Mateus Brito Gama

**Avaliação econômica e energética da distribuição
direta do etanol hidratado no estado de São Paulo**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Área: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes

Orientador: Prof. Dr. João Alexandre Widmer

São Carlos

2014

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – ESSC – USP.

	Gama, Mateus Brito
G184a	Avaliação econômica e energética da distribuição direta do etanol hidratado no estado de São Paulo / Mateus Brito Gama; orientador João Alexandre Widmer. São Carlos, 2014. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Planejamento e Operação de Sistemas de Transporte -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014. 1. Distribuição. 2. Etanol hidratado. 3. Economia de transportes. 4. SIG. 5. Custo. 6. Energia. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **MATEUS BRITO GAMA**.

Título da dissertação: "Avaliação econômica e energética da distribuição direta do etanol hidratado no estado de São Paulo".

Data da defesa: 08/05/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **João Alexandre Widmer (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Marcel Andreotti Musetti**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Profa. Dra. **Camilla Miguel Carrara Lazzarini**
(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes:
Prof. Associado **Antônio Nelson Rodrigues da Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais,
Pedro e Gislene, por tudo que eles
representam na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida.

Aos meus pais, Pedro Carlos Gama da Silva e Gislene Feitosa Brito Gama, pois sem a dedicação, o amor, o incentivo e a confiança que eles me passam, eu não chegaria até aqui.

Ao meu irmão, Filipe Brito Gama, pelo companheirismo, amizade e apoio em todas as etapas de minha vida. Estendo os agradecimentos à Jeanine Freire.

A Paula de Sousa Pereira por compartilhar comigo, todos os dias, seu amor, carinho e alegria, e por me incentivar a sempre alcançar meus objetivos.

A Ana Guimarães, por tudo que ela fez e faz todos os dias por minha família.

Agradeço a toda minha família, tias, tios, primos e avós (*in memoriam*), pelos valores ensinados e os vários momentos de alegria que me proporcionam.

Ao Professor João Alexandre Widmer, pela orientação e aprendizado no decorrer da pesquisa e o suporte durante o período de mestrado.

Aos professores Antônio Néelson Rodrigues da Silva, Marcel Andreotti Musetti e Camilla Miguel Carrara Lazzarini, pelas importantes contribuições para o desenvolvimento e continuidade da pesquisa.

Agradeço a CAPES pela bolsa concedida para realização desse estudo.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Transportes da EESC/USP.

Agradeço ao meu tio e padrinho José Renaldi Brito pelas valiosas contribuições.

A Helena Queiroga e Sidinei Silva.

Pelo apoio na pesquisa, agradeço a Fernando Piva, Antônio Nilson e Andrea Nicola.

Aos grandes amigos que tive a oportunidade de conhecer e conviver durante o período de mestrado. Agradeço a Antônio Carvalho, Heymar, Piva, Artur, Andrea, Elievan, Nil e Cassiano, pela amizade e momentos de descontração. Aos amigos da turma de mestrado de 2012, Edgar, Fernando Velazquez, Glaucia, Diego e Conrado. Aos amigos do Departamento, André, Andressa, Gabriela, Marcela, Alex, Fernando Sorriso...Muito obrigado a todos.

Aos amigos de minha querida cidade, Petrolina: Breno Michel, Jefferson Queiroz, Bruno Luís e Raoni Gonzaga.

RESUMO

GAMA, M. B. **Avaliação econômica e energética da distribuição direta do etanol hidratado no estado de São Paulo**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Na busca por soluções que minimizem os impactos ambientais, causados especialmente por atividades da economia que dependem integralmente de alguma fonte de energia para funcionar, surgem novas alternativas de caráter renovável. No caso do setor de transportes, que se destaca na emissão de gases efeito estufa, o etanol hidratado proveniente da cana de açúcar tem se mostrado como uma opção à gasolina. Entretanto, para torná-lo competitivo no mercado, o etanol deve ser viável em termos econômicos e energéticos em todas as etapas da cadeia de suprimento. Na distribuição do etanol hidratado no mercado nacional, há uma importante restrição na regulamentação do setor, que determina que o etanol produzido nas usinas tenha passar por bases de distribuição antes de chegar aos centros de consumo, impedindo a entrega direta do mesmo. Assim, a presente pesquisa teve como objetivo investigar os ganhos econômicos e energéticos da distribuição direta do etanol hidratado no estado de São Paulo. Para isso foram criados dois cenários de avaliação, o primeiro, representando o sistema atual de distribuição e o segundo representando a entrega direta. Na avaliação dos cenários foi desenvolvido um modelo custo e outro de gasto energético. A partir dos cálculos realizados, obteve-se um custo de R\$ 559,09 mi para o Cenário 1, e de R\$ 295,62 mi para o Cenário 2, o que resultou em um ganho de R\$ 263,46 mi a partir da entrega direta. Apesar do ganho, sabe-se que a viabilização da entrega direta depende da implementação de novas estruturas, o que implicaria em novos custos. Neste caso o ganho real estaria no custo de transportes, que representa cerca de R\$ 137,33 mi. Com relação ao gasto energético, o Cenário 1 resultou em 1,69 bi de MJ, e o Cenário 2 em 1,22 bi de MJ, representando um ganho de 469,4 mi de MJ. Comparando este ganho com outros valores divulgados na literatura para a mesma etapa da cadeia, observa-se que há grande divergência entre os mesmos. Outro aspecto observado foi a pouca representatividade do gasto energético da etapa de distribuição, quando comparada com a etapa agrícola.

Palavras-chave: Distribuição; etanol hidratado; economia de transportes; SIG; custo; energia.

ABSTRACT

GAMA, M. B. **Economic and energetic evaluation of direct distribution of hydrous ethanol in the state of São Paulo**. 2014. Thesis (Master) – Transportation Department, Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2014.

In the search for solutions that minimize environmental impacts, especially caused by economic activities that are completely dependent on any source of energy to operate, new alternatives of renewable character emerge. In the case of the transport sector, which stands in the greenhouse gases emissions, the hydrous ethanol from sugar cane has been shown to be an option to gasoline. However to make it competitive in the market, it should be feasible in economic and energetic terms in all steps of the supply chain. In the scenario of distribution of hydrous ethanol in the domestic market, there is an important legal restriction on the regulation of the sector, which states define that ethanol produced in plants must go through distribution bases before coming to consumption centers , preventing the direct delivery. The present study aimed to investigate the economic and energetic gains of direct distribution of hydrous ethanol in the state of São Paulo. For this evaluation two scenarios were created, them first, representing the current distribution system, and the second, representing the direct delivery. To evaluate both scenarios, a cost and an energy consumption models were developed. From the calculations performed, it was obtained a cost of R\$ 559,09 million to Scenario 1, and R\$ 295,62 million to Scenario 2, which resulted in a gain of R\$ 263,46 million from direct delivery. Despite the gain, it is known that the feasibility of direct delivery depends on the implementation of new structures which would imply on new costs. In this case the real gain would be at the cost of transport, which accounts for approximately R\$ 137,33 million. With respect to energy consumption, the Scenario 1 resulted in 1,69 billion of MJ, and Scenario 2 in 1,22 billion of MJ, which represents a gain of 469.4 million of MJ . Comparing this gain with other values reported in the literature for the same step of the supply chain, it is observed that there is a great difference between them. Another significant aspect is the low representativeness of the energy consumption of the distribution step, when compared with the agricultural step.

Keywords: Distribution; hydrous ethanol; transportation economy; GIS; cost; energy.

LISTA DE ABREVIATURAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CIF	Cost, Insurance and Freight
CIMA	Conselho Interministerial do Açúcar e do Alcool
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CONSECANA	Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de S. Paulo
EIA	Energy Information Administration
EPA	Environmental Protection Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FOB	Free on Board
GJ	Gigajoule
ha	Hectare
MJ	Megajoule
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
NTC	Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística
ORPLANA	Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil
UDOP	União dos Produtores de Bioenergia
UNICA	União da Indústria de Cana de Açúcar

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação dos fluxos real e estudado na cadeia de suprimento do etanol.	8
Figura 2: Fluxograma da produção de etanol e açúcar a partir da cana de açúcar.	13
Figura 3: Distribuição das usinas produtoras de etanol no Brasil.	15
Figura 4: Cadeia de suprimento do etanol no mercado interno.	16
Figura 5: Fluxos de movimentação do etanol no mercado interno.	18
Figura 6: Representação de uma rede.	33
Figura 7: Representação do “Problema de Transporte” balanceado.	36
Figura 8: Demonstrativo da conversão de arquivo (.kml) para (.shp) no <i>software</i> Quantum GIS.	42
Figura 9: Mapa com a representação da rede de transportes elaborada para a pesquisa.	44
Figura 10: Representação dos cenários (a) 1 e (b) 2.	53
Figura 11: Fluxograma para o obtenção do custo e gasto energético.	53
Figura 12: Procedimento para conectar um ponto (camada de ponto) com uma linha (camada de linha).	55
Figura 13: <i>Dataview</i> dos <i>endpoints</i> que representam as usinas, contendo o nome e dados de produção.	56
Figura 14: <i>Dataview</i> dos <i>endpoints</i> que representam as bases, contendo o nome e dados de transbordo.	56
Figura 15: <i>Dataview</i> dos <i>endpoints</i> que representam os municípios, contendo o nome e dados de consumo.	57
Figura 16: Matriz de caminho mínimo gerada pelo TransCAD.	58
Figura 17: Matriz de alocação gerada pelo TransCAD.	59
Figura 18: Tabela de fluxo do produto nos <i>links</i> da rede gerada pelo TransCAD.	60
Figura 19: Mapa do consumo de etanol hidratado no estado de São Paulo.	70
Figura 20: Mapa da produção de etanol hidratado no estado de São Paulo.	70
Figura 21: Mapa com a representação do fluxo do produto nos <i>links</i> entre as usinas e as bases, gerado pelo TransCAD.	71
Figura 22: Mapa com a representação do fluxo do produto nos <i>links</i> entre as usinas e os municípios, gerado pelo TransCAD.	71
Figura 23: Mapa com a representação do fluxo do produto nos <i>links</i> entre as bases e os municípios, gerado pelo TransCAD.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Exemplo de conversão de materiais para unidades de energia.	29
Tabela 2: Gastos energéticos na produção e distribuição do etanol.	30
Tabela 3: Resumo da quantidade de dados de produção obtidos na pesquisa.	46
Tabela 4: Dados de produção de etanol (m ³) hidratado e anidro da safra 2010/2011 e 2011/2012.....	46
Tabela 5: Produção de etanol hidratado (m ³) estimado e real para safra 2011/2012.....	47
Tabela 6: Valores da literatura e valor adotado para C_c e v_c	51
Tabela 7: Resultados obtidos para o Cenário 1.	68
Tabela 8: Resultados obtidos para o Cenário 2.	68
Tabela 9: Comparação dos custos e gastos energéticos dos Cenários 1 e 2.....	73
Tabela 10: Gastos energéticos da etapa de distribuição encontrados na literatura e na pesquisa.	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Evolução da moagem da cana de açúcar e produção de etanol.	14
Gráfico 2: Relação do preço de frete rodoviário para o transporte de etanol com a distância.	50

SUMÁRIO

1. Introdução	5
1.1. Definição do Problema de Pesquisa.....	7
1.2. Objetivo Geral	9
1.2.1. Objetivo Complementar	10
1.3. Justificativa.....	10
1.4. Estrutura da dissertação	11
2. Revisão Bibliográfica	12
2.1. Mercado do etanol no Brasil	12
2.2. Cadeia do etanol no Brasil	15
2.3. Regulamentação do etanol no Brasil	19
2.3.1. Discussão sobre a entrega direta do etanol	23
2.4. Consumo energético na cadeia do etanol.....	26
2.5. Custos na etapa de distribuição da cadeia do etanol.....	31
2.6. Rede de transportes e sua aplicação em Programação Linear (PL) e Sistemas de Informações Geográficas (SIG)	33
2.6.1. Aplicação em PL	34
2.6.2. Aplicação em SIG.....	36
3. Método.....	39
3.1. Utilização do SIG na pesquisa.....	39
3.2. Construção de uma rede de transportes.....	40
3.2.1. Coleta de bases de dados georreferenciadas	40
3.3. Obtenção dos dados de produção, transbordo e consumo.....	44
3.4. Elaboração e escolha dos modelos	48
3.4.1. Modelo de custo.....	49
3.4.2. Modelo de consumo energético.....	51
3.4.3. Modelos matemáticos de minimização do custo e da energia e de alocação da produção	52

3.5.	Geração dos cenários	52
3.5.1.	Cálculo dos custos e gastos energéticos.....	53
4.	Procedimento para cálculo do custo e gasto energético	54
4.1.	Seleção das usinas, bases e municípios na rede	54
4.2.	Aplicação do modelo de caminho mais curto	57
4.3.	Aplicação do modelo de alocação	58
4.4.	Aplicação das planilhas eletrônicas para o cálculo do custo e gasto energético.	61
4.4.1.	Transferência das matrizes do TransCAD para o MS Excel.....	61
4.4.2.	Seleção das distâncias percorridas.....	62
4.4.3.	Aplicação do modelo de custo.....	63
4.4.4.	Aplicação do modelo de gasto energético.....	64
5.	Descrição e análise dos resultados	66
5.1.	Resultados	66
5.1.1.	Cenário 1	67
5.1.1.	Cenário 2	67
5.2.	Fluxos do etanol hidratado no estado de São Paulo	69
5.3.	Avaliação comparativa dos Cenários.....	73
5.4.	Análise comparativa do gasto energético com a literatura.....	75
6.	Conclusões e recomendações.....	77
7.	Referências	79

1. Introdução

Nos últimos anos, muito se tem discutido sobre a situação e as perspectivas energéticas, tanto no âmbito nacional, como internacional. Estas discussões recaem, principalmente, na questão da energia fóssil proveniente, por exemplo, do carvão mineral e do petróleo, devido à vasta aplicabilidade destes componentes minerais. Neste contexto energético, um dos setores que mais se destaca é o de transportes. O principal motivo desta notoriedade é o fato de depender integralmente de algum tipo de energia, normalmente a de origem fóssil, para funcionar.

No ano de 2012, nos Estados Unidos (EUA), 95,4% da energia consumida pelo setor de transportes era proveniente de combustíveis fósseis (EIA, 2013). O setor, neste mesmo país, representou 27,2% da emissão de gases efeito estufa, no ano de 2011 (EPA, 2013). No Brasil, em 2012, 87,5% da energia consumida pelo setor eram de fonte não renovável, e o mesmo representou 48,8% da emissão de gases efeito estufa no país (BRASIL, 2013a).

A relevância do setor de transportes no consumo de combustíveis fósseis tem reflexos diretos nos impactos ambientais. Diante disso, umas das soluções para mitigar estes impactos, é a utilização de fontes renováveis de energia. Especificamente no caso dos combustíveis, destaca-se a energia derivada de biomassa, que produz, por exemplo, o biodiesel e o etanol. Na matriz energética brasileira, segundo BRASIL (2013a), a parcela de energia de fonte renovável já representa 42,4%, com destaque para biomassa proveniente da cana de açúcar, que responde por 15,4% da matriz total, tanto na produção de eletricidade (bagaço da cana), como de etanol.

O etanol (ou álcool etílico) é um biocombustível que pode ser obtido através do processamento de várias culturas agrícolas, destacando-se a produção a partir do milho, com maior expressão nos Estados Unidos, e da cana de açúcar, no Brasil (GOLDEMBERG, COELHO e GUARDABASSI, 2008). No caso da cana de açúcar, seu processamento tem como principais produtos o etanol anidro, utilizado em mistura com a gasolina; o etanol hidratado, utilizado puro em veículos automotores; e o açúcar. Além desses são gerados subprodutos, dos quais se destaca a energia elétrica, gerada a partir da queima do bagaço da cana.

Em relação ao etanol, no ano de 2008, em que houve um pico na produção nacional, o Brasil foi responsável por 31,4% da produção mundial, ficando atrás apenas dos EUA, que tem como matéria prima principal o milho (LMC INTERNATIONAL, 2008). A produção desse biocombustível, junto ao processamento da cana, tem mostrado uma evolução constante nas últimas safras, com crescimento médio anual de 7,6% na produção e 6,7% no processamento da cana. Na safra 2011/2012 foram produzidos, aproximadamente, 22,7 bi de litros de etanol, com destaque para o estado de São Paulo, que representou 51% desta produção (UNICA, 2013a).

Atualmente, o etanol brasileiro proveniente da cana de açúcar já é consolidado como uma alternativa à gasolina, principalmente depois da inserção da tecnologia *Flex Fuel*, a partir de 2003, na qual é possível utilizar tanto o etanol hidratado, como o etanol anidro, misturado com a gasolina. Mais que isso, há uma potencialização do uso desta nova alternativa, principalmente pelas questões ambientais, no que se refere à redução da emissão de gases poluentes e a finitude da matéria prima dos combustíveis fósseis (CAMELINI e CASTILLO, 2012).

Contudo, para expandir o consumo de etanol no Brasil e no mundo, em substituição a outros combustíveis fósseis, não basta a justificativa que a fonte é renovável ou que a tecnologia para sua utilização já está dominada. O produto tem que ser viável para produtores e consumidores. Neste aspecto é relevante avaliar tanto a viabilidade econômica, como a energética, dos processos existentes na cadeia do etanol (da produção até a distribuição ao consumidor final), para saber, primeiramente, qual o custo envolvido no processamento do etanol ao longo da cadeia e, depois, quanto se gasta de energia para produzir e transportar o referido combustível.

No que tange à viabilidade energética, estudos vêm sendo realizados no sentido de investigar o gasto energético na cadeia do etanol. Como esse combustível é fonte de energia proveniente de fontes renováveis, há um interesse dos estudiosos em comparar a energia fóssil investida na produção (*inputs*), com aquela produzida (*output*). O objetivo das investigações sobre o gasto energético do etanol é basicamente o mesmo: traduzir em unidades energéticas aquilo que foi consumido no decorrer do processo (COMITRE, 1993). Para isso são utilizados coeficientes de conversão (ou valores caloríficos), expressos em unidades calóricas por unidades de tempo, massa, volume ou área.

Apesar dos estudos possuírem um procedimento de contabilização parecido, observa-se grande divergência nos resultados dos gastos energéticos do etanol, em especial, aquele proveniente da cana de açúcar do Brasil. Esta diferença está relacionada a diversos fatores, a começar pelo consumo de insumos e materiais, além dos coeficientes energéticos adotados por cada autor, bem como a contabilização, ou não, da utilização da energia elétrica produzida pelo bagaço da cana na etapa industrial.

Outro ponto observado é o foco dado às atividades agrícola e industrial, no que tange à avaliação energética do etanol. Existem diversos trabalhos na literatura que não consideram a etapa de distribuição dentro deste contexto. Mesmo com pouca representatividade, quando comparado à etapa agrícola, há um gasto de energia no transporte do etanol das usinas até os postos de combustíveis, em especial com a utilização do diesel, que deve ser contabilizada. Além disso, parece não haver consenso entre os autores que consideraram essa etapa, quanto às estimativas calculadas.

Além da questão energética, outra importante análise a ser feita na cadeia do etanol, como destacado anteriormente, se refere à viabilidade econômica das atividades que constituem a mesma. Uma avaliação desta natureza pode ser feita utilizando modelos que representem os custos nos processos desenvolvidos. No caso da distribuição do etanol, por exemplo, pode ser feita uma modelagem baseada nos custos operacionais do transporte ou nos preços de frete. No primeiro, há uma discriminação detalhada dos diversos componentes de custo inseridos na atividade de transporte, como combustível, mão de obra, manutenção, administrativos, estes muitas vezes divididos em custos variáveis e fixos. No segundo, o modelo de custo baseia-se nas tarifas de fretes praticadas no mercado.

Diante do exposto, entende-se que as avaliações, econômica e energética, se mostram pertinentes quando se busca discutir a viabilidade de combustíveis de caráter renovável, como é o caso do etanol.

1.1. Definição do Problema de Pesquisa

Para discutir melhor a questão da viabilidade econômica e energética da atividade de distribuição do etanol, deve-se compreender a cadeia desse produto no mercado interno. Na

cadeia de suprimento do etanol, representada de modo genérico na Figura 1, sabe-se que os fornecedores de matérias prima, usinas, distribuidores e pontos de revenda não têm a mesma localização, e deste modo as atividades logísticas, como transporte e armazenagem, podem ser repetidas várias vezes até este produto chegar ao consumidor.

Figura 1: Representação dos fluxos real e estudado na cadeia de suprimento do etanol.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência de etapas apresentada na figura acima é possível observar que a matéria prima (cana de açúcar) chega até as usinas, onde é produzido o etanol, segue para os centros de distribuição ou bases, para então chegar aos postos revendedores e, posteriormente, ao consumidor final. Este processo, praticado atualmente no mercado interno, e denominado ‘fluxo real’, é feito majoritariamente pelo modo rodoviário, utilizando caminhões tanque com capacidade de 30 mil litros (BNDES e CGEE, 2008), e assim será avaliado na presente pesquisa.

Neste fluxo, está identificada a etapa de distribuição da cadeia, representada pelos atores destacados em azul. Os fluxos desta etapa são fortemente influenciados por legislações (ou resoluções) criadas pela agência reguladora de combustíveis no Brasil, a Agência Nacional do Petróleo (ANP). Com base na resolução N° 43 da ANP, a usina só pode comercializar o etanol, hidratado ou anidro, com o distribuidor, ficando vedada a entrega direta aos postos revendedores. Esta norma tem por finalidade concentrar o controle de qualidade e a arrecadação de tributos em um único elemento, neste caso, os centros de distribuição, o que facilita a ação do órgão regulador.

A questão de concentrar o controle nos distribuidores também é explicada pelo fato desse elemento constituir um número menor de empresas, quando comparado ao número de usinas e postos. No mercado nacional existem 341 usinas produtoras, sendo 159 no estado de São Paulo, 225 bases de distribuição (47 em São Paulo) e 38.148 postos de revenda (BRASIL, 2013b; ANP, 2013; MENEZES, RODRIGUES e VAZQUEZ, 2013).

O grande problema da regulamentação atual, sob os aspectos econômicos e energéticos da cadeia, se refere ao problema do “turismo do álcool” (YOSHISAKI, MUSCAT e BIAZZI, 1996), que afeta, em especial, as regiões produtoras de etanol, que estão próximas das regiões de consumo e, portanto, a movimentação do etanol até um distribuidor, para posteriormente voltar para os locais de consumo poderia configurar um gasto econômico e energético desnecessário. Este possível gasto poderia ser minimizado, por exemplo, se fosse implantado para um ambiente operacional com nota fiscal eletrônica, emitida pelos postos revendedores, associada à entrega do etanol a partir das usinas até os postos de combustíveis.

Os grupos que representam as usinas de etanol entendem que esta intermediação dos distribuidores no escoamento da produção de etanol, gera custos desnecessários de transporte. Segundo esses grupos, como as usinas já produzem, estocam e analisam a qualidade do produto, poderiam também atuar na distribuição do etanol hidratado para as regiões de consumo próximas às unidades produtoras. No caso do etanol anidro, este deve passar necessariamente pelos distribuidores, onde é misturado com a gasolina (LOPES, SILVA e CONEJERO, 2010).

A melhor representação dessa problemática, que envolve a entrega direta do etanol hidratado, representada na Figura 1 como ‘fluxo estudado’, encontra-se no estado de São Paulo, onde há o maior número de centros produtores de etanol do País, localizados próximos às regiões de consumo. Nesse cenário entende-se que a movimentação desnecessária do referido produto no estado encarece o sistema, podendo refletir tanto no aumento do preço de venda do biocombustível, como na energia fóssil consumida. Diante desse quadro, o objeto de estudo da presente pesquisa é a distribuição do etanol hidratado no estado de São Paulo.

1.2. Objetivo Geral

Investigar os ganhos econômicos e energéticos do cenário de distribuição direta do etanol hidratado no estado de São Paulo.

1.2.1. Objetivo Complementar

Investigar os potenciais ganhos energéticos e compará-los com valores divulgados na literatura.

1.3. Justificativa

A justificativa para o desenvolvimento deste trabalho pode ser feita sob os pontos de vista ambiental e econômico.

A discussão sobre os benefícios de fontes de energia renovável já vem sendo feita há bastante tempo. Mesmo assim, a dimensão física que existe no mundo, abastecida por energia fóssil, é imensa, e com novos investimentos, como o caso do Pré-sal (explorado pela PETROBRAS), fica cada vez maior. Como consequência disto é estimado um aumento considerável na temperatura média global, até o final do século, devido à emissão de gases efeito estufa (ABRAMOVAY, 2013).

A atividade de transporte, por ser praticamente dependente dos combustíveis de origem fóssil, acaba por contribuir expressivamente para o aumento desta emissão. Em face deste problema, e entendendo a importância desta atividade na economia do país, torna-se necessária a busca por novas alternativas que possam competir com estes combustíveis, ou mesmo substituí-los, como é caso do etanol.

Contudo, para o aumento da competitividade deste biocombustível deve haver um respaldo baseado na viabilidade econômica e energética de todas as etapas que integram a cadeia deste produto. Como já discutido, uma dessas etapas é a distribuição, que tem como principal atividade o transporte. Este absorve a maior porcentagem dos custos logísticos totais de uma organização, normalmente entre um e dois terços (BALLOU, 2006). Neste sentido, esforços devem ser feitos na tentativa de reduzir ao máximo os custos com esta atividade, não sendo diferente para o caso do etanol, que depende dessas reduções para se tornar mais competitivo frente a outras alternativas de combustível.

Yoshisaki, Muscat e Biazzi (1996) estudaram a questão da distribuição direta do etanol, para um consórcio de usinas do estado de São Paulo, de modo que fosse possível o suprimento dos postos diretamente a partir dessas usinas. Com base em um modelo de distribuição, para avaliar os custos logísticos, os autores concluíram que há economia de custos, quando comparado à política utilizada com o intermédio de bases de distribuição.

Esta questão dos custos logísticos na cadeia do etanol ainda é muito atual, desta maneira vem sendo incluída nos planos do governo federal dentro do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). Baseado neste programa já foi instalado um duto de etanol entre as cidades de Ribeirão Preto (região produtora) e Paulínia (terminal de distribuição), ambas no estado de São Paulo, visando a diminuição do fluxo de caminhões na rodovia, a redução nos custos do transporte e, por consequência, o preço final do produto (BONATO, 2013).

1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma introdução do tema da pesquisa, a definição do problema, o objetivo geral e complementar e a justificativa. O Capítulo 2 reúne os principais conceitos e informações encontrados na literatura, que serviram para contextualizar a pesquisa, bem como fundamentar as discussões dos resultados e conclusões. No Capítulo 3 é descrito o método utilizado na pesquisa, contendo as etapas que foram desenvolvidas. Nessas etapas destacam-se o processo de obtenção das bases de dados georreferenciadas e dos dados complementares; os modelos de custo, gasto energético e de minimização aplicados na pesquisa; por fim, a descrição dos cenários avaliados. O Capítulo 4 descreve o procedimento para o cálculo do custo e gasto energético nos cenários avaliados. No Capítulo 5 é apresentada a descrição e análise dos resultados e no Capítulo 6 as conclusões e as recomendações para futuras pesquisas.

2. Revisão Bibliográfica

O presente capítulo consiste em uma reunião de conceitos e dados encontrados na literatura, sobre o tema em debate, que servem para fundamentar a pesquisa. A revisão realizada neste trabalho inicia abordando o mercado e logística do etanol no Brasil, passando pela regulamentação do setor. Também são discutidas questões relacionadas com o consumo energético e o custo na cadeia do etanol, assim como, sobre rede de transportes e modelos otimização.

2.1. Mercado do etanol no Brasil

O etanol (ou álcool etílico) é um biocombustível que pode ser obtido através do processamento de várias culturas agrícolas, destacando-se a produção a partir do milho, com maior expressão nos Estados Unidos, e da cana de açúcar, no Brasil (GOLDEMBERG, COELHO e GUARDABASSI, 2008). No caso da cana, seu processamento tem como principais produtos o etanol anidro, utilizado em mistura com a gasolina; o etanol hidratado, utilizado puro em veículos automotores; e o açúcar. Além desses são gerados subprodutos, como mostra a figura, no qual se destaca a energia elétrica, gerada a partir da queima do bagaço da cana. Essa energia é utilizada na própria usina e quando há excedente de produção é comercializada. A Figura 2 apresenta um fluxograma da produção dos principais produtos gerados a partir da cana de açúcar.

Por ter como matéria prima os recursos naturais fontes de bioenergia, o etanol é considerado um combustível renovável, com grande potencial para reduzir a dependência dos combustíveis de origem fóssil, como a gasolina. Este potencial está associado a fatores, como maturidade tecnológica, viabilidade econômica da produção e o aspecto ambiental, que se relaciona ao caráter renovável da matéria prima e a mitigação na emissão dos gases efeito estufa. Outro aspecto relevante refere-se a sua utilização nos veículos automotores, já que o etanol pode ser usado puro ou misturado com a gasolina. Desta maneira é possível utilizá-lo

em motores (Ciclo Otto) movidos a álcool, gasolina ou nos *flex fuel*, em operação desde 2003 no Brasil, e que no ano de 2011 já representavam 48% dos veículos leves (BRASIL, 2013a; BNDES e CGEE, 2008; IEA, 2010).

Figura 2: Fluxograma da produção de etanol e açúcar a partir da cana de açúcar.

Fonte: Seabra (2008) *apud* Souza (2010).

Houve um aumento expressivo na produção do etanol no Brasil nos últimos anos, o que impulsionou bastante o setor sucroalcooleiro, fazendo com que no ano de 2010, este representasse 1,56% do PIB nacional (CNI, 2012). Este aumento foi acompanhado pela produção de cana de açúcar, matéria prima deste biocombustível.

No ano de 2008, em que houve um pico na produção nacional, o Brasil foi responsável por 31,4% da produção mundial de etanol, ficando atrás apenas dos EUA, que tem como matéria prima principal o milho (LMC INTERNATIONAL, 2008). A produção de etanol, junto ao processamento da cana de açúcar, tem mostrado uma evolução constante nas últimas safras, com crescimento médio anual de 7,6% na produção e 6,7% no processamento da cana, assim como mostra o Gráfico 1. Na safra 2011/2012 foram produzidos, aproximadamente, 22,7 bi de litros de etanol, com destaque para o estado de São Paulo, responsável por 51% da

produção. Do total produzido, aproximadamente, 91,7% foi destinado ao mercado interno, o que mostra a representatividade da comercialização dentro do Brasil (UNICA, 2013a).

Gráfico 1: Evolução da moagem da cana de açúcar e produção de etanol.

Fonte: UNICA (2013b).

Outro ponto importante destacado no gráfico refere-se à representatividade do estado de São Paulo no cenário apresentado. Este tem uma média de participação anual de 55,4% na produção de etanol do Brasil, e 59,5% na moagem de cana, sendo atualmente o maior produtor de etanol e cana do país. Além disto, também é o maior consumidor do biocombustível, neste caso apenas tratando do hidratado, totalizando 59,2% do consumo do país. O reflexo desta relevância pode ser observado também na semelhança das curvas de produção mostradas no gráfico, para o etanol e a cana de açúcar, comparando o estado de São Paulo e o Brasil.

A Figura 3 também ilustra esta representatividade, mostrando a distribuição de usinas produtoras de etanol no país. Como é possível perceber, há maior concentração na região Centro-Sul, em especial no estado de São Paulo. Atualmente existem 341 usinas produtoras de etanol no país, sendo 300 (87,9%) na região Centro Sul, sendo que 159 (46,7%) estão localizadas em São Paulo (BRASIL, 2013b).

Figura 3: Distribuição das usinas produtoras de etanol no Brasil.
Fonte: Camelini (2011).

Tendo em vista a importância no setor sucroalcooleiro do país, o presente estudo analisará o estado de São Paulo, mais especificamente, as questões relacionadas à distribuição do etanol hidratado, como já foi previamente destacado na descrição do estudo. Para esclarecer este enfoque é relevante discutir a cadeia deste produto e quais os atores que integram a mesma.

2.2. Cadeia do etanol no Brasil

A abordagem sobre a cadeia que foi explorada nesta pesquisa está relacionada com o conceito de Cadeia de Suprimentos. Esta pode ser compreendida como um conjunto de atividades funcionais que se repetem inúmeras vezes ao longo de um canal, de modo que matérias primas são convertidas em produtos acabados, em uma sequência de etapas, de modo a agregar valor para o consumidor (BALLOU, 2006).

Com base nesse conceito, será discutida a cadeia de suprimento do etanol no mercado interno, que está representado na Figura 4. Esta figura mostra o encadeamento dos atores na cadeia, destacando aqueles que serão analisados no presente estudo.

Figura 4: Cadeia de suprimento do etanol no mercado interno.
Fonte: Adaptado de Lopes, Silva e Conejero (2010).

A definição de alguns desses atores está descrita na Resolução da ANP nº 43 (de 22/12/2009), assim como mostra o trecho destacado.

Art. 2º Para os fins desta Resolução, adotam-se as seguintes definições:

I - agente operador de etanol: pessoa jurídica que atua em bolsa de mercadorias e futuros na condição de cliente de etanol;

II - empresa comercializadora de etanol: pessoa jurídica controlada diretamente ou indiretamente por dois ou mais produtores ou cooperativas de produtores de etanol, que se enquadre no art. 116 e no § 2º do art. 243 da Lei nº 6.404, de 15 de dezembro de 1976, e que não poderá conter, em seu objeto social, a produção ou qualquer outra forma de industrialização de etanol;

(...)

V - distribuidor: pessoa jurídica, constituída sob as leis brasileiras, autorizada para o exercício da atividade de distribuição de combustíveis líquidos derivados de petróleo, etanol combustível, biodiesel, mistura óleo diesel/biodiesel especificada ou autorizada pela ANP e outros combustíveis automotivos;

VI - fornecedor de etanol combustível: i) produtor de etanol com unidade fabril instalada no território nacional, ii) cooperativa de produtores de etanol, iii) empresa comercializadora de etanol, iv) agente operador de etanol, ou v) importador de etanol, não podendo, em nenhum dos casos, exercer as atividades de distribuição ou revenda varejista de combustíveis líquidos.

(BRASIL, 2009).

Sobre os atores abordados cabe destacar alguns pontos. A empresa comercializadora de etanol atua como um intermediário nas transações comerciais entre usinas e postos, já que não adquirem o produto, tendo a função de otimizar este processo. O agente operador de etanol, apesar de não destacado na cadeia, atua também como facilitador, aperfeiçoando o processo de comercialização do produto (ANP, 2009). O TRR também atua como intermediário, contudo este adquire o produto, a granel, e o repassa ao varejo. Apesar de estar inserido na cadeia, é vedado ao mesmo comercializar “álcool etílico combustível” (etanol) para fins automotivos (ANP, 2008). Por fim, os grandes consumidores são normalmente empresas de porte elevado que compram a granel.

Outra questão relevante refere-se à relação entre as usinas e as distribuidoras, no que tange ao fluxo financeiro. Nesta relação prevalece a venda tipo FOB (*Free On Board*), em que o frete e o seguro são de responsabilidade do cliente, neste caso as distribuidoras. Estas buscam o produto nas usinas, levam para os centros de armazenamento (também chamados de bases de distribuição), para então encaminhar o produto até os postos. Em menor escala ocorre a venda tipo CIF (*Cost, Insurance and Freight*), em que o fornecedor (usina) é responsável pelo frete e o seguro. Esta modalidade de venda ocorre quando as usinas desejam fazer um aproveitamento logístico, e assim optam por levar o etanol até as bases em caminhões próprios, para que na volta, retornem com este mesmo veículo carregado com diesel. Este combustível é utilizado no abastecimento de sua frota de caminhões e tratores (LOPES, SILVA e CONEJERO, 2010; NEVES e CONEJERO, 2010).

A partir desta cadeia, pode ser feita uma análise mais profunda dos atores citados como foco da pesquisa. Outro tipo de análise de cadeia deve ser feita, com maior destaque para a distribuição do produto e os meios de transporte utilizados. A Figura 5 mostra os fluxos de movimentação do etanol no mercado interno, desde a saída da usina, até a chegada aos postos de revenda, com ênfase nas estruturas físicas de armazenamento pelo qual o produto deve passar. Estas três estruturas são: centro coletor, base de distribuição primária (Base P) e base de distribuição secundária (Base S).

As estruturas apresentadas são utilizadas, de modo geral, para estocar e encaminhar o etanol para os postos revendedores, mas cabe destacar algumas diferenças. Os centros coletores, de propriedade da BR Distribuidora, localizam-se próximos às usinas e têm a função também de interligar as regiões e bases de distribuição. A distinção principal entre as bases primária e secundária se refere à localização, de modo que a primeira fica mais próxima

dos produtores, em especial das refinarias de petróleo, e a segunda dos consumidores, visando atender os mercados mais distantes dos centros de produção (NEVES e CONEJERO, 2010).

Figura 5: Fluxos de movimentação do etanol no mercado interno.

Fonte: Adaptado de Neves e Conejero (2010), Lopes, Silva e Conejero (2010) e Barros e Wanke (2012).

Com relação ao produto transportado é possível observar uma distinção entre o fluxo do etanol anidro e hidratado. Basicamente, esta distinção é feita porque a partir das bases de distribuição o etanol anidro passa a ser comercializado misturado com a gasolina, seguindo um fluxo específico deste último combustível. Assim, em discussões sobre a distribuição do etanol na cadeia, como é o caso desse estudo, deve ser feita a consideração de que se trata apenas do etanol hidratado.

Outro aspecto importante destacado nesta figura refere-se aos tipos de movimentação de material que ocorre em cada fluxo, neste caso, coleta, transferência e entrega. Cada um desses está associado a um ou mais modos de transportes, dispostos na figura. Apesar da variada gama de modos de transporte, 70% do etanol comercializado no mercado interno é movimentado pelo modo rodoviário, utilizando caminhões tanque com capacidade de 30 mil litros, a partir das usinas, passando pela base primária e chegando aos postos revendedores (fluxo 3), o que reforça a importância deste modo para o setor (BNDES e CGEE, 2008).

Pode-se perceber que a movimentação do etanol no Brasil envolve, inevitavelmente, a presença das distribuidoras. Este fato está associado às normas regulatórias estabelecidas para o setor, que por sua vez, serão melhores discutidas no tópico subsequente.

2.3. Regulamentação do etanol no Brasil

Um dos principais marcos regulatórios do etanol no Brasil é a Lei Nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, também conhecida como Lei do Petróleo. Alguns dos objetivos desta lei são dispor sobre a política energética nacional, instituir o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e a Agência Nacional do Petróleo.

No que se refere aos princípios e objetivos da política energética nacional, destacam-se alguns incisos (XII – XVIII) do art. 1º, que tratam especificamente da questão dos biocombustíveis. A saber:

- XII - incrementar, em bases econômicas, sociais e ambientais, a participação dos biocombustíveis na matriz energética nacional;
- XIII - garantir o fornecimento de biocombustíveis em todo o território nacional;
- XIV - incentivar a geração de energia elétrica a partir da biomassa e de subprodutos da produção de biocombustíveis, em razão do seu caráter limpo, renovável e complementar à fonte hidráulica;
- XV - promover a competitividade do País no mercado internacional de biocombustíveis;
- XVI - atrair investimentos em infraestrutura para transporte e estocagem de biocombustíveis;
- XVII - fomentar a pesquisa e o desenvolvimento relacionados à energia renovável;
- XVIII - mitigar as emissões de gases causadores de efeito estufa e de poluentes nos setores de energia e de transportes, inclusive com o uso de biocombustíveis.

Quanto ao CNPE, estão atribuídas no art. 2º as funções deste, que visa, através do estabelecimento de diretrizes gerais, atender aos objetivos da política energética nacional. Estas ações buscam nortear o setor energético no médio e longo prazo, e no caso dos biocombustíveis, busca-se estabelecer metas para balancear a matriz energética nacional com este tipo de energia, assim como, garantir o bom funcionamento da cadeia, sob os mais diversos aspectos, como suprimento, distribuição e tecnológico.

Outro ponto de destaque na lei refere-se ao art. 7º, que institui a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), implantada pelo Decreto nº 2.455, de 14 de janeiro de 1998. Este, que é o mais importante órgão do setor, atua na regulação, contratação

e fiscalização das atividades econômicas (produção e distribuição) relativas à indústria do petróleo, do gás natural e dos biocombustíveis. Entre as diversas atribuições deste órgão, cabe destacar algumas:

- Regular e autorizar as atividades relacionadas à produção, à importação, à exportação, à armazenagem, à estocagem, ao transporte, à transferência, à distribuição, à revenda e à comercialização de biocombustíveis, assim como avaliação de conformidade e certificação de sua qualidade, fiscalizando-as diretamente ou mediante convênios com outros órgãos da União, Estados, Distrito Federal ou Municípios (inciso XVI);
- Especificar a qualidade dos combustíveis, entre eles o etanol (inciso XVIII);
- Registrar os contratos de transporte e de interconexão entre instalações de transporte, inclusive as procedentes do exterior, e os contratos de comercialização, celebrados entre os agentes de mercado (inciso XXI).

No que concerne à produção de etanol, além da ANP, outro órgão regulador e fiscalizador, segundo CAZEIRO (2010), é o Conselho Interministerial do Açúcar e Alcool (CIMA), atuando sob um ponto de vista gerencial e estratégico. Este foi criado pelo Decreto Nº 3.546, de 17 de julho de 2000, com o objetivo de desenvolver políticas relacionadas às atividades do setor sucroalcooleiro. Segundo o texto deste decreto, tais políticas devem:

- Adequar à participação dos produtos da cana-de-açúcar na Matriz Energética Nacional;
- Criar mecanismos econômicos necessários à auto sustentação setorial;
- Buscar o desenvolvimento científico e tecnológico.

Ainda na Lei do Petróleo, há um capítulo (CAPÍTULO IX-A) que trata das atividades econômicas da indústria de biocombustíveis. O único artigo contido no capítulo, art. 68-A, dispõe sobre um ponto importante na regulamentação dos biocombustíveis: qualquer empresa ou conglomerado de empresas (i.e., cooperativas), devidamente autorizadas pela ANP, podem desenvolver atividades econômicas na indústria de biocombustíveis, entre eles o etanol.

Outro documento normativo importante é a Lei Nº 9.847, de 26 de outubro de 1999, que trata da fiscalização das atividades relativas ao abastecimento de combustível no âmbito nacional. Entre outras disposições legais, está descrito no texto que a fiscalização das indústrias de combustíveis e do abastecimento nacional, assim como o adequado funcionamento do Sistema Nacional de Estoques de Combustíveis e do cumprimento do

Plano Anual de Estoques Estratégicos de Combustíveis, será executada pela ANP. Esta questão do estoque foi criada pela Lei nº 8.176, de 8 de fevereiro de 1991, visando garantir o abastecimento de combustíveis no país.

Ainda com relação à Lei Nº 9.847, está descrito que a questão do abastecimento nacional é de utilidade pública e envolve atividades como, produção, importação, processamento, transporte, transferência, armazenagem, estocagem, distribuição, revenda, comercialização e avaliação de conformidade.

No aspecto ambiental, cabe destacar a Lei nº 8.723, de 28 de outubro de 1993, que, entre outras questões, aborda a redução de emissão de poluentes por veículos automotores. No tocante aos biocombustíveis, foi deliberado sobre o percentual de adição de álcool etílico anidro à gasolina (Art. 9º), sendo fixado no valor de 22%, segundo a Lei nº 10.203, de 2001. Este valor pode ser alterado pelo Poder Executivo, sendo delegado a competência para o Ministro de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), com aprovação do CIMA. Atualmente, baseado na Portaria MAPA nº 105 de 28 de fevereiro de 2013, o percentual é de 25%.

Além das leis descritas, a regulamentação dos combustíveis no Brasil, focando no etanol, é baseada em portarias, instruções normativas e resoluções, estabelecidas pela ANP. Existem algumas resoluções importantes, para complementar esta discussão, como a ANP 36/2005 (Revogada ANP 7/2011) e a ANP 05/2006 (Revogada ANP 43/2009).

A resolução ANP Nº 5, de 2006, posteriormente revogada pela ANP Nº 43, de 2009, dispõe sobre os requisitos para cadastramento de fornecedores de etanol, além das condições para comercialização do referido produto e das obrigações dos fornecedores quanto aos envios de dados. Destes serão destacados apenas aspectos da comercialização e do cadastramento. Quanto a este último, cabe salientar que para que o fornecedor inicie a comercialização de etanol, é necessário um prévio cadastramento na ANP. Estes fornecedores, para serem cadastrados, também devem fazer parte do código de cadastramento do MAPA.

Já nas disposições sobre a comercialização, são delimitados os fluxos de venda e compra dos principais agentes da cadeia. Entre outras questões, fica estabelecido que o fornecedor somente poderá comercializar etanol com um distribuidor (autorizado pela ANP) e com mercado externo. Este distribuidor, por sua vez, somente poderá adquirir etanol de outro distribuidor autorizado, respeitando a regulamentação aplicável; de um fornecedor cadastrado

na ANP; ou diretamente do mercado externo. Fica vedada a comercialização entre fornecedores e entre fornecedor e distribuidor, para o etanol que não se enquadre nas especificações da resolução ANP nº36, que será descrita a seguir, ou outra que a substitua.

Em outras palavras, o produtor de etanol pode vender etanol, desde que atenda as especificações do produto, tanto para outros produtores, como para um distribuidor. O distribuidor, por sua vez, pode vender para outro distribuidor, diretamente para o mercado externo ou para um posto revendedor de combustíveis. Esta especificação representa uma importante restrição de fluxo na cadeia de comercialização do etanol para o mercado interno.

Outra resolução importante é a ANP nº36 (revogada pela ANP nº 7, em 2009), já citada anteriormente. Esta dispõe sobre as especificações do etanol anidro combustível e do etanol hidratado combustível, além das obrigações dos agentes da cadeia que comercializam o produto, quanto ao controle de qualidade. No que tange a especificação do produto, são descritos parâmetros de qualidade com relação a características, como cor, acidez, pH e teor alcoólico.

Além das questões destacadas, cabe mencionar outras instituições que auxiliam o processo de comercialização do etanol, atuando também na regulação da cadeia. Estas instituições representam, normalmente, a classe de determinados agentes da cadeia, como os produtores de cana, as usinas, distribuidoras e os postos revendedores. De acordo com CAZEIRO (2010), este tipo de entidade forma-se por meio de associações regionais, como é o caso da ORPLANA, CONSECANA-SP e da UNICA.

A primeira, ORPLANA (Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil), tem por objetivo atender aos interesses dos produtores, auxiliando-os com assessoria técnica, jurídica e na difusão do conhecimento, além de estabelecer o contato com órgãos públicos, privados e sociedade, no âmbito nacional e internacional. Esta instituição conta com associações dos estados de São Paulo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Distrito Federal e Goiás, representando cerca de 18 mil produtores de cana (ORPLANA, 2013).

O CONSECANA-SP (Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo) é uma associação formada por representantes das indústrias de açúcar e álcool e dos produtores de cana, e tem por objetivo, estabelecer um relacionamento adequado entre este elo da cadeia, em especial, no que se refere ao estabelecimento do preço da cana. Esta associação estabeleceu um modelo de pagamento da cana, baseado no teor de sacarose da mesma e outros parâmetros técnicos, que avaliam a qualidade da matéria prima

entregue às indústrias e assim, determinam o preço a ser pago aos produtores (UNICA, 2013c).

Por fim, a UNICA (União da Indústria de Cana-de-Açúcar) tem, basicamente, a finalidade de atender aos interesses dos produtores de açúcar, etanol e bioeletricidade tanto no Brasil, como no mundo, visando o fortalecimento do setor. Esta possui mais de 130 companhias associadas, respondendo por cerca de 50% do etanol produzido no Brasil (UNICA, 2013d). Além de auxiliar as empresas nos mais diversos sentidos e estabelecer uma comunicação com entidades governamentais, a UNICA divulga no meio eletrônico informações sobre o setor, auxiliando no processo de disseminação do conhecimento.

2.3.1. Discussão sobre a entrega direta do etanol

O debate sobre a regulação da cadeia do etanol fundamenta um dos pilares do presente trabalho. A comercialização do etanol no mercado interno, como já demonstrado, passa necessariamente por distribuidores depois que saem das usinas produtoras. Tal fato, que está regulamentado nas normas da ANP, faz com que toda produção se concentre neste agente, que está em menor quantidade (em relação aos produtores e postos). Como consequência, o controle de qualidade e a arrecadação de tributos também se concentram neste agente, devido à maior facilidade de intervenção dos órgãos governamentais competentes.

O grande problema da regulamentação atual, sob os aspectos econômicos e energéticos da cadeia, se refere ao já citado problema do “turismo do álcool”, que afeta, em especial, as regiões produtoras de etanol. Esta movimentação, que por muitas vezes é desnecessária, encarece o sistema, podendo refletir no aumento do preço de venda do combustível e no consumo desnecessário de energia.

Uma solução para este problema é apresentada por Safatle (2011), no capítulo que discute um novo mecanismo de comercialização do etanol. A seguir será feita uma discussão que se baseia nesta obra. O mecanismo refere-se, basicamente, a entrega direta do etanol das usinas produtoras até os postos de revenda, eliminando o agente intermediário, neste caso, o distribuidor. Contudo, a aplicação desta entrega direta gera, a princípio, dois questionamentos

importantes, o primeiro está relacionado com o controle de qualidade do produto, o segundo, refere-se à arrecadação de tributos.

Para justificar a viabilidade desse novo sistema, o autor faz uma comparação com a cadeia do leite. Nesta, onde existe uma produção pulverizada com a presença de muitos pequenos produtores, seria difícil o controle de qualidade, caso não fosse feito pelo próprio agente comercializador, o laticínio, que recolhe apenas o leite que atende as especificações. Os órgãos governamentais competentes fiscalizam este último agente, que recolheu o leite dos produtores, onde é feito um novo controle. A partir dos laticínios, o leite é encaminhado para os consumidores finais. Apesar de existirem casos de adulteração deste produto, a sistemática do controle na comercialização do leite está consolidada, mesmo se tratando de um produto perecível, inserido em uma complexa cadeia.

No que se refere ao novo mecanismo de comercialização do etanol abordado anteriormente, tomando como parâmetro o segmento leiteiro, a obrigação de fiscalizar o produto seria dos postos de revenda, que tem um interesse maior em fornecer um produto de qualidade, já que estão em contato direto com os consumidores finais. Assim, o controle de qualidade do produto poderia ser feito direto na fonte, de modo que se houver alguma irregularidade (como adulteração), este será rejeitado. A fiscalização governamental, por sua vez, atuaria junto aos postos de revenda, de modo a coibir qualquer fraude. Segundo o autor, esta atuação já ocorre nos dias de hoje, mas fica claro que com o novo modelo, a mesma poderia ser mais constante e incisiva.

Como já citado, um dos grandes problemas da nova conformação da cadeia do etanol, seria garantir a qualidade do produto. A regulamentação desta comercialização direta abriria espaço para o surgimento de mais usinas produtoras, principalmente às de menores portes, o que tornaria o controle mais complexo. Porém, para o autor, na situação atual mesmo com diversas normas que impedem a situação discutida, ocorrem vários problemas relacionados à irregularidade do produto e a sonegação de impostos. Tal fato indica que o problema não estaria no estabelecimento de um *link* direto entre usina e posto, mas sim na falta de vontade política em aumentar a fiscalização, especialmente no que tange ao número de fiscais da ANP, que chegam a pouco mais de 140, em todo território nacional.

O outro empecilho citado no novo sistema de comercialização etanol refere-se ao recolhimento dos tributos. No sistema atual, as distribuidoras têm papel central nesta questão, já que atuam como substitutas tributárias dos postos revendedores, no recolhimento do

ICMS¹. Isso torna o sistema de arrecadação bem mais simples, devido à facilidade no controle. Entretanto, mesmo com esta forma simplificada, o sistema não funciona de maneira eficiente, havendo vários problemas de sonegação.

De qualquer modo, a conexão direta entre usina e posto revendedor provocaria alterações significativas no sistema de arrecadação, mas não a dissolução do mesmo. A principal mudança seria que, a partir de então, a arrecadação deveria ser feita ou pelas usinas produtoras, ou pelos postos. No primeiro caso, tais usinas deveriam melhorar ou implementar sistemas de controle, para emissão de notas fiscais na comercialização do produto. No segundo caso, considerado mais viável, os postos, que normalmente já possuem em suas operações o controle de estoque, assim como um sistema para emitir notas fiscais, se adaptariam mais rápido a este novo sistema, devendo, se necessário, melhorar esses mecanismos de controle.

Diante do exposto, fica claro que a modificação no sistema de comercialização do etanol não é algo simples, mas, também, está longe de ser inviável. A possibilidade da venda direta dos produtores para os postos revendedores poderia gerar economia na cadeia, aproximando o mercado consumidor dos produtores, evitando o “turismo do álcool”.

Cabe ressaltar que este novo sistema em debate, não exclui a dinâmica de comercialização praticada atualmente. Na verdade, uma situação factível seria a operação das duas sistemáticas em simultâneo, de modo que fosse feita a escolha pela operação mais viável para os agentes. Isto porque, pela dimensão do Brasil, existem mercados consumidores próximos a regiões produtoras, assim como existem outros bem distantes, e neste último caso, seria impraticável a operação do novo modelo. Com estas duas formas de operação, o controle de estoques nestes postos faria a distinção do combustível que ainda deveria ser tributado (proveniente da compra direta), ou aquele onde já foi incidido o tributo (proveniente da distribuidora).

Neste contexto, pode-se citar o trabalho de Yoshisaki, Muscat e Biazzi (1996) que, como já descrito, avaliou a viabilidade econômica da descentralização da distribuição do etanol, a partir da entrega direta de um grupo de usinas do estado de São Paulo, até os postos de combustíveis que seria servido pelas bases. Esta avaliação foi baseada num modelo feito sob três pontos de vista: governo (sociedade), distribuidor e distribuidor mais produtor. Para

¹ Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação.

os três foram obtidas economias com novos terminais de distribuição próximos às usinas, mesmo considerando o investimento marginal para implementá-los.

Segundo os autores, o resultado mostrou que há vantagem potencial em se transportar parte do etanol hidratado a partir de bases colocadas próximas às usinas. Este estudo, que foi baseado num projeto mais extenso, serviu de base para que o grupo de usinas estudado pressionasse o governo a alterar o sistema de distribuição. Na época do projeto, os distribuidores não poderiam trabalhar apenas com um combustível, o que impossibilitava que as usinas atuassem nesse mercado. Conforme relatado depois de certo tempo, o governo cedeu aos interesses do grupo.

Cabe destacar que esta alteração realizada pelo governo na regulamentação não cria de fato um *link* direto entre usinas e postos, mas sim abre mais uma atividade de negócios para os grupos de usinas, que é a distribuição do etanol. Isso pode ser comprovado analisando o panorama mercadológico atual, em que existem diversos grupos dominando toda a cadeia deste combustível.

De acordo com Lopes, Silva e Conejero (2010) existe um mecanismo legal para entrega direta, através do processo de “venda a ordem”. Neste caso, a distribuidora compra o etanol hidratado na usina, emite uma nota fiscal para esta usina, para que a mesma emita outra nota para os postos revendedores. Segundo os autores este procedimento não é adotado por questões logísticas e estratégicas das grandes distribuidoras, pertencentes aos grupos citados anteriormente.

2.4. Consumo energético na cadeia do etanol

Muito se discute na literatura sobre a viabilidade energética na cadeia dos biocombustíveis, em especial na fase da produção agrícola, onde está a principal matéria prima destes produtos. Como os combustíveis são fontes de energia, estes especialmente de fontes renováveis, há um interesse dos estudiosos em comparar a energia investida na produção (*input*), com aquela produzida (*output*). Os *inputs*, em muitos, são baseados na energia fóssil investida, e os *outputs*, na quantidade de energia renovável gerada. Estes estudos são, normalmente, denominados como balanço energético.

Em muitos casos, este tipo de estudo é acompanhado pela avaliação da emissão de gás efeito estufa (GEE), que complementa a discussão associada ao impacto ambiental. Neste contexto, alguns trabalhos baseiam-se no método da Avaliação do Ciclo de Vida (ou *Life Cycle Assessment – LCA*), que tem por objetivo quantificar estes impactos dentro de um ciclo do produto, que vai desde a extração da matéria prima, passando pela produção e distribuição, podendo chegar até a reciclagem. O método é descrito em detalhes em Guinée (2002). Quanto à aplicação, Luo, Voet e Huppes (2009) e Ometto, Hauschild e Roma (2009), utilizaram o mesmo no contexto do etanol produzido a partir da cana de açúcar no Brasil.

Como citado anteriormente, há abordagens focadas na emissão de GEE e na avaliação energética. O princípio desses estudos é a descrição do consumo energético na etapa de produção da matéria prima e do produto, neste caso o etanol. Uma base de informação encontra-se em Pimentel (1980), que descreve os dados de consumo energético (*inputs e outputs*) de diversas culturas agrícolas, incluindo a energia associada a atividades (e.g. irrigação e transporte) e implementos agrícolas (e.g. fertilizantes) utilizados no seu processo produtivo.

Neste sentido, surgem trabalhos mais específicos sobre a avaliação energética do etanol, sendo o milho e a cana de açúcar, as matérias primas mais estudadas, pela sua importância na produção mundial. No Brasil, o etanol feito a partir cana, segundo Urquiaga, Alves e Boddey (2004), vem sendo estudado desde 1974, antes mesmo da produção de veículos que utilizavam este combustível.

Macedo e Nogueira (1985) desenvolveram um estudo para avaliar o consumo de energia fóssil (proveniente do petróleo), necessário para produzir certa quantidade de etanol, nas empresas cooperadas da Copersucar. Para o cálculo deste balanço energético foram considerados dois cenários, sendo o primeiro baseado nas médias de consumo de energia, insumos e investimentos, e o segundo, baseados nos melhores valores praticados. Na organização dos dados de consumo, estes foram divididos em três níveis:

- Nível 1: Energia associada aos combustíveis consumidos ou energia elétrica adquirida;
- Nível 2: Energia necessária para produção de insumos;
- Nível 3: Energia necessária para produção e manutenção dos equipamentos.

Procedeu-se a contabilização da energia tanto para a fase agrícola, como para a industrial (usina), contemplando e descrevendo, de maneira detalhada, cada componente. No

Cenário 1, baseado nas médias de consumo de energia, insumos e investimentos, foi calculado um *input* de 69.820 kcal/t² e um *output* de 450.000 kcal/t, obtendo um balanço de 6,4. O Cenário 2, referente aos melhores valores praticados, resultou em um *input* de 56.950 kcal/t³ e um *output* de 542.900 kcal/t, com um balanço de 9,5. Tomando como exemplo o primeiro resultado, isto significa que para cada 1 unidade de energia fóssil investida (neste caso expressa em kcal), são produzidas 6,4 unidades de energia total ou 5,4 de energia renovável.

Macedo, Leal e Silva (2004) realizaram uma atualização dos dados, gerando um novo balanço de 8,3 e 10,2, respectivamente. Macedo, Seabra e Silva (2008) fizeram uma nova avaliação voltada para a região centro sul do país, analisando dois cenários: o primeiro, referente a safra 2006/2006, e o segundo, baseado em uma previsão para 2020. Neste estudo, foi dado destaque à produção de energia elétrica, feita com uso do bagaço da cana, mostrando que há um excedente de energia do montante gerado. Apesar deste destaque, Macedo, Leal e Silva (2004), já haviam considerado este excedente. Diante do exposto, obteve-se um balanço de 9,3 e 11,6, respectivamente.

Boddey et al. (2008) e Soares et al. (2009) também estudaram o balanço energético do etanol nas condições brasileiras. Os dados de entrada foram separados em categorias: as operações agrícolas, transporte da cana até a usina e dos insumos (proveniente dos fornecedores), e as operações da usina. O primeiro trabalho encontrou um *input* de 14.859,7 MJ/ha/ano, e um *output* de 134.759,4 MJ/ha/ano, resultando em um balanço de 9,07. O segundo calculou 14.940,8 MJ/ha/ano de *input*, e 139.639,5 MJ/ha/ano de *output*, com um balanço de 9,35.

Oliveira et al. (2005) mudaram o enfoque apresentado anteriormente, e compararam as condições do etanol produzido a partir do milho (EUA), e aquele a partir da cana (Brasil). Os autores descrevem de modo sintético os insumos utilizados no processo produtivo das duas culturas, assim como apresentam valores globais para a energia gasta no setor industrial (usina) e na distribuição dos produtos. Os balanços energéticos do etanol encontrado a partir do milho e da cana foram respectivamente de 1,09 (*input* = 65,02 GJ e *output* = 71.44 GJ) e 3,67 (*input* = 42,43 GJ e *output* = 155,57 GJ).

Pimentel e Patzek (2008), diferentemente do trabalho anterior, compararam os gastos energéticos da produção de etanol a partir da cana dos EUA (no estado de Louisiana) e do Brasil. Os dados de consumo foram descritos para produção de 1000 l de etanol, basicamente,

² Cenário 1: Produtividade de etanol de 73 l/ton.

³ Cenário 1: Produtividade de etanol de 83 l/ton.

para a produção agrícola e para etapa industrial, sendo que esta última incluía também a distribuição do produto. O resultado do balanço energético para a cana dos EUA foi 1,12 (*input* = 4578 kcal GJ e *output* = 5130 GJ), e para cana do Brasil foi 1,61 (*input* = 3177 kcal GJ e *output* = 5130 GJ). Este trabalho ainda conduz outras análises, as quais enfatizam que o etanol proveniente destas biomassas não é um potencial substituto dos combustíveis fósseis, mesmo com um balanço energético positivo, já que existem fatores ambientais e econômicos negativos que o inviabilizam. Esta discussão também pode ser encontrada em Pimentel (2003).

Em um trabalho mais recente, Tudera (2013), avaliou o balanço energético e a emissão de CO₂, nas etapas agrícola, industrial e de distribuição, para produção de etanol em cinco usinas do estado do Mato Grosso do Sul (MS). Utilizando alguns dados (fatores de conversão) de trabalhos citados anteriormente⁴, o autor calculou um *input* médio de 19,8 GJ/ha, e um *output* de 134,4 GJ/ha, o que gerou um balanço médio de 6,8 (sem considerar a produção de energia elétrica), mostrando as vantagens da produção de etanol no estado.

Diante dos trabalhos apresentados, cabe destacar alguns pontos. O primeiro se refere a uma semelhança quanto à forma de como é conduzida a contabilização energética. Neste tipo de avaliação, segundo Comitê (1993), o objetivo é traduzir em unidades energéticas aquilo que foi consumido no decorrer do processo. Para isto, são utilizados coeficientes de conversão, expressos em unidades calóricas por unidades de tempo, massa, volume ou área. Através da multiplicação destes dois fatores, é possível converter instrumentos e materiais diferentes (e.g. máquinas, combustíveis, trabalho humano e insumos) para a mesma unidade calórica. A Tabela 1 exemplifica esta conversão:

Tabela 1: Exemplo de conversão de materiais para unidades de energia.

Materiais	Quantidade	(un.)	Coefficiente energético	(un.)	Valor energético (MJ)
Inseticida	1	kg	300	MJ/kg	300
Trabalho	60	h	8	MJ/h	480
Combustível	20	L	20	MJ/l	400

FONTE: Elaborada pelo autor.

Outro ponto se refere à grande divergência nos resultados do balanço energético do etanol, em especial, aquele proveniente da cana do Brasil. Na Tabela 2 são apresentados alguns dados de gastos energéticos para três estágios da cadeia do etanol: agrícola (preparo do

⁴ Macedo, Seabra e Silva (2008) e Oliveira et al. (2005).

solo, plantio, corte, carregamento e transporte da cana), industrial (transformação da cana em etanol) e distribuição (transporte do etanol da usina até o posto de combustível).

Tabela 2: Gastos energéticos na produção e distribuição do etanol.

Inputs de energia por estágio (GJ/ha)	Oliveira et al. (2005)	Pimentel e Patzek (2008)	Macedo, Seabra e Silva (2008)	Boddey et al. (2008)	Andreoli, Pimentel e Souza (2012)
Agrícola (A)	35,98	25,36	16,19	12,71	30,22
Industrial	3,63	18,62	1,82	2,61	0,69
Distribuição (D)	2,82	7,62	- ^a	- ^a	3,09
D/A	8%	30%			10%
Total	42,43	51,6	18,01	15,32	34

^a Distribuição não foi considerada no trabalho.

FONTE: Triana (2011) e Andreoli, Pimentel e Souza (2012).

As diferenças encontradas nas pesquisas, que podem ser visualizadas na Tabela 2, estão relacionadas a diversos fatores, a começar pelos dados de consumos energético adotados pelos autores. Estes dados, primeiramente, não são apresentados com a mesma unidade de medida, como aponta Triana (2011), que estabeleceu um comparativo entre os trabalhos de Oliveira et al. (2005), Pimentel e Patzek (2008), Macedo, Seabra e Silva (2008) e Boddey et al. (2008). Sendo assim, são encontrados dados em kcal x 1000, MJ/t, MJ/ha e GJ/ha, o que dificulta a comparação dos resultados.

Além disto, os elementos e materiais descritos na fase agrícola e industrial, bem como as respectivas quantidades e coeficientes energéticos, na maioria dos casos, não são os mesmos, o que resulta em consumos diferentes. Associado a isto, alguns autores (e.g. PIMENTEL e PATZEK, 2008) são céticos quanto aos benefícios do etanol, e desta maneira deixam de contabilizar elementos importantes, como o excedente de energia elétrica, proveniente da queima do bagaço da cana (TRIANA, 2011).

Um aspecto que também foi observado nos trabalhos é o foco dado às atividades agrícola e industrial, no que tange à avaliação energética do etanol. A atividade de distribuição, depois que o produto sai das usinas até a chegada ao consumidor, não é comumente contabilizado nos gastos energéticos. Apesar da pouca representatividade, quando se compara a atividade de distribuição com a atividade agrícola (Tabela 2: D/A), há um gasto de energia que deve ser considerado, principalmente com o uso do diesel nos caminhões que transportam o etanol.

Para aqueles trabalhos que consideram a distribuição, parece não haver consenso entre as estimativas calculadas. Tal fato é motivado principalmente por serem feitas estimativas não compatíveis com a realidade do local em estudo, como por exemplo em Oliveira et al. (2005) e Pimentel e Patzek (2008).

No trabalho de Bovolenta (2007), encontra-se uma abordagem interessante para atividade de distribuição, sendo neste caso para a *commodite* da soja. O autor avaliou o gasto energético no escoamento da produção deste grão a partir de Rio Verde (GO) até o porto de Santos (SP), considerando uma rota pelo modo rodoviário e outra multimodal. Para realizar esta avaliação foram considerados dados de energia classificada como direta, sob a forma de combustível e lubrificantes (fontes fóssil), energia das máquinas elétricas e mão de obra, e indireta, sob a forma de máquinas e equipamentos, e manutenção da via. Nesta contabilização, destaca-se o consumo do combustível (óleo diesel), que representou, em média, 93% do consumo energético total nas duas rotas.

Este trabalho busca analisar a etapa de distribuição sob o enfoque do gasto energético. Outro aspecto avaliado refere-se ao gasto econômico nesta distribuição, que será discutido no próximo tópico.

2.5. Custos na etapa de distribuição da cadeia do etanol

A avaliação econômica de uma atividade pode ser feita por meio da utilização de modelos que representem os custos envolvidos no processo. No caso da distribuição do etanol, em que ocorre o transporte deste produto da usina até o consumidor final, passando pelas distribuidoras (transbordo), a representação dos custos pode ser sintetizada em três componentes: movimentação do produto, transbordo e armazenagem.

A movimentação ou transporte do etanol para o caso em estudo é feita exclusivamente pelo modo rodoviário, como discutido anteriormente. Neste caso, para análise econômica, poderia ser adotado tanto um modelo de custo operacional, como outro baseado no frete (SILVA, 2005).

No modelo de custo operacional há uma discriminação detalhada dos diversos componentes de custo na atividade de transporte, como combustível, mão de obra,

manutenção, administrativo, estes muitas vezes divididos em custos variáveis e fixos (BALLOU, 2006). Pode-se citar como exemplo, o modelo desenvolvido pela Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística (NTC), em que ao fim da aplicação é obtido um custo operacional por quilômetro (R\$/km). Nos trabalhos de Silva (2005), Teixeira (2007) e Gonçalves (2008), são encontradas aplicações do modelo.

O modelo de custo baseado no frete tem como parâmetro as tarifas praticadas no mercado. Para criação deste modelo, as tarifas de transporte devem ser relacionadas com outra variável, para que se possa estabelecer uma regressão entre as mesmas. De acordo com Corrêa Junior (2001), o preço do frete pode ser influenciado por diversas variáveis como distância, custos operacionais, carga de retorno, carga e descarga, sazonalidade da demanda por transporte, pedágios, entre outros. Porém, a maioria dos trabalhos pesquisados pelo autor considera a distância como principal variável determinante nas tarifas.

Martins (2008) estudou a formação de fretes rodoviários em cadeias do agronegócio brasileiro. Neste trabalho a variável distância teve, para diversos modelos de regressão, elevados níveis de explicação da tarifa. Esta influência já havia sido observada por Corrêa Junior (2001), que estudou os determinantes do preço dos fretes rodoviários de soja a granel. Ballou (2006) também entende que a distância tem relação com as estruturas mais comuns de tarifas.

Em consonância com os autores citados, Bowersox, Closs e Cooper (2006) afirmam que a distância é o fator que mais influencia os custos do transporte, já que contribui diretamente nos custos variáveis. Ainda de acordo com o mesmo, a relação entre estas duas variáveis geram dois aspectos importantes: o primeiro é que a curva de custo não começa na origem, pois há a ocorrência de custos fixos independentes da distância; segundo é que curva de custo aumenta a uma taxa decrescente.

Diante que foi apresentado, e com base no cenário da distribuição do etanol, onde há uma predominância da terceirização do serviço de transporte por parte dos produtores (usinas), o presente trabalho irá utilizar o modelo de custo baseado no frete, estabelecendo uma relação com a distância percorrida. No trabalho de Rodrigues (2007) também foi usado este modelo para avaliar o transporte de etanol voltado para exportação.

2.6. Rede de transportes e sua aplicação em Programação Linear (PL) e Sistemas de Informações Geográficas (SIG)

A representação de cadeia de suprimento normalmente é feita através de uma rede, principalmente quando se trata de estudos quantitativos. Como pode ser observado na Figura 6, uma rede é composta por uma série de pontos ou nós, sendo estes conectados por uma série de *links* ou arcos. Estes, por sua vez, estão associados a uma direção de fluxo, indicando os possíveis caminhos (sequência de *links* direcionados) de uma rede. Para cada *link* costuma-se atribuir algum tipo de impedância, que pode ser representado, por exemplo, pelo custo monetário ou dispêndio energético em se percorrer estes conectores (SHEFFI, 1985; SHAPIRO, 2001).

Figura 6: Representação de uma rede.
Fonte: Sheffi (1985).

Embora as redes sejam dispositivos úteis para descrever e discutir as cadeias, fornecendo uma visão ampla do processo, ainda não são suficientes para realização de análises mais aprofundadas. Estas requerem a adição de diversas variáveis que descrevam as atividades, recursos, capacidade e custos que ocorrem realmente nas instalações e nos *links* de transportes. Para realização destas análises são utilizados normalmente sistemas de modelagem matemática, que não apenas representam o fenômeno, mas buscam otimizá-lo, gerando assim modelos de otimização (SHAPIRO, 2001).

2.6.1. Aplicação em PL

A formulação destes modelos pode ser feita utilizando a PL aplicada em redes. Esta é uma técnica aplicada na resolução de problemas em que recursos limitados devem ser alocados, de maneira ótima, a atividades ou decisões diversas. O termo “linear” implicada que todas as funções matemáticas utilizadas nos modelos sejam lineares, enquanto que “programação” tem uma conotação de planejamento (NOVAES, 1978; HILLIER e LIEBERMAN, 2005).

De acordo com Novaes (1978) e Hillier e Lieberman (2005), a PL pode ser formulada com a construção de três componentes: função objetivo, condicionantes (ou restrições), e restrições não negativas. O primeiro representa a função Z das variáveis que se deseja otimizar ($x_1, x_2, \dots, x_n$), podendo estas serem maximizadas (e.g. lucro) ou minimizadas (e.g. benefício negativo). O segundo está associado às limitações ou níveis máximos ($b_1, b_2, \dots, b_m$) que os recursos podem atingir. O terceiro indica que as variáveis de um problema de PL não podem ser negativas. Uma formulação matemática genérica está descrita abaixo:

Função objetivo

$$\text{Maximizar } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n ,$$

Sujeito às restrições,

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

$$\vdots$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

Sendo,

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \dots x_n \geq 0.$$

Em que

c_j, b_i e a_{ij} , são constantes de entrada do modelo e x_n as variáveis de decisão.

Uma aplicação muito comum da PL encontra-se no planejamento e operação de sistemas de transportes. Muitos estudos abordam o “problema do fluxo na rede”, mais especificamente, “o problema do fluxo de mínimo custo” que é o principal modelo utilizado neste contexto. O objetivo central destes modelos é determinar o menor custo no transporte de produtos em uma rede, a fim de satisfazer a demanda de determinados nós, a partir de recursos disponíveis em outros (AHUJA, MAGNANTI e ORLIN, 1993).

Para melhor compreender este modelo, será apresentada a formulação do mesmo, descrita por Hillier e Lieberman (2005). Neste será considerado uma rede com, ao menos, um ponto de fornecimento, e um ponto de demanda.

Função objetivo

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}, \quad (1)$$

Sujeito às restrições,

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ij} = b_i, \text{ para cada nó } i, \quad (2)$$

Sendo,

$$0 \leq x_{ij} \leq u_{ij}, \text{ para cada link } i \rightarrow j, \quad (3)$$

Em que

x_{ij} : (variável de decisão): fluxo através do *link* $i \rightarrow j$,

c_{ij} : custo por unidade de fluxo através *link* $i \rightarrow j$,

u_{ij} : capacidade do *link* $i \rightarrow j$,

b_i : fluxo resultante gerado no nó i , em que:

- se $b_i > 0$, i é um nó de fornecimento;
- se $b_i < 0$, i é um nó de demanda;
- se $b_i = 0$, i é um nó de transferência ou transbordo (*transshipment*).

Cabe destacar, na equação 2, que a primeira somatória se refere ao fluxo total de saída do nó i , enquanto que a segunda representa o fluxo total que chega no nó i . A diferença entre as duas somatória é o fluxo gerado naquele nó.

A partir deste problema, surgem diversas aplicações, como é o caso do “Problema do Transporte”. Este é um problema originalmente formulado por Hitchcock, 1941, e por isso, também é chamado de “O Problema de Transporte de Hitchcock”⁵. Um exemplo clássico desta aplicação é a de distribuição de produtos a partir de armazéns ou centros de distribuição (nós de fornecimento), até os consumidores ou zonas de consumo (nós de demanda), assim como pode ser visto na Figura 7 (NOVAES, 1978; AHUJA, MAGNANTI e ORLIN, 1993).

A resolução do problema de transporte pode ser simplificada caso seja feita a seguinte consideração: o fluxo total de fornecimento pelo nó i (O_i), para todo i variando de 1 até I , deve ser equivalente ao fluxo total demandando pelo nó j (D_j), para todo j variando de 1 até J , como demonstra a Figura 7. Esta consideração torna o problema balanceado, ou seja, o total fornecido é igual ao total de demanda. O problema é formulado da seguinte maneira (SHEFFI, 1985):

⁵ Sheffi (1985).

Função objetivo

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij} x_{ij}, \quad (5)$$

Sujeito às restrições,

$$\sum_j x_{ij} = O_i, \text{ para todo } i = 1, 2, \dots, I \quad (6)$$

$$\sum_i x_{ij} = D_j, \text{ para todo } j = 1, 2, \dots, J \quad (7)$$

Sendo,

$$x_{ij} \geq 0, \text{ para todo } i, j \quad (8)$$

Em que

$$\sum_i O_i = \sum_j D_j \quad (9)$$

Figura 7: Representação do “Problema de Transporte” balanceado.
Fonte: Adaptado de Sheffi (1985).

Há ainda uma variação dentro do problema de transporte, denominado “Problema do Transbordo”. Este é aplicado quando produtos, que devem ser distribuídos a partir dos pontos de origem até os de destino, têm que passar por um ou mais pontos intermediários. Estes pontos podem interligar outras fontes e destinos, bem como outros transbordos, sendo representados na rede como nós de transferência (HILLIER E LIEBERMAN, 2005).

2.6.2. Aplicação em SIG

Para resolver os problemas de programação linear apresentados são normalmente utilizadas ferramentas computacionais (*softwares*) que auxiliam no processo de obtenção de soluções otimizadas. Como se trata de uma aplicação específica de fluxo em rede voltado ao

âmbito dos transportes, é importante a utilização de um *software* que permita a modelagem do problema com uma interface de fácil manipulação, e também adequada apresentação dos resultados, para facilitar o processo de análise.

O pacote TransCAD apresenta-se como uma ferramenta robusta e de vasta aplicabilidade, principalmente no contexto abordado nesta pesquisa. Este é um sistema de gestão e análise de dados voltados ao transporte, que integra um SIG, com um conjunto de recursos relacionados ao mapeamento digital, gerenciamento de bases de dados geográficas e apresentações gráficas, com ferramentas avançadas aplicadas ao transporte, pesquisa operacional e modelos estatísticos (CALIPER, 2006a).

Um SIG é um sistema de gerenciamento de banco de dados, que visa converter dados geográficos em informações úteis, a partir da entrada, armazenamento, recuperação, análise e produção de informações espaciais (COWEN, 1988). Este pode ser subdividido em três componentes, segundo Teixeira et al. (1992) *apud* Silva (1998): banco de dados, *hardware* e operadores espaciais.

O *hardware* representa os equipamentos que um SIG pode operar, sendo os mais comuns, os computadores ou microcomputadores. Os operadores espaciais, por sua vez, representam um conjunto de programas ou *softwares* que visam gerar as informações desejadas pelos usuários. Segue algumas dessas informações: localização de entidade; listagem de atributos; cálculos de área, perímetro e distância; cálculos estatísticos, entre outros (SILVA, 1998).

O banco de dados pode ser descrito como uma técnica para o gerenciamento de informações computadorizadas, que visa armazenar e recuperar dados de maneira eficiente, para determinado objetivo de aplicação. Na implementação dos dados, estes podem ser organizados em uma estrutura de dados matricial (*raster*) ou vetorial. O primeiro representa o espaço de modo segmentado utilizando uma malha horizontal e vertical, que forma as quadrículas (unidades de informação) ou *pixels*. Já o segundo representa o espaço de uma forma contínua, através de pontos, linhas e áreas (MATIAS, 2001; FRANÇOSO ET AL. *apud* SILVA, 1998).

Um ponto é a representação gráfica mais simples de um objeto, referindo-se a um fenômeno espacial que ocorre em apenas um local do espaço. As linhas representam a conexão de no mínimo dois pontos (chamados no TranCAD de *endpoints*), e são usadas para demonstrar objetos que podem ser definidos em uma dimensão (normalmente comprimento),

por exemplo, uma estrada. Por fim, as áreas são usadas para representar objetos em duas dimensões, sendo delimitadas por no mínimo três linhas ligadas (MIRANDA, 2010). Esses tipos de representações podem ser inseridas em ferramentas de SIG a partir de bases de dados georreferenciadas, gerando nos programas camadas distintas (ponto, linha e área), também chamada de *layers*.

Devido a suas características, a aplicação do SIG é muito vasta, abrangendo diversas áreas do conhecimento, como Geologia, Agricultura, Hidrografia e as mais diversas Engenharias, como Civil, Minas, Transportes, entre outras. No caso específico da aplicação Transporte, onde há o enfoque no planejamento e operações, denomina-se ao sistema de SIG-T, em que se enquadra o TransCAD. Este, por consequência, possui uma gama de ferramentas que permitem a realização de muitos estudos na área de transportes, como planejamento de sistemas de transporte público, planejamento de tráfego, gerência de vias não pavimentadas, geração e previsão de demanda, acessibilidade aos transportes, roteirização de veículos, localização de instalações, entre outros. Uma discussão ampla sobre a utilização e aplicação do SIG-T encontra-se em SILVA (1998).

Uma das aplicações do *software* apresentado se refere ao problema de transportes. A resolução deste problema é baseada no “Problema de Transporte de Hitchcock”, em que se busca encontrar o menor custo no transporte de um produto a partir de múltiplas origens, até múltiplos destinos (CALIPER, 2006b). Uma aplicação deste problema, utilizando o TransCAD, será abordada na presente pesquisa.

3. Método

Neste tópico será descrito o método proposto na presente pesquisa para avaliar os ganhos econômicos e energéticos na distribuição direta do etanol hidratado no estado de São Paulo. Essa avaliação será feita com base na construção de cenários, auxiliado por um SIG. Para facilitar a compreensão do método, serão descritas as etapas a serem desenvolvidas no trabalho:

1. Utilização do SIG na pesquisa;
2. Construção de uma rede de transportes e coleta de bases de dados georreferenciadas;
3. Obtenção dos dados de produção, transbordo e consumo;
4. Elaboração de um modelo de custo e gasto energético por unidade de distância, e escolha do modelo matemático de minimização;
5. Geração dos cenários.

3.1. Utilização do SIG na pesquisa

A pesquisa requer a construção de uma rede de transporte que represente um fenômeno. De modo a auxiliar este processo, utilizou-se o *software* TransCAD[®], um SIG voltado especificamente para problemas de transporte, com um conjunto de recursos relacionados ao mapeamento digital, gerenciamento de bases de dados geográficas e apresentações gráficas e ferramentas avançadas aplicadas ao transporte, pesquisa operacional (PO) e modelos estatísticos (CALIPER, 2006a).

3.2. Construção de uma rede de transportes

O principal objetivo dessa etapa é obter uma base consistente de dados que permita a obtenção das distâncias entre todos os nós da rede de transportes. Um passo fundamental para criação dessa rede refere-se a localização dos agentes que fazem parte da etapa de distribuição do etanol, e dos *links* que os conectam. Desta maneira são necessárias bases de dados georreferenciadas de cada um destes elementos, para que seja possível representar este processo de maneira adequada. Sabendo que os agentes são representados pelas usinas, distribuidoras e municípios, enquanto os *links* são representados pela malha rodoviária do estado de SP, seguem as bases que foram coletadas:

- Malha rodoviária do estado;
- Localização das usinas produtoras de etanol;
- Localização das bases de distribuição;
- Localização dos municípios.

Os municípios representam o consumo dos postos de combustíveis do estado. Esta simplificação foi adotada, primeiro, porque existem muitos postos de revenda, o que se tornaria inviável para localizá-los; segundo porque a distância entre os postos dentro da maioria das áreas urbanas é pequena, quando comparada com as distâncias das usinas até os municípios.

Para compreender como esta rede foi desenvolvida, será feita uma descrição do procedimento de obtenção (ou criação) e elaboração das bases. Em seguida será apresentado um mapa contendo todas as bases citadas, representando a referida rede.

3.2.1. Coleta de bases de dados georreferenciadas

De modo a facilitar a visualização das bases georreferenciadas, bem como auxiliar no processo de elaboração, foi utilizado um arquivo geográfico de área referente ao estado de São Paulo com a delimitação de cada município. Esta foi obtida no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no formato *Esri Shapefile (.shp)*, sendo convertido no

software TransCAD para o formato *Standard Geographic File* (.dbf), que é o formato padrão utilizado neste programa. Segue a descrição de cada base.

Malha Rodoviária do estado

A base da malha rodoviária é um dos mais importantes componentes para construção desta rede. Funciona como *link* entre os pontos de origem e destino que se pretende avaliar. Para realização deste trabalho, a malha rodoviária foi obtida no site dos Ministérios dos Transportes, na seção referente à Base de Dados Georeferenciados do Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT) do ano de 2010 (BRASIL, 2013c). A partir da obtenção do arquivo da referida malha, que foi disponibilizada no formato (.shp), iniciou-se o processo de elaboração.

Inicialmente, utilizou-se o *software* TransCAD para converter o formato do arquivo para (.dbf), transformando-o em um arquivo de linha, para que o mesmo fosse editado. Em seguida, tendo em vista que a base é disponibilizada com a malha do Brasil, foi feita a seleção apenas da malha do estado de São Paulo. Para isso, utilizou-se o arquivo geográfico de área, descrito anteriormente. Segue o procedimento de seleção:

1. Foi feita uma seleção por localização (*Selection > Selection by Location*), em que foi selecionado todo segmento de linha (malha rodoviária) que “toca” a área (estado São Paulo);
2. Depois, utilizou-se o comando “*Combine Selection*” para criar uma segunda seleção com a malha que não toca a referida área;
3. Por fim, essa segunda seleção foi deletada (*Edit > Delete Set*).

Depois de realizar a seleção, foi feita uma avaliação da malha rodoviária criada, para saber se todos os pontos (*endpoints*), localizados nas extremidades de cada segmento de linha, estavam conectados de maneira correta, de modo a tornar possível a criação de uma rede. Este procedimento foi feito utilizando uma ferramenta do TransCAD (*Tolls > Map Editing > Check Line Layer Connectivity*), que detectou 194 problemas de conexão. Após a correção dos mesmos, a elaboração da base contendo a malha rodoviária foi concluída.

Usinas produtoras de etanol

As usinas produtoras de etanol constituem, nos cenários de simulação, as origens do problema de transporte estudado. Para os objetivos desta pesquisa, a base georreferenciada a

ser obtida deveria representar a população completa de usinas no estado de São Paulo, ou seja, deveria ser obtido um arquivo geográfico de pontos com a localização de todas as usinas.

Em um primeiro momento, a fim de obter a referida base, foi feita busca nos sites dos principais órgãos e entidades que representam o setor, como a UNICA, União dos Produtores de Bioenergia (UDOP), MAPA, assim como em grupos de pesquisa, como a ESALQ-LOG, incluindo pesquisadores da área.

Diante da dificuldade de obtenção dos dados, optou-se por construir a base, por meio da localização de cada usina no Google Earth, utilizando a ferramenta de “marcador. No total foram localizadas 159 usinas, baseando-se na lista divulgada pelo ProCana BRASIL, no Anuário da Cana 2012 (ANUÁRIO, 2012a). Este procedimento teve apoio do mapa de usinas e destilarias disponibilizado no site da UDOP⁶, assim como a lista de usinas divulgada pelo BRASIL (2013b).

As usinas localizadas foram exportadas em um arquivo no formato (.kml). Como este tipo de arquivo não é compatível com o *software* utilizado nesta pesquisa, recorreu-se ao Quantum GIS (1.8.0 - Lisboa), para que fosse feito a conversão do formato do arquivo de (.kml) para (.shp), como mostra a Figura 8.

Figura 8: Demonstrativo da conversão de arquivo (.kml) para (.shp) no *software* Quantum GIS.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir disto fez-se nova conversão, de (.shp) para (.dbf), no TransCAD, e em seguida avaliou-se a estrutura do arquivo geográfico de pontos criado. Nesta observou-se que

⁶ www.udop.com.br

alguns dos nomes atribuídos às usinas, na marcação feita no Google Earth, não foi incorporado à base de informação (*Dataview*) do referido arquivo geográfico. Assim, foram feitas as devidas correções, concluindo a elaboração da base de usinas.

Bases de distribuição

As bases de distribuição representam os pontos de transbordos em um dos cenários de simulação. O procedimento para obter uma base georreferenciada com a localização das mesmas foi semelhante àquele adotado para as usinas. Fez-se a localização por meio do Google Earth, baseando-se em ANP (2013), onde o procedimento foi repetido, até obter um arquivo geográfico de pontos (*.dbd*), com 47 bases de distribuição. Também foi observado o mesmo problema com a *Dataview*, com relação aos nomes das bases de distribuição, que foi devidamente corrigido.

Municípios

A base georreferenciada dos municípios do estado de São Paulo, última que compõe a rede de transporte, representa a localização dos pontos de destino nos cenários de simulação da presente pesquisa. Esta foi obtida no banco de dados desenvolvido por Teixeira (2007), disponível em formato (*.dbd*), com a localização dos municípios de todo Brasil. Para adaptá-la aos objetivos desta pesquisa, utilizou-se o mesmo procedimento de seleção descrito na base de rodovias, de modo a se obter os municípios do estado.

Após a seleção, foi feita uma avaliação do arquivo geográfico de pontos, comparando-o com os municípios do arquivo geográfico de área (que contém os limites municipais), e foi constatado que dois municípios não haviam sido localizados. Diante disso, criaram-se dois novos pontos (*Map Editing Toolbox > Add point*), completando os 645 municípios do estado.

O mapa, apresentado na Figura 9, apresenta a rede de transportes elaborada para esta pesquisa. As quatro bases georreferenciadas estão dispostas no arquivo geográfico de área do estado de São Paulo.

Figura 9: Mapa com a representação da rede de transportes elaborada para a pesquisa.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3. Obtenção dos dados de produção, transbordo e consumo

Além da construção da rede de transporte, obtiveram-se dados referentes à produção de etanol, transbordo nas bases de distribuição e consumo de etanol nos municípios do estado de São Paulo. Os dados serão utilizados na alocação da produção de etanol nos municípios, com eventual transbordo nas bases, a qual será descrita posteriormente.

Para tentar modelar um cenário de produção e consumo de etanol no estado, esses dados deveriam se referir a uma mesma escala temporal, para que se aproximassem ao máximo da situação real de distribuição do combustível. Neste trabalho propõe-se a avaliação da produção e do consumo de um ano, utilizando-se a produção de etanol referente à safra 2011/2012 e o consumo do ano de 2012, estimando que o etanol produzido naquele período, foi consumido no referido ano. Para detalhar esta questão, segue uma descrição do processo

de obtenção desses dados, e nos tópicos subsequentes, será detalhada a rotina para executar a alocação.

Produção

Os dados de produção utilizados nesta pesquisa referem-se, exclusivamente, ao etanol do tipo hidratado, produzido por todas as usinas do estado. Para obtê-los, inicialmente, foi utilizado o mesmo procedimento adotado para bases georreferenciadas, por meio de buscas em sites de órgãos e entidades (UNICA, UDOP, MAPA, ANP, COOPERSUCAR⁷, Nova Cana⁸, entre outros) que representam o setor sucroenergético em âmbito nacional e estadual. Nesta busca, vale destacar que as informações de produção contidas no site da UNICA, na seção UNICADATA (UNICA, 2013b), estão disponíveis de modo agregado por região, o que não atende aos anseios desta pesquisa.

Em um segundo momento, foi feito contato com algumas entidades, em especial a UNICA. Esta foi contatada via correio eletrônico e por telefone, visando obter os dados de produção desagregados por usina.

Diante da não obtenção, foi feito buscas em anuários do setor sucroenergéticos, que contém dados referentes à produção. Foram consultados o Anuário da Cana de 2012 (ANUÁRIO, 2012a), referente à safra 2011/2012, e a revista Análise Energia (ANUÁRIO, 2012b), referente à safra 2010/2011. Nas duas referências foram disponibilizadas listas com as usinas cadastradas no MAPA, para os períodos destacados, com as respectivas produções de etanol. Contudo, cabe destacar alguns aspectos: no primeiro anuário, aproximadamente 53% das usinas não declararam os dados de produção ou os declararam de forma consolidada (produção de várias usinas de mesmo grupo) e agregada (produção de etanol anidro e hidratado juntas); no segundo anuário, todos os dados das usinas que declararam a produção estavam dispostos de maneira agregada.

Assim, pelo fato do primeiro representar a produção de uma safra mais recente, assim como, possuir dados desagregados (produção etanol anidro e hidratado separadas), optou-se por adotar o mesmo como a base de dados principal. Para complementação dos dados foram realizados contatos com 33 usinas, dentre aquelas sem dados, por telefone e correio eletrônico, mas só houve resposta de sete delas. Diante disso, adotou-se a alternativa de estimar a produção das usinas que não possuíam dados.

⁷ www.copersucar.com.br

⁸ www.novacana.com

Antes de detalhar a estimativa, cabe destacar alguns pontos da Tabela 3, que apresenta um resumo da quantidade de dados de produção obtidos para esta pesquisa. O número de usinas do estado de São Paulo dispostas no anuário da ProCana BRASIL (apenas aquelas que produziram na referida safra) era de 168⁹, sendo que para 86 usinas os dados estavam disponíveis, enquanto 82 não declararam os mesmos. Das usinas com dados, 70 apresentaram a produção de etanol hidratado; sete forneceram dados depois de realizado o contato; e nove produziram apenas etanol anidro ou açúcar, sendo estas últimas descartadas. Das usinas sem dados, foram feitas duas estimativas que serão apresentadas a seguir.

Tabela 3: Resumo da quantidade de dados de produção obtidos na pesquisa.

Número de usinas no anuário	168		
Com dados	86		
	+	Hidratado	70
	+	Hidratado/Contato	7
	+	Anidro/açúcar	9
Sem dados	82		
	+	Estimativa Análise	69
	+	Estimativa Média	13
Número de usinas utilizadas na pesquisa	159		

Fonte: Elaborada pelo autor.

A primeira estimativa foi baseada nos dados divulgados pelo Anuário (2012b), que contemplava 69 usinas não incorporadas no anuário, com a produção agregada da safra 2010/2011. Para estimar a produção da safra subsequente foi necessário, inicialmente, aplicar uma porcentagem referente à redução (33,03%) que houve de uma safra para outra, como mostra a Tabela 4, e depois outra porcentagem (59,11%) para desagregar a produção, encontrando-se apenas o valor estimado da produção de etanol hidratado da safra 2011/2012.

Tabela 4: Dados de produção de etanol (m³) hidratado e anidro da safra 2010/2011 e 2011/2012.

Produção Etanol (m³)			
Safra	Hidratado	Anidro	% Hidratado
2010/2011	10.236.000,00	5.119.000,00	
2011/2012	6.855.000,00	4.743.000,00	59,11%
Redução	33,03%		

Fonte: Elaborado pelo autor.

A segunda estimativa foi feita para 13 usinas que não possuíam dados em nenhum dos anuários, e foi baseada na média aritmética dos valores de produção de etanol hidratado

⁹ Este número não contabilizou as usinas que não produziram, mas estavam disponíveis no anuário.

estimados anteriormente. Esta média resultou em 16.875,99 m³ de etanol hidratado para cada usina, o que pode ser considerado como baixa produção, quando comparado com os dados não estimados. Contudo, pelo conhecimento adquirido no decorrer da pesquisa, as 13 usinas a que foram atribuídos estes dados, não tinham representação significativa no mercado de etanol do estado de São Paulo, não havendo grande incoerência com o referido valor.

A Tabela 5 que apresenta a produção estimada de etanol hidratado para a safra 2011/2012 no estado, utilizada nesta pesquisa, bem como a quantidade realmente produzida, segundo dados da UNICA (2013b). Como pode ser observado houve uma diferença absoluta de 45.772,21 m³ do real para o estimado, o que pode ser considerada baixa, quando comparada com o montante da produção real (0,67%).

Tabela 5: Produção de etanol hidratado (m³) estimado e real para safra 2011/2012.

Produção Safra 2011/2012 (m³)	
Pesquisa	
Hidratado Anuário	3.754.672,76
Hidratado Estimado	3.054.555,02
Total	6.809.227,79
Dados UNICA	
Hidratado Real	6.855.000,00
Diferença absoluta	45.772,21
(%) Hidratado Real	0.67%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Consumo

Os dados de consumo, que representam a quantidade de etanol hidratado consumido pelos municípios do estado de São Paulo, foram obtidos no site da Secretaria de Energia do governo do estado, através do Anuário Estatístico de Energéticos por Município no Estado de São Paulo do ano de 2012 (SÃO PAULO, 2013). Como discutido anteriormente foi adotado o consumo de 2012, pois este deveria ser consonante à produção da safra 2011/2012. No total são 645 municípios, com consumo de 5.834.459,53 m³ de etanol hidratado.

Como pode ser observado, o valor de produção de etanol supera o valor do consumo. Na presente pesquisa esta diferença será tratada como excedente, ou seja, todo o estado é atendido com produção própria, e o restante é alocado para as demandas de outros estados ou

para o mercado externo. Este aspecto configura uma restrição na aplicação do modelo de alocação, visto que na prática o estado de São Paulo pode ser suprido com etanol de outros estados.

Transbordo

Os dados de transbordo referem-se a todo etanol que antes de chegar aos municípios, passa pelas bases de distribuição, como descrito no Cenário 1. Para obtê-los, foi adotada a Relação e Bases de Distribuição de Combustíveis Líquidos Autorizadas a Operar, divulgadas pela ANP em setembro de 2013 (ANP, 2013), onde está listado um total de 47 bases de distribuição, com as respectivas capacidades de armazenagem.

Como os dados em questão devem conter a quantidade de etanol (m^3) armazenada no período que será simulado, neste caso, o ano de 2012, foi feita a seguinte consideração: todo etanol consumido nos municípios será armazenado (processo de transbordo) nas bases de distribuição, em quantidades proporcionais às respectivas tancagens. Assim foi feita a proporção de cada capacidade, com relação ao total, e depois multiplicado pelo total consumido, sendo obtidos os dados de transbordo.

Para o modelo simulado o valor de transbordo representa a capacidade operacional de uma base de distribuição, o que se aproxima de uma situação real de distribuição de etanol, em que a eventual limitação de tancagem pode provocar o deslocamento não para a base mais próxima, mas para aquela com maior capacidade.

3.4. Elaboração e escolha dos modelos

Outra etapa do trabalho, além da construção da rede, refere-se à elaboração dos modelos que representam os custos e os gastos energéticos na distribuição do etanol. Esses modelos referem-se, basicamente, ao consumo da atividade de transporte, neste caso pelo modo rodoviário, como destacado na literatura. Para caracterizar essa atividade, será definido um único veículo tipo, um caminhão-tanque de cinco eixos, na configuração 2S3 (WIDMER, 2004), com capacidade para transportar $30 m^3$ de combustível (frota homogênea). Além disso, será discutida a escolha do modelo matemático de minimização de custo e da energia.

3.4.1. Modelo de custo

A representação dos custos da distribuição do etanol hidratado no estado de São Paulo foi baseada em um modelo baseado no frete, estabelecendo relação com a distância percorrida. Neste modelo foram considerados dois componentes:

- Transporte do Produto (T_p): refere-se à movimentação do produto.
- Operação de Tancagem (O_t): referente ao transbordo e armazenagem.

Para modelar o primeiro componente foram obtidos valores de tarifas cobradas para o transporte de etanol, tendo como origem e destino cidades do estado de São Paulo. Estes dados de frete rodoviário foram coletados no Sistema de Informações de Fretes (Sifreca), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial (ESALQ-LOG) para o produto álcool (anidro e hidratado). No total, foram coletadas 21 tarifas (R\$/m³), relacionadas com a distância (km) dos trechos correspondentes a cada uma delas. A partir da plotagem dos valores no *software* MS Excel foi aplicada a regressão linear para que o modelo fosse estabelecido. Para melhor ajuste da reta, três pontos foram retirados da coleta inicial, gerando a regressão apresentada no Gráfico 2.

Este modelo de regressão foi adotado, primeiramente, visando à simplificação da relação entre as duas variáveis, já que para uma variação relativamente pequena de distância, há uma tendência de crescimento constante da tarifa. Em segundo lugar, a relação entre tarifa e distância com uma distribuição dos dados crescente é representada por Ballou (2010) por uma regressão linear (“Tarifas Proporcionais”). Estas são empregadas para o transporte rodoviário. Por fim, como parâmetro para avaliar se o modelo consegue explicar de modo satisfatório os valores observados será utilizado o R^2 , que varia de 0 a 1, sendo 1 o indicativo de que a variável dependente consegue ser explicada totalmente pelo modelo adotado.

Desta forma, o modelo referente ao transporte do produto pode ser representado pela equação (10):

$$T_p = (0,17d + 9,26)q \quad (10)$$

Em que

d: distância (km) entre o nó de origem e o nó de destino;

q: quantidade (m³) de etanol alocada para cada origem e destino.

Gráfico 2: Relação do preço de frete rodoviário para o transporte de etanol com a distância.
Fonte: Elaborado pelo autor.

O segundo componente de custo refere-se ao transbordo e a armazenagem. Para o contexto pesquisado, estes podem ser sintetizados em uma única operação que será denominada de ‘operação de tancagem’. Esta representa a descarga do caminhão que transporta etanol nas bases de distribuição (transbordo), utilização da tange (armazenagem) e carga do caminhão (transbordo).

De acordo com as Tarifas de Referência para Serviços de Movimentação de Etanol, divulgada pela TRANSPETRO, o custo para realizar a operação de tancagem em um terminal localizado em Guarulhos, no estado de São Paulo, é de R\$ 21,62 por m³. Este valor é cobrado para períodos de 15 dias de armazenagem, sendo cobrado o mesmo valor caso seja ultrapassado este tempo (TRANSPETRO, 2013).

Diante disso, foi adotado este valor no modelo como uma impedância, ou seja, quando o etanol passar pela base, foi contabilizado um gasto por quantidade de produto a ser descarregado/carregado e armazenado, expresso em R\$/m³.

A equação (11) representa o modelo da operação de tancagem:

$$O_t = (21,62)Q \quad (11)$$

Em que,

Q: quantidade (m³) de etanol processado nas bases de distribuição.

Baseado nos dois componentes de apresentados, a modelagem do Custo Total (C_T) na distribuição será feita como mostra a equação 12:

$$C_T = T_p + O_t \quad (12)$$

3.4.2. Modelo de consumo energético

O modelo de gastos energéticos na distribuição do etanol baseou-se no consumo de combustível fóssil (diesel), utilizado nos caminhões tanque. Este consumo por sua vez, foi obtido pela relação do consumo de combustível deste veículo (l/km), pela distância percorrida (d).

Baseado na quantidade de combustível consumido foi feita a conversão de unidades de volume para unidades energéticas considerando-se o valor calorífico do diesel. A equação (13) representa os gastos energéticos totais da distribuição:

$$E_T = C_c \cdot d \cdot v_c \cdot n \quad (13)$$

Em que,

E_T: gastos energéticos totais (MJ);

C_c: consumo de combustível do caminhão tanque (l/km);

d: distância (km) entre o nó de origem e o nó de destino;

v_c: valor calorífico do diesel (MJ/l);

n: número de viagens entre o nó de origem e o nó de destino.

Os valores adotados para C_c e v_c da equação (13) foram obtidos a partir de dados da literatura, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6: Valores da literatura e valor adotado para C_c e v_c.

Trabalhos	Oliveira et al. (2005)	Pimentel e Patzek (2008)	Macedo, Seabra e Silva (2008)	Boddey et al. (2008)	Andreoli, Pimentel e Souza (2012)	Valor proposto
v _c (MJ/l)	38,3	47,79	47,79	47,73	47,6	47,7
C _c (l/km)	-	-	-	-	0,54	0,54

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.3. Modelos matemáticos de minimização do custo e da energia e de alocação da produção

Para resolver o problema proposto, com os modelos descritos anteriormente, foi necessário encontrar as variáveis independentes estabelecidas para os mesmos, que se resumem em distância e quantidade. No entanto, para que seja encontrado o menor custo e energia na distribuição do etanol foi necessária a minimização das distâncias entre as origens e destinos (ODs). Neste caso, adotou-se o modelo referente ao “problema do fluxo de mínimo custo”, descrito no tópico 2.6.1, em que c_{ij} representa a distância a ser minimizada.

Já para determinação da quantidade partiu-se do pressuposto que a distribuição do etanol pode ser configurada como um problema em que se busca alocar um recurso (etanol produzido), a um custo mínimo (distância), dos nós de oferta até os nós de demanda. Este problema está associado com “O Problema do Transporte”, descrito no mesmo tópico, o qual será aplicado para encontrar a quantidade que será transportada entre cada OD.

Os dois modelos descritos estão inseridos no TransCAD e serão aplicados para auxiliar na obtenção do custo e da energia.

3.5. Geração dos cenários

Com base na rede de transportes e nos modelos apresentados anteriormente foram avaliados o custo e o gasto energético em dois cenários. O Cenário 1 se refere ao cenário atual de distribuição do etanol hidratado no estado de São Paulo, em que o produto sai das usinas, passa pelas bases de distribuição, para então ser levado para aos municípios consumidores (Problema do Transbordo). A Figura 11 (a) ilustra esse cenário, sendo ($U_1...U_n$) as usinas produtoras de etanol, ($B_1...B_n$) as bases de distribuição e ($M_1...M_n$) os municípios de consumo.

O Cenário 2 representa a entrega direta do etanol hidratado no estado, no qual esse será transportado diretamente das usinas para os municípios (Problema de Transportes), como pode ser observado na Figura 10 (b).

Figura 10: Representação dos cenários (a) 1 e (b) 2.
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5.1. Cálculo dos custos e gastos energéticos

Foi feito o cálculo do custo (R\$) e gasto energético (MJ) da distribuição do etanol para os cenários 1 e 2 como mostra o fluxograma apresentado na Figura 11. Esse cálculo foi feito sob uma possível perspectiva da sociedade, onde o objetivo é minimizar os gastos totais da distribuição.

Figura 11: Fluxograma para o obtenção do custo e gasto energético.
Fonte: Elaborada pelo autor.

4. Procedimento para cálculo do custo e gasto energético

Baseado na rede de transportes e nos dados detalhados anteriormente será descrito neste capítulo o procedimento executado para obtenção dos custos e gastos energéticos, que consiste basicamente de quatro etapas:

- Seleção das usinas, bases e municípios na rede;
- Aplicação do modelo do caminho mínimo;
- Aplicação do modelo de alocação;
- Aplicação das planilhas eletrônicas para os cálculos do custo e gasto energético.

Estas etapas foram executadas nos dois cenários de avaliação desta pesquisa. Para o Cenário 1, devido às ferramentas disponíveis no TransCAD, os procedimentos a serem descritos foram aplicados duas vezes; primeiro, entre as usinas (origens) e as bases de distribuição (destinos), e segundo, das bases (origens) até os municípios (destinos). Para o Cenário 2, que avalia a entrega direta do etanol, o procedimento foi aplicado uma vez, entre as usinas (origens) e os municípios (destinos).

4.1. Seleção das usinas, bases e municípios na rede

Para criação de uma rede no *software* TransCAD faz-se necessário que todos os arquivos geográficos estejam na mesma camada (*layer*). Em outras palavras, entendendo uma rede como a junção de nós e *links*, seria necessário unir as bases de dados georreferenciados de pontos das usinas, bases e municípios, com a base de linha de rodovias, em uma mesma camada. Para isso, utilizou-se a ferramenta *Connect* (*Tolls > Map Editing > Connect*), que ‘quebra’ o segmento de reta e cria um novo segmento, perpendicular ao primeiro, e por consequência, mais dois *endpoints*. A Figura 12 ilustra um exemplo deste procedimento. Como é possível perceber, um desses *endpoints* representa um ponto do arquivo geográfico de pontos.

Figura 12: Procedimento para conectar um ponto (camada de ponto) com uma linha (camada de linha).
Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir do procedimento mostrado na Figura 13, foi feita a união das bases utilizadas neste trabalho, sendo possível, criar a rede no TransCAD (*Procedures > Networks/Paths > Create*). Em seguida, foi necessário selecionar os *endpoints* que representavam os pontos das usinas, bases e municípios na camada unificada (rodovias). Portanto, utilizou-se a seleção por localização (*Selection > Selection by Location*), já que os referidos pontos e os *endpoints* estavam na mesma posição ou muito próximos entre si, contudo em camadas distintas.

Depois desta seleção foram adicionadas, primeiramente, três colunas do tipo ‘caractere’ na *dataview*¹⁰ dos *endpoints* (*Edit > Modify Table*), para atribuir os nomes (importados das bases de dados dos pontos) das usinas, bases e municípios, e depois, mais três colunas do tipo ‘real’, para informar os dados de produção, transbordo e consumo dos respectivos *endpoints* selecionados.

Para se certificar de que os procedimentos de seleção, nomenclatura e atribuição de valores foram feitos da maneira correta, desenvolveu-se uma planilha eletrônica que comparou a longitude e latitude (ou localização) das usinas, bases e municípios com a dos *endpoints* selecionados. Foi feito o mesmo para comparar a nomenclatura dos pontos. Depois do ajuste de alguns erros, foi feita a comparação dos valores de produção, transbordo e consumo atribuídos aos *endpoints*, com a base de dados correspondente.

Com a conclusão dos testes, a *dataview* dos *endpoints* foi finalizada. As Figuras 13, 14 e 15 ilustram parte da *dataview* com as informações de produção das usinas, de transbordo

¹⁰ Tabela em que constam os dados da camada de trabalho no TransCAD.

das bases e de consumo dos municípios, respectivamente. Para que os nomes das usinas e bases não fossem divulgados, foram criados nomes fictícios para os mesmos.

ID	Longitude	Latitude	[Cont Usina]	Producao
15067	-52524230	-22349828	USINA 1	88098.69
15069	-52165241	-22323987	USINA 2	134544.65
15070	-51819439	-22513698	USINA 3	71537.09
15072	-51765908	-22124401	USINA 4	44443.69
15073	-51504537	-22534316	USINA 5	60808.83
15075	-52021664	-21971039	USINA 6	40287.13
15077	-51674899	-21588940	USINA 7	38439.79
15079	-51454418	-21589848	USINA 8	19723.62
15081	-51778240	-21278683	USINA 9	50435.81
15083	-51585680	-21087850	USINA 10	44750.05
15085	-51467468	-21167990	USINA 11	120984.00
15087	-51028659	-22151145	USINA 12	33052.59
15089	-50601906	-22746393	USINA 13	44506.45
15091	-50656782	-22575399	USINA 14	52715.42
15093	-50549953	-22785984	USINA 15	72301.83
15095	-50789267	-22474205	USINA 16	45712.65
15097	-50654376	-22251274	USINA 17	64799.95
15099	-50493191	-22465796	USINA 18	20331.07
15100	-50484704	-22165850	USINA 19	14915.59
15102	-51259553	-21866040	USINA 20	21138.22
15104	-51132667	-21510788	USINA 21	44002.36
15106	-50867340	-21914602	USINA 22	16875.99
15108	-50959968	-21567338	USINA 23	31535.00
15110	-51366596	-21339494	USINA 24	74978.70
15112	-51215354	-21196681	USINA 25	21411.44
15114	-51029944	-21489014	USINA 26	15292.00
15116	-50949623	-21327276	USINA 27	51620.76
15118	-50431920	-21582089	USINA 28	74807.94
15120	-50793207	-21459835	USINA 29	23433.77
15122	-50779150	-21229308	USINA 30	22822.62
15124	-50845280	-21051986	USINA 31	33744.00
15126	-50544025	-21076534	USINA 32	39542.48
15128	-50465356	-21058561	USINA 33	33964.73
15130	-51258924	-20770600	USINA 34	30928.97

Figura 13: Dataview dos endpoints que representam as usinas, contendo o nome e dados de produção.

Fonte: Elaborada pelo autor.

ID	Longitude	Latitude	[Cont Base]	Transbordo
15370	-51401272	-22172937	BASE 1	19623.06
15372	-51388268	-22149397	BASE 2	42861.54
15374	-51379375	-22164766	BASE 3	105084.34
15376	-50397050	-22637169	BASE 4	9890.69
15378	-50418103	-21258587	BASE 5	10272.81
15380	-50519580	-21226124	BASE 6	54576.28
15382	-50519423	-21226121	BASE 7	113761.99
15384	-49859414	-22986394	BASE 8	125642.42
15386	-49859169	-22983133	BASE 9	32476.53
15388	-49840237	-22994069	BASE 10	124882.68
15390	-49051782	-22317527	BASE 11	17952.48
15392	-49044685	-22315839	BASE 12	141189.89
15394	-49045468	-22314611	BASE 13	113150.49
15396	-47517116	-23430069	BASE 14	8976.24
15398	-46851827	-23654344	BASE 15	23325.76
15400	-46829002	-23506137	BASE 16	350821.36
15402	-46814915	-23507862	BASE 17	379507.93
15404	-46449350	-23885915	BASE 18	510685.70
15406	-46587848	-23609551	BASE 19	616842.20
15408	-46555404	-23612848	BASE 20	311288.51
15410	-46442886	-23470990	BASE 21	187636.69
15412	-46441426	-23467193	BASE 22	185459.08
15414	-46354896	-23405052	BASE 23	9811.53
15416	-46354562	-23404043	BASE 24	37924.61
15418	-47542814	-22864748	BASE 25	20514.95
15420	-47529915	-22359746	BASE 26	20894.69
15422	-48224650	-21780378	BASE 27	2244.06
15424	-47860242	-21133544	BASE 28	123921.97
15426	-47813416	-21037589	BASE 29	10135.67
15428	-47168945	-22737710	BASE 30	9522.46
15430	-47163836	-22733611	BASE 31	20283.81
15432	-47151836	-22735519	BASE 32	115559.36

Figura 14: Dataview dos endpoints que representam as bases, contendo o nome e dados de transbordo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

ID	Longitude	Latitude	Município	Consumo
15463	-53059167	-22579722	ROSANA	1523.50
15465	-52590278	-22561389	EUCLEDIS DA CUNHA PAULISTA	907.00
15467	-52167500	-22532500	TEODORO SAMPAIO	3680.00
15469	-51963389	-22291944	MIRANTE DO PARANAPANEMA	2091.00
15471	-51962500	-22108056	MARABA PAULISTA	116.00
15473	-51763056	-22456111	SANDOVALINA	418.00
15475	-51660278	-22488056	ESTRELA DO NORTE	242.00
15477	-51524444	-22407222	NARANDIBA	460.00
15479	-51559167	-22302500	TARABAI	1653.00
15481	-51387222	-22295278	ANHUMAS	250.00
15483	-51500000	-22275278	PIRÁPOZINHO	4247.00
15485	-51471944	-22079444	ALVARES MACHADO	2772.00
15487	-51388889	-22125556	PRESIDENTE PRUDENTE	42822.50
15489	-52115556	-21763333	PRESIDENTE EPITÁCIO	5852.20
15491	-51998333	-21831667	CAUA	144.00
15492	-51843889	-21876111	PRESIDENTE VENCESLAU	5694.00
15493	-51651389	-21975833	RIBEIRÃO DOS ÍNDIOS	70.00
15495	-51728611	-21867500	PIQUEROBI	290.00
15497	-51553056	-22006111	PRESIDENTE BERNARDES	4453.00
15499	-51610278	-21838333	SANTO ANASTÁCIO	2312.00
15501	-51412778	-21955278	ALFREDO MARCONDES	894.00
15503	-51483056	-21833056	EMILIANÓPOLIS	245.00
15505	-51392222	-21850556	SANTO EXPEDITO	509.00
15506	-51384167	-21675833	FLORA RICA	323.00
15507	-51433611	-21514722	JUNQUEIROPOLIS	5700.02
15508	-51859722	-21356389	PANORAMA	1596.00
15510	-51838556	-21317778	PAULICEIA	1292.50
15512	-51780278	-21489444	OURO VERDE	938.00
15514	-51755278	-21350833	SANTA MERCEDES	285.00
15516	-51643889	-21334444	NOVA GUATAPORANGA	375.00
15517	-51665833	-21268056	SÃO JOÃO DO PAU D'ALHO	317.00
15519	-51532778	-21482500	DRACENA	10660.00
15521	-51570556	-21381111	TUPI PAULISTA	2679.00
15523	-51568611	-21299444	MONTE CASTELO	325.00

Figura 15: *Dataview dos endpoints que representam os municípios, contendo o nome e dados de consumo.*

Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma vez descrito os procedimentos, foi possível gerar como *output* a rede de transportes, com a identificação de todos os pontos que serão utilizados nas próximas etapas.

4.2. Aplicação do modelo de caminho mais curto

Após a criação da rede, a próxima etapa visou obter a distância entre as origens e os destinos dos cenários de simulação. Para realização deste procedimento foi aplicado o modelo de caminho mínimo disponível no TransCAD, com uso da ferramenta *MultiplePath* (*Procedures > Networks/Paths > Multiple Paths*). Essa ferramenta cria uma matriz com a distância mais curta entre múltiplas origens e destinos, estabelecidos por meio de uma seleção.

Para o Cenário 1, foi utilizada esta ferramenta para encontrar as distâncias entre as usinas e as bases de distribuição, e depois, das bases até os municípios, gerando duas matrizes. Para o Cenário 2, a mesma ferramenta foi aplicada para encontrar o caminho mais curto entre as usinas e os municípios, gerando também uma matriz.

Para ilustrar este procedimento e não tornar repetitiva a apresentação de imagens, é apresentada na Figura 17 uma parte da matriz de mínimo caminho das usinas até as bases, calculada para o Cenário 1, apenas como exemplo do *output* gerado pelo TransCAD. Na

matriz da Figura 16 é possível observar a distância (quilômetros) entre as múltiplas origens e destinos.

	BASE 1	BASE 2	BASE 3	BASE 4	BASE 5	BASE 6	BASE 7	BASE 8	BASE 9	BASE 10	BASE 11	BASE 12	BASE 13	BASE 14	BASE 15	BASE 16
USINA 1	145.90	148.71	150.37	273.17	317.45	323.68	323.66	339.84	339.37	341.92	424.88	425.85	425.88	597.57	717.73	665.51
USINA 2	108.37	111.18	112.84	235.64	279.92	286.15	286.13	302.31	301.84	304.38	387.34	388.32	388.35	560.03	680.20	627.98
USINA 3	63.95	66.76	68.42	191.22	235.50	241.73	241.71	257.89	257.42	259.97	342.93	343.90	343.93	515.62	635.78	583.56
USINA 4	54.95	53.33	54.99	177.79	222.07	228.30	228.28	244.46	243.99	246.53	329.49	330.47	330.50	502.18	622.35	570.13
USINA 5	55.09	57.90	59.56	182.36	226.64	232.87	232.85	249.03	248.56	251.11	334.07	335.04	335.07	506.76	626.92	574.70
USINA 6	82.88	81.25	82.91	205.71	236.24	242.47	242.45	272.39	271.92	274.46	357.42	358.40	358.42	530.11	650.27	598.05
USINA 7	95.37	93.74	95.40	218.20	192.24	181.98	182.00	204.88	204.41	206.95	325.73	326.70	326.73	542.60	662.76	610.54
USINA 8	85.61	83.98	85.64	208.44	164.00	153.74	153.76	275.12	274.65	277.19	297.48	298.46	298.49	518.23	638.33	586.11
USINA 9	153.06	151.43	153.09	270.37	216.56	206.30	206.31	337.04	336.57	339.12	350.64	351.62	351.65	571.39	691.49	639.27
USINA 10	164.40	162.77	164.44	281.71	153.73	143.47	143.48	348.39	347.92	350.46	341.59	342.57	342.60	562.33	682.44	630.22
USINA 11	147.11	145.48	147.14	264.42	146.51	136.25	136.26	331.10	330.63	333.17	334.37	335.35	335.38	555.11	675.22	623.00
USINA 12	49.48	46.78	45.27	100.79	165.38	171.60	171.58	167.47	167.00	169.54	241.66	242.64	242.67	425.19	545.35	493.13
USINA 13	145.45	142.75	141.25	29.70	241.29	247.52	247.50	96.37	95.90	98.45	198.60	199.58	199.61	354.10	474.26	422.04
USINA 14	101.03	98.33	96.83	38.18	219.16	225.39	225.37	104.86	104.39	106.93	207.09	208.07	208.10	362.58	482.74	430.52
USINA 15	146.77	144.06	142.56	31.01	242.61	248.83	248.81	97.69	97.22	99.76	199.92	200.90	200.93	355.41	475.57	423.36
USINA 16	85.16	82.45	80.95	59.10	203.29	209.51	209.50	125.78	125.31	127.85	223.02	224.00	224.03	383.50	503.66	451.44
USINA 17	87.23	84.53	83.02	59.22	172.23	178.46	178.44	125.89	125.42	127.96	200.09	201.07	201.09	383.61	503.78	451.56
USINA 18	118.14	115.44	113.93	34.54	203.14	209.37	209.35	101.22	100.75	103.29	196.30	197.28	197.31	358.94	479.10	426.88
USINA 19	129.00	126.29	124.79	66.29	214.00	220.23	220.21	132.96	132.49	135.03	204.33	205.31	205.33	390.68	510.85	458.63
USINA 20	70.69	69.06	70.72	185.12	140.64	146.87	146.85	251.80	251.33	253.87	265.39	266.37	266.40	486.14	606.24	554.02
USINA 21	117.72	116.09	117.75	191.33	138.13	127.87	127.88	258.01	257.54	260.08	271.61	272.59	272.61	492.35	612.46	560.24
USINA 22	69.47	66.77	65.26	151.29	106.81	113.04	113.02	217.97	217.50	220.04	231.57	232.55	232.57	452.31	572.42	520.20
USINA 23	128.00	125.30	123.79	179.56	135.08	130.60	130.61	246.23	245.76	248.30	259.83	260.81	260.84	480.57	600.68	548.46
USINA 24	151.89	150.26	151.92	269.20	175.52	165.26	165.27	335.87	335.40	337.95	349.47	350.45	350.48	570.22	690.32	638.10
USINA 25	223.32	220.62	219.11	274.87	95.12	84.86	84.87	341.55	341.08	343.62	282.98	283.96	283.99	503.73	623.83	571.61
USINA 26	144.05	141.35	139.85	195.61	96.21	85.95	85.97	262.28	261.82	264.36	275.88	276.86	276.89	496.63	616.73	564.51
USINA 27	162.07	159.37	157.86	213.62	68.27	58.01	58.02	280.30	279.83	282.37	256.13	257.11	257.14	476.87	596.98	544.76
USINA 28	130.97	128.27	126.76	182.53	44.14	50.37	50.35	247.97	247.50	250.05	189.21	190.19	190.22	409.96	530.06	477.84
USINA 29	156.86	154.16	152.66	208.42	163.94	159.46	159.48	275.09	274.62	277.17	288.69	289.67	289.70	509.44	629.54	577.32
USINA 30	190.65	187.95	186.44	242.21	45.34	35.08	35.09	291.96	291.49	294.03	233.20	234.18	234.21	453.94	574.05	521.83
USINA 31	203.40	200.70	199.20	254.96	75.20	64.94	64.96	321.63	321.16	323.70	263.07	264.04	264.07	483.81	603.91	551.70
USINA 32	194.51	191.81	190.30	246.06	31.69	30.65	30.63	278.31	277.84	280.38	219.55	220.53	220.55	440.29	560.40	508.18

Figura 16: Matriz de caminho mínimo gerada pelo TransCAD.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para testar se esses valores estão próximos do real foram selecionadas distâncias aleatórias de pares OD's, entre elas a maior e menor distância obtida, para serem comparadas com estimativas de distâncias, desses mesmos pares, obtidas a partir do Google Maps (por meio da criação de roteiros) e do Google Earth (em que se considerou a distância retilínea entre pontos). Com esse teste, feito nas três matrizes, observou-se que os valores informados pelo *software* estavam compatíveis com os reais.

Assim, ao fim desta etapa obteve-se, para os Cenários 1 e 2, as distâncias entre todas as origens e destinos a serem avaliadas.

4.3. Aplicação do modelo de alocação

A terceira etapa teve o objetivo de alocar a produção de etanol entre as origens e os destinos avaliados nos cenários, ou seja, através de um modelo baseado no Problema de Transporte embutido no *software* utilizado, sendo definidos para quais destinos serão alocados determinada quantidade do referido produto, a partir das origens. Esta alocação

representada em algumas OD's será feita a distribuição do etanol, o que implicará em custos e gastos energéticos.

Na aplicação do modelo de alocação (*Procedures > Networks/Paths > Routing/Logistics > The Transportation Problem*) utilizou-se o mesmo procedimento da etapa anterior: para o Cenário 1, foi alocado toda produção de etanol das usinas para as bases, e depois, em outra aplicação do modelo, das bases até o município; para o Cenário 2, foi feita a alocação direta entre as usinas e os municípios. Cabe ressaltar que esta aplicação depende fundamentalmente da geração dos caminhos mínimos e da atribuição dos valores de produção, transbordo e consumo aos pontos.

Depois de cada aplicação, o *software* gera como *output* uma matriz que indica, por exemplo, quanto de etanol deve ser transportado de cada usina para cada base, como mostra a Figura 17. Esta ilustra parte da matriz de alocação Usina-Base gerada no cenário 1. Um aspecto a considerar é que cada origem pode atender a mais de um destino, a depender das quantidades de produção, transbordo e consumo.

	BASE 1	BASE 2	BASE 3	BASE 4	BASE 5	BASE 6	BASE 7	BASE 8	BASE 9	BASE 10	BASE 11	BASE 12	BASE 13	BASE 14	BASE 15	BASE 16
USINA 1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 3	...	...	62316.42	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 4	...	1675.77	42767.92	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 5	19623.06	41185.77	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 6	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 9	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 10	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 11	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 12	...	...	...	9890.69	...	...	...	...	...	23161.90	...	...	...	...	...	...
USINA 13	...	...	...	...	...	...	...	...	...	44506.45	...	...	...	...	...	...
USINA 14	...	...	...	...	...	...	...	...	...	22418.86	...	...	8976.24	...	21320.32	...
USINA 15	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	10153.45	...
USINA 16	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 17	...	...	...	...	...	...	...	57009.96	...	7789.99	...	...	...	...	...	...
USINA 18	...	...	...	...	...	...	...	20331.07	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 19	...	...	...	...	...	...	...	...	...	14915.59	...	...	...	...	...	...
USINA 20	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 21	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 22	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	16875.99
USINA 23	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	31535.00	...	...	...	...	...
USINA 24	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 26	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 27	...	...	...	...	31753.66	19867.10	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 28	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 29	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 30	...	...	...	...	22822.62	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 31	...	...	...	...	...	33744.00	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
USINA 32	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Figura 17: Matriz de alocação gerada pelo TransCAD.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como já foi discutido na descrição dos dados, a produção de etanol no estado de São Paulo é superior ao consumo, o que torna a aplicação do Problema de Transportes desbalanceada na alocação Usina-Base (Cenário 1) e Usina-Município (Cenário 2). Em outras palavras, algumas usinas (origens) não terão toda sua produção alocada ou simplesmente não alocarão nada, o que implica, para as considerações do modelo, que aquele montante de etanol será enviado para outro estado ou para exportação.

Mesmo com o desbalanceamento, sabe-se que os valores alocados aos destinos devem corresponder ao transbordo e ao consumo. Diante do exposto, foi feito um teste para avaliar se a alocação feita pelo programa destinou a quantidade certa de etanol para cada destino, a partir de quantidades especificadas de cada origem. Por exemplo, no Cenário 1 (Usina-Base), foi feito um somatório do que deveria ser transportado de cada usina, bem como outro somatório do que foi alocado para cada destino. Estes somatórios foram confrontados com os dados de produção e transbordo, para observar possíveis desvios dos valores.

O teste foi realizado por meio de planilhas eletrônicas, no *software* MS Excel, para os dois cenários de avaliação, em que foi constatado que os dados de alocação estavam de acordo com os dados de entrada do modelo (produção, transbordo e consumo). Para o caso da alocação Usina-Base e Usina-Município foi observado o desbalanceamento já descrito anteriormente.

Retomando aos resultados fornecidos pelo programa, além da matriz apresentada, na aplicação do Problema de Transportes é gerada uma tabela que indica os fluxos de produto que passam por cada *link* (rodovia) da rede. Na Figura 18 é possível observar uma parte da tabela, que possui uma coluna com a identificação (ID) do *link*, o fluxo que passa nos dois sentidos do mesmo (AB_flow e BA_flow) e o fluxo total (Tot_Flow), que foi ordenado de forma decrescente para ilustrar melhor a situação. Esta descrição dos fluxos é uma importante informação que pode indicar determinada sobrecarga de transporte em trechos da rodovia.

ID1	AB_Flow	BA_Flow	Tot_Flow
19967	0.0000	2774038.2944	2774038.2944
18232	0.0000	2774038.2944	2774038.2944
19968	0.0000	2590230.5640	2590230.5640
18149	0.0000	2590230.5640	2590230.5640
18124	0.0000	2590230.5640	2590230.5640
16225	0.0000	2590230.5640	2590230.5640
15186	0.0000	2590230.5640	2590230.5640
18112	0.0000	2533609.5332	2533609.5332
15802	2492432.5625	0.0000	2492432.5625
19553	0.0000	1900584.7715	1900584.7715
18792	0.0000	1900584.7715	1900584.7715
17992	0.0000	1900584.7715	1900584.7715
16432	0.0000	1900584.7715	1900584.7715
18786	0.0000	1888603.9814	1888603.9814
18600	0.0000	1834664.7715	1834664.7715
18782	0.0000	1719052.7920	1719052.7920
18160	1620059.1963	0.0000	1620059.1963
19997	0.0000	1585099.5979	1585099.5979
19999	1582855.5378	0.0000	1582855.5378
16838	1456211.6870	0.0000	1456211.6870
18784	0.0000	1446785.9932	1446785.9932
18099	1326838.8003	0.0000	1326838.8003
18097	1326838.8003	0.0000	1326838.8003
16465	1326838.8003	0.0000	1326838.8003
18790	0.0000	1315175.9912	1315175.9912
18788	0.0000	1201489.4209	1201489.4209
19950	0.0000	1153273.2729	1153273.2729
18150	0.0000	1153273.2729	1153273.2729
18134	0.0000	1153273.2729	1153273.2729
18780	0.0000	1069339.2302	1069339.2302
18736	0.0000	1033267.7100	1033267.7100

Figura 18: Tabela de fluxo do produto nos *links* da rede gerada pelo TransCAD.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para facilitar a visualização dos fluxos, o programa cria no mapa uma representação da intensidade do fluxo em cada *link* (*Trans Flows*). Os mapas com estas representações estão expostos nos resultados desta pesquisa, já que compõem a análise dos mesmos (Figuras 21, 22 e 23).

Depois de aplicado o modelo de alocação, gerou-se como *output* a quantidade de etanol que deve ser transportada de cada origem para cada destino.

4.4. Aplicação das planilhas eletrônicas para o cálculo do custo e gasto energético.

A partir da matriz de caminho mínimo e da matriz de alocação nas OD's, já é possível calcular o custo e gasto energético, visto que as variáveis de distância e quantidade já foram encontradas com o desenvolvimento das respectivas matrizes. Para realização desses cálculos, optou-se por utilizar planilhas eletrônicas no MS Excel, pela maior facilidade de manipulação dos dados.

O principal objetivo desta etapa é encontrar os valores de custo e gasto energético para os cenários de avaliação. Para isso foram criadas três planilhas eletrônicas para avaliação dos custos (uma para cada aplicação do modelo de alocação), e mais três para avaliar o gasto energético. Nas planilhas foram desenvolvidas as seguintes rotinas:

- Transferência das matrizes do TransCAD para o MS Excel;
- Seleção das distâncias a serem percorridas;
- Aplicação do modelo de custo;
- Aplicação do modelo de gasto energético.

4.4.1. Transferência das matrizes do TransCAD para o MS Excel

As matrizes de caminho mínimo e alocação foram transferidas para o MS Excel, tanto para planilhas de avaliação de custo, como para de gasto energético, já que são utilizadas nas

duas análises. Para ilustrar a situação, seja d_{mn} um valor de mínima distância (km) entre um ponto m de origem e um ponto n de destino, e a_{mn} a quantidade de etanol alocado (m^3) entre m e n , de acordo com as matrizes:

Cenário 1 (Usina-Base) – Planilha de custo e de energia

$$\begin{pmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & \cdots & d_{mn} \end{pmatrix}_{(159 \times 47)} \quad \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}_{(159 \times 47)}$$

Cenário 1 (Base-Município) – Planilha de custo e de energia

$$\begin{pmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & \cdots & d_{mn} \end{pmatrix}_{(47 \times 645)} \quad \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}_{(47 \times 645)}$$

Cenário 2 (Usina-Município) – Planilha de custo e de energia

$$\begin{pmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & \cdots & d_{mn} \end{pmatrix}_{(159 \times 645)} \quad \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}_{(159 \times 645)}$$

4.4.2. Seleção das distâncias percorridas

Como mostrado na Figura 17, a matriz de alocação indica, através das quantidades de etanol alocadas, se as origens e destinos geraram alguma viagem ($a_{mn} \neq 0$), ou não ($a_{mn} = \emptyset$). Para aquelas que geraram viagens, devem-se conhecer as distâncias que são percorridas, para que o custo e o gasto energético sejam encontrados. Desta maneira foi criada mais uma matriz contendo apenas as distâncias percorridas (dp_{mn}). O preenchimento da mesma foi feito da seguinte maneira:

$$dp_{mn} \begin{cases} se \ a_{mn} \neq 0 \Rightarrow dp_{mn} = d_{mn} \\ se \ a_{mn} = \emptyset \Rightarrow dp_{mn} = 0 \end{cases}$$

Em que

a_{mn} : quantidade de etanol alocado entre m e n (m^3);

d_{mn} : distância mínima entre m e n (km);

dp_{mn} : distância mínima efetivamente percorrida entre m e n (km)

Desta maneira a matriz de distância percorrida foi criada para cada planilha desenvolvida. A partir deste procedimento foram aplicados os modelos de custo e energia, que serão descrito de modo separado a seguir.

4.4.3. Aplicação do modelo de custo

Após a obtenção das distâncias percorridas, foi criada outra matriz (c_{mn}) nas três planilhas de custo, com o cálculo do custo do transporte de etanol para as OD's que geraram viagens. Este custo foi encontrado conforme o modelo descrito no tópico 3.4.1 deste trabalho, e destacado abaixo:

$$T_p = (0,17d + 10,54)q \quad (14)$$

Em que

d : distância (km) entre o nó de origem e o nó de destino;

q : quantidade (m^3) de etanol alocada para cada origem e destino.

A partir desse, a referida matriz foi preenchida da seguinte maneira:

$$c_{mn} = (0,17dp_{mn} + 10,54)a_{mn} \quad (15)$$

Em que

c_{mn} : custo de transporte entre m e n (R\$);

a_{mn} : quantidade de etanol alocado entre m e n (m^3);

dp_{mn} : distância mínima efetivamente percorrida entre m e n (km).

Cabe salientar que este representa apenas o custo de transporte. O custo de transbordo (O_t), outro componente do modelo, foi calculado separadamente para os custos do Cenário 1, onde há passagem pelas bases de distribuição, já que não depende das quantidades alocadas (a_{mn}), mas sim da quantidade total transportada (Q), como mostra a equação abaixo:

$$O_t = 21,62 Q \quad (16)$$

Em que

Q: Quantidade total transportada entre m e n .

O custo total (C_T) do cenário 1 foi encontrado utilizando-se o somatório de c_{mn} , para as matrizes da Usina-Base e da Base-Município, acrescido de O_t . Para o cenário 2, o C_T se referiu basicamente à soma de c_{mn} (Usina-Município), visto que não passa pelas bases. Para ilustrar o que foi descrito, segue a representação da matriz de custo e cálculo de C_T em cada planilha.

Cenário 1 (Usina-Base) – Planilha de custo

$$\begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mn} \end{pmatrix}_{(159 \times 47)} \Rightarrow C_{T(U-B)} = \sum_{m=1}^{159} \sum_{n=1}^{47} c_{mn} + O_t$$

Cenário 1 (Base-Município) – Planilha de custo

$$\begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mn} \end{pmatrix}_{(47 \times 645)} \Rightarrow C_{T(B-U)} = \sum_{m=1}^{47} \sum_{n=1}^{645} c_{mn}$$

Assim, o custo final do cenário 1 foi encontrado através de:

$$C_{T(\text{cenário 1})} = C_{T(U-B)} + C_{T(B-U)}$$

Cenário 2 (Usina-Município) – Planilha de custo

$$\begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mn} \end{pmatrix}_{(159 \times 645)} \Rightarrow C_{T(\text{cenário 2})} = \sum_{m=1}^{159} \sum_{n=1}^{645} c_{mn}$$

4.4.4. Aplicação do modelo de gasto energético

O cálculo do gasto energético (E_T), que representa o consumo de energia no transporte de etanol, foi baseado no modelo descrito no tópico 2.1.2, que está destacado abaixo. Para realização do mesmo foram criadas duas novas matrizes em cada uma das três planilhas de gasto de energia.

$$E_T = C_c \cdot d \cdot v_c \cdot n \quad (17)$$

Em que,

E_T : gastos energéticos totais (MJ);

C_c : consumo de combustível do caminhão tanque (l/km);

d : distância (km) entre o nó de origem e o nó de destino;

v_c : valor calorífico do diesel (MJ/l);

n : número de viagens entre o nó de origem e o nó de destino.

A primeira matriz refere-se a variável n , que representa o número de viagens a serem realizadas entre as origens e destinos. Para encontrar os valores da matriz (nv_{mn}), foi feita a relação entre a quantidade de etanol alocada para cada OD, a_{mn} , e a capacidade do veículo tipo adotado nesta pesquisa (30 m³). Como n refere-se a um número inteiro de viagens, para a relação apresentada, aproximaram-se os valores para o inteiro superior mais próximo. Assim, os valores de nv_{mn} foram preenchidos da seguinte maneira:

$$nv_{mn} = \text{inteiro superior} (a_{mn}/30) \quad (18)$$

Depois que os valores de nv_{mn} foram encontrados, gerou-se a segunda matriz referente ao gasto energético (e_{mn}). Esta foi calculada utilizando-se a seguinte equação:

$$e_{mn} = C_c \cdot dp_{mn} \cdot v_c \cdot nv_{mn} \quad (19)$$

Em que,

dp_{mn} : distância mínima efetivamente percorrida entre m e n (km);

nv_{mn} : o número de viagens a serem realizadas entre m e n .

A partir dessa matriz foi possível encontrar o valor de E_T , através do somatório de todos os gastos de energia, e_{mn} , entre as origens e destinos. A matriz de gasto energético criada em cada planilha, assim como o cálculo do consumo total de energia em cada cenário, seguiram a mesma configuração do modelo de custo.

5. Descrição e análise dos resultados

No presente capítulo serão apresentados os resultados encontrados por meio da simulação dos dois cenários de avaliação, no que se refere ao custo e gasto energético, e em seguida serão feitas análises alinhadas com os objetivos estabelecidos para a pesquisa.

5.1. Resultados

A partir da simulação do Cenário 1, que avaliou a entrega do etanol hidratado no estado de São Paulo assim como ocorre na prática, realizando o transbordo em bases de distribuição, e do Cenário 2, que analisou a perspectiva da entrega direta deste combustível, foi possível obter valores de custo (R\$) e gasto energético (MJ) referente à atividade de transporte. Em cada cenário será apresentado uma tabela com os principais resultados que complementam os valores totais de custos e gasto energético. Para melhor compreensão desses resultados, segue um detalhamento dos componentes da referida tabela:

- **PRODUÇÃO ALOCADA NA BASE:** Quantidade de etanol (m^3) que foi alocado nos pontos de destino. O valor deste parâmetro deve sempre ser igual ao valor de consumo (dado de entrada do modelo);
- **DISTÂNCIA MÉDIA PONDERADA:** Somatório da multiplicação entre a matriz de distância percorrida (dp_{mn}), com a proporção da quantidade transportada em cada origem destino (a_{mn} dividido pelo total transportado);
- **CUSTO TOTAL (C_T):** Somatório dos valores da matriz de custo (c_{mn});
- **ENERGIA TOTAL (E_T):** Somatório dos valores da matriz de energia (e_{mn}).

A seguir serão apresentados os resultados de cada cenário.

5.1.1. Cenário 1

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos com a simulação do Cenário 1. Como pode ser observado, estes foram dispostos separados para cada etapa de simulação, sendo a primeira referente à distribuição do etanol entre as usinas e as bases de distribuição, e a segunda, entre as bases e os municípios. Ao final das duas é apresentado um resumo com a soma do C_T e da E_T .

O custo resultante deste cenário para o ano em estudo foi de R\$ 559,09 mi, sendo composto da seguinte maneira: 55% (R\$ 310,56 mi) pelo custo de transporte Usina-Base; 23% (R\$ 126,14 mi) pelo custo de transbordo; 22% (R\$ 122,39 mi) pelo custo de transporte Base-Município.

A distância média percorrida no deslocamento Usina-Base foi de 268,35 km, quase quatro vezes maior que a distância média no deslocamento Base-Município, que foi de 68,93 km.

No que tange ao gasto energético, este resultou em um montante de 1,69 bi de MJ, sendo 80% (1,34 bi de MJ) referente ao transporte Usina-Base, e 20% (0,34 bi de MJ) ao transporte Base-Município. Cabe ressaltar que o modelo de gasto energético adotado na pesquisa não contemplou a operação de tancagem, ocorrida nas bases de distribuição.

5.1.1. Cenário 2

Os resultados da simulação do Cenário 2 estão dispostos na Tabela 8. O custo total do transporte de etanol hidratado a partir da entrega direta foi de R\$ 295,63 mi, enquanto que o gasto energético foi de 1,22 bi de MJ. A distância média percorrida entre as usinas e municípios foi 243,58.

Tabela 7: Resultados obtidos para o Cenário 1.

CENÁRIO 1			
USINA - BASE			<i>un.</i>
PRODUÇÃO ALOCADA NA BASE	5.834.459,55		<i>m³</i>
DISTÂNCIA MÉDIA PONDERADA	268,35		<i>km</i>
CUSTO U-B			
	TRANSPORTE	310.557.500,33	<i>R\$</i>
	TRANSBORDO	126.141.015,44	<i>R\$</i>
	SUBTOTAL	436.698.515,77	<i>R\$</i>
ENERGIA U-B			
	TRANSPORTE	1.343.703.360,37	<i>MJ</i>
BASE - MUNICÍPIOS			
PRODUÇÃO ALOCADA NOS MUNICÍPIOS	5.834.459,55		<i>m³</i>
DISTÂNCIA MÉDIA PONDERADA	68,93		<i>km</i>
CUSTO B-M			
	TRANSPORTE	122.393.290,41	<i>R\$</i>
ENERGIA B-M			
	TRANSPORTE	344.353.328,08	<i>MJ</i>
RESUMO			
CUSTO TOTAL (C_T)	559.091.806,18		<i>R\$</i>
ENERGIA TOTAL (E_T)	1.688.056.688,44		<i>MJ</i>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8: Resultados obtidos para o Cenário 2.

CENÁRIO 2			
USINA – MUNICÍPIOS			<i>un.</i>
PRODUÇÃO ALOCADA NOS MUNICÍPIOS	5.834.459,55		<i>m³</i>
DISTÂNCIA MÉDIA PERCORRIDA	243,58		<i>km</i>
CUSTO TOTAL (C_T)	295.625.561,09		<i>R\$</i>
ENERGIA TOTAL (E_T)	1.218.666.046,17		<i>MJ</i>

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2. Fluxos do etanol hidratado no estado de São Paulo

Os resultados apresentados mostraram que as distâncias médias percorridas nos deslocamentos Usina-Base (Cenário 1) e Usina-Município (Cenário 2) foram semelhantes, sendo a do primeiro 268,35 *km*, e a do segundo 243,58 *km*. Ao mesmo tempo, a distância média encontrada no deslocamento Base-Município (Cenário 1) apresentou um valor discrepante dos mesmos (68,93 *km*).

Tal fato está relacionado ao distanciamento que existe entre as regiões de maior produção de etanol hidratado no estado, com as regiões de maior consumo (municípios) e as regiões com maior transbordo (bases). Para ilustrar a situação da concentração do consumo no foi criado um mapa temático, apresentado na Figura 19, que aponta os principais municípios consumidores de etanol hidratado, bem como a sua localização. Dentre esses municípios se destaca a cidade de São Paulo, responsável por aproximadamente 24% do consumo de etanol hidratado do estado.

De modo semelhante ao consumo, o transbordo também se concentra na região sudeste do estado. Como exemplos, a cidade de Paulínia (próxima à cidade de Campinas) e a cidade de São Paulo representam aproximadamente 43% da capacidade de armazenagem do estado.

Diferente do que foi observado no consumo e no transbordo, a concentração da produção de etanol no estado encontra-se nas regiões oeste e noroeste do estado, como pode ser visto na Figura 20. Esta diferença de concentração entre a oferta (produção das usinas) e demanda (consumo dos municípios e transbordo das bases), que pode ser visualizada nesses dois mapas, acaba provocando maiores deslocamentos no transporte do produto entre as origens e destinos.

Estes deslocamentos maiores, retomando os dados apresentados na introdução desse tópico, foram observados entre as usinas e as bases e entre as usinas e os municípios. Para facilitar a visualização dos mesmos, serão apresentados os mapas de fluxos de etanol, que mostram os deslocamentos do produto em cada etapa de simulação. Os mapas são gerados pelo TransCAD ao fim da aplicação do Problema de Transportes.

Figura 19: Mapa do consumo de etanol hidratado no estado de São Paulo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20: Mapa da produção de etanol hidratado no estado de São Paulo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

No deslocamento Usina-Base, como mostra a Figura 21, grande parte do fluxo é ‘canalizado’ das regiões produtoras para o sudeste do estado, onde se concentram as bases de distribuição com maiores capacidades.

Figura 21: Mapa com a representação do fluxo do produto nos *links* entre as usinas e as bases, gerado pelo TransCAD.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22: Mapa com a representação do fluxo do produto nos *links* entre as usinas e os municípios, gerado pelo TransCAD.

Fonte: Elaborada pelo autor.

No deslocamento Usina-Municípios, observa-se uma situação parecida com a mostrada anteriormente, sendo que neste caso, os municípios de maiores consumo demandam a maior parte do etanol produzido, o que provoca o acúmulo do fluxo do produto para região sudeste, como pode ser observado na Figura 22.

Como comparativo às duas situações apresentadas, no deslocamento Base-Município observa-se uma situação diferente, assim como mostra a Figura 23. Com o etanol alocado nas bases, os deslocamentos até os municípios (destino) tornam-se menores, especialmente porque a região de maior capacidade destacada anteriormente está muito próxima da região de maior consumo. Isto explica o menor valor encontrado na distância média deste deslocamento.

Figura 23: Mapa com a representação do fluxo do produto nos *links* entre as bases e os municípios, gerado pelo TransCAD.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Outro aspecto avaliado nesta pesquisa refere-se ao fluxo de etanol nos *links* da rede. A partir das tabelas de fluxo fornecidas pelo TransCAD nas aplicações do Problema de Transportes, foi possível gerar o fluxo de veículos em trechos de maior carregamento da rede de transportes.

Para o Cenário 1, no deslocamento Usina-Base foi observado um fluxo máximo de 2.774.038,29 m³ e no deslocamento Base-Município, 1.371.222,23 m³. Para o Cenário 2 houve um fluxo máximo de 2.009.162,39 m³, entre as usinas e municípios. Avaliando-se

apenas o maior valor observado, e partindo do pressuposto que este se refere ao transporte de etanol no período de um ano (ou 365 dias), pode-se estimar a partir da capacidade do veículo tipo, que são realizadas 254 viagens por dia no trecho crítico da malha.

A fim de estabelecer um parâmetro comparativo com o valor encontrado, utilizou-se a Caracterização de Frota de Caminhões (CUNHA et al., 2005), desenvolvida a partir da coleta de dados em alguns trechos de duas importantes rodovias do estado de São Paulo. De acordo com o banco de dados desenvolvido, houve uma frequência aproximada de 2% de caminhões-tanque na configuração 2S3. Aplicando essa porcentagem no Volume Médio Diário de Tráfego (VDM)¹¹ de veículos comerciais no ano de 2012 (nos dois sentidos), para trechos próximos aos locais de coleta, obteve-se um volume aproximado de 241 (SP-330) e 503 (SP-348) veículos por dia.

Quando estes parâmetros são comparados com o volume de viagens estimado para um dos cenários de simulação, pode-se afirmar que os valores encontrados na pesquisa não tem, em termos de VDM, efeito significativo sobre o nível de serviço do sistema viário utilizado.

5.3. Avaliação comparativa dos Cenários

A partir dos resultados apresentados, foi estabelecido um comparativo entre os cenários para avaliar qual o ganho obtido com a entrega direta do etanol hidratado (Cenário 2), em termos de custo e energia, com relação à entrega praticada atualmente (Cenário 1). Como pode ser observado na Tabela 9 houve uma redução de 47% no custo total, quando praticada a entrega direta, o que representou um ganho de R\$ 263,46 mi. No que tange ao gasto energético houve uma redução de 28%, o que resulta em um ganho de 469,39 mi de MJ.

Tabela 9: Comparação dos custos e gastos energéticos dos Cenários 1 e 2.

	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	REDUÇÃO
CUSTO (R\$)	559.091.806,18	295.625.561,09	47%
GASTO ENERGÉTICO (MJ)	1.688.056.688,44	1.218.666.046,17	28%

Fonte: Elaborada pelo autor.

¹¹ SÃO PAULO (2012).

Do ganho obtido em termos de custo, 52% referem-se ao transporte do etanol hidratado e 48% ao transbordo, o que significa que houve uma redução real de 25% no custo de transporte e de 23% no custo da operação de tancagem.

Se for considerado que na entrega direta do etanol seria necessária a implementação de novas estruturas de armazenagem próximas às usinas, para suprir a ausência das bases, como descreve a literatura, pode-se considerar que a economia obtida no custo de transbordo poderia ser convertida em novos investimentos.

Sob o ponto de vista da sociedade, no qual se baseia o modelo de custo, os referidos ganhos podem ser avaliados em função do preço final do etanol hidratado, admitindo que seja este um dos parâmetros mais relevantes para o consumidor final (sociedade).

Adotando o preço médio do etanol hidratado ao consumidor no estado de São Paulo de R\$ 1,806 por litro, no ano de 2012 (ANP, 2013 ANUÁRIO), e estabelecendo a relação do primeiro ganho econômico obtido na pesquisa (R\$ 263,46 mi) com o total transportado (5,8 mi m³), obtém-se uma economia de aproximadamente R\$ 0,05 por litro. Este último representa cerca de 3% do preço final do produto, o que não parece ser tão representativo ao ponto de torná-lo mais competitivo à gasolina, por exemplo, que é o combustível que compete diretamente com o etanol.

A análise feita não tem a pretensão de esgotar a discussão sobre o impacto do custo do transporte no preço final do etanol. Busca apenas apresentar outro ponto de vista acerca da economia obtida, que não deixa de ser expressiva.

No que tange ao gasto energético, foi observado um ganho percentual menor, quando comparado com o aspecto econômico. De qualquer modo, considera-se relevante o ganho energético obtido. Pelo fato deste valor em termos de energia não ser muito elucidativo, foi feito uma conversão do mesmo em emissão de gases efeito estufa, especificamente o CO₂, o que permite uma avaliação mais objetiva do resultado. Esta mudança de parâmetro é plausível já que o gasto de energia causado pelo consumo de combustível (diesel), nos caminhões tanque, gera também a emissão de poluentes no ambiente.

Na conversão utilizou-se um fator de emissão de CO₂ para veículos pesados a diesel de 74 g/MJ (ÁLVARES JUNIOR E LINKE, 2001), o que resultou, quando relacionado ao ganho energético (469,4 mi de MJ), em 34.734,91 t de CO₂, que deixariam de ser emitidos em um ano, caso fosse feita a entrega direta. Esta pode ser comparada à emissão de combustíveis

fósseis de uma cidade de pequeno porte como, por exemplo, Socorro no interior do estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2012), que possui aproximadamente 36 mil habitantes¹².

5.4. Análise comparativa do gasto energético com a literatura

Outro objetivo da pesquisa foi comparar o gasto energético obtido com valores divulgados na literatura para a etapa de distribuição da cadeia do etanol. Para realizar a comparação foram utilizados os dados da Tabela 2, apresentada na revisão bibliográfica deste trabalho, na qual constam os gastos energéticos de três trabalhos expressos em GJ/ha.

Para padronizar as unidades, os gastos energéticos encontrados para os cenários de avaliação desta pesquisa foram convertidos inicialmente para MJ/l, estabelecendo a relação entre E_T e o total transportado, e depois para GJ/ha, adotando uma produtividade de 6314 l/ha (TRIANA, 2011).

A partir deste procedimento, o gasto energético encontrado para o Cenário 1 foi de 1,83 GJ/ha, e para o Cenário 2 foi de 1,32 GJ/ha (Tabela 10).

Tabela 10: Gastos energéticos da etapa de distribuição encontrados na literatura e na pesquisa.

Trabalhos da literatura	Gasto energético na distribuição do etanol (GJ/ha)
Oliveira et al. (2005)	2,82
Pimentel e Patzek (2008)	7,62
Andreoli, Pimentel e Souza (2012)	3,09
Pesquisa	
Cenário 1	1,83
Cenário 2	1,32

Fonte: Elaborada pelo autor.

¹² IBGE Cidades (www.cidades.ibge.gov.br).

Como pode ser observado, há certa divergência nos valores encontrados na pesquisa, com aqueles divulgados na literatura, especialmente com o trabalho de Pimentel e Patzek (2008). Neste caso entende-se que esta diferença é causada pelo ceticismo desses dois autores quanto ao etanol proveniente da cana no Brasil, o que acaba impactando na contabilização do gasto energético. No mais, a análise das divergências entre os dados da pesquisa com os outros trabalhos torna-se limitada, pois nesses não são explicitados todos os parâmetros utilizados no cálculo.

De todo modo, entende-se que os valores calculados nos cenários de simulação agregam mais uma ordem de grandeza na literatura quanto ao consumo energético para as condições de distribuição do etanol hidratado no estado de São Paulo, tanto na entrega direta, como na modalidade de entrega praticada atualmente.

Cabe destacar ainda que, mesmo sabendo da importância da etapa de distribuição na cadeia, fica evidente que a mesma acaba agregando relativamente pouco ao consumo energético, quando comparada com as outras atividades da cadeia de produção. Comparando-se o gasto obtido no Cenário 1, $1,83 \text{ GJ/ha}$, com o gasto relativo à atividade agrícola divulgado no trabalho de Andreoli, Pimentel e Souza (2012), $30,22 \text{ GJ/ha}$, percebe-se que o primeiro representa apenas 6% do segundo. A baixa representatividade constatada nos resultados da pesquisa evidencia a provável razão da pouca ênfase dada à distribuição do etanol em trabalhos acadêmicos.

6. Conclusões e recomendações

Esta pesquisa teve por objetivo investigar os ganhos econômicos e energéticos da distribuição direta do etanol hidratado no estado de São Paulo. Para isso foram criados dois cenários de avaliação, o primeiro, representando o sistema atual de distribuição, em que o etanol sai das usinas, realiza o transbordo nas bases, para então chegar aos municípios de consumo; e o segundo, representando a entrega direta das usinas até os municípios.

A partir dos cálculos realizados, obteve-se um custo de R\$ 559,09 mi para o Cenário 1, e de R\$ 295,62 mi para o Cenário 2, o que resultou em um ganho de R\$ 263,46 mi a partir da entrega direta. Para atingir este ganho houve uma redução real de 25% no custo do transporte e de 23% no custo do transbordo.

Apesar do ganho, sabe-se que a viabilização da entrega direta depende não somente da economia na distribuição do etanol das usinas até os municípios ou postos de combustíveis. Seria necessária a implementação de novas estruturas de armazenagem próximas às usinas (YOSHISAKI, MUSCAT E BIAZZI, 1996), bem como um novo sistema de controle de qualidade e arrecadação (SAFATLE, 2011), o que implicaria em novos custos. Neste caso, o ganho real não estaria na eliminação das bases de distribuição, devido aos referidos investimentos, mas sim no ganho do custo de transportes, que representa cerca de R\$ 137,33 mi.

Este ganho real tem pouca participação no preço final do produto (aproximadamente 1%), e não parece suficientemente grande para determinar o consumo do etanol hidratado, o que não significa dizer que deva ser desconsiderado. Afinal, por conta do atual sistema de distribuição, a sociedade (consumidor final) acaba pagando mais caro por um gasto desnecessário no transporte.

Este gasto pode estar associado não só às questões legais (regulamentação), mas também às questões estratégicas de grandes empresas que dominam o mercado de distribuição. As empresas, que normalmente atuam em toda cadeia do etanol, acabam adotando o sistema atual de distribuição como forma de otimizar os processos que as mesmas desenvolvem, impactando diretamente no preço final do produto.

Com relação ao gasto energético, para o Cenário 1, este resultou em 1,69 bi de MJ, e no Cenário 2, um gasto de 1,22 bi de MJ, que representou em um ganho de 469,4 mi de MJ. Comparando este ganho com outros valores divulgados na literatura para a mesma etapa da cadeia observa-se grande divergência entre os valores, conforme foi discutido no levantamento bibliográfico. Diante do exposto, considera-se que os valores obtidos na pesquisa são mais uma ordem de grandeza para o gasto energético na distribuição do etanol hidratado no estado de São Paulo, em condições compatíveis com a realidade do Brasil.

No que tange a relação de consumo e oferta de etanol hidratado no estado de São Paulo, observou-se que há um distanciamento entre as regiões de maior produção e aquelas com maior consumo, o que acaba provocando um aumento nas distâncias percorridas a partir das usinas até os municípios.

Como recomendações, cabe destacar que na análise da distribuição do etanol estabelecida na presente pesquisa foram adotados dois modelos: o primeiro referente ao custo e o segundo referente ao gasto energético. No primeiro foi adotado um modelo de custo de transporte baseado no frete médio pago pelo mercado e, para o custo de transbordo, um valor de referência (R\$/m³) encontrado na literatura. Estas duas atividades que compõem a distribuição do etanol podem ser representados por um modelo econômico de custo operacional, o qual pode representar melhor a situação estudada, e provocar alterações no custo final. No segundo, referente à energia, não foi considerado o gasto energético da atividade de transbordo. Neste caso, cabe investigar se, para a escala de distribuição de etanol de todo o estado de São Paulo, esta atividade poderia implicar em um gasto significativo de energia, ou mesmo, se o gasto energético desta atividade poderia tornar mais próximo os valores encontrados na pesquisa com os de Oliveira et al.(2005) e Andreoli, Pimentel e Souza (2012).

Por fim, um aspecto observado a partir da análise de fluxo do etanol hidratado é que o escoamento da produção através do modo rodoviário está concentrado em poucos canais de distribuição, o que sugere a avaliação do uso de outros modos de transportes, o dutoviário ou ferroviário, por exemplo, como uma forma de reduzir o custo de transporte.

7. Referências

- ABRAMOVAY, R. **O mito do veneno que salva.** (2013). Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/empreendedorsocial/colunas/1225858-o-mito-do-veneno-que-salva.shtml>>. Acesso em: 5 fev. 2013.
- ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. (2008). **Cartilha da atividade de Transportador-Revendedor-Retalhista (TRR).** 2. ed. Rio de Janeiro, 2008. 20 p. Disponível em: <http://www.sindtrr.com.br/download/arq_318.pdf>. Disponível em: 12 ago. 2013.
- ANP **cria agente comercializador e operador do mercado de etanol.** (2009). Disponível em: <www.economia.uol.com.br/ultimas-noticias/valor/2009/12/22/anp-cria-agente-comercializador-e-operador-do-mercado-de-etanol.jhtm>. Acesso em: 7 ago. 2013.
- ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. (2013). **Relação de bases de distribuição de combustíveis líquidos autorizadas a operar:** planilha eletrônica - atualizado em setembro de 2013. Disponível em: <www.anp.gov.br>. Acesso em: 5 set. 2013.
- ANUÁRIO da Cana. (2012a). Ribeirão Preto: ProCana BRASIL, 2012.
- ANUÁRIO Análise Energia. (2012b). São Paulo: Análise Editorial, 2012. 252 p.
- AHUJA, R. K.; MAGNANTI, T. L.; ORLIN, J. B. (1993). **Network flows: theory, algorithms, and applications.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993. 846 p.
- ÁLVARES JUNIOR., O. M.; LINKE, R. R. A. (2001). **Metodologia Simplificada de Cálculo das Emissões de Gases do Efeito Estufa de Frotas de Veículos no Brasil.** CETESB. São Paulo, 2001. 182 p.
- ANDREOLI, C.; PIMENTEL, D.; SOUZA, S. P. (2012). Net energy balance and carbono footprint of biofuel from corn and sugarcane. In: PIMENTEL, D. (Ed.). **Global economic and environmental aspects of biofuels.** Boca Raton: CRC Press, 2012. p. 221-248.
- BALLOU, R. H. (2006). **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 616 p.
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social; Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. (2008). **Bioetanol de cana-de-açúcar:** energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro, 2008. 312 p.
- BARROS, C. C. C.; WANKE, P. F. (2012). Logística de distribuição de etanol: uma proposta de avaliação para a viabilidade na construção de alcooldutos a partir do Centro Oeste do Brasil. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 343-355, 2012.

BODDEY, R. M.; SOARES, L. H. B.; ALVES, B. J. R., URQUIAGA, S. (2008). Bio-ethanol production in Brazil. In: PIMENTEL, D. (Ed.). **Biofuels, solar and wind as renewable energy systems**. New York: Springer, 2008. p. 331-356.

BONATO, J. **Dilma inaugura duto de etanol e diz que combustível fica R\$ 0,12 mais barato**. (2013). Disponível em: <<http://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2013/08/12/etanol-vai-ficar-mais-barato-na-bomba-afirma-dilma.htm>>. Acesso em: 12 ago. 2013.

BOVOLENTA, F. C. (2007). **Análise energética comparativa na logística de transporte multimodal da soja**. 2007. 70 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. (2006). **Gestão da cadeia de suprimentos e logística**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BRASIL. (1993). Lei nº 8.723, de 28 de outubro de 1993. Dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 29 out. 1993. Seção 1, p. 16313. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8723.htm>. Acesso em: 5 abr. 2013.

BRASIL. (1997). Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 7 ago. 1997. Seção 1, p. 16925. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9478.htm>. Acesso em: 5 abr. 2013.

BRASIL. (1999). Lei nº 9.847, de 26 de outubro de 1999. Dispõe sobre a fiscalização das atividades relativas ao abastecimento nacional de combustíveis, de que trata a Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, estabelece sanções administrativas e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 27 out. 1999. Seção 1, p. 1. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9847.htm>. Acesso em: 5 abr. 2013.

BRASIL. (2000). Decreto nº 3.546, de 17 de julho de 2000. Cria o Conselho Interministerial do Açúcar e do Alcool - CIMA e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 jul. 2000. p. 5. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D3546.htm>. Acesso em: 8 abr. 2013.

BRASIL. (2005). Resolução ANP nº 36, de 06 de dezembro de 2005. Estabelece as especificações do Alcool Etílico Anidro Combustível (AEAC) e do Alcool Etílico Hidratado Combustível (AEHC) comercializados pelos diversos agentes econômicos em todo o território nacional, consoante as disposições contidas no Regulamento Técnico ANP nº 7/2005. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 7 dez. 2005. Disponível em: <http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2005/dezembro/ranp%2036%20-%202005.xml>. Acesso em: 5 abr. 2013.

BRASIL. (2006). Resolução ANP nº 5, de 13 de fevereiro de 2006. Ficam estabelecidos, pela presente Resolução, os requisitos para cadastramento de fornecedor, comercialização e envio de dados de álcool etílico combustível para fins automotivos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 14 fev. 2006. Disponível em: <http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2006/fevereiro/ranp%205%20-%202006.xml>. Acesso em: 5 abr. 2013.

BRASIL. (2009). Resolução ANP nº 43, de 22 de dezembro de 2009. Ficam estabelecidos, pela presente Resolução, os requisitos para cadastramento de fornecedor, comercialização e envio de dados de etanol combustível à ANP. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 24 dez. 2009. Disponível em: http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2009/dezembro/ranp%2043%20-%202009.xml>. Acesso em: 4 abr. 2013.

BRASIL. (2011). Resolução ANP nº 7, de 9 de fevereiro de 2011. Estabelece as especificações do álcool etílico anidro combustível ou etanol anidro combustível e do álcool etílico hidratado combustível ou etanol hidratado combustível, contidas no Regulamento Técnico ANP nº 3/2011, parte integrante desta Resolução, e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos diversos agentes econômicos que comercializem o produto em todo o território nacional. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 10 fev. 2011. Disponível em: http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2011/fevereiro/ranp%207%20-%202011.xml>. Acesso em: 5 abr. 2013.

BRASIL. (2013). Portaria MAPA nº 105, de 28 de fevereiro de 2013. Resolve fixar em vinte e cinco por cento o percentual obrigatório de adição de álcool etílico anidro combustível à gasolina, a partir da zero hora do dia 1º de maio de 2013. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 1 mar. 2013. Seção 1, p. 3. Disponível em: <www.normasbrasil.com.br/norma/portaria-105-2013_251794.html>. Acesso em: 5 abr. 2013.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. (2013a). **Balanço energético nacional 2013: ano base 2012 – relatório síntese**. Brasília, DF; Rio de Janeiro: EPE, 2013. 55 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2013b). **Relação das unidades produtoras cadastradas no Departamento da Cana-de-açúcar e Agronegria**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/Orientacoes_Tecnicas/Usinas%20e%20Destilarias%20Cadastradas/DADOS_PRODUTOES_20_03_2012.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2013.

BRASIL. Ministério dos Transportes. (2013c). **Base de Dados Georreferenciados PNLT 2010**. Disponível em: <www.transportes.gov.br/index/conteudo/id/36604>. Acesso em: 16 nov. 2013.

CALIPER. (2006a). **TransCAD transportation GIS software: user's guide**. Newton: Caliper Corporation, 2006. 804 p.

CALIPER. (2006b). **TransCAD transportation GIS software: routing and logistics with TransCAD 4.8**. Newton: Caliper Corporation, 2006. 126 p.

CAMELINI, J. H. (2011). **Regiões competitivas do etanol e vulnerabilidade territorial no Brasil: o caso emblemático de Quirinópolis, GO.** 2011. 159 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CAMELINI, J. H.; CASTILLO, R. (2012). Logística e competitividade no circuito espacial produtivo do etanol no Brasil. **Boletim Campineiro de Geografia**, Campinas, v. 2, n. 2, p. 262-278, 2012.

CAZEIRO, P. C. de A. (2010). **Processo de aperfeiçoamento da cadeia de produção e comercialização do etanol: um estudo sobre a regulamentação e a tributação do mercado de etanol combustível no Brasil.** 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo.

COMITRE, V. (1993). **Avaliação energética e aspectos econômicos da filière soja na região de Ribeirão Preto.** 1993. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Planejamento Agropecuário) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). (2012). **Bioetanol – o futuro renovável.** Brasília, DF. 2012. 78 p. il. (Cadernos Setoriais Rio+20).

CORRÊA JUNIOR, G. (2001). **Determinantes do preço do frete rodoviário para transporte de soja em grãos em diferentes regiões brasileiras: uma análise econométrica.** 2001. 118 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

COWEN, D. J. (1988). GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences? **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Falls Church, v. 54, n. 11, p. 1551-1555, 1988.

CUNHA, A. L. B. N.; MON-MA, M. L.; ARAÚJO, J. J.; EGAMI, C. Y.; SETTI, J.R. (2005). **Caracterização da frota de caminhões no sistema Anhangüera-Bandeirantes.** In: XIX ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2005, Recife. Resumo das Comunicações Técnicas do XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2005. p. 1-8.

EIA. Energy Information Administration. (2013). **Monthly energy review.** Washington, DC, 2013. 201 p. il. Disponível em: <<http://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/mer.pdf>>. Acesso 12 ago. 2013.

EPA. Environmental Protection Agency. (2013). **Draft inventory of US greenhouse gas emissions and sinks: 1990–2011.** Washington, DC, 2013. 470 p.

GONÇALVES, G. I. (2008). **Perspectivas de integração modal rodo-hidro-ferroviária na exportação de produtos agrícolas e minerais no Estado de São Paulo.** 2008. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GUINÉE, J. B. (Coord.). (2002). **Handbook on life cycle assessment.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. 704 p.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. (2008). The sustainability of ethanol production from sugarcane, **Energy Policy**, Philadelphia, v. 36, n. 6, p. 2086-2097, 2008.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. (2005). **Introduction to operations research**. 8. ed. Boston: McGraw-Hill, 2005. 1061 p.

IEA. International Energy Agency. (2010). **Ethanol internal combustion engines**. Paris, 2010. 6 p. (Technology Brief T06). Disponível em: <http://www.iea-etsap.org/web/E-TechDS/PDF/T06_Ethanol%20ICEs_final_18Jun10_GS_OK_NH.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2013.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2013). **IBGE downloads geociências**. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 12 set. 2013.

LMC International. (2008). **Ethanol Quarterly: Q3 2008**. Disponível em: <http://www.lmc.co.uk/Biofuels_and_Biomass-LMC_Ethanol_Market_Report>. Acesso em: 27 fev. 2013.

LOPES, M. B.; SILVA, A. L.; CONEJERO, M. A. (2010). Fluxos e poder nos canais de distribuição de etanol carburante: um estudo qualitativo no Estado de São Paulo. **Revista de Administração**, São Paulo, v. 45, n. 4, p. 356-372, 2010.

LUO, L.; VOET, E. van der; HUPPES, G. (2009). Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Philadelphia, v. 13, p. 1613–1619, 2009.

MACEDO, I. C.; NOGUEIRA, L. A. H. (1985). Balanço de energia na produção de açúcar e álcool nas usinas cooperadas. **Boletim Técnico Copersucar**, São Paulo, n. 31, p. 22–27, 1985.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V.; SILVA, J. E. A. R. (2004). **Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2004. 37 p.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. (2008). Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy** Philadelphia, v. 32, n. 7, p. 582–595, 2008.

MARTINS, R. S. (2008). Estudo da formação do frete rodoviário e potencial de conflitos em negociações em cadeias do agronegócio brasileiro. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, Lavras, v. 10, n. 1, p. 73-87, 2008.

MATIAS, L. F. (2001). **Sistema de Informações Geográficas (SIG): teoria e método para representação do espaço geográfico**. 2001. 325 p. Tese (Doutorado em Geografia Humana) - Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MENEZES, R. C.; RODRIGUES, T. S.; VAZQUEZ, M. G. C. (2013). Implementação da Solução de Integração da Cadeia de Suprimentos de Etanol. Apresentação. SAP FORUM - 21 de março de 2013, São Paulo.

MIRANDA, J. I. (2010). **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Campinas, SP: Embrapa Informática Agropecuária, 2010. 433 p.

NEVES, M., CONEJERO, M. (2010). **Estratégias para a cana no Brasil**. São Paulo: Atlas, 2010. 288 p.

NOVAES, A. G. (1978). **Métodos de otimização**: aplicações aos transportes. São Paulo: Edgard Blucher, 1978. 463 p.

OLIVEIRA, M. E. D.; VAUGHAN, B. E.; RYKIEL, E. J. (2005). Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. **BioScience**, Washington, DC, v. 55, n. 7, p. 593-602, 2005.

OMETTO, A. R.; HAUSCHILD, M. Z; ROMA, W. N. L. (2009). Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, New York, v. 14, p. 236–247, 2009.

ORPLANA. (2013). **Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil**. Disponível em: <www.orplana.com.br/novosite/quem_somos.php>. Acesso em: 29 abr. 2013.

PIMENTEL, D. (1980). **Handbook of energy utilization in agriculture**. Bata Raton: CRC Press, 1980. 475 p.

PIMENTEL, D. (2003). Ethanol fuels: energy balance, economics, and environmental impacts are negative. **Natural Resources Research**, New York, v. 12, n. 2. p. 127-134, 2003.

PIMENTEL, D.; PATZEK, T. W. (2008). Ethanol production: energy and economic issues related to US and Brazilian sugarcane. In: PIMENTEL, D. (Ed.). **Biofuels, solar and wind as renewable energy systems**. Dordrecht: Springer, 2008. cap. 14, p. 357-371.

RODRIGUES, S. B. M. (2007). **Avaliação das alternativas de transporte de etanol para exportação na região Centro-Sul**. 2007. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SÃO PAULO. Departamento de Estradas e Rodagem. Secretaria de Logística e Transportes (2012). **Estatística de fráfego**: volume médio diário (VDM). São Paulo, 2012.

SÃO PAULO (ESTADO). (2013). Anuário Estatístico de Energéticos por Município no Estado de São Paulo – 2012. SECRETARIA DE ENERGIA – São Paulo, 2013

SAFATLE, F. N. (2011). **A economia política do etanol**. São Paulo: Alameda, 2011. 296 p.

SHAPIRO, J. F. (2001). **Modeling the supply chain**. Michigan: Cole-Thomson Learning, 2001. 586 p.

SHAPOURI, H.; DUFFIELD, J. A.; WANG, M. (2002). **The energy balance of corn ethanol: an update**. Washington, DC: USDA, 2002. 16 p. (USDA, Agricultural Economic Report, 813).

SHEFFI, Y. (1985). **Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods**. New Jersey: Prentice-Hall, 1985. 415 p.

SIFRECA. (2013). **Fretes rodoviários: álcool** - período: 25/05 - 21/06/2013. Disponível em: <<http://sifreca.esalq.usp.br/sifreca/pt/fretes/rodoviaros/index.php?q=>>. Acesso em: 11 ago. 2013.

SILVA, A. N. R. (1998). **Sistema de informações geográficas para planejamento de transportes**. 2005. 112 f. Tese (Livre-docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SILVA, V. B. (2005). **Distribuição modal rodo-ferroviária em uma rede de exportação de açúcar a granel para o Porto de Santos**. 2005. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SOARES, L. H. de B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. **Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2009. 14 p.

SOUZA, S. P. (2010). **Produção integrada de biocombustíveis: Uma proposta para reduzir o uso de combustível fóssil no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar**. 2010. 142 f. Dissertação (Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

TEIXEIRA, K. M. (2007). **Investigação de opções de transporte de carga geral em contêineres nas conexões com a região Amazônica**. 2007. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

TRANSPETRO. (2013). **Tarifas de referência para serviços de movimentação de etanol: revisão 37** - setembro/2013. Disponível em: <www.transpetro.com.br>. Acesso em: 11 ago. 2013.

TRIANA, C. A. R. (2011). Energetics of Brazilian ethanol: Comparison between assessment approaches. **Energy Policy**, Surrey, v. 39, n. 8, p. 4605-4613, 2011.

TUDERA, M. V. (2013). Energy balance, forecasting of bioelectricity generation and greenhouse gas emission balance in the ethanol production at sugarcane mills in the state of Mato Grosso do Sul. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 19, p. 582-588, 2013.

UNICA. UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR. (2013a). **UNICADData**. Disponível em: <www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4>. Acesso em: 12 fev. 2013.

UNICA. UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR. (2013b). **UNICADData**. Disponível em: www.unicadata.com.br/historico-de-consumo-de-combustiveis.php?idMn=11&tipoHistorico=10. Acesso em: 10 jul. de 2013.

UNICA. UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR. (2013c). **Consecana** - Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de S. Paulo. 2013. Disponível em: <www.unica.com.br/consecana>. Acesso em: 29 abr. 2013.

UNICA. UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR. (2013d). **Histórico e missão**. 2013. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/historico-e-missao>>. Acesso em: 29 abr. 2013.

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY. (2004). Produção de bio-combustíveis: a questão do balanço energético. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 1, 2004, Campina Grande. **Energia e sustentabilidade**: anais. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004. 1 CD-ROM.

YOSHIZAKI, H. T. Y.; MUSCAT, A. R. N.; BIAZZI, J. L. (1996). Decentralizing ethanol Distribution in Southeastern Brazil. **Interfaces**, Catonsville, v. 26, n. 6, p. 24-34, 1996.

WIDMER, J. A. (2004). **Proposta de Nomenclatura de Caminhões**. Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Volume I, p. 624 – 635. Florianópolis, SC.