPA (2013).

A capacidade produtiva do etanol é um dos fatores que pode influenciar na oferta deste combustível e consequentemente no seu preço. No estudo realizado por Milanez *et al.* (2012), estima-se que a taxa de crescimento da capacidade produtiva do etanol hidratado e anidro das usinas instaladas no país não seja suficiente para atender à demanda desse biocombustível. A **Figura 6** mostra a previsão de demanda e a capacidade produtiva estimada entre o período de 2011 a 2015.

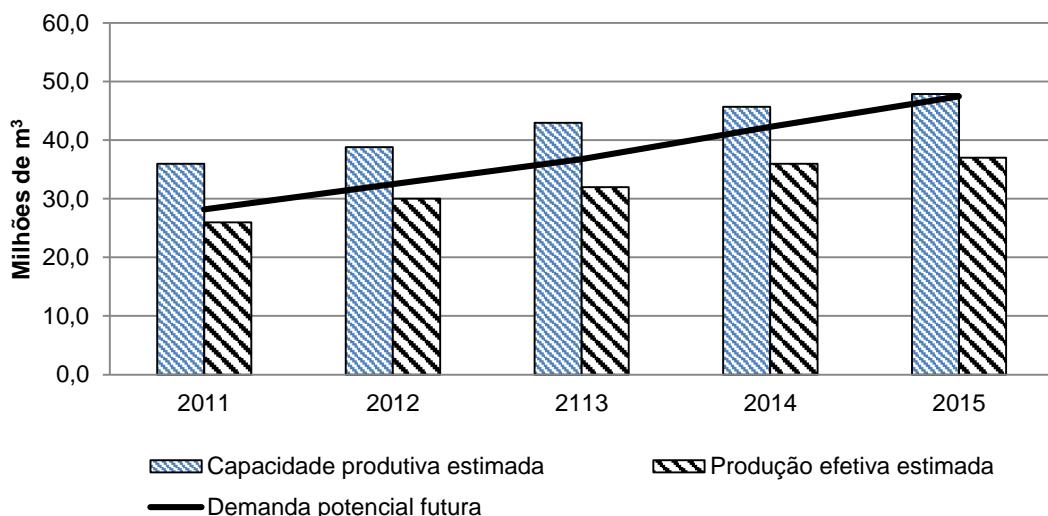


Figura 6 – Capacidade produtiva estimada e demanda potencial do etanol
Fonte: Adaptado de Milanez *et al.* (2012).

4.1.2.3 Simulação em Dinâmica de Sistemas

Wang *et al.* (2008) definem que o desenvolvimento da Dinâmica de Sistemas (DS) por Forrester foi obtido com base na teoria de controle por realimentação,

assunto este muito utilizado na Engenharia Elétrica para o controle de sistemas e servomecanismos. Os mesmos autores acrescentam ainda que a DS é realizada utilizando-se os laços de realimentação, variáveis e equações. O laço de realimentação é definido como uma malha fechada de controle, que envolve causas e efeitos inerentes ao sistema em análise.

De acordo com Sterman (2000), a Dinâmica de Sistemas é uma metodologia e técnica de modelagem e simulação executada em computador para a compreensão do comportamento dinâmico de sistemas complexos. O enfoque é analisar e solucionar problemas complexos para obtenção de melhores políticas e projetos de sistemas. Nesse contexto, a demanda de combustíveis no país pode ser considerada como um sistema dinâmico, cuja demanda está atrelada a diversos fatores como a frota circulante de veículos, a paridade de preços entre os combustíveis, a distância média percorrida pela frota e o rendimento dos veículos em função do combustível utilizado.

Atualmente, são utilizadas diversas abordagens para a simulação de sistemas dinâmicos, tais como a *Abordagem Analítica* e a *Dinâmica de Sistemas*. A abordagem analítica envolve a utilização de equações diferenciais para a solução de problemas, sejam eles de primeira ou segunda ordem, cuja solução pode ser obtida por meio da transformada de *Laplace*, conforme cita Ogata (2010).

Poles (2013) define que a *DS* envolve a identificação de relações de causa e efeito entre as variáveis de um sistema complexo, a fim de realizar uma comparação entre o sistema real e o comportamento dinâmico do modelo que representa o sistema. Lätiällä *et al.* (2010) define que a *DS* é modelada por sete elementos básicos a saber: fontes, fluxos de entrada, fluxos de saída, estoques, sumidouros (escoadouro), variáveis e laços de realimentação. De acordo com os autores, os sete elementos são combinados e as variáveis definidas pelas suas respectivas fórmulas ou expressões matemáticas, possibilitando assim a modelagem e resolução de sistemas complexos.

4.1.3 Materiais e Métodos

Para realizar a simulação, optou-se pelo software *Insight Maker®* por ser este um software livre e que opera de forma similar aos demais softwares comerciais disponíveis no mercado, tais como o *Stella®*, *PowerSim®* e *Vensim®*.

De acordo com o manual de operações do *Insight Maker®* (2013), existem nove tipos de blocos/funcões básicas para a elaboração de um modelo: *stocks* (estoques), *flows* (fluxos), *variables* (variáveis), *links* (conexões), *converters* (conversores), *states* (estados), *transitions* (transições), *agent populations* (representação da população) e *actions* (ações).

Para a simulação, procurou-se analisar o consumo de gasolina C e do etanol hidratado, no período de 2013 a 2020, para a frota brasileira de veículos compostos por automóveis e comerciais leves. Utilizou-se para tanto, intervalos mensais para a simulação, possibilitando-se assim, a análise do impacto das variações dos novos veículos licenciados e da variação da paridade entre os dois combustíveis ao longo do tempo de simulação. A **Figura 7** mostra o diagrama esquemático utilizado para a simulação da demanda de etanol hidratado e gasolina C para os automóveis *flexfuel*.

Conforme o diagrama esquemático da **Figura 7**, a demanda total de etanol hidratado depende das seguintes variáveis: a decisão do proprietário do veículo, que por sua vez depende da paridade do preço entre os dois combustíveis. Considerando a frota circulante de veículos, esta depende da quantidade mensal de veículos licenciados e da quantidade de veículos sucateados. Ainda como variáveis no sistema simulado, foram consideradas a intensidade de uso da frota e o rendimento do combustível utilizado (em *km/L*). As funções matemáticas e demais variáveis utilizadas para elaborar o modelo de simulação no *Insight Maker®* são apresentados nos subitens a seguir. A demanda da gasolina C tem a mesma base de cálculo utilizada para o etanol hidratado.

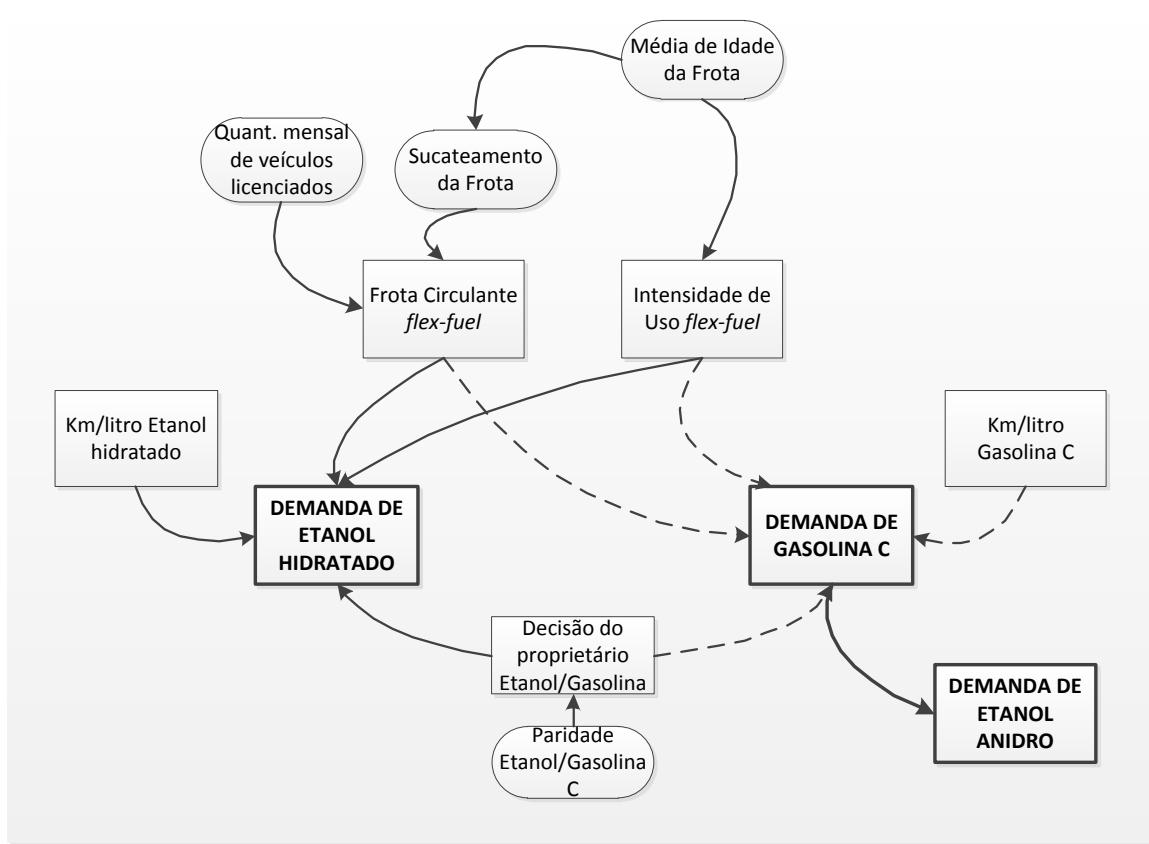


Figura 7 – Diagrama esquemático para a simulação da demanda de combustíveis

A determinação da demanda de etanol anidro foi realizada mediante a proporção de 25% da demanda de gasolina C.

4.1.3.1 Critérios de decisão do combustível a ser utilizado para veículos *flexfuel*

Para a decisão do combustível a ser abastecido em veículos *flexfuel*, utilizou-se a função definida na **Equação 6**, obtida à partir de EPE (2013). Note que a razão Pe/Pg da **Equação 6** (razão entre o preço do etanol hidratado e o preço da gasolina C) é a paridade entre os dois combustíveis, que se trata de um dos principais fatores de decisão pela escolha entre um dos combustíveis.

Na **Tabela 4**, define-se o cálculo da paridade média para cada mês do ano e a taxa de variação mensal da paridade. As paridades médias mensais foram calculadas por meio da média das paridades dos meses para o período de 2003 a

2012, e a média geral foi obtida à partir da média das paridades médias mensais, e a taxas de variação mensal das paridades foram calculadas mediante a **Equação 7**.

$$\text{Taxa de Variação mensal da Paridade} = \frac{\text{Paridade Média Mensal}}{\text{Media Geral}} \quad (7)$$

Tabela 4 – Paridade média mensal e taxa de variação mensal da paridade para período de 2003 a 2012.

Paridade Média	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Mensal (%)	65,85	66,54	66,91	66,81	64,40	61,58	61,12	61,69	61,72	62,74	63,59	64,71
Paridade Média Geral	63,97%											
Taxa de Variação												
Mensal da Paridade (sem unidade)	1,03	1,04	1,05	1,04	1,01	0,96	0,96	0,96	0,96	0,98	0,99	1,01

Fonte: Adaptado de MAPA (2013).

A Taxa de Variação Mensal da Paridade tem o objetivo de simular as variações da paridade entre os combustíveis, devido às oscilações dos preços do etanol hidratado e da gasolina C ao longo do ano. Analisando-se o Relatório Final da Safra 2012-2013 publicada pela UNICA (2013), pode-se observar que a safra de cana-de-açúcar e a produção de etanol têm início entre os meses de março e abril de cada ano e o término da safra entre os meses de novembro a dezembro. Via de regra, no período de safra da cana-de-açúcar, os preços do etanol hidratado têm sido mais vantajosos ao consumidor, ao contrário do período de entressafra, quando o biocombustível tem o seu preço elevado e o consumidor opta pelo combustível fóssil. Pode-se observar que a Taxa de Variação Mensal da Paridade calculada na **Tabela 4** é menor entre os meses de maio a dezembro, que é justamente o período de safra da cana-de-açúcar.

4.1.3.2 Frota circulante de veículos

De acordo com a ANFAVEA (2013-b), no ano de 2012 foram licenciados 136.365 automóveis a gasolina, 2.715.130 veículos *flexfuel*, 137.557 comerciais leves a gasolina e 447.809 comerciais leves *flexfuel*. No estudo realizado pelo MMA (2011), considera-se que ao final do ano de 2012, a frota circulante de veículos foi

de 10.818.489 veículos à gasolina, 15.321.615 veículos *flexfuel*, 1.587.787 comerciais leves a gasolina e 1.824.110 comerciais leves *flexfuel*. Para a simulação, foi considerada a frota estimada em MMA (2011). Cabe aqui observar que não foram considerados os automóveis e comerciais leves fabricados para a utilização exclusiva de etanol, tendo em vista que os mesmos não são mais fabricados e representam uma parcela pequena da frota circulante.

Analizando-se as quantidades licenciadas no período de 2010 a 2012 para os veículos leves em ANFAVEA (2013-b), verificou-se que as quantidades de veículos licenciados não são constantes ao longo dos meses do ano, conforme apresenta a **Tabela 5**. Para fins de obtenção da taxa mensal de novos veículos que irão ser adicionadas à frota existente de veículos na simulação, calculou-se a razão entre as médias mensais de veículos licenciados para o período de 2010 a 2012 e a média anual de veículos licenciados. As quantidades mensais de veículos licenciados, incluindo os automóveis e comerciais leves para a utilização de etanol hidratado e gasolina e os valores calculados da percentagem mensal de novos veículos licenciados estão definidos na **Tabela 5**.

Tabela 5 – Quantidades mensais de veículos leves licenciados (10^3 unidades).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
2010	213,3	221,0	353,7	277,8	251,1	262,8	302,3	312,8	307,1	303,2	328,5	381,6	3.515,1
2011	244,9	274,2	306,1	289,2	318,5	304,3	306,2	327,6	311,6	280,6	321,6	348,4	3.633,2
2012	268,3	249,5	300,6	257,9	287,5	353,2	364,2	420,1	288,1	341,6	311,8	359,4	3.802,1
Média	242,2	248,2	320,1	274,9	285,7	306,8	324,2	353,5	302,3	308,5	320,6	363,1	3650,2
%	6,63	6,80	8,77	7,53	7,83	8,40	8,88	9,68	8,28	8,45	8,78	9,95	

Fonte: Adaptado de ANFAVEA (2013-b).

Para a simulação, considerou-se a entrada em circulação de 2,5 milhões de automóveis e 450 mil comerciais leves a cada ano e o sucateamento da frota de veículos em função da média de idade da frota. Em estudo realizado por MMA (2011), foram definidas as funções de sucateamento dos veículos, sendo a **Equação 8** para os automóveis e, **Equação 9** para os comerciais leves.

$$S_{\text{Automóveis}} = 1 - \exp(-\exp(1,798 - 0,137(t))) \quad (8)$$

$$S_{\text{Comerciais}} = 1 - \exp(-\exp(1,618 - 0,141(t))) \quad (9)$$

Em que:

- $S_{\text{Automóveis}}$ = Fração de automóveis remanescentes na idade t
 $S_{\text{Comerciais}}$ = Fração de veículos comerciais remanescentes na idade t
 t = idade da frota de veículos em anos

4.1.3.3 Intensidade de uso dos veículos

A intensidade de uso representa a quantidade de quilômetros que um determinado veículo é utilizado no período de um ano. De acordo com o trabalho publicado pelo MMA (2011), define-se que a intensidade de uso dos automóveis e veículos comerciais leves decresce de acordo com a idade do veículo, conforme mostra o gráfico da **Figura 8**. As funções matemáticas para a intensidade de uso dos automóveis e comerciais leves foram obtidas utilizando-se o software LabFit® e estão representadas na **Tabela 6**, juntamente com os respectivos coeficientes de correlação.

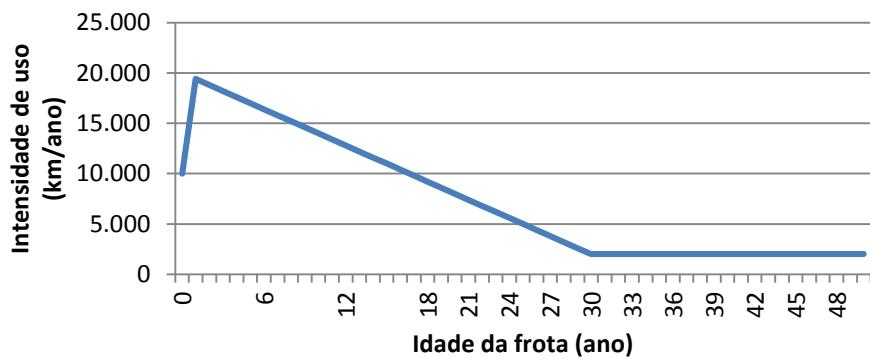


Figura 8 – Intensidade de uso dos automóveis e comerciais leves
Fonte: Adaptado de MMA (2011).

Tabela 6 – Funções matemáticas para as intensidades de uso dos veículos.

	Função matemática para intensidade de uso	Coeficiente de correlação
Automóveis	$I_{uso(automovel)} = 22.711,67 \cdot e^{-(0,05682 \cdot t)}$	0,97
Comerciais leves	$I_{uso(comercial)} = 22.554,49 - 3419 \cdot \ln(t)$	0,91

Fonte: Adaptado de MMA (2011).

4.1.3.4 Rendimento dos combustíveis de acordo com o veículo

Como parâmetros de rendimento médio dos combustíveis em trajetos urbanos e estrada, expresso em quilômetros que um veículo é capaz de se locomover com um litro de combustível, adotou-se os valores utilizados pelo MMA (2011) que estão registrados na **Tabela 7**. Cabe observar que nessa tabela, a distância percorrida por um veículo com motorização para ser abastecido exclusivamente com gasolina C é menor que a distância percorrida pelo veículo *flexfuel* quando abastecido com gasolina C. Abreu (2007) justifica que o menor rendimento para os veículos destinados ao abastecimento exclusivo com gasolina C, é devido a prevalecerem na frota os veículos de maior porte e mais potentes, com menor rendimento de combustível.

Tabela 7 – Rendimento médio dos combustíveis para automóveis e comerciais leves.

Tipo do Veículo (Automóveis e Comerciais Leves)	Combustível	
	Etanol Hidratado	Gasolina C
<i>Flexfuel</i>	8,0 km/L	12,0 km/L
Gasolina C	- x -	9,5 km/L

Fonte: Adaptado de MMA (2011).

4.1.3.5 Cenários utilizados na simulação

A simulação foi realizada buscando-se em três cenários o impacto da variação da paridade na demanda de etanol e gasolina C para a frota circulante de veículos. Sendo assim, as quantidades anuais de licenciamento de novos veículos, as taxas mensais de variação da paridade, o critério de decisão do combustível a ser utilizado nos veículos *flexfuel*, a intensidade de uso e o rendimento dos combustíveis foram mantidos constantes.

Os valores de paridade utilizados na simulação foram de 60%, 70% e 80%. Note que o primeiro cenário representa uma condição altamente favorável ao consumo de etanol hidratado, o segundo cenário em que é indiferente ao consumidor a opção por qualquer um dos combustíveis e o último, um cenário altamente favorável ao consumo de gasolina C.

4.1.3.6 Modelagem do sistema no software *Insight Maker®*

A modelagem obtida no software *Insight Maker®* está reproduzida na **Figura 9**. Pode-se observar na referida figura que a modelagem está dividida em sete blocos, a saber: 1) evolução da frota de automóveis *flexfuel*, 2) evolução da frota de automóveis a gasolina, 3) evolução da frota de comerciais leves *flexfuel*, 4) evolução da frota de comerciais leves a gasolina, 5) decisão do abastecimento com etanol ou gasolina C, 6) cálculo da demanda de etanol hidratado e 7) cálculo da demanda de gasolina C.

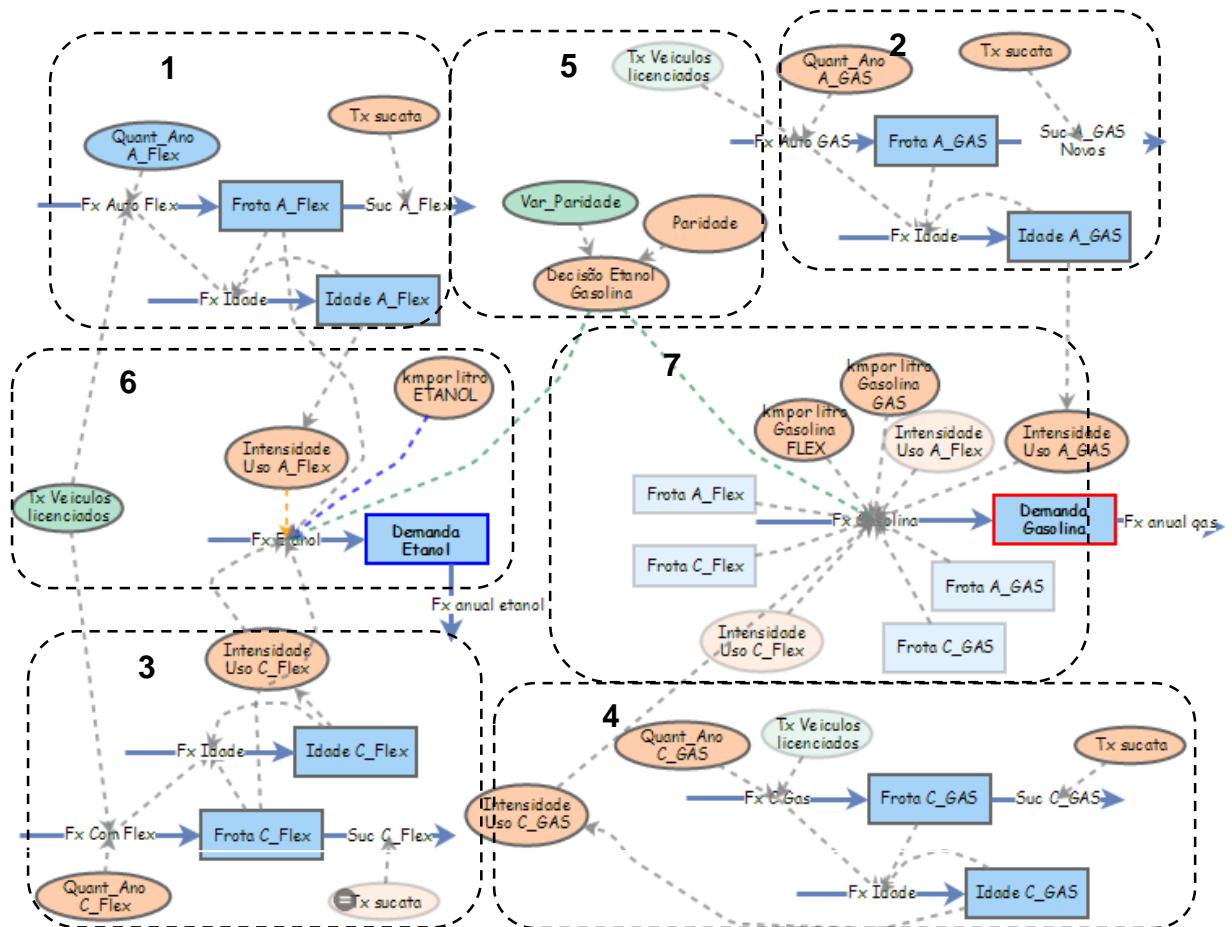


Figura 9 – Simulação da demanda de combustíveis realizada no software *Insight Maker®*

4.1.4 Resultados

A **Tabela 8** e as **Figuras 10, 11 e 12** mostram as demandas anuais de combustíveis obtidos a partir dos três cenários propostos na simulação.

Tabela 8 – Demandas anuais de combustíveis de acordo com a paridade de preços (x 10⁶ litros)

Ano	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
	(paridade 0,60)	(paridade 0,70)	(paridade 0,70)	(paridade 0,80)	(paridade 0,80)	
Ano	Etanol Hid. + Anidro	Gasolina C	Etanol Hid. + Anidro	Gasolina C	Etanol Hid. + Anidro	Gasolina C
2013	29.741,62	30.763,36	20.725,50	37.976,26	15.242,46	42.362,69
2014	31.844,11	31.478,91	22.028,54	39.331,37	16.071,04	44.097,37
2015	33.871,66	32.088,31	23.233,99	40.526,44	16.833,17	45.647,10
2016	35.581,60	32.663,23	24.354,74	41.644,73	17.542,63	47.094,42
2017	37.217,02	33.180,08	25.372,47	42.655,72	18.186,32	48.404,64
2018	38.700,83	33.643,16	26.295,25	43.567,63	18.769,38	49.588,33
2019	40.044,83	34.056,43	27.130,44	44.387,95	19.296,47	50.655,12
2020	41.259,87	34.423,52	27.884,82	45.123,57	19.771,91	51.613,90

As **Figuras 10, 11 e 12** mostram graficamente as demandas mensais do etanol hidratado, anidro e gasolina C para as paridades de valores 0,60, 0,70 e 0,80 obtidas na simulação. As oscilações temporais apresentadas em cada uma das curvas de demanda são em função das variações que ocorrem com o preço do etanol ao consumidor em decorrência dos períodos de safra, quando o preço do etanol hidratado é menor, e período de entressafra.

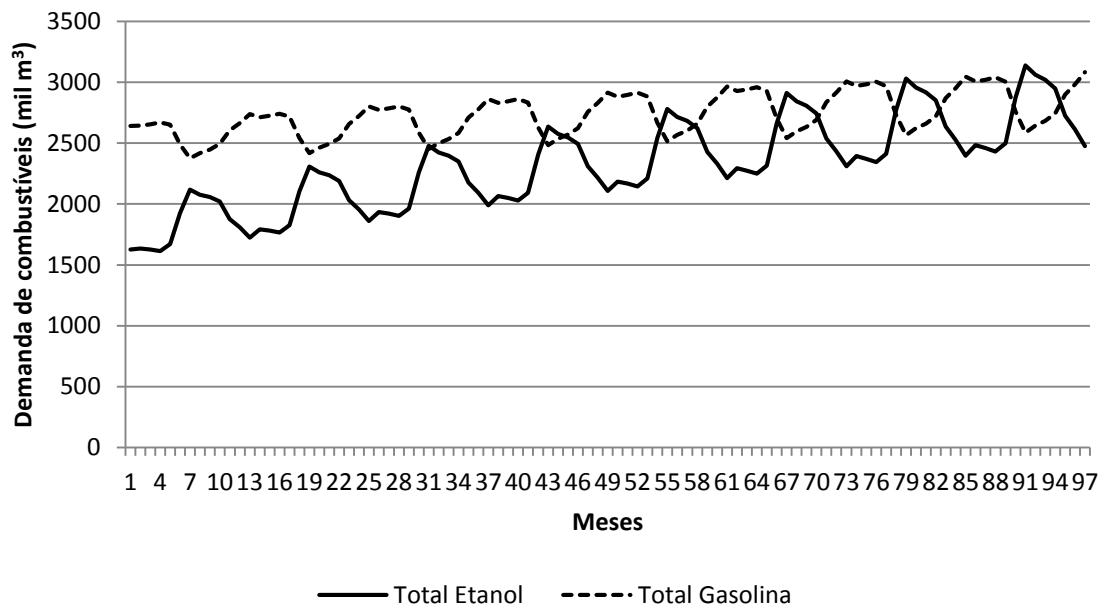


Figura 10 – Demanda de combustíveis considerando a paridade 0,6

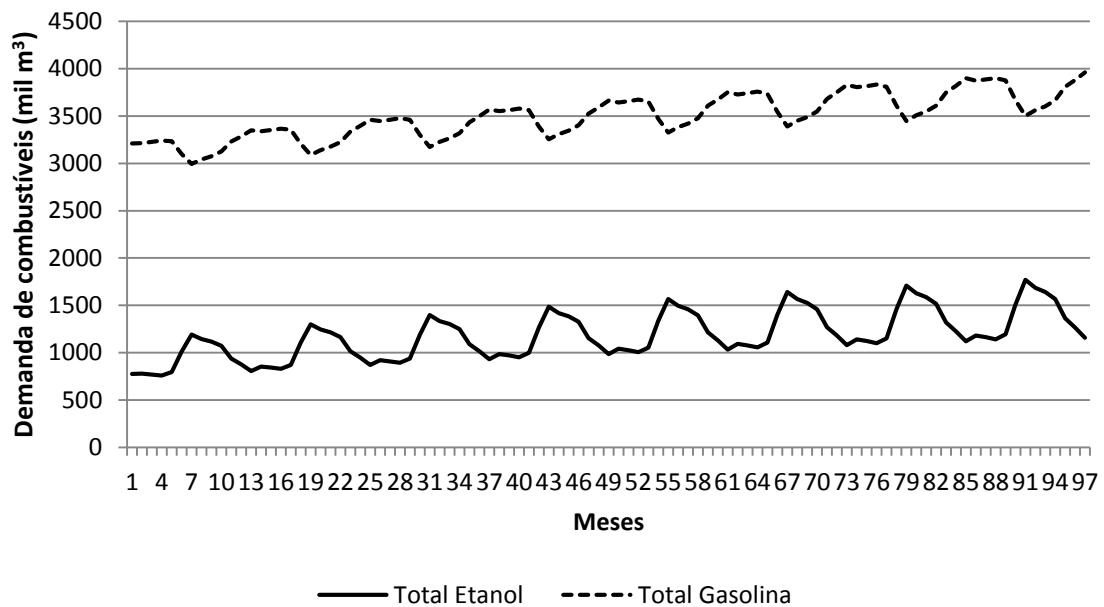


Figura 11 – Demanda de combustíveis considerando a paridade 0,7

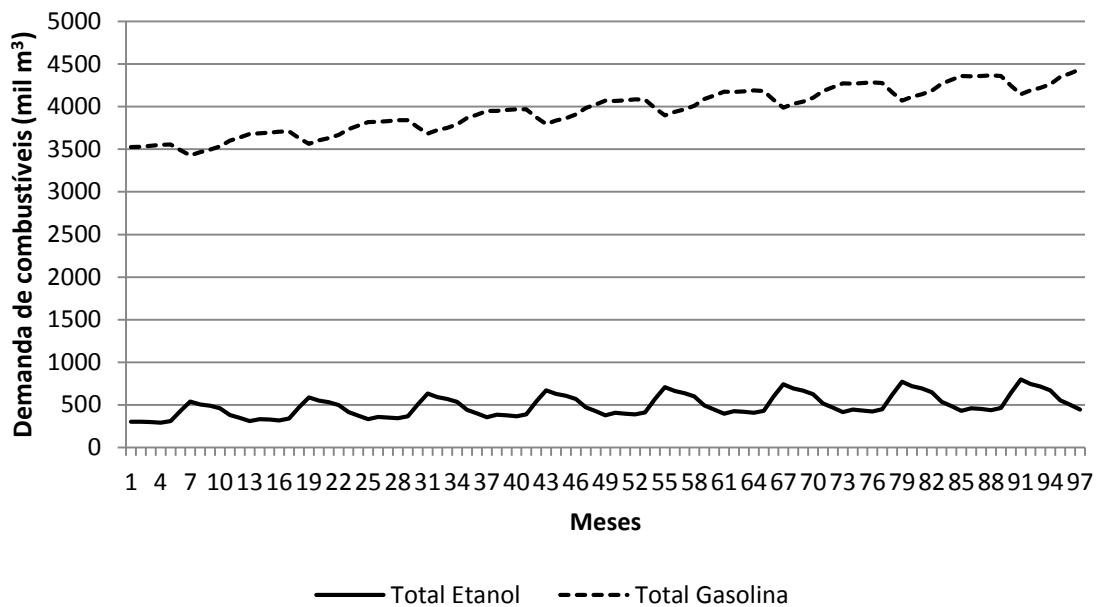


Figura 12 – Demanda de combustíveis considerando a paridade 0,8

As **Figuras 13, 14 e 15** mostram respectivamente a evolução da frota de veículos, a idade média das frotas e as intensidades de uso para cada frota de veículos. Conforme comentado na metodologia, a simulação foi ajustada para ser realizada em intervalos mensais. Portanto, o período compreendendo do mês zero a 12 representa o ano de 2013, o período do mês 13 a 24 representa o ano de 2014 e assim por diante. Note que os resultados apresentados nas **Figuras 13, 14 e 15** são constantes para os três cenários propostos na simulação, tendo em vista que os resultados referentes à frota de veículos não se alteram com a paridade.

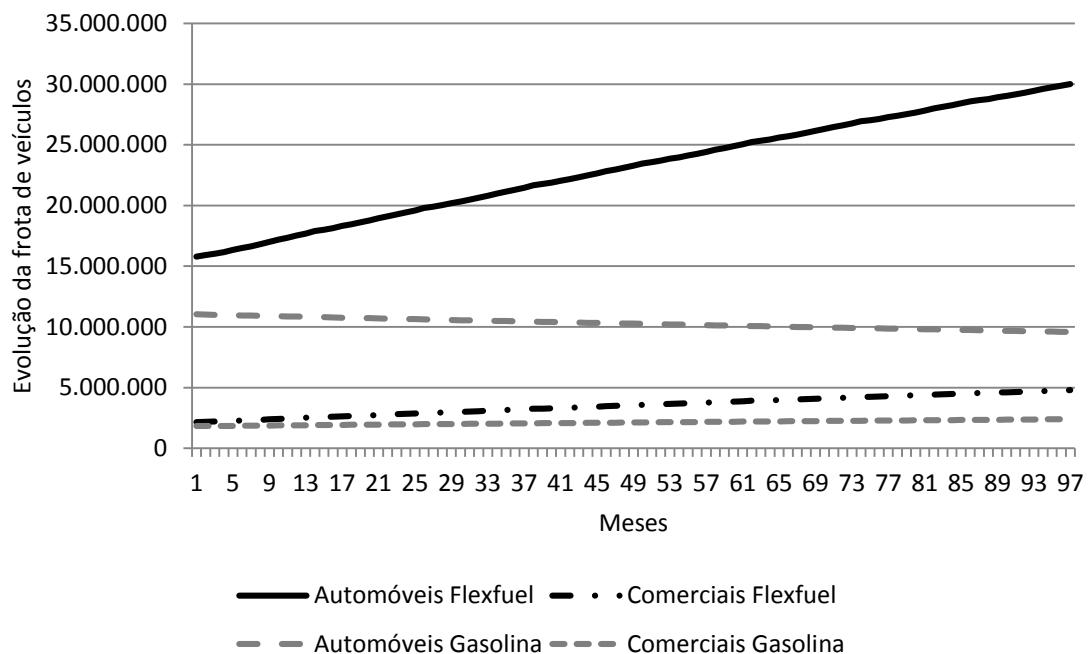


Figura 13 – Evolução da frota de veículos circulantes no Brasil

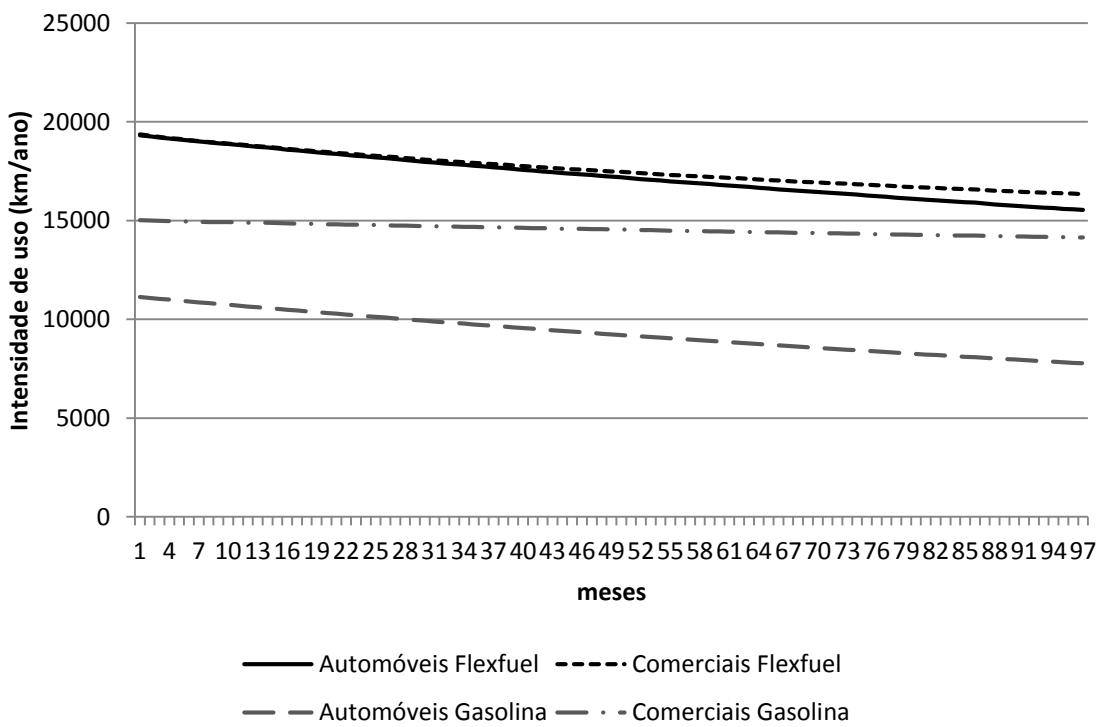


Figura 14 – Intensidade de uso para a frota de veículos circulantes

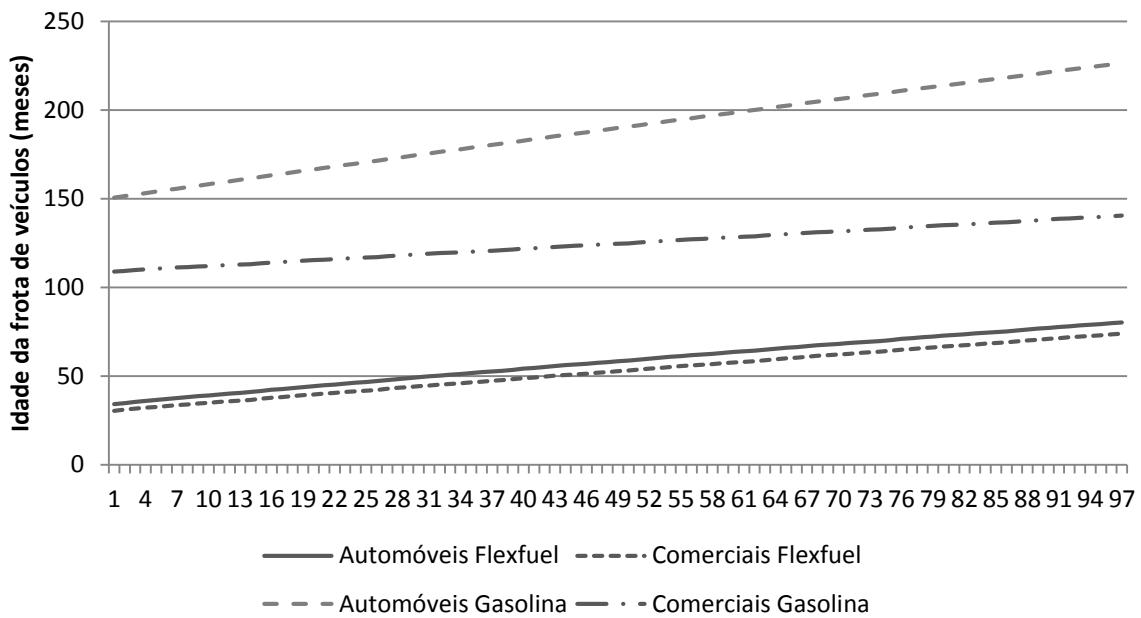


Figura 15 – Média de idade da frota de veículos

A simulação da demanda de etanol hidratado e gasolina C realizada em DS no software *Insight Maker®* mostrou-se eficaz, atingindo-se os objetivos planejados neste trabalho. Com a metodologia utilizada, foi possível obter as demandas dos combustíveis utilizados para abastecer a frota de veículos leves, levando-se em consideração as variações mensais dos automóveis licenciados, da paridade entre os combustíveis e da intensidade de uso dos veículos em função da idade da frota circulante.

Para validação do modelo apresentado, utilizou-se a paridade de preços entre o etanol hidratado e a gasolina C de 71%, ocorrida em 2012, valor este publicado pelo MAPA (2013). Também foi efetuada a simulação das demandas para a frota de veículos existentes em 2012, isto é, de 10.818.489 unidades de veículos à gasolina, 15.321.615 unidades de veículos *flexfuel*, 1.587.787 unidades comerciais leves à gasolina e 1.824.110 unidades comerciais leves *flexfuel*, conforme definido no item 3.2 da metodologia deste trabalho. Os resultados comparativos entre os resultados obtidos na simulação e a demanda de combustíveis publicada pela ANP (2013-b) estão resumidos na **Tabela 8**. Conforme se pode verificar, o erro de previsão é de +0,10% para o etanol e de -5,53% para a gasolina C.

Tabela 9 – Comparativo entre a demanda real de combustíveis e demanda estimada na simulação.

Combustível	UNICA	Simulação	Erro % de previsão
Etanol hidratado	9.850 x (milhões de litros)	9.860 x (milhões de litros)	+ 0,10%
Gasolina C	39.697 x (milhões de litros)	37.500 x (milhões de litros)	- 5,53%

Fonte: UNICA (2013) e resultados obtidos na simulação

O erro de previsão para a gasolina C poderia ser minimizado caso alguns ajustes fossem feitos para as equações utilizadas e para as funções obtidas por meio do *software* de ajuste de curvas LabFit®. Outro fator que poderia justificar o desvio apresentado para a demanda de gasolina C, pode ter sido causado devido à função de opção do combustível a ser utilizado para os proprietários de veículos *flexfuel*, apresentado pela EPE (2013) e descrito neste trabalho na **Equação 6**. De acordo com esse estudo, os dados foram coletados de todas as regiões do Brasil para a obtenção da função matemática de decisão do consumidor, cujos hábitos de consumo são bastante distintos. O fato de se utilizar uma curva de demanda representativa de todo o país poderia ter sido a causadora do erro apresentado.

Com relação aos valores quantitativos da demanda de combustíveis obtidos na simulação, percebeu-se que a paridade de preços entre os combustíveis influencia de forma significativa na demanda de combustíveis. Pode-se tomar como exemplo a demanda de etanol hidratado e anidro para o ano de 2013, sendo a demanda de 29.741,62 milhões de litros com a paridade de 0,60, 20.725,50 milhões de litros com a paridade de 0,70 e 15.242,46 milhões de litros com a paridade de 0,80. A simulação em DS possibilita a determinação das demandas dos combustíveis em função da paridade (o que foi objeto deste estudo) de forma bastante rápida, possibilitando-se assim, fazer a análise da demanda dos combustíveis veiculares por meio da simulação de diversas paridades entre os preços dos combustíveis.

Milanez *et al.* (2012) e a ANP (2013) definem que a capacidade produtiva de gasolina pelas refinarias brasileiras para 2013 foi da ordem de 21 bilhões de litros anuais e do etanol, incluindo o hidratado e o anidro, da ordem de 43 bilhões de litros anuais. Observando-se os resultados obtidos na simulação para o ano de 2013,

resumidos na **Tabela 10**, pode-se observar que em qualquer cenário de simulação, a demanda de gasolina estará acima da capacidade produtiva pelas refinarias instaladas no Brasil. Um outro ponto importante a ser observado, é a demanda de etanol hidratado e anidro, que em qualquer cenário está aquém da capacidade produtiva. Note que as demandas de gasolina A, que são as obtidas nas refinarias e apresentadas na **Tabela 10** foram corrigidas em relação aos resultados de simulação, cujos valores eram para a gasolina C. Considerou-se que a gasolina C é uma mistura que contém em volume, 75% de gasolina A e 25% de etanol anidro.

Com relação aos resultados, pode-se ressaltar que a situação dos combustíveis tende a se agravar futuramente, em decorrência do aumento dos volumes consumidos devido ao aumento da frota de veículos. Considera-se importante o estabelecimento de uma diretriz energética para os combustíveis, de forma a possibilitar um melhor equilíbrio das demandas totais de combustíveis utilizados em veículos leves, reduzindo-se o consumo da gasolina e aumentando-se o consumo do etanol e isto pode ser obtido buscando-se a paridade de preços ideal. Analisando-se os resultados obtidos em função das paridades simuladas, foi possível observar que aquela que apresenta o melhor equilíbrio de demanda de etanol hidratado e gasolina C é a paridade de valor 0,70.

Tabela 10 – Comparativo entre as demandas obtidas na simulação e capacidades produtivas dos combustíveis para o ano de 2013.

Combustível	Paridade		
	0,6	0,7	0,8
Demanda Gasolina A	23.072	28.482	31.771
Capacidade produtiva Gasolina A		21.000	
Demanda Etanol (hidratado + anidro)	29.742	20.725	15.242
Capacidade produtiva etanol (hid. + anid)		43.000	

Fonte: Adaptado de ANP (2013), Milanez *et al.* (2012) e resultados da simulação.

Como trabalhos futuros, poderia se realizar a simulação com dados referentes a cada região do país, cujos valores de paridade são diferentes. Por exemplo, de

acordo com dados da UNICA (2013), o preço do biocombustível tem sido favorável somente para os estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Fazendo-se estudos de forma setorizada, os resultados apresentados teriam os seus erros reduzidos e os resultados da simulação poderiam dar sugestões para as possíveis diretrizes para cada região do país, incluindo a possibilidade de sugerir a infraestrutura de armazenagem de biocombustíveis na entressafra, o qual poderia contribuir para a oferta desse combustível a preços mais vantajosos ao consumidor.

4.1.5 Agradecimentos

Essa pesquisa foi realizada com o apoio da CAPES-PROSUP (Programa de Apoio à Pós-graduação de Instituições de Ensino Particulares).

4.1.6 Referências Bibliográficas

ABREU, A. A. **Medidas de Eficiência Energética como Instrumento de Mitigação do Aquecimento Global no Setor de Transportes Rodoviário Brasileiro**. Tese de Doutorado, Engenharia de Transportes, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

ANFAVEA – Associação Nacional de Veículos Automotores. **Carta da ANFAVEA 320**. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br>>. Acesso em: 21/03/2013-a.

ANFAVEA – Associação Nacional de Veículos Automotores. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2013**. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br>> Acesso em: 29/04/2013-b.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico 2012**. Brasília/DF, Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=60983#Se_o_2>. Acesso em: 05/06/2013-a.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Boletim Eletrônico nº 65**. Brasília/DF, Fevereiro de 2013-b.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução nº 36**. Brasília/DF, dezembro/2005.

BNDES. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro, 2008.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Avaliação do Comportamento dos Usuários de Veículos Flex-Fuel no Consumo de Combustíveis no Brasil.** Brasília, 2013.

FREITAS, L. C., KANEKO, S. **Ethanol Demand under the Flex Fuel Technology Regime in Brazil.** Energy Economics v.33, pp. 1146 – 1154, 2011.

INSIGHT MAKER. **Insight Maker Guide.** Disponível em: <<http://insightmaker.com/help>>. Acesso em: 12/08/2013.

LÄTTILÄ, L.; HILLETOFTH, P.; LIN, B. **Hybrid Simulation Models – When, Why, How.** Expert Systems with Applications v.37. P. 7969-7975. 2010.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Comparativo Etanol Hidratado x Gasolina no Brasil – 2002 a 2013.** Brasília, 2013

MILANEZ, A. Y.; NYKO, D.; GARCIA, J. L. F.; REIS, B. L. S. F. S. **O Déficit de Produção de Etanol no Brasil entre 2012 e 2015: Determinantes, Consequências e Sugestões de Política.** BNDES Setorial – Biocombustíveis, Brasília, 2012.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários.** Brasília, 2011

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** Prentice Hall, Brasil, 5^a edição, 2010.

PETEAN, G. H., NORILLER, R. M.; SANTOS, L. C.; CHAEBO, G.; SANCHES, F. T. **Etanol Hidratado no estado de São Paulo: previsão de preços a partir do método de Holt-Winters,** SIMPEP, 2011.

POLES, R. **System Dynamics modelling of a production and inventory system for remanufacturing to evaluate system improvement strategies.** Int. J. Production Economics, 2013

STERMAN, J. D. **Business Dynamics – Systems Thinking and Modeling for a Complex World.** McGraw Hill, 2000

UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. **Relatório Final da Safra 2012-2013.** Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=83>>. Acesso em: 02/06/2013.

WANG, J.; LU, H; PENG, H. **System Dynamics of Urban Transportation System and its Application.** Journal of Transportation – Systems Engineering and Information Technology, v.8 P. 83-89, 2008.

4.2 Artigo: METODOLOGIA NUMÉRICA PARA DETERMINAÇÃO DO CONSUMO VOLUMÉTRICO DE ETANOL HIDRATADO EM VEÍCULOS FLEXFUEL.

Publicado no IFIP International Federation for Information Processing, Springer, v. 459, p. 243-259, 2015, texto original em inglês com o título “*Numeric Methodology for Determining the Volumetric Consumption of Hydrated Ethanol in Flex-Fuel Vehicles*”, DOI: 10.1007/978-3-319-22756-6_30.

Este artigo buscou respostas para o objetivo específico 2 desta tese, que foi determinar um método de cálculo para a obtenção do consumo de combustíveis para veículos leves.

Resumo: A frota de veículos leves no Brasil é constituída por automóveis de passeio e comerciais leves. Quanto aos tipos de motorização, os veículos leves podem ser subdivididos em veículos com motorização dedicados à gasolina, à etanol e por último, os veículos *flexfuel*, que podem ser abastecidos com o etanol hidratado, gasolina ou a mistura de ambos em qualquer proporção. O início da fabricação e comercialização dos veículos *flexfuel*, ocorrido em 2003, deu uma nova dinâmica à demanda de combustíveis no país, sendo que a decisão pelo combustível a ser utilizado no veículo, que antes da tecnologia *flexfuel* ocorria no momento da compra do veículo, passou a ocorrer no momento do abastecimento, de acordo com o preço mais vantajoso e a preferência do consumidor. Diante dessa nova dinâmica, o presente trabalho teve como objetivo a obtenção de um método de cálculo para a determinação dos volumes de combustíveis utilizados pela frota de veículos *flexfuel*. Utilizou-se como metodologia, a conversão dos combustíveis envolvidos em unidades energéticas de barril de petróleo, possibilitando-se dessa forma, obter as demandas de combustíveis por tipo de veículo, da proporcionalidade das quantidades de veículos e distância percorrida no período. Ao final do trabalho, os resultados da pesquisa são apresentados mostrando ter havido uma mudança de comportamento quanto ao consumo de combustíveis pela frota de veículos *flexfuel*. Tais resultados são discutidos, tentando explicar as possíveis causas e soluções para o programa bioenergético brasileiro.

Palavras-chave: Etanol, Veículos *Flexfuel*, Demanda de combustíveis.

4.2.1 Introdução

No Brasil, de acordo com a ANFAVEA (2015), foram licenciados no ano de 2014 o total de 3.333.466 veículos leves no Brasil. Desse total, 2.940.494 veículos são dotados da tecnologia *flexfuel* e o restante, são veículos dedicados à gasolina ou etanol.

Nogueira e Capaz (2013) e Bake *et al.* (2009) afirmam que o etanol consumido pelos veículos brasileiros pode ser o anidro (misturado à gasolina na proporção de 20 a 25% dependendo da disponibilidade e preço do biocombustível no mercado) e o etanol hidratado. A gasolina misturada com o etanol anidro é denominada pela ANP (2014) como Gasolina C, e pode ser utilizada tanto pelos veículos com motores dedicados à gasolina como pelos veículos *flexfuel*. O etanol hidratado por sua vez, pode ser utilizado tanto pelos veículos *flexfuel* como os veículos com motores dedicados ao etanol.

Martinez *et al.* (2013) afirmam que o Brasil é o segundo maior produtor mundial de etanol, favorecido pelo clima favorável à cultura de cana-de-açúcar, sendo o Centro-Sul, a região do Brasil com o maior volume de produção desse biocombustível. A produção desse biocombustível concentrada nessa região brasileira favoreceu a introdução e a aceitação dos veículos *flexfuel* pelos consumidores, tendo em vista ser essa região a que possui a maior frota de veículos automotores.

De acordo com Du e Carriquiry (2013), os veículos *flexfuel*, desde o seu lançamento, estão substituindo os veículos que são abastecidos por um único tipo de combustível (gasolina ou etanol) possibilitando aos proprietários desses veículos, escolher o combustível com o preço mais vantajoso no momento do abastecimento. Essa característica dos veículos *flexfuel* insere uma nova dinâmica ao consumo de combustíveis pela frota de veículos leves no Brasil, além de dificuldades para mensurar os volumes de combustíveis consumidos por esses veículos.

Pesquisando os artigos científicos publicados, não se constatou trabalhos que descrevem um método de cálculo para a obtenção dos volumes de etanol hidratado e gasolina C consumidos pelos veículos *flexfuel*, à partir dos volumes totais de combustíveis consumidos num determinado período por toda a frota. Alguns trabalhos, tais como os publicados pela EPE (2013), MMA (2014) e Losekann *et al.* (2012), mostram os métodos para a determinação futura de consumo de combustíveis, utilizando para tanto, a correlação entre a paridade de preços entre os dois combustíveis e a fração de etanol hidratado em relação ao volume total de combustíveis demandado por essa frota.

Diante da situação exposta anteriormente, o presente artigo tem o objetivo de elaborar um método de cálculo numérico para a determinação do consumo de combustíveis pela frota de veículos *flexfuel* no Brasil, permitindo assim, a obtenção dos volumes efetivos de combustíveis consumidos pela frota de veículos *flexfuel*. Com a obtenção dos dados reais de consumo de combustíveis pela frota de veículos *flexfuel*, novos estudos poderão ser realizados, tais como a análise da mudança de comportamento da demanda em função de preços entre os combustíveis.

4.2.2 Revisão Bibliográfica

4.2.2.1 A evolução da frota de veículos *flexfuel* e a demanda de combustíveis no Brasil.

Com o início da fabricação e comercialização dos veículos *flexfuel* no Brasil, ocorrido a partir do ano de 2003, houve uma mudança significativa na utilização do etanol hidratado e anidro como combustíveis carburantes.

De acordo com Freitas e Kaneko (2011) e BNDES (2008), o etanol anidro é o mais importante aditivo adicionado à gasolina, e o etanol hidratado pode ser utilizado como combustível alternativo pelos veículos *flexfuel*, capazes de serem supridos tanto com a gasolina C, etanol hidratado ou a mistura de ambos em qualquer proporção. BNDES (2008) e Hira (2011) definem que o etanol anidro tem sido misturado à gasolina na proporção de 20 a 25% de acordo com a disponibilidade e preço deste combustível no mercado.

Segundo Santos (2013), Crago *et al.* (2010) e Bake *et al.* (2009), o etanol foi introduzido na matriz energética brasileira em 1975 por meio do programa PROALCOOL, cujo objetivo era a produção em larga escala de combustíveis para a substituição dos combustíveis fósseis utilizados para abastecer a frota brasileira de veículos. A busca por um combustível alternativo se deveu às crises do petróleo de 1974 e 1975, que elevaram os preços dessa fonte energética e consequentemente o preço da gasolina. O programa foi bem-sucedido até meados dos anos de 1980, quando ocorreu o declínio do preço do petróleo, decretando o fim do PROALCOOL e a redução da fabricação dos veículos com motores dedicados exclusivamente ao etanol hidratado.

De acordo com Santos (2013) e Silva *et al.* (2009), em 2003 foi iniciada a fabricação dos veículos flexíveis, que podem ser abastecidos com o etanol hidratado, gasolina C ou a mistura de ambos os combustíveis em qualquer proporção, iniciando-se então, uma nova tentativa à utilização do biocombustível para a utilização veicular. Stattman *et al.* (2013) afirmam que o lançamento de veículos bicombustíveis em 2003 ganhou rápida aceitação pelos proprietários dos veículos pela eliminação do risco de desabastecimento, tal como ocorrido com os proprietários de veículos à etanol no tempo do PROALCOOL. Mollo Neto *et al.* (2010) reforçam que além da redução da dependência do petróleo, o uso do etanol para o abastecimento veicular reduz a emissão de materiais particulados, monóxido de carbono, além de minimizar os problemas na camada de ozônio.

Segundo a ANFAVEA (2015), a frota de veículos leves é constituída pelos automóveis de passeio e os comerciais leves. Fazem parte do grupo de comerciais leves os furgões, caminhonetas e *pick-ups*. Quanto ao abastecimento, a frota de veículos leves está composta por três tipos de motorização, ou seja, com motores dedicados exclusivamente a gasolina C, a etanol e os *flexfuel*.

No Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, publicado por MMA (2014), foi estimado que a demanda de combustível da frota de veículos é função da quantidade de veículos que circulam na frota, da intensidade de uso e do rendimento do combustível. A **Equação 10** mostra a relação entre essas variáveis.

$$D = \frac{Q_{Veículos} \cdot I_{Uso}}{R} \quad (10)$$

Em que:

D = Demanda de combustível

Q_{Veículos} = Quantidade de veículos que efetivamente circulam na frota

I_{Uso} = Intensidade de Uso

R = Rendimento do combustível em km/L

O MMA (2014) define no mesmo estudo, que a taxa de sucateamento e a intensidade de uso dos veículos leves sofrem variações de acordo com a idade da frota. As **Equações 11 e 12** mostram respectivamente as funções matemáticas para a fração de automóveis e veículos comerciais leves remanescentes (que efetivamente circulam após o início de uso).

$$S_A(t) = 1 - \exp(-\exp(1,798 - 0,137(t))) \quad (11)$$

$$S_C(t) = 1 - \exp(-\exp(1,618 - 0,141(t))) \quad (12)$$

Em que:

S_{Automóveis} = Fração de automóveis remanescentes na idade t

S_{Comerciais} = Fração de veículos comerciais remanescentes na idade t

t = Idade da frota de veículos em anos

Freitas e Kaneko (2011) definem que a substituição da gasolina pelo etanol no momento do abastecimento só se constituirá em vantagem ao consumidor caso a razão do preço do biocombustível em relação ao preço da gasolina seja menor que 70%. De acordo com os mesmos autores, essa relação de preços é referente à diferença entre os poderes caloríficos desses combustíveis.

Goldemberg *et al.* (2011) afirmam que a energia contida no etanol é 37% menor se comparada à gasolina pura, sendo que o etanol possui densidade 5% maior que a gasolina. A **Tabela 11** mostra os combustíveis utilizados pela frota de veículos leves no Brasil e os seus respectivos poderes caloríficos.

Tabela 11 – Poder calorífico dos combustíveis (em PCI – Poder Calorífico Inferior).

Combustível	Kcal/litro
Gasolina pura	7.696
Gasolina C (com 25% em volume de etanol anidro)	7.106,8
Etanol Hidratado	5096,7
Etanol Anidro	5339,3

Fonte: Adaptado de EPE (2014)

A **Figura 16** mostra graficamente o consumo de combustíveis e a evolução da frota de veículos leves em circulação no Brasil, compreendendo o período de 2003 a 2013. No respectivo gráfico apresentado pode-se visualizar que a partir do ano de 2011, a quantidade de veículos *flexfuel* passa a ser maioria na frota em circulação no país.

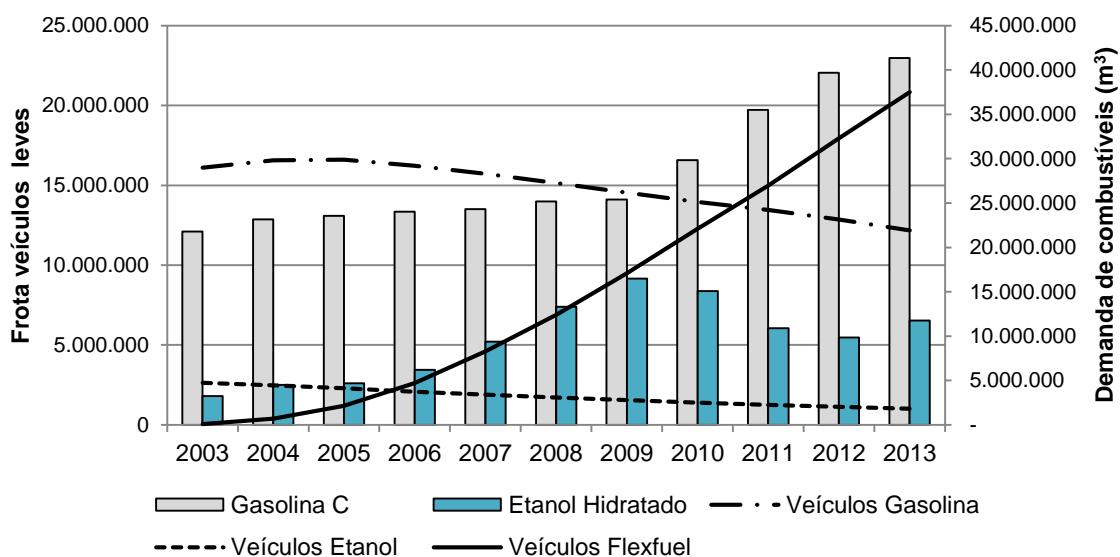


Figura 16 – Demanda de combustíveis e frota de veículos leves no Brasil
Fonte: adaptado de ANFAVEA (2015), MMA (2014) e ANP (2014)

Nogueira e Capaz (2013), EPE (2013) e Milanez *et al.* (2012) apontam o aumento do consumo do combustível fóssil e a redução da demanda do biocombustível, possível de se visualizar a partir do ano de 2009 na **Figura 16**, como sendo uma fase de estagnação e interrupção da expansão da indústria sucroalcooleira no Brasil. Os mesmos autores complementam que contribuíram para essa fase de estagnação, a intervenção governamental nos preços da gasolina, com o intuito de combater a inflação do país, fazendo com que o seu preço

comercializado ficasse abaixo do preço do barril do petróleo (aproximadamente US\$ 70,00/barril) no período de 2008 a 2012. Além disso, outras causas são comentadas pelos autores como o clima adverso enfrentado pela cultura da cana-de-açúcar, o aumento de custos no plantio e a redução do rendimento da cana-de-açúcar devido à mecanização da sua colheita.

A **Figura 17** mostra, para o período de 2007 a 2013, os volumes anuais de produção da gasolina A (gasolina pura sem nenhum aditivo), do etanol (incluindo o anidro e o hidratado) e as respectivas importações desses combustíveis. De acordo com o gráfico, constata-se que a partir do ano de 2009 tem-se o aumento da produção de gasolina A e a importação desse combustível, justamente para suprir a elevação da demanda da gasolina C pela frota de veículos leves. No mesmo gráfico percebe-se que a partir do ano de 2010 o Brasil inicia a importação de etanol para suprir a demanda do biocombustível no país.

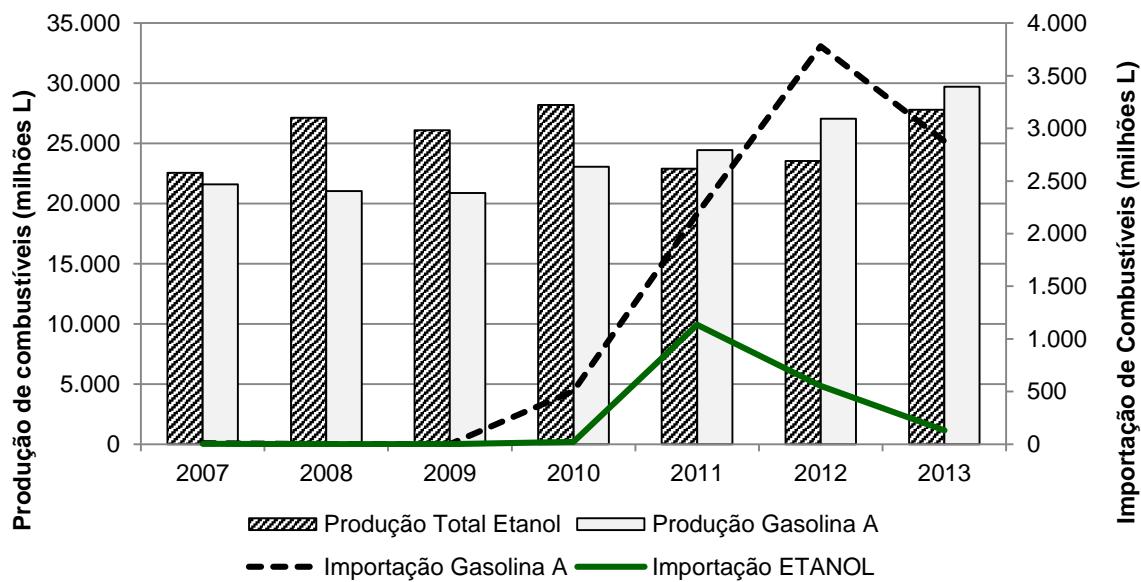


Figura 17 – Gráfico de produção e importação da gasolina A e etanol.
Fonte: Adaptado de ANP (2014)

O Ministério do Meio Ambiente publicou em 2014 o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, onde define a intensidade de uso dos veículos leves automotores, incluindo os automóveis e os comerciais leves. Tal estudo mostra que a distância percorrida por um veículo leve no período de um ano varia em função da sua idade. A **Figura 18** mostra a

intensidade de uso em função da idade do veículo e a **Equação 13** define a função matemática que expressa a intensidade de uso para a frota de veículos leves no Brasil.

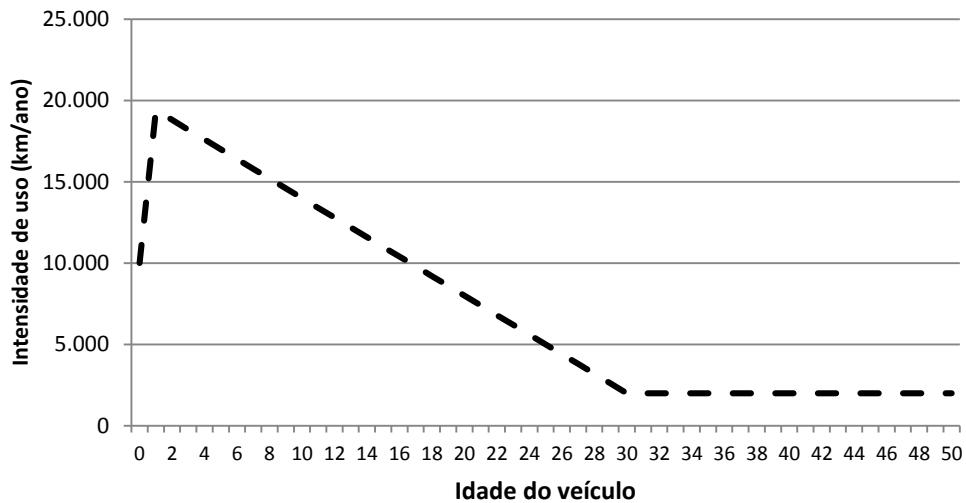


Figura 18 – Intensidade de uso dos automóveis e veículos comerciais leves.
Fonte: Adaptado de MMA (2014)

$$I_{uso} = 19.400 - 600(t - 1), \text{ para } t \geq 1 \text{ ou } I_{uso} = 1633 \times t \text{ para } t < 1 \quad (13)$$

Em que:

I_{uso} = Intensidade de uso em km/ano
 t = Idade do veículo em anos

4.2.3 Metodologia

As demandas anuais de etanol hidratado e gasolina C foram obtidas a partir de dados fornecidos pela ANP (2014) e as quantidades anuais de veículos licenciados foram obtidas de ANFAVEA (2015). O estudo compreendeu a determinação dos combustíveis utilizados pelos veículos *flexfuel* para o período de 2006 a 2014. Dessa forma, foi possível analisar o comportamento da demanda de combustíveis num horizonte de nove anos.

Para a melhor manipulação dos dados referentes aos volumes de etanol e gasolina C da pesquisa, optou-se pela conversão dos volumes do etanol hidratado e gasolina C em uma única unidade de poder calorífico, escolhendo-se então, a

conversão da energia dos respectivos combustíveis na energia referente ao barril equivalente de petróleo (bep). Dessa forma, estando os volumes de etanol hidratado e da gasolina C uma mesma unidade de medida energética, possibilita-se realizar diretamente as operações matemáticas entre o etanol hidratado e a gasolina C sem a necessidade de conversões. A EPE (2014) define que um metro cúbico de etanol hidratado é equivalente a 3,59 barris de petróleo e a gasolina C, tem a equivalência energética de 5,42 barris de petróleo.

As **Equações 14 e 15** apresentam os cálculos utilizados para a conversão dos combustíveis em gasolina equivalente:

$$V_{\text{gasolina (bep)}} = V_{\text{gasolina_C}} \cdot F_{\text{bep(g)}} \quad (14)$$

$$V_{\text{etanol (bep)}} = V_{\text{etanol_hidratado}} \cdot F_{\text{bep(e)}} \quad (15)$$

Em que:

- $V_{\text{gasolina (bep)}}$ = Volume de gasolina C convertido em unidades de barris de petróleo equivalente consumido no período.
 $V_{\text{gasolina C}}$ = Volume de gasolina C consumido no período.
 $F_{\text{bep(g)}}$ = Fator de conversão de gasolina C para bep.
 $V_{\text{Etanol (bep)}}$ = Volume de Etanol Hidratado convertido em barris de petróleo equivalente consumido no período.
 $F_{\text{bep(e)}}$ = fator de conversão de etanol hidratado para bep.

Os volumes anuais de gasolina C demandados pelos veículos à gasolina e *flexfuel*, e as quantidades anuais de etanol hidratado demandado pelos veículos a etanol e *flexfuel* foram calculados de acordo com a metodologia descrita a seguir.

Adotando-se a conversão dos volumes mensais de gasolina C e etanol hidratado em volumes de bep, obtidos à partir das equações **14 e 15**, o consumo total (C_t) de combustíveis demandada pela frota de veículos leves pode ser expresso pela equação **16**.

$$C_t = C_{VG} + C_{VE} + C_{VF(\text{gas})} + C_{VF(\text{etanol})} \quad (16)$$

Os volumes dos combustíveis abastecidos pela frota (Gasolina C ou Etanol hidratado) podem ser expressos adicionalmente pelas **Equações 17, 18, 19 e 20**:

$$C_t = C_{t(G)} + C_{t(E)} \quad (17)$$

$$C_{t(G)} = C_{VG} + C_{VF(gas)} \quad (18)$$

$$C_{t(E)} = C_{VE} + C_{VF(Etanol)} \quad (19)$$

$$C_{VF} = C_{VF(gas)} + C_{VF(Etanol)} \quad (20)$$

Em que:

C_t	=	Consumo total de combustíveis num determinado período
$C_{t(E)}$	=	Consumo total de etanol hidratado num determinado período
$C_{t(G)}$	=	Consumo total de gasolina C num determinado período
C_{VG}	=	Consumo total de gasolina C pela frota de veículos à gasolina
C_{VD}	=	consumo de etanol hidratado pela frota de veículos à etanol
C_{VF}	=	consumo total de combustível (gasolina C e etanol hidratado) pela frota de veículos <i>flexfuel</i> .
$C_{VF(gas)}$	=	consumo de combustível gasolina pela frota de veículos <i>flexfuel</i>
$C_{VF(etanol)}$	=	consumo de combustível etanol pela frota de veículos <i>flexfuel</i>

Tendo em vista que os volumes de combustíveis envolvidos estão expressos em volumes de bep, a **Equação 20** pode ser expressa em função da porcentagem de etanol hidratado, conforme descrito na **Equação 21**.

$$C_{VF} = C_{VF} \cdot (1 - E\%) + C_{VF} \cdot E\% \quad (21)$$

Em que:

$$E\% = \text{porcentagem de etanol consumido pelos veículos *flexfuel*.}$$

Considerando-se que o volume de combustível consumido por uma determinada frota de veículos pode ser obtido pelo resultado da multiplicação da quantidade de veículos pela distância percorrida, e dividido pelo rendimento do automóvel (km/L), pode-se representá-lo matematicamente pela **Equação 22**:

$$C_{Vi} = \frac{Q_{Vi} \cdot I_{Vi}}{R_{Vi}} \quad (22)$$

Em que:

$$C_{Vi} = \text{Consumo de combustíveis de um determinado tipo de veículo (em bep).}$$

$$Q_{Vi} = \text{Quantidade de veículos em circulação na frota (em unidades).}$$

$$I_{Vi} = \text{Intensidade de uso médio dos veículos (em km/ano)}$$

$$R_{Vi} = \text{Rendimento do automóvel (em km/L)}$$

Na **Equação 22**, a l_{Vi} (intensidade de uso médio dos veículos) pode ser substituída pela função matemática que determina a Intensidade de Uso (vide **Equação 13**), ficando:

$$C_{Vi} = \frac{Q_{Vi} \cdot (19.400 - 600(t-1))}{R_{Vi}} \quad (23)$$

Substituindo a **Equação 23** na **Equação 16** obtém-se a **Equação 24**.

$$C_t = \frac{Q_{VG} \cdot l_{VG}}{R_{VG}} + \frac{Q_{VE} \cdot l_{VE}}{R_{VE}} + \frac{Q_{VF} \cdot l_{Vi} \cdot (1 - E\%)}{R_{VF}} + \frac{Q_{Vi} \cdot l_{Vi} \cdot E\%}{R_{VF}} \quad (24)$$

Considerando que os volumes de combustíveis foram expressos numa mesma unidade energética, pode-se considerar que os rendimentos, dados em km por unidade de bep, dos automóveis à gasolina, etanol e *flexfuel* são equivalentes. Sendo assim, pode-se definir que os volumes de combustível demandados pelos veículos constituintes da frota (**Equação 24**) são proporcionais à quantidade de veículos da frota multiplicado pela respectiva intensidade de uso.

A idade da frota de veículos foi determinada utilizando-se a fórmula matemática demonstrada na **Equação 25**.

$$If_n = \frac{\sum_{i=0}^n (V_{ri} \times Id_i)}{\sum_{i=0}^n V_{ri}} \quad (25)$$

Em que:

If_n = idade da frota de veículos tendo-se como referência o ano n

V_{ri} = veículos que efetivamente circulam na frota fabricados em um determinado ano i

Id_i = idade dos veículos licenciados num determinado ano i

Os volumes de combustíveis consumidos, compreendendo a gasolina C e o etanol hidratado pela frota de veículos leves foram obtidos com auxílio de uma planilha de cálculos, do tipo *Excel*.

4.2.4 Resultados e Discussão

A **Figura 19** mostra a evolução da frota brasileira de veículos leves, composta pelos veículos dedicados a gasolina, ao etanol e os *flexfuel*. Analisando-se os dados do gráfico, pode-se constatar que a partir do ano de 2011, os veículos *flexfuel* passaram a ser maioria da frota de veículos, tal qual comentado por Du e Carriquiry (2013).

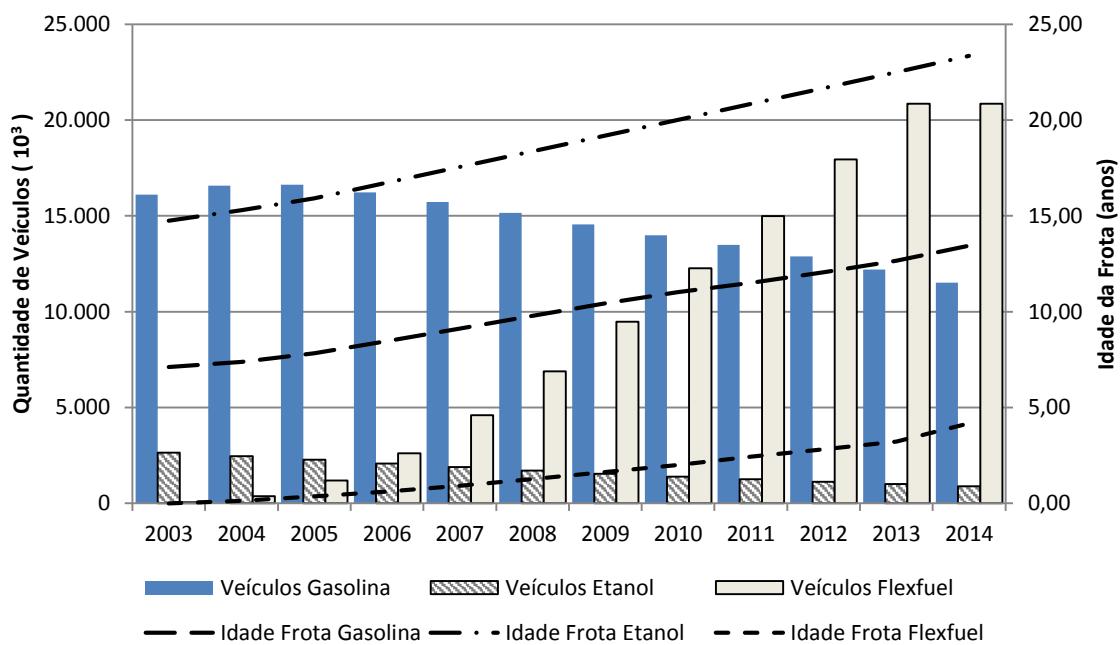


Figura 19 – Variação da frota de veículos em circulação no Brasil.

Analisando-se a evolução das idades das frotas de veículos, calculado pelas **Equações 11** e **12** obtido por MMA (2014), percebe-se que a frota de veículos *flexfuel* possui a menor idade, de 4,18 anos em 2014, a frota de veículos a gasolina com idade de 13,45 anos e a frota de veículos a etanol de 23,36 anos. A menor idade da frota de veículos *flexfuel* sugere que esses veículos sejam responsáveis pelo consumo de uma maior parcela de combustíveis automotivos no Brasil.

Na **Figura 20** são apresentados graficamente os resultados obtidos para os combustíveis consumidos pela frota brasileira de veículos leves. Tais resultados foram inicialmente calculados em bep e convertidos em metros cúbicos de gasolina

C ou etanol hidratado para os respectivos combustíveis abastecidos para cada tipo de veículo da frota de veículos leves.

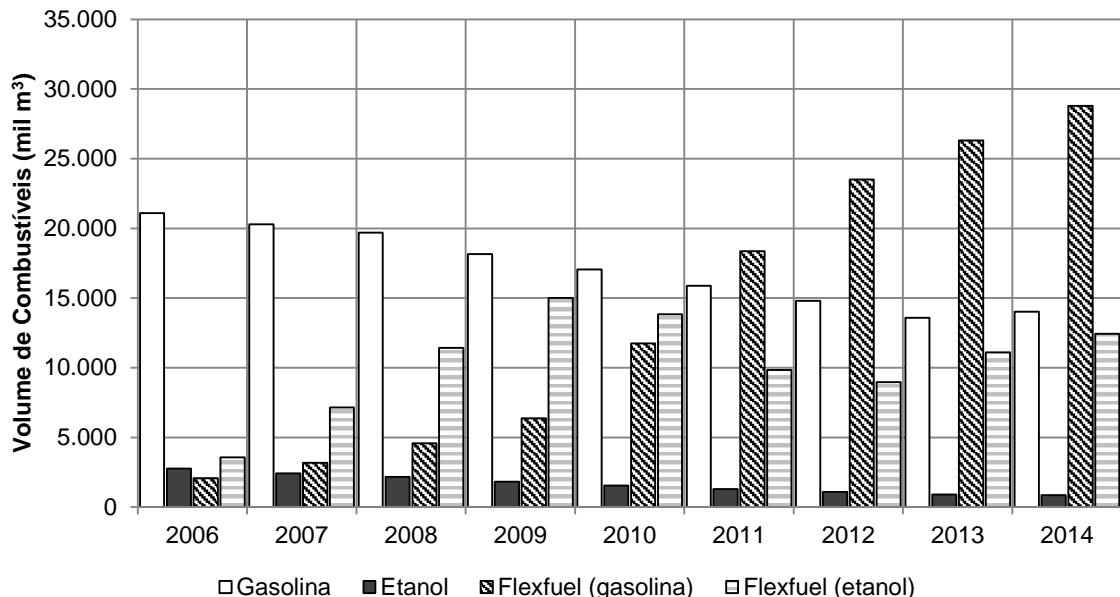


Figura 20 – Consumo de combustíveis pela frota brasileira de veículos leves

Analizando-se o gráfico da **Figura 20**, nota-se um aumento significativo de consumo de gasolina pelos veículos *flexfuel*, passando do volume de 2,074 milhões de metros cúbicos em 2006 para 28,787 milhões de metros cúbicos. Ainda com relação ao gráfico, percebe-se um crescimento do consumo do etanol hidratado consumido pelos veículos *flexfuel* no período de 2006 a 2009 e redução da demanda a partir de 2010. Esses resultados, que foram obtidos a partir da metodologia proposta no presente estudo, sugerem que os proprietários dos veículos *flexfuel* passaram a dar preferência para o combustível fóssil, em detrimento ao uso do biocombustível. Tais números vão ao encontro das afirmações de Nogueira e Capaz (2013), EPE (2013) e Milanez *et al.* (2012), que haviam definido que a partir do ano de 2009 tem-se o início da fase de estagnação da indústria sucroalcooleira no Brasil, tendo como consequências a interrupção da expansão das usinas produtoras de etanol e a redução da oferta do biocombustível no mercado brasileiro.

Na **Figura 21** pode-se visualizar a evolução da porcentagem do volume de gasolina C em relação ao volume total de combustíveis consumidos pelos veículos *flexfuel*. Pode-se perceber com clareza, que houve uma clara mudança de

comportamento da demanda de combustíveis, com o aumento do consumo de gasolina C, passando de 36,7% em 2006 para 69,8% em 2014.

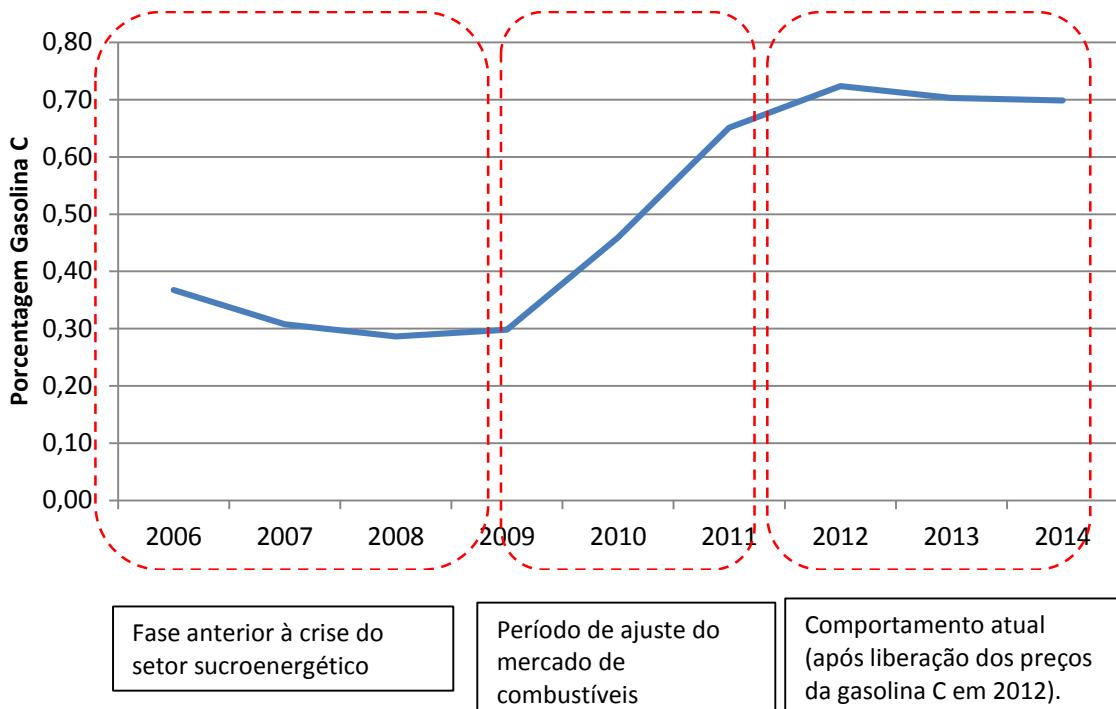


Figura 21 – Porcentagem de Gasolina C consumido pelos veículos *flexfuel*

O aumento do consumo de gasolina C e a consequente diminuição de demanda do biocombustível no período analisado pode ter sido causado pela manutenção artificial dos preços da gasolina C, conforme citado por Nogueira e Capaz (2013), EPE (2013) e Milanez *et al.* (2012), e pode trazer duas graves consequências ao setor energético brasileiro. A primeira, seria o agravamento da crise no setor sucroalcooleiro brasileiro, com o fechamento de usinas produtoras. Consultando-se a UNICA (2015), no período de 2009 a 2014, 51 unidades encerraram as suas atividades e 18 novas unidades iniciaram as suas operações. É um balanço negativo se comparado com a quantidade de veículos *flexfuel* que são maioria da frota brasileira de veículos leves, divulgado por MMA (2014), que potencializam a demanda do biocombustível. A segunda consequência, caso a taxa de consumo de gasolina C se mantenha em patamares similares ao período de 2011 a 2014 (**Figura 16**), seria a necessidade crescente de importação de gasolina C, conforme divulgado por ANP (2014), aumentando ainda mais a necessidade de importação da gasolina C.

Por último, um outro fator que não deve ser ignorado são os benefícios trazidos pela substituição do biocombustível pela gasolina C, tais como a redução de materiais particulados, gases de efeito estufa e monóxido de carbono, afirmado por Mollo Neto *et al.* (2010). A manutenção de altas taxas de uso da gasolina C pelos veículos *flexfuel* pode minimizar esses benefícios, piorando a qualidade do ar das metrópoles brasileiras.

4.2.5 Conclusão

O presente trabalho possibilitou a determinação dos volumes de gasolina C e etanol hidratado consumido pela frota de veículos *flexfuel* no Brasil. Com os volumes de combustíveis obtidos, foi obtida a curva de demanda porcentual da gasolina C, mostrando a mudança de comportamento de consumo de combustíveis a partir de 2010.

Apesar de várias causas terem sido relacionadas para o estabelecimento da crise no setor sucroalcooleiro e a consequente mudança no comportamento da demanda de combustíveis, é importante apontar que a falta de uma diretriz energética pode ter sido o seu principal fator causador, necessitando portanto, de uma completa reestruturação nas políticas energéticas no país, de tal forma que tragam condições para a manutenção do biocombustível e o retorno do crescimento do setor sucroalcooleiro brasileiro, traduzindo no aumento de usinas e oferta do produto no mercado.

Como trabalhos futuros, a metodologia de cálculo obtido no presente trabalho poderia ser utilizada para a determinação da função matemática de consumo do etanol hidratado em função dos preços praticados no Brasil. Essa função matemática poderia ser utilizado para a previsão de demanda de combustíveis pela frota de veículos leves, permitindo-se assim, prever os volumes a serem consumidos e fazer planejamento da infraestrutura necessária para a oferta desse produto no mercado de combustíveis brasileiro.

4.2.6 Bibliografia

- ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2015.** Disponível em: <www.anfavea.com.br>. Acesso em: maio/2015.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo. **Anuário Estatístico 2014.** Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: nov/2014.
- BAKE, J. D. V. D. W, JUNGINGER M., FAAIJ, A. POOT, T., WALTER, A. **Explaining the experience curve: cost reductions of Brazilian ethanol from sugarcane.** Biomass and Bioenergy v.33, pp. 644-658, 2009.
- BNDES. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável.** Rio de Janeiro, 2008.
- CRAGO C. L., KHANNA, M., BARTON, J., GIULIANI, E., AMARAL, W. **Competitiveness of Brazilian sugarcane ethanol compared to US corn ethanol.** Energy Policy v.38, p. 7404-7415, 2010.
- DU, X., CARRIQUIY, M.A. **Flex-fuel vehicle adoption and dynamics of ethanol prices: lessons from Brazil.** Energy Policy v.59, pp. 507-512, 2013.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética, **Conversor de Unidades.** Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br>>. Acesso em: nov/2014.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Avaliação do Comportamento dos Usuários de Veículos Flex-Fuel no Consumo de Combustíveis no Brasil.** Brasília, 2013.
- FREITAS, L. C., KANEKO, S. **Ethanol Demand under Flex-fuel Technology Regime in Brasil.** Energy Economics v.33, pp. 1146-1154, 2011.
- GOLDEMBERG, J., COELHO, S. T., LUCON, O., GUARDABASSI, P. **Brazilian sugarcane ethanol: lessons learned.** Energy Police v.39; pp. 6925-6935; 2011.
- HIRA, A. **Sugar Rush: Prospects for a Global Ethanol Market.** Energy Police v.39; p. 6925-6935; 2011.
- LOSEKANN, L., VILELA, T., CASTRO, G. R. **Difusão de Automóveis Flexíveis no Brasil: Sensibilidade ao Preço e Impactos na Emissão de CO₂.** Instituto Brasileiro do Petróleo, 2012.
- MARTINEZ, S. H., EIJCK, J. V., CUNHA, M. P., GUILHOTO, J. J. M., WALTER, A., FAAIJ, A. **Analysis of socio-economic impacts of sustainable sugarcane ethanol production by means of inter-organizational Input-Output analysis demonstrate of North-East of Brazil.** Renewable and Sustainable Energy Reviews v.28, p. 290-316, 2013.
- MILANEZ A. Y., NYKO. D., G. J. L. F., REIS, B. L. S. F. S. **O déficit de produção de etanol no Brasil entre 2012 e 2015: determinantes, consequências e sugestões de política.** BNDES, Rio de Janeiro, 2012.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários.** Brasília/Brasil, 2014.

MOLLO NETO, Mario : VENDRAMETTO, O. : WAKER, R. A. **Is the Development of Brazilian Biofuel Network Sustainable?** International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2010). IFIP Working Group 5.7 on Advances in Production Management Systems. Vienna, Springer, 2010.

NOGUEIRA, L. A. H; CAPAZ, R. S. **Biofuels in Brazil: Evolution, Achievements and Perspectives on Food Security.** Global Food Security v.2; p. 117-125, 2013.

SANTOS, G. F. **Fuel Demand in Brazil in a Dynamic Panel Data Approach.** Energy Economics v.36, p. 229-240, 2013.

SILVA, G.F., TIRYKI, G.F., PONTES, L.A.M. **The impact of a growing ethanol market on the demand elasticity for gasoline in Brazil.** 32nd Annual International Association for Energy Economics Conference, San Francisco, 2009.

STATTMAN, S. L., HOSPES, O., MOL, A. P. J. **Governing Biofuels in Brazil: a comparison of ethanol and biodiesel policy.** Energy Policy v.61, p. 22-30, 2013.

UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. **Relatório Final da Safra 2013-2014.** Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=88>>. Acesso em: 12/02/2015.

4.3 Artigo: PRODUÇÃO FLEXÍVEL DE ETANOL: A ENERGIA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR PODE AUXILIAR NA SUSTENTABILIDADE DOS BIOCOMBUSTÍVEIS.

Publicado por IFIP International Federation for Information Processing, Springer, v. 459, p. 662-669, 2015, texto original em inglês com o título “*Flexible Ethanol Production: Energy from Sugarcane Bagasse Might Help the Sustainability of Biofuels*”, DOI: 10.1007/978-3-319-22756-6_81.

Este artigo buscou respostas para o objetivo específico 3 desta tese, ou seja, analisar a contribuição que o etanol produzido a partir do milho poderia trazer à oferta desse biocombustível no país.

Resumo: A indústria do etanol no Brasil passa por uma fase de estagnação, tendo como consequência a redução da produção e oferta do etanol combustível. O etanol hidratado, disponível nos postos de abastecimento no Brasil, abastece os veículos *flexfuel* que podem utilizar esse biocombustível, a gasolina ou a mistura de ambos em qualquer proporção. O presente estudo teve como finalidade analisar a contribuição que o milho poderia trazer para a fabricação de etanol em usinas adaptadas para operarem com a cana-de-açúcar e este cereal. Para tanto, considerou-se no estudo o excedente de energia proveniente da biomassa da cana-de-açúcar e a disponibilidade do milho nas regiões produtoras. Ao final do artigo, os resultados obtidos são discutidos, apresentando uma análise da aplicação do milho como matéria-prima alternativa para a fabricação de etanol.

Palavras-chave: Etanol, Etanol de Milho, Eficiência Energética.

4.3.1 Introdução

De acordo com Coelho *et al.* (2006) e Freitas e Kaneko (2011), o etanol anidro é o mais importante aditivo adicionado à gasolina, e o etanol hidratado pode ser utilizado como combustível alternativo pelos veículos *flexfuel*, que podem utilizar tanto a gasolina pura, etanol hidratado ou a mistura de ambos em qualquer proporção.

Dados da ANP (2014) mostram que a partir do ano de 2009, iniciou-se a redução da demanda de etanol hidratado no Brasil, que passou de 16.471 milhões de metros cúbicos nesse ano para o volume de 9.793 milhões de metros cúbicos no ano de 2013. A gasolina por sua vez, era consumida no volume de 25.409 milhões de metros cúbicos em 2009 passando a 39.678 milhões de metros cúbicos no ano de 2013.

Nogueira e Capaz (2013) apontam o aumento do consumo do combustível fóssil e a diminuição da demanda do biocombustível como sendo uma fase de estagnação e interrupção da expansão da indústria sucroalcooleira no Brasil. Os mesmos autores complementam que contribuíram para essa fase de estagnação, a intervenção governamental nos preços da gasolina no período de 2008 a 2012, com o intuito de combater a inflação no país, fazendo com que o seu preço de comercialização ficasse abaixo do preço do barril do petróleo, além da baixa produtividade da lavoura nesse período. Ainda, de acordo com os autores, a redução da expansão das unidades produtoras de etanol e a oscilação da oferta do biocombustível devido às variações climáticas determinaram o aumento de seus preços aos consumidores e, consequentemente, a redução do consumo.

Dantas *et al.* (2013) definem que as usinas brasileiras produtoras de etanol são autossuficientes em energia, sendo essa uma das vantagens competitivas do etanol produzido no Brasil. Dentro desse enfoque, a combinação da disponibilidade de usinas de etanol, o excedente de energia e a produção de milho numa mesma região geográfica dariam condições para a produção do etanol de milho, bastando para isso, a adaptação das usinas para a operação com as duas matérias-primas mencionadas.

O presente artigo tem o objetivo de analisar o adicional de etanol que poderia ser produzido com a utilização do milho como matéria-prima e a energia excedente

obtida do bagaço da cana-de-açúcar. O estudo foi realizado considerando-se a região Centro-Oeste do Brasil, que além de ter uma grande produção de etanol de cana-de-açúcar, é ainda uma grande produtora de milho.

4.3.2 Revisão Bibliográfica

4.3.2.1 A produção do etanol de cana-de-açúcar e milho na Região Centro-Oeste do Brasil.

De acordo com Hofsetz e Silva (2012), a produção de etanol de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil ocorre de março a dezembro de cada ano. Consultando a ANP (2014), os maiores volumes do biocombustível são produzidos nos meses intermediários da safra, ou seja, de julho a setembro. Essa característica de produção faz com que, de acordo com os mesmos autores, os preços do etanol aos consumidores sejam maiores na entressafra da cana-de-açúcar e início do ciclo de produção, quando os estoques do biocombustível costumam estar em níveis menores.

De acordo com Coelho *et al.* (2006), a produção brasileira do etanol a partir da cana-de-açúcar e a utilização de veículos *flexfuel* são referências mundiais em energia renovável. Os mesmos autores complementam que a produção do etanol tem promovido o desenvolvimento rural, diversificação das fontes de energia, redução da dependência da importação de petróleo e principalmente, a redução da poluição do ar e gases do efeito estufa.

As produções regionais de etanol de cana-de-açúcar para o ano de 2013 são apresentadas na **Tabela 12**.

Tabela 12 – Produção regional de etanol no Brasil

Região	Produção 2013 Milhões de m ³	Porcentagem da produção brasileira
Norte	253,61	0,91%
Nordeste	1.703,67	6,13%
Sudeste	17.167,74	61,74%
Sul	1.475,83	5,31%
Centro-Oeste	7.207,75	25,92%
Total Brasil	27.808,59	100,00%

Fonte: Adaptado de ANP (2014)

Du e Carriquiry (2013) destacam que o Brasil, como pioneiro na produção de etanol de cana-de-açúcar, tem sido bem-sucedido na superação dos desafios iniciais para o desenvolvimento deste combustível fazendo uso eficiente de tecnologias de produção agrícola, práticas modernas de gerenciamento da lavoura, e a utilização do bagaço da cana após a moagem para a geração de calor e energia elétrica para a produção de etanol. Dantas *et al.* (2013) complementam que além da produção de energia para suprir as necessidades energéticas da usina, o bagaço de cana-de-açúcar pode ser destinado futuramente à fabricação do etanol lignocelulósico.

Na **Tabela 13**, relacionam-se os estados da região Centro-Oeste do Brasil, composta pelos estados de Mato Grosso (MT), Mato Grosso do Sul (MS) e Goiás (GO). Nessa tabela, são mostradas as quantidades de usinas instaladas nos respectivos estados, os dias médios de operação das usinas e as quantidades colhidas na segunda safra de milho no ano de 2013.

De acordo com o BNDES (2014), a safra de inverno do milho é uma cultura que se alterna com o plantio da soja, e tem um potencial de aumento da produção desse cereal para 72.239 mil toneladas, caso toda a área de plantio de soja seja alternada com o plantio do milho (safra de inverno).

Tabela 13 – Usinas de etanol, dias médios de operação e segunda safra de milho.

Estado	Quant. Usinas	Dias médios de Operação durante o ano	Etanol de cana-de-açúcar produzido na safra de 2014 (em mil m ³)	Segunda safra de milho (2012) mil ton
MS	23	222	2248,37	7.451,1
GO	36	183	3871,93	4.816,9
MT	9	173	1087,46	19.357,8

Fonte: Adaptado de CONAB (2013), CONAB 2013-a, ANP (2014)

4.3.2.2 Etanol de milho: a experiência americana e perspectivas para a produção no Brasil.

Nos EUA, o etanol produzido a partir do milho é atualmente o biocombustível predominante, utilizando para isso, a quantidade de 30% da produção total de milho do país. De acordo com Hettinga *et al.* (2009), são utilizados dois processos para a

produção do etanol a partir do milho: por moagem úmida e moagem seca, sendo esta última a mais utilizada para a produção de etanol. A produção de etanol pela via úmida proporciona uma maior quantidade de subprodutos, tais como o óleo de milho, gás carbônico, amido e aproximadamente 440 litros de etanol anidro por tonelada de milho. Por outro lado, a produção de etanol por via seca proporciona a produção de 460 litros de etanol anidro e 380 kg DDGS (*Distillers Dried Grains with Solubles*) por tonelada de milho processado. Os autores complementam que nos EUA, a preferência é pela produção de etanol por moagem seca devido a possibilidade de se obter maiores volumes de etanol.

Uma das desvantagens da produção do etanol a partir do milho é a impossibilidade de aproveitamento total da biomassa do milho como fonte de geração de energia, tal qual ocorre com o bagaço da cana-de-açúcar. Hofsetz e Silva (2012) e Crago *et al.* (2010) comentam que a colheita do milho gera palha, colmo, folhas e sabugo, que boa parte precisa ser deixada no campo para preservar a fertilidade e a umidade do solo. Diante disso, nos EUA utilizam-se o gás natural como fonte de energia para a produção do etanol de milho.

Com relação às características das matérias-primas utilizadas para a produção do etanol, BNDES (2014) destaca que a cana-de-açúcar deve ser moída e processada em poucas horas após a colheita, pois caso contrário, há a perda da sacarose e consequentemente, a redução do rendimento da produção de etanol ou açúcar. O milho, por sua vez, não passa por este problema, podendo ser armazenado por períodos de até três anos, sendo esta uma vantagem em relação à cana-de-açúcar.

Consultando a UNICA (2015) no período de dezembro de 2013 a abril de 2014, foram produzidas em duas usinas do estado do Mato Grosso (MT), convertidas para operarem simultaneamente com a cana-de-açúcar e milho, a quantidade de 0,37 milhões de metros cúbicos de etanol de milho, fazendo o aproveitamento do milho excedente da safra de inverno naquele estado. Há que se observar que a utilização do cereal para a produção de etanol ocorreu justamente no período de entressafra da cana-de-açúcar, entre os meses de dezembro a abril, quando as usinas costumavam ficar paradas.

A APROSOJA (2013) divulgou o rendimento obtido pelas usinas no ano de 2012, sendo de 0,352 m³ de etanol por tonelada de milho e a obtenção de 169,5 kg de DDGS por tonelada de milho. Tais números mostram que o rendimento produtivo das usinas brasileiras está ainda aquém do rendimento obtido pelas usinas americanas, que é da ordem de 460 litros de etanol por tonelada de milho processado.

Um ponto importante a ser citado, principalmente quando deseja-se analisar a sustentabilidade e a competitividade da produção do etanol, é o consumo de energia nas etapas industriais. Salla e Cabelo (2010) publicaram um estudo que determina que o processamento industrial de uma tonelada de cana-de-açúcar para a obtenção de 85 litros de etanol consome 1.641,56 MJ, ao passo que o processamento de uma tonelada de milho produz 352 litros de etanol e consome 3.882,39 MJ de energia. Esses dados ganham importância quando colocados em análise o bagaço de cana-de-açúcar que é a principal fonte de energia utilizada nas usinas brasileiras. De acordo com a Lamonica (2007), o processamento de uma tonelada de cana-de-açúcar gera 276kg de bagaço com potencial energético de 2503,71 MJ e quando a colheita é mecanizada, pode-se obter a quantidade de 165 kg de palha por tonelada de cana colhida, que tem o potencial energético de 2.143,64 MJ.

Analizando esses dados energéticos e considerando perdas de 21% na conversão da queima do bagaço de cana-de-açúcar para a obtenção de vapor nas usinas de cana, de acordo com Lamonica (2007), pode se estimar que ao processar uma tonelada de cana-de-açúcar, há a disponibilidade bruta de 2503,71 MJ de energia do bagaço de cana, perdas de 525,78 MJ, consumo de 1.641,56 MJ de energia no processo industrial de obtenção do etanol, havendo o saldo de 336,37 MJ, que poderia ser aproveitado para o processamento de milho para a obtenção de etanol.

4.3.3 Metodologia

Neste artigo, o potencial de produção de etanol na região Centro-Oeste do Brasil foi estimado levando em consideração a utilização da cana-de-açúcar durante a sua respectiva safra e o milho durante a entressafra. Os dados utilizados no estudo foram obtidos da ANP (2014), CONAB (2013) e CONAB (2013-a). A partir dos dados obtidos, estimou-se o potencial de contribuição que o etanol de milho poderá trazer à oferta do biocombustível na região Centro-Oeste do Brasil. Os cálculos foram realizados em dois diferentes cenários, sendo que no primeiro, considerou-se a produção de etanol de cana-de-açúcar nos volumes obtidos em 2013, e a energia excedente do bagaço de cana-de-açúcar sendo utilizada para a produção do etanol de milho. Neste caso, o limite de produção de etanol de milho poderia vir de duas variáveis, isto é, a disponibilidade de energia ou a disponibilidade do cereal em cada estado.

No segundo cenário, considerou-se a utilização da energia do bagaço de cana-de-açúcar e da palha como fonte de energia para a obtenção do etanol. Com relação ao volume de milho utilizado para a produção do etanol, houve a necessidade de ponderar entre a quantidade de milho processável devido à disponibilidade de energia, a quantidade do cereal proveniente da colheita de segunda safra, e a quantidade de milho necessária para a produção de 120 dias de etanol, que é justamente a duração da entressafra da cana-de-açúcar. O volume de milho considerado no processamento diário foi o equivalente ao volume médio diário de etanol obtido com a cana-de-açúcar como matéria-prima, que pressupõe ser o volume máximo de etanol capaz de ser produzido no período de um dia.

As fórmulas matemáticas utilizadas para a simulação dos cenários 1 e 2 estão descritas nas equações 26, 27, 28 e 29.

$$D_{Ec} = \frac{V_e}{0,085} \cdot 2.503 \quad (26)$$

Em que:

- D_{Ec} = Disponibilidade de energia do bagaço de cana-de-açúcar (em MJ).
 V_e = Volume de etanol produzido (em m³),
 0,085 = Volume de etanol (em m³) produzido por tonelada de cana
 2,503 = Quantidade de energia obtida no bagaço de 1 tonelada de cana, em MJ

$$D_{Ep} = \frac{V_e}{0,085} \cdot 2.134 \quad (27)$$

Em que:

- D_{Ep} = Disponibilidade de energia da palha de cana-de-açúcar (em MJ)
 V_e = Volume de etanol produzido (em m³),
 0,085 = Volume de etanol (em m³) produzido por tonelada de cana
 2,503 = Quantidade de energia obtida no bagaço de 1 tonelada de cana, em MJ

$$E_{ex} = D_{Ec} \cdot 0,79 - E_c \quad (28)$$

Em que:

- E_{ex} = Energia excedente disponível para o processamento industrial do milho (em MJ).
 D_{Ec} = Disponibilidade de energia do bagaço de cana-de-açúcar (em MJ).
 E_c = Energia utilizada para o processamento da cana-de-açúcar para fabricação do etanol (em MJ).

$$V_{EM} = \frac{E_{ex}}{E_{pm}} \cdot 0,350 \quad (29)$$

Em que:

- V_{EM} = Volume de etanol de milho obtido (em m³).
 E_{ex} = Energia excedente disponível para o processamento do etanol de milho (em MJ).
 E_{pm} = Energia necessária para o processamento de 1 tonelada de milho (em MJ).
 0,350 = volume de etanol obtido (em m³) no processamento de 1 tonelada de milho.

4.3.4 Resultados e Discussão

As **Tabelas 14 e 15** apresentam os resultados obtidos a partir das simulações realizadas. No Cenário 1 foi possível estimar a obtenção de 2.537,9 mil metros cúbicos de etanol de milho, representando um adicional de 35,21% em relação à produção do etanol de cana-de-açúcar.

Tabela 14 – Resultados da simulação para o Cenário 1.

Estado	Segunda safra de milho - ref. 2013 (t)	Milho processável pela energia excedente disponível (t)	Energia excedente (10 ⁶ MJ)	Etanol Cana-de- açúcar (m ³)	Etanol milho (m ³)
MS	7.451.100	2.291.755	8.897	2.248.370	802.114
GO	4.816.900	3.946.643	15.322	3.871.930	1.355.176
MT	19.357.800	1.108.444	4.303	1.087.460	380.611
Total				7.207.760	2.537.901

No cenário 2, considerou-se a utilização da energia disponível (proveniente do excedente de bagaço de cana e da palha da cana-de-açúcar), o volume de cana processável com a energia disponível, a quantidade diária de milho processável e a colheita de milho na safra de 2013. Em negrito, definem-se as quantidades de milho que foram considerados para a produção do etanol, de acordo com as condições impostas na metodologia. Observe-se que nesse cenário, obteve-se um adicional de 66,08% em relação ao etanol obtido da cana-de-açúcar.

Tabela 15 – Resultados da simulação para o Cenário 2.

Estado	Segunda safra de milho - ref. 2013 (t)	Milho processável pela energia excedente disponível (t)	Milho processável em 120 dias de produção (t)	Energia excedente (10 ⁶ MJ)	Etanol Cana-de-açúcar (m ³)	Etanol milho (m ³)
MS	7.451.100	13.829.704	6.252.671	53.692	2.248.370	1.215.335
GO	4.816.900	23.816.208	3.175.978	92.464	3.871.930	2.538.970
MT	19.357.800	6.688.957	4.180.598	25.969	1.087.460	754.308
Total					7.207.760	4.508.613

Os resultados do estudo mostram que o etanol produzido a partir do cereal pode dar uma boa parcela de contribuição para o aumento da oferta do biocombustível no Brasil. Dessa forma, o déficit do biocombustível anunciado por Nogueira e Capaz (2013) seria minimizado, dando condições ao setor voltar a crescer com o aumento da demanda do biocombustível.

Conforme definido por Hofsetz e Silva (2012) e BNDES (2014), no presente estudo considerou-se o milho sendo processado em períodos de entressafra da cana-de-açúcar, ou seja, nos meses de janeiro a abril, quando as usinas de etanol ficam paradas por falta de cana-de-açúcar. Dessa forma, há uma redução da ociosidade das usinas, tendo em vista que na safra de cana-de-açúcar produz o etanol com essa matéria-prima e nos demais períodos pode se utilizar o cereal como matéria-prima.

Uma outra observação que deve ser acrescentada é com relação aos preços de venda do etanol de milho pelas usinas produtoras. Como a produção do etanol de milho é praticada na entressafra da cana-de-açúcar, quando os preços do etanol são favoráveis, os produtores podem se beneficiar disso, tendo preços melhores para comercializar os seus produtos.

Com relação à energia necessária para a produção de etanol de milho, o estudo mostrou que com a utilização do bagaço de cana excedente é possível aumentar em 35,21% a produção de etanol e com a utilização de bagaço excedente e palha, o aumento pode chegar até 62,55%. Ambos os estudos considerando a disponibilidade regional do cereal e o limite máximo de produção suportado pelas

usinas. Esses resultados mostram que a conversão das usinas para operarem com o milho pode auxiliar na eficiência energética das unidades produtoras, tendo em vista o aumento da produção do biocombustível com maior aproveitamento da biomassa excedente. Essa eficiência energética é uma vantagem competitiva das usinas preparadas para operarem com as duas matérias-primas em relação às usinas típicas americanas, conforme definido por Hofsetz e Silva (2012) e Crago *et al.* (2010), que precisam de fontes de energia externa para o processamento do milho.

Por final, há que se acrescentar uma nota sobre os aspectos de armazenamento das duas matérias-primas. Conforme definido por BNDES (2014), a cana-de-açúcar deve ser processada poucas horas após a colheita e o milho pode ser armazenado por um período maior. As usinas adaptadas para a operação com as duas matérias-primas podem se beneficiar dessas características, pois sendo armazenável, o milho poderá ser utilizado para suprir as oscilações de produtividade, conforme comentado por Nogueira e Capaz (2013).

4.3.5 Conclusão

O estudo realizado mostrou, para a região Centro-Oeste do Brasil, os volumes adicionais de etanol que podem ser produzidos com a utilização do milho em usinas produtoras de etanol de cana-de-açúcar previamente adaptadas. Tais resultados foram obtidos por meio de simulação, considerando o aproveitamento da biomassa proveniente da cana-de-açúcar como fonte de energia das usinas. A partir dos resultados obtidos, foi possível comprovar a viabilidade energética que as usinas teriam ao adaptar para a operação com o milho como matéria-prima.

Além do aumento produtivo, pode-se concluir no presente estudo, que a utilização do milho pode reduzir a ociosidade das usinas nos períodos da entressafra da cana-de-açúcar, utilizando este cereal como matéria-prima. Outro benefício da utilização do milho seria a sua utilização para minimizar os efeitos da oscilação da produção da cana-de-açúcar devido aos fatores climáticos.

Como estudos futuros, análises poderiam ser realizadas considerando se a variação mensal da oferta de cana-de-açúcar e a utilização do milho como instrumento para a manutenção dos volumes de etanol produzidos pelas usinas.

Referências

- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico 2014**; Brasília/DF. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 05/12/2014.
- APROSOJA. **I Forum Brasileiro de Etanol de Milho e Sorgo**. Sorriso/MT, 2013.
- BNDES. **A Produção do Etanol pela Integração do Milho-Safrinha às Usinas de Cana-de-Açúcar: Avaliação Ambiental, Econômica e Sugestões de Política**. Brasília, 2014.
- COELHO, S.T.; GOLDEMBERG, J.; LUCON, O.; GUARDABASSI, P. **Brazilian Sugar-cane Ethanol: Lessons Learned. Energy for Sustainable Development**. V.10, Nº 2, June 2006.
- CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira – Grãos; V1 – Safra 2013/14**, Brasília, dez/2013.
- CONAB. **Perfil do Setor do Açúcar e do Álcool no Brasil; Volume 5 – Safra 2011/2012**. Brasília, 2013-a.
- CRAGO, C.L.; KHANNA, M.; BARTON, J.; GIULIANI, E.; AMARAL, W. **Competitiveness of Brazilian Sugarcane Ethanol Compared to US Corn Ethanol**. Energy Policy v.38; p. 7404-7415; 2010.
- DANTAS, G. A., LEGEY, L. F. L., MAZZONE, A. **Energy from Sugarcane Bagasse in Brazil: An Assessment of the Productivity and Cost of Different Technological Routes**. Renewable and Sustainable Energy Reviews v.21, p. 356-364, 2013.
- DU, X.; CARRIQUIRY, M. A. **Flex Fuel Vehicle Adoption and Dynamics of Ethanol Prices: Lessons from Brazil**. Energy Policy v.59; p. 507-512; 2013.
- FREITAS, L. C., KANEKO, S. **Ethanol Demand under the Flex Fuel Technology Regime in Brazil**. Energy Economics v.33, p. 1146 – 1154. 2011.
- HETTINGA, W. G.; JUNGINGER, H. M., DEKKER, S. C.; HOOGWIJK, M; MCALOON, A. J.; HICKS, K. B. **Understanding the Reduction in US Corn Ethanol Production Costs: An Experience Curve Approach**. Energy Policy v.37; p. 190-203, 2009.
- HOFSETZ, K; SILVA, M. A. **Brazilian Sugarcane Bagasse: Energy and Non-energy consumption**. Biomass and Energy v.46; p. 564-573, 2012.

LAMONICA, H. M. **Produção de Vapor e Eletricidade – A Evolução do Setor Sucroalcooleiro.** Workshop de Gestão de Energia e Resíduos na Agroindústria Sucroalcooleira, 2007.

NOGUEIRA, L. A. H; CAPAZ, R. S. **Biofuels in Brazil: Evolution, Achievements and Perspectives on Food Security.** Global Food Security v.2; p. 117-125, 2013.

SALLA, D. A., CABELLO, C. **Análise Energética na Produção de Etanol de Mandioca, Cana-de-Açúcar e Milho.** Revista Energia na Agricultura, v. 25, n. 2, p. 32 - 53, 2010.

UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. **Relatório Final da Safra 2013-2014.** disponível em <http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=88>, acesso em 11/03/2015.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de biocombustíveis tem sido foco de preocupação mundial, representando além de questões referentes à segurança energética, a preocupação com as questões que envolvem a substituição dos combustíveis fósseis pelos combustíveis renováveis e a redução dos gases de efeito estufa, minimizando-se assim, o aquecimento global. O Brasil desenvolveu, desde a implantação do PROALCOOL, uma matriz energética que possibilitou a introdução do etanol combustível para a utilização em veículos, sendo desde então, uma referência mundial em combustíveis renováveis.

Essa tese estudou e analisou os fatores que afetam o consumo do biocombustível no Brasil, utilizando para isso, estudos buscando respostas para o setor sucroalcooleiro e publicados sob a forma de três artigos científicos. A introdução da tecnologia *flexfuel* trouxe uma mudança significativa no comportamento dos proprietários desses veículos e, consequentemente, na demanda desse biocombustível no território nacional. Tal fato se deve à possibilidade dos proprietários dos veículos *flexfuel* poderem optar pelo combustível de sua preferência no momento do abastecimento, cuja opção tem, como a sua principal variável, a relação entre os preços do etanol hidratado em relação à gasolina C (também conhecida como paridade técnica).

5.1 Conclusões

Esta tese teve como objetivo geral, analisar a demanda de combustíveis, incluindo a gasolina C e o etanol hidratado, em função da evolução da frota de veículos leves e a paridade de preços entre os dois combustíveis. Por meio dos estudos realizados, constata-se que a questão do uso de biocombustíveis ganha relevância ao se analisar o interesse crescente mundial pelo uso de biocombustíveis. Além disso, o aumento da frota de veículos bicompostíveis no país mostra a importância do fortalecimento do setor sucroalcooleiro, que poderia ser viabilizado por meio de políticas de longo prazo, que trazem uma visão clara de futuro e incentivam os investimentos no setor sucroalcooleiro.

De acordo com os resultados obtidos, observou-se que a demanda do biocombustível tem a sua variação de acordo com a paridade de preços entre os combustíveis, o que comprova que os proprietários dos veículos dotados com a tecnologia *flexfuel* possuem consciência com relação às vantagens econômicas trazidas pela escolha do combustível adequado, em função da paridade de preços.

Os artigos publicados possibilitaram trazer conclusões para a demanda de etanol hidratado e gasolina C, que mostram que a crise no setor sucroenergético tem origem devido à falta de políticas públicas de longo prazo para o segmento de energia, cujos detalhes, que são os objetivos específicos desta pesquisa, estão descritos a seguir.

Com a simulação proposta no artigo publicado com o título “Análise do Comportamento da Demanda do Etanol e da Gasolina em Função a Evolução da Frota de Veículos Leves no Brasil” foi possível observar que a demanda de combustíveis para veículos leves sofre uma variação significativa com a paridade de preços entre os combustíveis estudados, mostrando que com a paridade de 0,6, há uma previsão de demanda de 29.741,62 milhões de litros, 20.725,50 milhões de litros com a paridade de 0,70 e 15.242,46 milhões de litros com a paridade de 0,80 (para resultados com ano base 2013 da simulação realizada). Tais resultados mostram que a produção do biocombustível se mostra insuficiente para suprir a demanda atual e futura, fato este agravado pelo baixo interesse em investimentos em novas usinas pelo setor privado. Um dos fatores que contribuiu para agravar a crise no setor pode ser atribuído a uma falta de diretriz de longo prazo para o setor de combustíveis pelo Governo Federal, por meio do Ministério de Minas e Energia.

No segundo artigo publicado, com o título “Metodologia Numérica para Determinação do Consumo Volumétrico de Etanol Hidratado em Veículos *Flexfuel*”, foi possível analisar o consumo de combustíveis para veículos leves, considerando-se o período entre os anos de 2006 a 2014. Dentre os resultados observados, chamou a atenção a mudança de comportamento da demanda de combustíveis ocorrida a partir do ano de 2010, quando o consumo de gasolina C pelos proprietários dos veículos *flexfuel* passou de valores próximos a 30% para valores próximos a 70%. Na pesquisa bibliográfica, pode-se constatar que essa variação foi causada pela manutenção artificial dos preços da gasolina C praticada nos postos

de abastecimento, que foi promovida pelo governo brasileiro por meio de sua estatal Petrobrás. A manutenção artificial dos preços do combustível fóssil, que teve a intenção de conter a inflação monetária do período citado, teria contribuído para agravar ainda mais a crise instalada no setor sucroenergético.

No terceiro artigo publicado, com o título “Produção Flexível de Etanol: A Energia do Bagaço da Cana-de-Açúcar pode Auxiliar na Sustentabilidade dos Biocombustíveis”, foi analisada a possibilidade da produção do etanol de milho em usinas, originalmente projetadas para a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, instaladas em localidades que possuem a safra de inverno deste cereal. Tais localidades compreenderam os estados da região Centro-Oeste do Brasil, especificamente o Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás. Neste artigo, buscou-se analisar a viabilidade das operações produtivas nas usinas, propondo-se a utilização do bagaço de cana-de-açúcar excedente e da palha de cana-de-açúcar para o fornecimento de energia para as operações produtivas das usinas. O estudo realizado em dois cenários distintos mostrou que o uso do milho como matéria-prima para a obtenção do etanol poderia trazer um acréscimo de 14,05% a 19,10% na oferta do biocombustível no país, dando, portanto, condições para minimizar a crise no setor. Uma observação interessante a ser acrescentada neste estudo realizado, é que as simulações dos volumes de produção foram realizadas considerando-se o período de entressafra da cana-de-açúcar. Sendo assim, além do aumento dos volumes produzidos, com a utilização do milho na entressafra haveria a redução da ociosidade das usinas produtoras de etanol, que tradicionalmente ficam paradas no período de entressafra. Apesar de constatado um aumento da oferta do biocombustível nesse estudo, pode-se concluir que a adoção do milho como matéria-prima esbarra mais uma vez na falta de políticas claras e de longo prazo para o setor sucroenergético, que poderiam auxiliar os empresários do setor para a ampliação do número de usinas no país.

Buscando analisar o futuro do etanol para fins de abastecimento veicular, é possível de se prever que o mesmo continuará a desempenhar um importante papel mundial, tendo em vista a preocupação dos países com as mudanças climáticas e a busca por alternativas para minimizar a dependência do petróleo. Portanto, tendo como base as considerações do BNDES (2008), é possível esperar por uma intensificação da utilização do biocombustível pelos países, por meio da sua adição

à gasolina, criando dessa forma, oportunidades a curto e médio prazo para que o Brasil cumpra um importante papel como exportador desse produto.

Além dos aspectos que se relacionam com a redução do consumo de combustíveis derivados do petróleo, novas tecnologias de motorização estão surgindo, tais com os veículos híbridos e elétricos. Como mencionado por Castro e Ferreira (2010) e Baran e Legey (2010), os veículos híbridos, que utilizam a combinação de motores à combustão e elétricos podem ser considerados como a tecnologia de transição entre os veículos atuais, dotados com motores a combustão para os futuros veículos com motores puramente elétricos. Dentro desse enfoque, é previsível que o etanol continuará contribuindo de forma significativa para o abastecimento desses veículos nesta fase de transição, que pode levar várias décadas.

O veículo elétrico se mostra como a tecnologia ideal, quando o objetivo é a total eliminação da emissão dos gases veiculares. No entanto, não se pode deixar de analisar, em uma visão mais ampla, as emissões causadas pela geração de energia elétrica, que servirão para abastecer os veículos elétricos. Segundo Castro e Ferreira (2010), em países desenvolvidos, a eletricidade é obtida utilizando 85% de fontes não renováveis tais como o carvão e derivados do petróleo. Diante desse aspecto, não se conseguiria a mitigação dos gases de efeito estufa, tendo em vista que, apesar de não haver emissão de gases pelos veículos elétricos, há que se considerar a emissão causada na fase de geração de energia elétrica. A título de informação, segundo a ANEEL (2016), a matriz energética brasileira é constituída por aproximadamente 70% proveniente de fontes renováveis, como a energia hidroelétrica, solar e eólica.

Portanto, é oportuno comentar que em países cuja geração de energia elétrica é obtida a partir de fontes não renováveis, a substituição dos veículos convencionais pelos veículos elétricos não levaria à redução dos gases de efeito estufa e da dependência do petróleo e sim, à transferência das emissões veiculares para a etapa de geração de energia elétrica. Diante dessas considerações apresentadas, o etanol obtido a partir de fontes vegetais se mostra como aquela que cumpre a redução da dependência do petróleo e a mitigação dos gases de efeito estufa.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O etanol combustível continuará desempenhando um importante papel na matriz energética brasileira gerando empregos nas plantações de cana-de-açúcar e usinas produtoras e auxiliando na redução dos gases de efeito estufa, conforme citado por BNDES (2008) e Coelho *et al.* (2006), dentre outros autores analisados ao longo dessa tese.

Com relação às análises e conclusões obtidas no presente estudo, pode-se constatar que o objetivo principal se direcionou para a demanda e a produção do etanol, tendo a cana-de-açúcar como matéria-prima. A tecnologia utilizada atualmente pelas usinas brasileiras é conhecida como o etanol de primeira geração. É, portanto, utilizada em larga escala apresentando vantagens econômicas sobre o etanol de segunda geração, que comumente é citado na literatura como o etanol lignocelulósico.

Apesar do etanol de segunda geração não ser atualmente produzido em larga escala devido aos custos ainda pouco competitivos, prevê-se que em futuro próximo esta tecnologia venha a ser utilizada, causando, portanto, a competição do uso do bagaço da cana-de-açúcar, que na atualidade é utilizada como fonte de energia térmica nas usinas e geração de energia elétrica. Diante disso e tendo em vista que o bagaço de cana pode ser utilizado como matéria-prima para a produção do etanol lignocelulósico, uma pesquisa recomendável para trabalhos futuros seria o estudo do impacto causado pelo etanol de segunda geração aproveitamento do bagaço de cana. Sendo assim, essa sugestão de pesquisa futura poderia por exemplo, explorar a utilização do bagaço de cana-de-açúcar diante de três aplicações concorrentes entre si, ou seja, a utilização para geração de energia para a fabricação de etanol de cana-de-açúcar, de milho (que foi um dos objetivos do presente estudo) e como matéria-prima para a fabricação do etanol de segunda geração.