

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

HENRIQUE MOREIRA FRÜH MACHADO

ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA E SOCIOAMBIENTAL DO
ETANOL SUPER-HIDRATADO COMO COMBUSTÍVEL PARA
MOBILIDADE E GERAÇÃO DE ENERGIA

Santa Maria, RS
2019

HENRIQUE MOREIRA FRÜH MACHADO

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA E SOCIOAMBIENTAL DO ETANOL
SUPER-HIDRATADO COMO COMBUSTÍVEL PARA MOBILIDADE E GERAÇÃO
DE ENERGIA**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Orientador: Prof. Dr. Macklini Dalla Nora
Coorientador: Prof. Dr. Alejandro Ruiz Padillo

Santa Maria, RS
2019

HENRIQUE MOREIRA FRÜH MACHADO

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA E SOCIOAMBIENTAL DO ETANOL
SUPER-HIDRATADO COMO COMBUSTÍVEL PARA MOBILIDADE E GERAÇÃO
DE ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Aprovado em 11 de março de 2019:

Macklini Dalla Nora, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Alejandro Ruiz Padillo, Dr. (UFSM)
(Coorientador)

Julio Cezar Mairesse Siluk, Dr. (UFSM)
(Membro da banca)

Gil Eduardo Guimarães, Dr. (UNICRUZ)
(Membro da banca)

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Bárbara e minhas filhas Eduarda e Luísa, que acompanharam todo o esforço e dedicação que tive durante a construção desta.
Muito obrigado por tudo!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado forças e iluminado meu caminho para que esse momento acontecesse. Agradeço aos bons espíritos que me guiaram e abençoaram durante a construção desta dissertação.

Agradeço aos meus pais, Nídia e Carlos (in memoriam) por sempre me incentivarem a estudar continuamente. Obrigado por terem me dado toda educação, carinho, amor e dedicação. Obrigado pelos ensinamentos, pelos “puxões de orelha” dados quando criança. Obrigado por compartilharem este momento importante comigo. Agradeço ainda aos meus familiares por todo carinho e apoio incondicionais.

Agradeço em especial ao meu orientador, prof. Dr. Macklini Dalla Nora, pela oportunidade de ser seu orientando. Muito obrigado pela chance que tive de estudar e pesquisar contigo. Obrigado também pelas considerações, pela atenção dispensada a mim e por orientar a realizar um trabalho científico de qualidade.

Também agradeço em especial ao meu co-orientador, prof. Dr. Alejandro Ruiz Padillo. Muito obrigado por toda atenção que teve comigo. Agradeço por todas as considerações, pelas conversas que tivemos durante a construção deste trabalho e também orientar esta dissertação da melhor forma possível.

Agradeço aos colegas de trabalho: Fabiano Marcon, Sabrina Nadalon, Marcos Machado pelas conversas e apoio prestados. Aos colegas “conselheiros” Eduardo Ferreira, Fernando Hofmann, Cristiano Wendt, Eduardo Spies pelos momentos de descontração que ajudaram a tranquilizar em momentos difíceis. Aos colegas de mestrado, em especial Lucas Sudati, Igor Perdoná, Vinicius Guillet, Fernanda Andrade e Mayara Ricci pelos momentos felizes e também trabalhosos que tivemos durante o transcorrer do curso. Muito obrigado!!

RESUMO

ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA E SOCIOAMBIENTAL DO ETANOL SUPER-HIDRATADO COMO COMBUSTÍVEL PARA MOBILIDADE E GERAÇÃO DE ENERGIA

AUTOR: Henrique Moreira Fröh Machado
ORIENTADOR: Prof. Dr. Macklini Dalla Nora
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Alejandro Ruiz Padillo

Combustíveis fósseis, como a gasolina e o diesel, são largamente empregados como fonte primária de energia para a mobilidade e geração estacionária de energia elétrica. Tal utilização, entretanto, tem impacto negativo nas emissões de gases de efeito estufa (*Greenhouse Gases – GHG*), além de manter a dependência energética sobre fontes não renováveis e poluentes. Nesse contexto, os biocombustíveis, como etanol e biodiesel, são alternativas viáveis, tendo como benefícios a preservação dos recursos naturais e mitigação dos *GHG*. No Brasil, o principal biocombustível comercializado é o etanol (94% álcool etílico e 6% de água), produzido a partir da cana-de-açúcar, dado o clima e tecnologias adequadas ao seu cultivo. Dentre as etapas de produção do etanol combustível estão a destilação e a desidratação, em que a água é gradativamente removida da solução, de modo a se aumentar a concentração final de etanol. Em função das condições físicas da mistura, o consumo energético deste processo produtivo aumenta drasticamente a medida em que se almeja maiores concentrações de etanol em água, particularmente acima de 80%. Isso torna o processo produtivo do etanol combustível mais oneroso em comparação a produção de misturas etanol-água menos nobres, como aquelas com 70% e 80% de etanol. Portanto, com base nessa atual desvantagem do processo de obtenção do etanol combustível, a presente pesquisa explora os fatores que interferem na utilização de misturas etanol-água mais diluídas, aqui referido como etanol super-hidratado, de modo a se reduzir os custos de produção do combustível e torná-lo mais competitivo em relação aos combustíveis fósseis atualmente empregados na mobilidade e geração de energia. Através de uma pesquisa bibliográfica, documental e de campo sobre o assunto, são analisados dados referentes aos custos de produção e transporte do etanol super-hidratado. Foi aplicado também questionário com especialistas a fim de melhor elencar os fatores críticos de sucesso na viabilidade do etanol super-hidratado. Ainda, são utilizados elementos da abordagem multicritério *Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)* para apoio a decisão, a fim de se avaliar os critérios que interferem na produção, comercialização e distribuição do etanol super-hidratado como combustível. Ao utilizar este método multicritério, reduz-se a incerteza sobre os critérios analisados, buscando hierarquiza-los, para melhor avaliar a viabilidade do etanol super-hidratado. Como resultado, chegou-se à conclusão de que os critérios técnico e financeiro são os mais relevantes em uma análise de viabilidade do etanol super-hidratado como combustível.

Palavras-chave: etanol super-hidratado, mobilidade, geração de energia, FAHP.

ABSTRACT

STUDY OF FINANCIAL AND SOCIOENVIRONMENTAL FEASIBILITY OF SUPER-HYDROUS ETHANOL AS MOBILITY AND ENERGY GENERATOR FUEL

AUTHOR: Henrique Moreira Früh Machado
ADVISOR: Prof. Dr. Macklini Dalla Nora
CO-ADVISOR: Prof. Dr. Alejandro Ruiz Padillo

Fossil fuels (gasoline and diesel) are largely used as primary energy source for mobility and stationary power generation. Meanwhile, their use has a negative impact on Greenhouse Gas (GHG) emission, and maintains the energy dependency of non-renewable and pollutant sources. In this context, biofuels (ethanol and biodiesel, for example) are feasible alternatives that provide benefits such as the natural resources preservation and GHG mitigation. In Brazil, ethanol (a blend of 94% ethanol and 6% water) is the main marketed biofuel, produced from sugarcane, because it has climate and technologies suitable for its cultivation. Distillation and dehydration are among the ethanol production steps, where the water is gradually removed from solution, increasing the final concentration of ethanol. Because of the physical conditions of the mixture, energy consumption for this production process increases drastically as long as more ethanol in water is desired (above 80%). For this, ethanol production process become more onerous in comparison to the production of less noble ethanol-water mixtures, as 80% and 70% of ethanol. Therefore, based in this current disadvantage of the ethanol obtaining process, the present research explored the economic feasibility of more diluted ethanol-water mixtures, referred as super-hydrous ethanol, in order to reduce fuel production costs, improving its competitiveness in relation of fossil fuels, currently used for mobility and power generation. Through a bibliographical and documental research about the theme, data referred to super-hydrous ethanol production and transportation costs were analyzed. A survey was applied to ethanol experts, in order to rank the critical success factors in a viability of super-hydrous ethanol. Also, MCDA were used, specifically Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP), in order to evaluate the impact of higher water concentration in the super-hydrous ethanol chain, especially about the logistics in Brazilian territory. Using this MCDA, uncertainty is reduced about the analyzed criteria, hierarchizing them, in order to evaluate the viability of super-hydrous ethanol. As a result, it was concluded that technical and financial criteria were the most relevant to analyze the feasibility of super-hydrous ethanol.

Keywords: super-hydrous ethanol, mobility, energy generation, FAHP.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vendas de etanol hidratado no Brasil.....	22
Quadro 2 - Frota brasileira de veículos leves.....	23
Quadro 3 - Emissões de GEE nas análises WTT, WTW e TTW, em diferentes combustíveis	27
Quadro 4 - Comparação entre produção e consumo de etanol hidratado no Brasil..	36
Quadro 5 - Composição do preço do EHC no Brasil	44
Quadro 6 - Valores do ICMS e PIS/COFINS sobre o etanol, por estado	44
Quadro 7 - Produção e consumo de etanol hidratado combustível no Brasil, por região	46
Quadro 8 - Valores de frete de etanol no Brasil	46
Quadro 9 - Vantagens e desvantagens do AHP.....	52
Quadro 10 - Enquadramento metodológico	58
Quadro 11 - Escala de julgamentos do método FAHP	62
Quadro 12 - Índice Randômico de Saaty	64
Quadro 13 - Critérios de avaliação.....	68
Quadro 14 - Níveis de importância relativa	71
Quadro 15 - Respondentes da pesquisa.....	73
Quadro 16 - Matriz das médias CRITÉRIOS.....	74
Quadro 17 - Razão de consistência sobre os critérios	76
Quadro 18 - Pesos da matriz subcritério financeiro.....	78
Quadro 19 - Pesos da matriz subcritério socioambiental	80
Quadro 20 - Pesos da matriz subcritério técnico.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapeamento bibliométrico	19
Figura 2 - Utilização de combustíveis na matriz veicular nacional em 2017	22
Figura 3 - Relação entre energia dispendida na destilação – mistura etanol/água ...	33
Figura 4 - Produção de etanol (anidro e hidratado) no Brasil, por década, em m ³	34
Figura 5 - Produção de etanol (anidro e hidratado) no Brasil	35
Figura 6 - Comparação do balanço energético entre o etanol anidro e o etanol hidratado (E65W35)	37
Figura 7 - Distribuição dos custos por atividade.....	38
Figura 8 - Diagrama da fase de separação da mistura gasolina-etanol-água	39
Figura 9 - Efeito da água no poder calorífico do etanol.....	40
Figura 10 - Distribuição das regiões produtoras de cana-de-açúcar e etanol no Brasil.	43
Figura 11 - Comparação entre os modais dos países Brasil, Canadá, Austrália, Rússia, China e EUA.....	47
Figura 12 - Matriz de comparação pareada AHP	52
Figura 13 - Modelo de árvore hierárquica	53
Figura 14 - Fuzzy triangular.....	56
Figura 15 - Procedimentos metodológicos da pesquisa.....	61
Figura 16 - Exemplo de matriz de comparação pareada.....	63
Figura 17 - Árvore hierárquica da pesquisa.....	69
Figura 18 - Recorte do instrumento de avaliação.....	71
Figura 19 - Estrutura hierárquica FAHP dos critérios e subcritérios.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV – Análise do Ciclo de Vida

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

AHP – *Analytic Hierarchy Process*

ANP – Agência Nacional do Petróleo

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CEVASA – Central Energética Vale do Sapucaí LTDA

CO₂ – Dióxido de carbono

E100 – Etanol anidro (sem água)

ExxWyy – Mistura de etanol hidratado, com concentração volumétrica de xx% de etanol e yy% de água.

EAC – Etanol Anidro Combustível

EHC – Etanol Hidratado Combustível

ESHHC – Etanol Super-Hidratado Combustível

EUA – Estados Unidos da América

FAHP – *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*

Flex – Termo utilizado para designar motores de veículos brasileiros flexíveis ao uso tanto de gasolina como de etanol.

GHG – Gases do Efeito Estufa (*Greenhouse Gases*)

HCCI - *Homogeneous Charge Compression Ignition*

Km – Kilometro

MCDA – *Multi-Criteria Decision Analysis*

MJ/kg - Megajoule

NO_x – Óxido de Nitrogênio

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S/A

PIB – Produto Interno Bruto

PROMETHEE – *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*

TOPSIS – Técnica de ordem de preferência por semelhança a uma solução ideal

TTW – *Tank-to-Wheel*

UE – União Europeia

UF – Unidade Federativa

UNICA – União Nacional dos Produtores de Cana-de-Açúcar

WTT – *Well-to-Tank*

WTW – *Well-to-Wheel*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO GERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3 JUSTIFICATIVA	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 MOBILIDADE E EMISSÃO DE GHG	21
2.2 BIOCOMBUSTÍVEIS	24
2.2.1 Etanol	25
2.2.1.1 <i>Processo Produtivo do Etanol</i>	27
2.2.1.2 <i>Etanol hidratado</i>	32
2.2.1.2 <i>Etanol super-hidratado</i>	36
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DISTRIBUIÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DO ETANOL NO BRASIL.....	40
2.3.1 Aspectos técnicos ligados ao etanol no Brasil	39
2.3.2 Aspectos financeiros ligados ao etanol no Brasil	41
2.3.3 Aspectos socioambientais relacionados ao etanol	48
2.4 ABORDAGEM MULTICRITÉRIO COMO APOIO A DECISÃO	49
2.4.1 Analytic Hierarchy Process (AHP)	51
2.4.2 Lógica Fuzzy	54
2.4.3 Extensão Fuzzy - Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP)	56
3 METODOLOGIA	58
3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO.....	58
3.2 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	60
3.2.1 Procedimentos metodológicos	60
3.2.1.1 <i>Método FAHP aplicado à pesquisa</i>	61
4 ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA E CONSTRUÇÃO DA MODELAGEM	66
4.1 CONSTRUÇÃO DA ÁRVORE DE DECISÃO	66
4.2 CONSTRUÇÃO DOS INDICADORES	70
4.3 VALIDAÇÃO DOS INDICADORES	70
4.4 CONSTRUÇÃO DO INSTRUMENTO DE AVALIAÇÃO	70
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	73

5.1 COLETA DE DADOS	73
5.2 DEFINIÇÃO DE MATRIZES CRITÉRIOS	74
5.3 DEFINIÇÃO DAS MATRIZES DOS SUBCRITÉRIOS.....	76
6 CONCLUSÃO	84
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
6.2 LIMITAÇÕES.....	87
6.3 ESTUDOS FUTUROS.....	87
REFERÊNCIAS.....	88
APÊNDICES	99

1 INTRODUÇÃO

O constante aumento da temperatura global tem alertado os cientistas quanto à queima de combustíveis fósseis, como a gasolina e o diesel, e a consequente produção de gases do efeito estufa (*Greenhouse Gases* – GHG). Numerosas estratégias na busca de fontes de energia renováveis estão em desenvolvimento em muitos países, entre eles o Brasil (ROSO et al, 2016; BARRINGTON-LEIGH; OULIARIS, 2017). Preocupações com alterações climáticas, ambientais, tecnológicas, econômicas e políticas afetam diretamente a matriz energética mundial (MORAES et al., 2014).

Alterações no clima e a poluição do ar têm sido uma frequente preocupação, no que se refere ao desenvolvimento social e econômico, especialmente em grandes cidades, onde se faz necessário a implementação de políticas de sustentabilidade. Problemas como volatilidade dos preços e incerteza sobre o abastecimento de petróleo contribuem para uma maior oferta de fontes de energia alternativas, as quais reduzam a emissão de GHG. (GARCIA e SPERLING, 2017; GOLDEMBERG, 2007; MENEZES et al., 2017).

A adoção do Acordo de Paris, no ano de 2016, foi uma importante medida como estímulo ao desenvolvimento sustentável. Inicialmente, 195 países aceitaram o referido acordo; porém, em 2017, os Estados Unidos anunciaram a sua saída do Acordo. Conforme este protocolo, os países concordaram em emitir menores quantias de GHG, a fim de manter o aumento da temperatura média global a menos de 2 °C acima dos níveis pré-industriais e promover esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C acima dos níveis industriais (ONU, 2015; MMA, 2017).

No Brasil, a conclusão do processo de ratificação do Acordo ocorreu em setembro de 2016, aprovado pelo Congresso Nacional. O país se comprometeu a reduzir as emissões de GHG em 37% até 2025, em comparação aos níveis de 2005. Em consequência da aprovação, o Brasil também se comprometeu em aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18%, até 2030 (MMA, 2017).

Relacionado a este panorama, o governo brasileiro lançou dois programas que vão ao encontro dos interesses mundiais em minimizar os danos ambientais, buscando

ainda desenvolver socioeconomicamente o Brasil. O primeiro deles é o Rota 2030, em continuidade ao Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (Inovar Auto), que durou de 2012 a 2017) e incentivou as montadoras a produzirem veículos com maior aporte tecnológico. O Rota 2030 tem como objetivos: promover a integração competitiva às cadeias globais de valor, melhorar o ambiente de negócio, e aprimorar a segurança veicular e a produção. O segundo programa, diretamente ligado ao Rota 2030, é conhecido por RenovaBio, definido por lei aprovada na Câmara dos Deputados em dezembro de 2017, o qual prevê um aumento na produção de biocombustíveis (biodiesel e etanol), com o objetivo de reduzir as emissões de GHG, a fim de se cumprir com os compromissos ambientais assumidos na 21ª Conferência das Partes (COP-21), da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) (MME, 2017; CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2017; NOVACANA, 2018).

Nesse contexto, o etanol surge como uma opção à crescente necessidade de fontes renováveis de energia. Este combustível caracteriza-se por ser incolor, volátil, inflamável e solúvel em água. O etanol pode ser aplicado de diversas maneiras, como combustível para veículos, seja na forma anidra (adicionado à gasolina) ou hidratado (para a utilização direta em teores ~ 94%). É produzido através de açúcares fermentados de diferentes matérias-primas, tais como: beterraba, cana-de-açúcar (mais comum no Brasil), milho, mandioca, centeio entre outras. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, sendo a principal matéria-prima do etanol no país, com cerca de 720 milhões de toneladas, as quais correspondem a 40% do cultivo mundial. Mesmo sendo o principal produtor mundial de cana-de-açúcar, o Brasil é o segundo maior produtor de etanol, sendo os Estados Unidos o maior produtor (BILHÃO, 2015; U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2015; YARA, 2017).

No Brasil, o etanol foi utilizado em larga escala, como combustível, na década de 70 e 80, através do programa PRÓ-ALCOOL, tornando-se pioneiro no mundo. Como houve um aumento na produção e consumo do etanol, o governo brasileiro, em parceria com as indústrias automobilísticas, fomentou a fabricação de automóveis abastecidos a E100. Santos et al. (2018) destacam que, no início da década de 80, esses veículos representavam cerca de 23% da frota nacional de carros. Contudo, em meados da década de 90, houve uma queda expressiva no consumo de automóveis movidos

exclusivamente a álcool, sendo estes retirados do mercado, nos anos 2000. Fatores como aumento do preço do açúcar (o qual desestimulou a produção de etanol), retirada de subsídios à produção e importação de etanol produzido nos EUA, o qual possuía menor custo de produção em relação ao etanol brasileiro, contribuíram para a paralisação da produção de veículos movidos unicamente a E100 do mercado brasileiro.

A partir de 2003, iniciou-se a produção e comercialização de carros com motores Flex. Esses veículos podem ser abastecidos por álcool (E94W6), gasolina ou a combinação dos dois combustíveis. Em 2017, segundo dados da ANFAVEA (2017), os veículos leves com motor Flex correspondiam a 50% da frota nacional, sendo responsáveis por mais de 90% das vendas totais de automóveis no Brasil. Consequentemente, o etanol passou a ser disponibilizado em, praticamente, todas as cidades brasileiras.

Sendo o Brasil o maior produtor de cana-de-açúcar no mundo, a comercialização do etanol hidratado combustível (EHC) poderia ser feita em maior escala. De acordo com a UNICA (2017), foram vendidos mais de 14 bilhões de litros de etanol hidratado (E94W6) em todo país. As regiões que mais consomem EHC são produtoras desse combustível, como os estados de São Paulo e Paraná (57,3% e 8,5% das vendas totais, respectivamente). Em regiões distantes das áreas produtivas, como o Rio Grande do Sul, o consumo do combustível em questão corresponde a 0,47% das vendas totais no Brasil.

Apesar de o etanol ser um combustível que vai ao encontro com o conceito de desenvolvimento sustentável, este ainda apresenta problemas de cunho ambiental em relação à atividade produtiva. De acordo com Alvarenga e Queiroz (2008), a cultura da cana-de-açúcar favorece a contaminação das águas superficiais e do solo, pelo uso desregulado de adubos e herbicidas, por exemplo. Além disso, Rochedo et al. (2016) destacam que, durante a fase de fermentação, há uma grande liberação de CO₂ em temperatura ambiente (cerca de 1000 m³ de CO₂ em 1000 L de etanol).

Quanto a geração de energia elétrica, o etanol é pouco utilizado para esta função. Os grupos motor-geradores mais comuns são abastecidos a diesel, dada a maior eficiência térmica quando da utilização desse combustível. Outra razão para que isso aconteça é o fato de o poder calorífico do diesel ser maior do que do etanol (42MJ/kg e

26MJ/kg, respectivamente), o que impacta diretamente no consumo volumétrico e autonomia do conjunto. Pesquisas comprovam que a conversão de geradores à diesel para etanol pode ser rentável economicamente, pois o custo de produção do etanol em pequena escala é menor. Porém, para que haja viabilidade econômica favorável, o uso de etanol para geração de energia é mais rentável em áreas próximas aos locais de produção de cana-de-açúcar (ROSO et al., 2016).

De acordo com Bilhão (2015), o processo produtivo do etanol é constituído pelas seguintes fases: moagem, cozimento, fermentação, destilação e desidratação. A demanda energética para sua produção em concentrações até 80% de etanol na mistura cresce linearmente. Entretanto, acima desse valor, o consumo energético do processo comparado ao conteúdo energético da mistura cresce exponencialmente, aumentando significativamente o custo de produção. Assim, visto que o EHC atualmente empregado em veículos apresenta uma concentração de 96% de etanol e 4% de água (neste trabalho referido como E96W4), seu custo de produção poderia ser reduzido caso fosse possível a utilização de misturas etanol-água super-hidratadas como combustível.

A utilização do etanol super-hidratado como combustível teria impacto direto na redução dos seus custos de produção e na emissão global de GHG, indo ao encontro dos programas Rota 2030 e RenovaBio a serem desenvolvidos pelo Governo Federal. Porém, ao se abastecer um veículo *flex-fuel* com etanol super-hidratado, este não poderá ser abastecido com gasolina até que a totalidade do combustível seja consumida, eliminando assim a oportunidade de opção do cliente em abastecer com dois tipos diferentes de combustível. Além disso, o transporte do combustível super-hidratado, desde sua planta de produção até o consumidor final é impactado pelo transporte conjunto de água, visto que este não agrega valor ao combustível. Por fim, há de ser destacado que o combustível em estudo não atende às especificações da Agência Nacional do Petróleo (ANP), a qual determina a proporção aceita para comercialização de apenas 6% de água na mistura com etanol anidro (sem adição de água).

Dada à importância deste tema, frente ao cenário atual estabelecido na mobilidade e geração de energia, faz-se necessária uma análise sobre a viabilidade de comercialização do etanol hidratado em todo o Brasil. Em um ambiente competitivo, cujos cenários mudam continuamente, é fundamental uma estratégia de negócios clara e bem desenhada, visando o sucesso das empresas ou cenários no longo prazo e a

manutenção do valor conquistado (FERNANDES, 2014). Diante desse contexto, apresenta-se a seguinte pergunta: Quais são os fatores que mais relevantes na produção e distribuição do etanol super-hidratado, para fins de mobilidade e geração de energia, no Brasil?

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente estudo tem como objetivo principal elencar os fatores críticos de sucesso na viabilidade financeira e socioambiental do etanol super-hidratado como combustível para fins de mobilidade e geração de energia, no Brasil.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Descrever as principais características da economia do etanol super-hidratado na mobilidade e geração de energia no contexto nacional;
- b. Descrever a cadeia produtiva do etanol super-hidratado, bem como sua distribuição e comercialização.
- c. Identificar os fatores que interferem na viabilidade do etanol super-hidratado como combustível;
- d. Construir e testar a modelagem.
- e. Avaliar os diferentes critérios e subcritérios que interferem na viabilidade econômica, técnica e socioambiental do combustível em estudo.

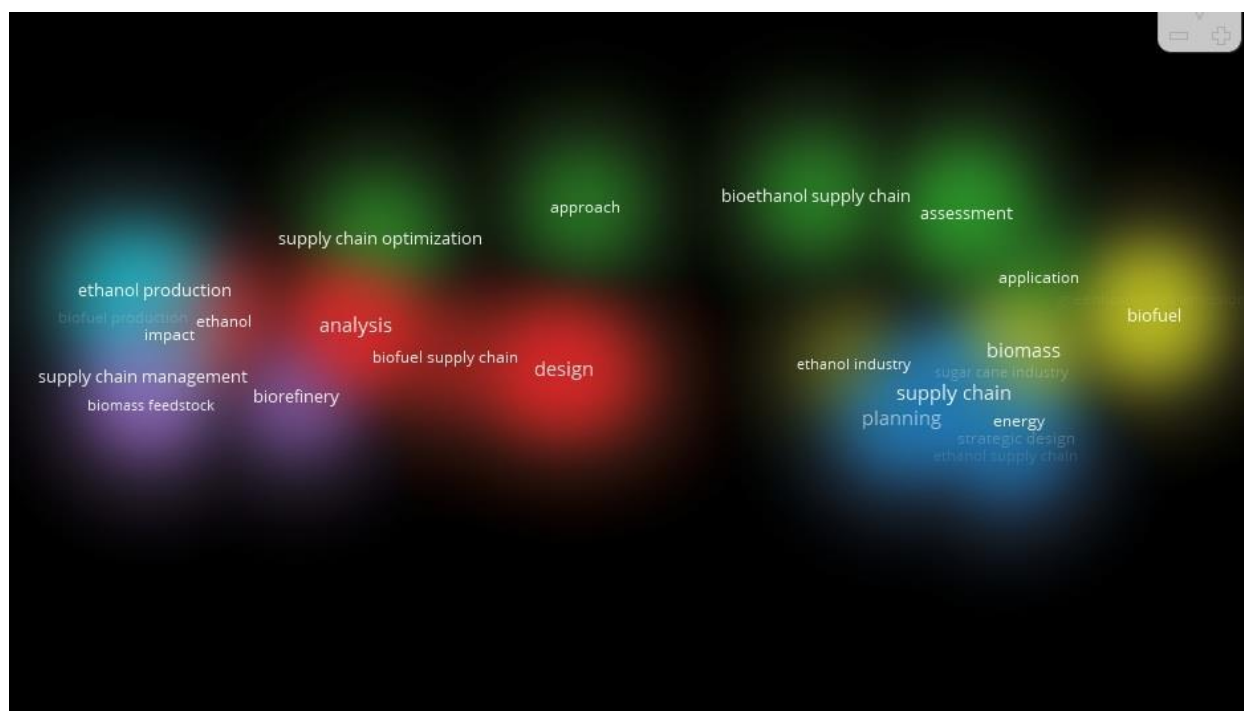
1.3 JUSTIFICATIVA

Este estudo visa servir como documento para a tomada de decisões nos níveis empresariais ou governamentais, elucidando se é viável ou não a comercialização do etanol super-hidratado no Brasil, como combustível para mobilidade e para fins de geração de energia.

Quanto ao ambiente acadêmico, verificou-se o assunto em questão nas mais diversas pesquisas (em sua maioria, artigos Qualis A1 e A2), no portal de periódicos da CAPES, assim como nos portais da *Science Direct* e *Scopus*. Utilizou-se como palavra-

chave (*super*) *hydrous (wet) ethanol*, correlacionada com *fuzzy AHP*, *logistics costs*, *supply chain management*, *feasibility*. Foram realizadas diversas combinações entre as palavras-chave, porém estas não se aproximam da abordagem proposta na pesquisa, garantindo-se assim uma contribuição pouco explorada para a área. A relevância deste assunto é significativa, uma vez que existem escassos trabalhos publicados com essa temática. Ainda, as buscas foram realizadas entre fevereiro de 2018 e fevereiro de 2019. Para melhor ilustrar a relação entre as palavras-chave encontradas, realizou-se um mapeamento bibliométrico, utilizando o software VOSviewer. Este foi utilizado na configuração padrão. A figura 1 mostra o mapeamento.

Figura 1 - Mapeamento bibliométrico



FONTE: o autor

Na figura acima, tem-se as relações entre as palavras-chave de acordo com o algoritmo do software. Observa-se que há 6 clusters, os quais representam as forças associativas das palavras-chave. Em vermelho, apresentam-se as palavras-chave com maior ocorrência e força associativa, seguido das cores verde, azul, roxo e amarelo. Percebe-se que há interseção entre alguns clusters, representando que estes estão conectados formando uma rede. Porém, ao utilizar a palavra-chave “*fuzzy AHP*”, não se percebe presença desta palavra-chave nos clusters, comprovando que o uso de métodos

multicritério em pesquisas relacionadas ao etanol não são comuns, comprovando a pouca exploração de MCDA nestes tipos de pesquisas.

Para a sociedade como um todo, o estudo sobre a viabilidade técnica, econômica e socioambiental de um biocombustível é importante, para fins de segurança energética nacional e redução de emissões de GHG. Relacionado a isso, existem políticas nacionais voltadas ao incentivo do consumo de biocombustíveis. Um exemplo disso é o RenovaBio - aprovado em 27/11/2017, pela Câmara dos Deputados. Dessa forma, a viabilidade econômica para a comercialização do etanol super-hidratado, seja em todo o Brasil ou em regiões específicas, torna-se uma importante alternativa sustentável de geração de energia. Com o aumento no consumo de etanol, o setor sucroalcooleiro também se desenvolve, na geração de empregos e no aumento do PIB.

Em relação ao uso do método *Fuzzy AHP* para a realização da pesquisa, justifica-se o uso pelo fato de ser um método combinado, a qual se pode comparar diferentes critérios e, ao mesmo tempo, hierarquiza-los. Além disso, considera-se também as incertezas e imprecisões que determinados métodos e lógicas podem apresentar. Em comparação com outros métodos, como por exemplo o *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE), este é mais aplicado para pesquisas quantitativas. Já o *Fuzzy AHP* pode ser aplicado também em pesquisas qualitativas ou quanti-qualitativas.

Portanto, a fim de elucidar a importância do assunto a ser pesquisado, há que se considerar que a atividade de distribuição de combustíveis para mobilidade e geração de energia envolveu, em 2017, 385 unidades produtoras, 90 entidades distribuidoras e 69 unidades importadoras de etanol no país (ANP, 2017). Dessa forma, o Brasil, em relação a outros países de clima tropical e temperado, coloca-se em condições vantajosas na produção e distribuição de biocombustíveis, embora sua distribuição ainda careça de uma gama de opções mais viáveis em comparação ao transporte rodoviário.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são abordados os conceitos fundamentais para o embasamento e desenvolvimento da pesquisa. Considerando o objetivo principal que foi proposto, mostrou-se essencial realizar uma revisão sobre o panorama da mobilidade, item 2.1, retratando um pouco de como se encontra a participação dos diversos combustíveis na matriz veicular nacional, além de relacioná-la com a emissão de GHG. Também serão revisados os conceitos envolvidos em biocombustíveis, item 2.2, como a produção e importância econômica dos mesmos no Brasil.

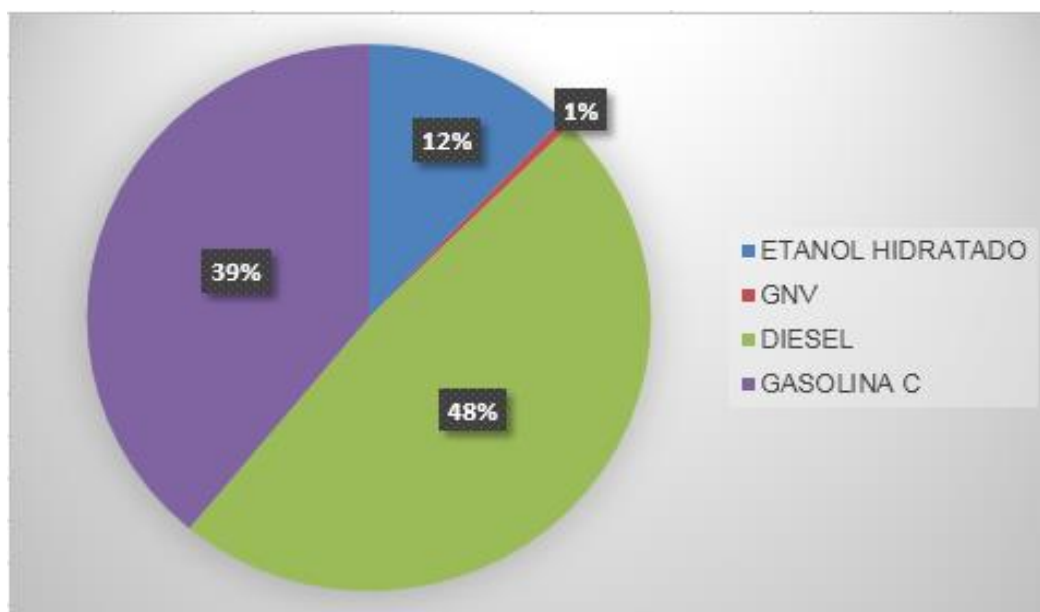
Posteriormente, será apresentada uma revisão acerca do etanol, seja este anidro, hidratado ou super-hidratado, itens 2.2.1 e 2.2.2. E por fim, para o estudo de viabilidade, será dissertado sobre fatores que influenciam na viabilidade do etanol super-hidratado e a abordagem multicritério para tomada de decisão, vide itens 2.3 e 2.4, mostrando os pontos de produção de etanol, e os fatores que interferem na viabilidade do etanol super-hidratado. Em relação a abordagem multicritério, serão apresentados os principais métodos e ferramentas, elucidando como avaliar os critérios mais importantes para o processo de viabilidade econômica, técnica e socioambiental do etanol super-hidratado.

2.1 MOBILIDADE E EMISSÃO DE GHG

O aumento na urbanização e industrialização acarretou em um crescimento significativo da demanda por transporte. Em áreas metropolitanas, essa procura é maior, em função da industrialização e alto nível de compra de veículos automotores. Conseqüentemente, o uso de combustíveis aumentou na mesma proporção. No ano de 2010, o uso de combustíveis fósseis, para fins de mobilidade, atingiu 80% da energia consumida no mundo (NIGAM; SINGH, 2011; SALVI et al., 2013).

No Brasil, de acordo com a ANP (2018), entre os anos de 2014 e 2015, houve um retraimento no uso de combustíveis fósseis na matriz veicular. Porém, entre 2016 e 2017 o cenário mudou. Houve aumento nas vendas de combustíveis fósseis e retraimento no consumo de etanol. Em um cenário de retração econômica, o setor de combustíveis também apresentou decréscimo no volume de vendas. Apesar disso, enquanto o consumo de etanol diminuiu, o de combustíveis fósseis avançou.

Figura 2 - Utilização de combustíveis na matriz veicular nacional em 2017



Fonte: O autor, adaptado de ANP (2018)

Entre os anos de 2013 e 2017, houve uma tendência de crescimento no consumo de etanol. O Quadro 1 abaixo mostra a evolução das vendas de etanol hidratado no Brasil.

Quadro 1 - Vendas de etanol hidratado no Brasil

ANO	VENDAS (m ³)
2007	9.366.837
2008	13.290.095
2009	16.470.948
2010	15.074.300
2011	10.899.220
2012	9.850.180
2013	11.754.962
2014	12.994.086
2015	17.862.739
2016	14.585.844
2017	13.920.991

Fonte: o autor adaptado de ANP (2017)

Em 2017, os automóveis leves com motores *flex* representaram 74,03% dos licenciamentos no Brasil, conforme Quadro 2 (ANFAVEA, 2017). A tecnologia de veículos *flex-fuel* facilitou o uso de biocombustíveis, como o etanol, sendo uma opção para as políticas de redução de GHG (MORAES; ZILBERMAN, 2014; MENEZES et al., 2017). Ainda, é perceptível o decaimento no número de veículos unicamente abastecidos por gasolina ou etanol, mais destacado ainda no caso do biocombustível. Por exemplo, a cidade de São Paulo lançou, em 2009, a Lei Municipal nº14933/2009, a qual definiu como meta a redução de 30% da emissão de GEE em 2012, comparado a 2003. Entretanto, segundo dados da Ekos-Geoklock (2013), a emissão de GEE aumentou em 8,7% no período de 2003-2012. Com isso, percebeu-se que a adoção de apenas uma política de mitigação de emissão de GEE não era suficiente. Estudos propõem a adoção de um modelo baseado em diferentes ferramentas para o controle e redução de GEE. Parâmetros como economia, população local, frota de veículos, tecnologia, entre outros, devem ser mensurados e analisados para se atingir a redução de emissão esperada (LI et al., 2012; LIU et al., 2015; MENEZES et al., 2017)

Quadro 2 - Frota brasileira de veículos leves.

ANO	FROTA TOTAL	FLEX-FUEL	GASOLINA	ETANOL	ELÉTRICO
2008	23.104.220	6.878.189	14.555.523	1.670.508	
2009	24.967.140	9.467.825	13.991.052	1.508.263	
2010	27.058.723	12.244.937	13.455.428	1.358.358	
2011	29.058.723	14.944.734	12.995.272	1.220.419	
2012	31.410.752	17.895.425	12.421.215	1.093.995	117
2013	33.513.236	20.772.995	11.761.194	978.439	608
2014	35.307.138	23.328.161	11.104.282	873.232	1.463
2015	36.224.340	25.030.412	10.413.865	777.768	2.295
2016	36.557.411	26.172.750	9.689.901	691.398	3.362
2017	36.967.759	27.365.821	8.981.826	613.493	6.619

Fonte: UNICA (2018)

Mesmo com a redução do uso de combustíveis fósseis, estes ainda são os mais utilizados em todo o mundo. Na União Europeia (UE) em 2014, por exemplo, os carros de passeio foram responsáveis por 44% das emissões de GHG, enquanto os veículos pesados foram responsáveis por 18,4% destas (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2016).

2.2 BIOCOMBUSTÍVEIS

Conforme Rodriguez et al. (2011), a promoção ao uso de recursos energéticos renováveis são prioridades em todo o mundo. Biocombustíveis são vistos como recursos sustentáveis, com o objetivo de substituir combustíveis fósseis. De acordo com Boden et al. (2016), os combustíveis fósseis, como gasolina e diesel, são responsáveis por mais de 50% das taxas de emissão de CO₂ na atmosfera. Esse número aumentou em 7% somente no início desta década. Estima-se que, em 2050, a população chegará a 9 bilhões de pessoas, necessitando de 50% mais combustível que os dias atuais. Com isso, a emissão de CO₂ precisará reduzir em mais de 80% (GALOS et al., 2015; WAGNER et al., 2016).

O biodiesel, por exemplo, foi introduzido na matriz energética brasileira em 2005, através da Lei nº 11.097/2005, por meio da adição do biodiesel ao diesel mineral consumido no país. Com isso, o objetivo do Governo Federal era promover um combustível renovável que pudesse promover o desenvolvimento regional, reduzindo as desigualdades sociais, gerando emprego e renda para a população rural. Consequentemente, os custos com a importação de diesel seriam reduzidos (CARVALHO; FERREIRA, 2017)

Dentre os biocombustíveis brasileiros, o mais utilizado é o etanol, sendo este produzido, principalmente, a partir da cana-de-açúcar. A produção e o uso do etanol como combustível teve um crescimento considerável na última década, a partir da popularização de motores *flex-fuel*, os quais ocupam mais 90% do total de veículos produzidos nacionalmente (GARCIA; SPERLING, 2017; EPE, 2012). Este pode ser utilizado na mistura com a gasolina (etanol anidro) ou diretamente como combustível (etanol hidratado – E94W6). Atualmente, a percentagem autorizada de mistura de álcool na gasolina comum é de 27%, enquanto a gasolina premium recebe até 25% de etanol.

2.2.1 Etanol

O etanol é um combustível oxigenado da família dos álcoois, cuja formulação é dada por C_2H_5OH . Em temperatura ambiente, este se apresenta em estado líquido e é altamente miscível em água. É um composto químico inflamável, podendo entrar em combustão, se submetido a uma fonte de calor, a partir de 13 °C. Em sua composição, a massa molecular do etanol possui 52,14% de carbono, 13,13% de hidrogênio e 34,73% de oxigênio, tendo poder calorífico inferior de 27 MJ/kg (NOVACANA, 2018; FAGUNDEZ, 2016).

A produção de etanol é conduzida a partir da fermentação de açúcares provenientes de diferentes culturas agrícolas. Dentre estas, destacam-se: trigo, milho, centeio, sorgo, cana-de-açúcar, beterraba, mandioca, entre outras. Os principais passos para a produção de etanol a partir de cereais são: moagem, sacarificação, fermentação, destilação e desidratação (WALKER, 2010).

O Brasil é o maior exportador e o 2º maior produtor mundial, atrás apenas dos Estados Unidos. Em 2016, o país produziu mais de 14 bilhões de litros, exportando aproximadamente 135 milhões de litros (DU; CARRIQUIRY, 2013; MDIC, 2017). No Brasil, destaca-se a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar. Em média, uma tonelada de cana-de-açúcar produz em torno de 90 litros de etanol hidratado combustível (EHC) ou 85 litros de etanol anidro combustível (EAC). Neste tipo de produção, o bagaço restante pode ser queimado em fornalhas para geração de vapor e aumento da eficiência global do processo por meio de aquecimento direto ou geração de energia elétrica em turbinas a vapor (FILHO, 2016; DIAS et al., 2010; 2011). Além disso, Pazuch et al. (2017) relatam que os líquidos residuais resultantes da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar pode também ser utilizado na produção de biogás, para aquecimento e geração de energia.

A comercialização em larga escala de etanol teve maior destaque em 1973, devido à crise do petróleo, causada pelo embargo ao fornecimento de petróleo aos Estados Unidos e parte da Europa. Em 1975, durante o governo de Ernesto Geisel, foi criado o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), com o objetivo de financiar pesquisas, a fim de substituir os veículos movidos a combustíveis oriundos do petróleo por automóveis movidos a álcool. Este programa representou o marco na evolução do etanol no mercado

brasileiro, sendo dividido em três etapas: a primeira se inicia em 1975 a 1979; a segunda, de 1980 a 1990 (auge do PROÁLCOOL) e a terceira, de 1991 a 2003. No ano de 1977, tomou-se a decisão de adicionar 12% de etanol anidro à gasolina. Em 1979, aconteceu a segunda crise petrolífera, onde o preço do barril teve um aumento significativo e culminou no lançamento do primeiro automóvel movido a álcool, com produção em série. Na década de 80, o etanol foi usado de forma intensa pela frota nacional de veículos. Todavia, na década de 90, o etanol perdeu mercado, em razão de seu alto custo de produção. Com isso, tornou-se desvantajoso em relação à gasolina, reduzindo significativamente a aquisição de veículos abastecidos a álcool. Na década de 2000, a nova alta no preço do petróleo retomou a discussão da dependência de combustíveis fósseis, estimulando a busca de fontes alternativas renováveis de energia. Houve também uma maior conscientização sobre o Protocolo de Kyoto, de modo que o Brasil presenciou um aumento dos canaviais, com o objetivo de ofertar, em elevada escala, o combustível alternativo e renovável (LIMA, 2011; CRUZ et al., 2010).

Atualmente, os motores *flex-fuel* estão presentes na grande maioria da frota de veículos nacionais, onde os consumidores podem optar em abastecer com etanol hidratado (E94W6) ou gasolina do tipo comum (E27). Além disso, a maioria dos motores *flex-fuel* aceitam qualquer mistura de gasolina e etanol. Em alguns carros, estes rodam também com gás natural, sendo conhecidos por veículos tri-fuel ou tetra-fuel, em referência a possível utilização ainda de gasolina pura sem adição de etanol, vendida em outros países da América Latina (BENTIVOGLIO et al., 2016; MACHADO et al., 2015).

A produção de etanol pode ser adaptada, de acordo com a cultura agrícola local disponível, na qual não reduz somente a dependência de combustíveis fósseis, como também estimula a economia local. Em análises *well-to-wheel*, a utilização do etanol, em comparação com a gasolina e o diesel em redução significativa na emissão de GHG, pois a maior parte desses gases são absorvidos pelo próprio cultivo. A análise *well-to-wheel*, desenvolvida pelo *Argonne National Laboratory*, é uma abordagem utilizada para avaliar tais emissões, visto que é realizado um balanço energético desde o cultivo da planta até sua combustão, passando por todas as etapas de produção e transporte. Esta análise difere da abordagem *tank-to-wheel* (tanque à roda), pois esta última considera apenas as emissões diretas produzidas pelo uso do veículo, ou seja, pela queima do

combustível. (LANZANOVA et al., 2016; MAROUN; LA ROVERE, 2014; CORREA et al., 2017).

Pesquisas apontam que a emissão de GHG, através da queima do etanol, é menor que dos combustíveis fósseis (CORREA et al., 2017). É importante salientar que as emissões na análise WTT são representativas do processo produtivo do combustível. No caso das misturas etanol-água, as emissões variam conforme os processos produtivos. Portanto, dependendo do processo produtivo é possível se chegar a uma emissão próxima de zero, ou mesmo negativa de CO₂, ao se contabilizar todo o ciclo de vida do biocombustível (WTW). É importante destacar que a diferença nas emissões de gases poluentes do combustível utilizado (TTW), quando se compara E100 e E0, é mínima e os benefícios principais são resultantes a partir do modo de produção do combustível. Não obstante, o uso de etanol (hidratado, super-hidratado e anidro) ainda está ligado ao seu preço de produção, o qual está diretamente relacionado ao gasto energético do ciclo de produção de biocombustíveis

Quadro 3 - Emissões de GEE nas análises WTT, WTW e TTW, em diferentes combustíveis

COMBUSTÍVEL	WTT g CO₂/km	WTW g CO₂/km	TTW g CO₂/km
E100	-127 a 30	146	19 a 176
E85	-82 a 29	143	61 a 171
E20	6 a 28	148	154 a 176
E10	17 a 28	150	166 a 178
Gasolina	29	156	185
Diesel	25	120	145

FONTE: COWI (2015)

Considerando o quadro acima, percebe-se que na análise WTT há menores emissões de GHG que as demais. Um fator que contribui para isso é a cogeração de energia elétrica, especialmente nas usinas de açúcar e etanol. Essa atividade consiste em utilizar o bagaço da cana (resíduo proveniente do processo produtivo) como fonte de energia (CASTRILLON et al., 2018).

Outra consequência do sistema de cogeração é a produção de etanol de segunda geração (etanol 2G). Este tipo de combustível é proveniente das sobras do processo produtivo do etanol e açúcar (bagaço, resíduo lignocelulósico). Ao extrair o caldo da cana-de-açúcar, o bagaço passa pelas mesmas etapas de produção do etanol (hidratado e anidro) (CONTRERAS-LISPERGUER et al., 2018). De acordo com Dias et al. (2013), para que haja produção de etanol 2G em larga escala, é necessário altos investimentos em tecnologia na infraestrutura produtiva. No estudo realizado, foram necessários 133 milhões de reais para processar 462 toneladas de resíduo lignocelulósico. Apesar do alto custo, esta forma de produção está diretamente relacionada com a ideia de desenvolvimento sustentável.

2.2.1.1 Processo Produtivo do etanol

Uma cadeia de produção pode ser definida como o conjunto de atividades necessárias para transformar uma determinada matéria-prima em produto final. Uma cadeia de produção é constituída pelos agentes produtores de insumos, pelos produtores de matéria-prima, pelos agentes transformadores (geralmente indústria de transformação), pelos agentes distribuidores e pelo consumidor final (MONTEIRO et al., 2016)

A cadeia produtiva do etanol pode ser resumida em: plantio, colheita, acondicionamento, moagem e extração, fermentação, destilação e desidratação (esta última não presente da produção do ESHC). O Brasil, como o segundo maior produtor de etanol do mundo, perdendo somente para os Estados Unidos, possui uma das matrizes energéticas mais limpas do planeta, sendo que fontes renováveis de energia representam quase 50%. O país se destaca também na produção e no uso do etanol como combustível, sendo mais avançado tecnologicamente nesse setor que os Estados Unidos. Dessa maneira, o país tem trabalhado não só no sentido de aumentar sua produção para combustível, a partir da cana-de-açúcar, como também de transferir sua experiência e tecnologia para que outros países tropicais, que dispõem de terras, mão-de-obra e radiação solar intensa (condições básicas para o cultivo da cana-de-açúcar em larga escala), possam ser produtores e exportadores de etanol, aumentando e diversificando sua oferta no mercado mundial (FAGUNDES, 2013).

A cana-de-açúcar é uma planta que consiste em fibra, caldo e pequenos sólidos dissolvidos, em proporções variadas. A formação da sacarose, presente no caldo e na fibra, dá-se pela maturação. A maturação, ou seja, a síntese de açúcares e estocagem de sacarose ocorre de cima para baixo. Fatores como o clima, o solo e a genética da cana influenciam nesse teor de sacarose, também chamado de brix. O planejamento para o plantio da cana deve contemplar a variedade da cana a ser utilizada, os adubos específicos, os defensivos contra doenças e pragas, as máquinas e os serviços. Em São Paulo (principal estado produtor de etanol), as variedades de cana podem ser divididas em cana de entressafra, cana de inverno e cana de ano. A cana de entressafra é plantada entre fevereiro e maio e tem um tempo de crescimento de 15 a 18 meses. A cana de inverno é plantada entre o final de maio e setembro, recebe esse nome porque se desenvolve no período de temperaturas mais baixas. Seu período de ocupação de terra é de 12 a 14 meses. A cana de ano é plantada de setembro a novembro e exige solos mais férteis. (UNICA, 2019; SOUSA et al., 2012, CAPUTO, 2006).

A colheita da cana pode ser feita de maneira manual ou mecânica, de acordo com a topografia e dos recursos disponíveis. A colheita manual entrega a cana-de-açúcar inteira, e está associada às queimadas, prática que, além de representar perigo aos trabalhadores, é fonte de poluição e danos ambientais. Já a colheita mecânica é mais produtiva, porém mais onerosa, e entrega a cana picada em toletes de 20cm a 25cm. Só pode ser executada em terrenos com menos de 12% de declive e tem a vantagem de fornecer cobertura verde para manter a umidade do solo, constituída da palha da cana colhida. A cana-de-açúcar não pode ser estocada por mais de dois dias, para evitar a perda do teor de sacarose (SAGARDI et al., 2014, SOUSA et al., 2012).

Após feita a colheita da matéria-prima, é realizado o transporte da cana até a usina. No Brasil, o modal logístico mais utilizado nessa atividade é o rodoviário. Para saber o peso da carga, os caminhões são pesados antes e depois do descarregamento. Também são realizados controles de qualidade do insumo, ao recolher algumas amostras para análise. Nesta, mede-se o teor de sacarose da cana. Após esta etapa, a cana pode ser estocada ou ir para o processo de moagem. Todavia, em virtude da decomposição bacteriológica, a qual diminui o teor de açúcar, o material estocado deve ser consumido rapidamente, a fim de se obter etanol de melhor qualidade. De acordo com a COPERSUCAR (2019), nas usinas, grande parte da cana estocada é oriunda da

colheita manual, pois a área de contato da cana em toletes com o ambiente é maior, acelerando o processo de decomposição.

Antes do insumo se dirigir às moendas ou aos difusores, onde é feita a extração do caldo, precisa passar por um processo de preparação, para a retirada de materiais grosseiros e posterior compactação. São levadas às mesas alimentadoras, que se encarregam de fazer o transporte da cana durante o processo (FAGUNDES, 2013).

A lavagem é efetuada sobre as mesas, e visa à retirada de matérias grosseiras como terra e areia. O preparo da cana é então iniciado, com o objetivo de aumentar sua densidade e realizar o máximo de rompimento das células para liberação do caldo. Ele começa por um conjunto de facas, que nivelam e preparam a cana para o desfibrador, deixando o insumo em pedaços menores. O desfibrador compacta a cana logo na entrada e, em seguida, força sua passagem por uma pequena abertura. Com essa preparação, a cana está pronta para ter seu caldo retirado. No processo de extração do caldo, separam-se as fibras deste, que é o composto principal. Em escala industrial existem dois processos de extração: a moagem e a difusão. (UNICA, 2018; CAPUTO, 2006).

Outro processo de extração da sacarose da cana é a difusão, que está começando a ser adotado no Brasil. Independentemente do método de extração do caldo, o bagaço resultante contém 46% de fibra, 50% de água e 4% de sólidos dissolvidos. A quantidade de bagaço varia entre 240 kg e 280 kg por tonelada de cana e pode servir para a geração de energia. O bagaço proveniente do processo de extração do caldo alimentará as caldeiras, onde será queimado, liberando energia térmica, a ser transformada em energia mecânica nas turbinas a vapor. Essas turbinas acionam os equipamentos da usina, além de geradores para a produção de energia elétrica, que pode ser usada na própria usina, ou vendida como forma de diversificação de renda (UNICA, 2018; COPERSUCAR, 2019).

Finalmente extraído, o caldo ainda contém impurezas. Após o tratamento primário, a massa de caldo resultante passa por medidores de vazão, o que permite melhor controle do processo. Em seguida, é realizado o tratamento químico, com o intuito de retirar pequenas impurezas insolúveis que ainda restaram, além de impurezas solúveis (CAPUTO, 2006).

O processo de fermentação começa com o preparo do fermento. No Brasil, o processo chamado *Melle–Boinot* é o mais utilizado e tem como característica a recuperação da levedura através da centrifugação do vinho. A levedura, por ter o vital papel de transformar a sacarose em etanol, precede de um tratamento anterior, que consiste em diluição com água e adição de ácido sulfúrico, para esterilização. Essa mistura recebe o nome de pé-de-cuba. Com o mosto e o pé-de-cuba prontos, estes são misturados na proporção de 2:1 nas dornas de fermentação, onde os açúcares são finalmente transformados em etanol pelo processo de fermentação (SOUSA et al., 2012).

Após os processos de destilação e de desidratação, tem-se como produto final o etanol hidratado, sendo que o resíduo das operações é conhecido como vinhaça, que se constitui de água e sais sólidos e é usada como fertilizante nas lavouras. O etanol hidratado, produto final dos processos de destilação e desidratação, é uma mistura de etanol e água, com um teor alcoólico de aproximadamente 96°. O etanol hidratado pode assim ser comercializado ou passar por um processo de desidratação. O processo consiste na retirada da água do etanol, deixando-o anidro. A etapa é realizada em colunas de destilação. O etanol, tanto o anidro quanto hidratado, é quantificados através de medidores de vazão e finalmente são enviados para a armazenagem em tanques, onde esperam por sua comercialização (COPERSUCAR, 2019; SAGARDI et al., 2014).

Em relação à distribuição do etanol, a logística no Brasil ainda é onerosa. O país utiliza essencialmente o modal rodoviário para realizar a distribuição do etanol. Uma vez este esteja em condições de ser comercializado, ele pode ser distribuído aos canais de venda. A rota compulsória via base regional de combustíveis é estabelecida pela agência reguladora de combustíveis no Brasil. 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. (GAMA; WIDMER, 2015; SOUSA et al., 2012).

Além dos aspectos legais e dos interesses comerciais envolvidos na interação produtores/distribuidores, a questão de concentrar o controle nos distribuidores também pode ser explicada pela eventual limitação da ANP de efetivamente gerenciar o processo e auditar a qualidade do produto ao longo de toda a cadeia de distribuição. Os órgãos de classe que representam as destilarias de etanol entendem que essa intermediação dos distribuidores no escoamento da produção gera custos desnecessários de transporte e argumentam que se as usinas já produzem, estocam e analisam a qualidade do

produto, poderiam entregá-lo diretamente aos postos de abastecimento nas regiões de consumo próximas às unidades produtoras. A passagem pelas distribuidoras se justifica apenas no caso do etanol anidro, dado o reprocessamento para misturá-lo à gasolina (LOPES et al, 2010).

A comercialização direta do etanol das usinas para os postos é um tema que vem sendo debatido há décadas. A liberação é defendida por grande parte dos produtores de álcool (plantadores de cana e usineiros) e donos de postos de combustíveis. Também recebeu um apoio de última hora do Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE), que incluiu, entre suas propostas, reduzir o preço dos combustíveis na bomba, mas enfrenta resistência das distribuidoras. Para os setores que pressionam pela liberação, a venda direta proporcionaria uma redução no preço final ao consumidor que pode variar de 10% a 30%, dependendo da distância dos postos de combustíveis da usina produtora (UNICA, 2019).

2.2.1.2 Etanol hidratado

O etanol hidratado é o resultado da mistura homogênea de água e etanol, formando uma mistura azeotrópica (ponto de ebulição constante). A etapa de destilação pode ser utilizada para separar o etanol da água, até se chegar a valores próximos à 96% de etanol em água, embora na prática outros processos podem ser utilizados próximo a esse limite azeotrópico dado o menor dispêndio energético. Essa mistura, conhecida como etanol hidratado combustível (EHC) é utilizada diretamente como combustível aos veículos automotores no Brasil (COSTA; SODRÉ, 2010).

De acordo com Lei et al. (2014), a produção de etanol pode ser descrita como um processo dividido em cinco fases diferentes: pré-tratamento da matéria-prima (cana-de-açúcar, milho, sorgo, centeio, mandioca, etc.), hidrólise, fermentação, destilação e desidratação. Após a fase de fermentação, a concentração de etanol em água na mistura, convencionalmente, varia de 6% a 12% (LADISCH; DICK, 1979).

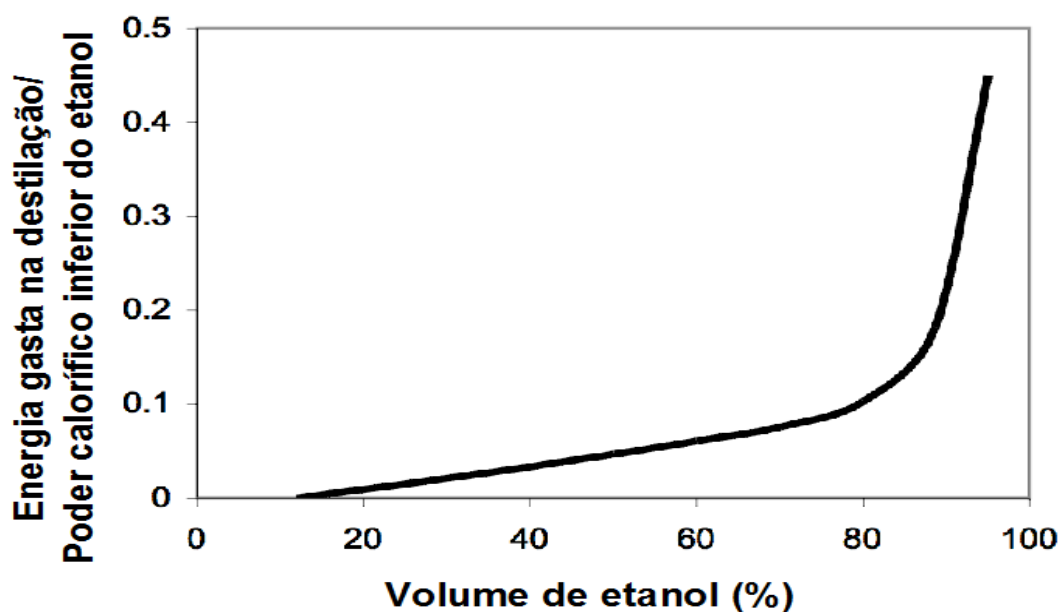
A partir disso, para se obter uma proporção maior de etanol, é necessário que haja um processo de remoção de água. A destilação usando misturas azeotrópicas são comuns pela adição de benzeno, heptano, ou outros hidrocarbonetos na mistura. Essa

nova mistura atinge a ebulição em uma temperatura menor que a mistura de etanol/água somente. (SAFFY et al., 2015).

Saxena et al. (2014) destacam que, durante o processo de produção de etanol, uma quantia significativa de energia é utilizada na remoção da água da mistura, através dos processos de desidratação e destilação (cerca de 37% do total da energia).

Uma das características a serem destacadas é o aumento exponencial do gasto energético durante o processo de destilação, após 80% de etanol em água. Essa tendência é apresentada na figura 3. Na pesquisa realizada por López-Plaza (2014), é proposto o uso de etanol hidratado com uma maior quantia de água que a proporção comum (E94W6), a fim de reduzir os custos de produção.

Figura 3 - Relação entre energia dispendida na destilação – mistura etanol/água



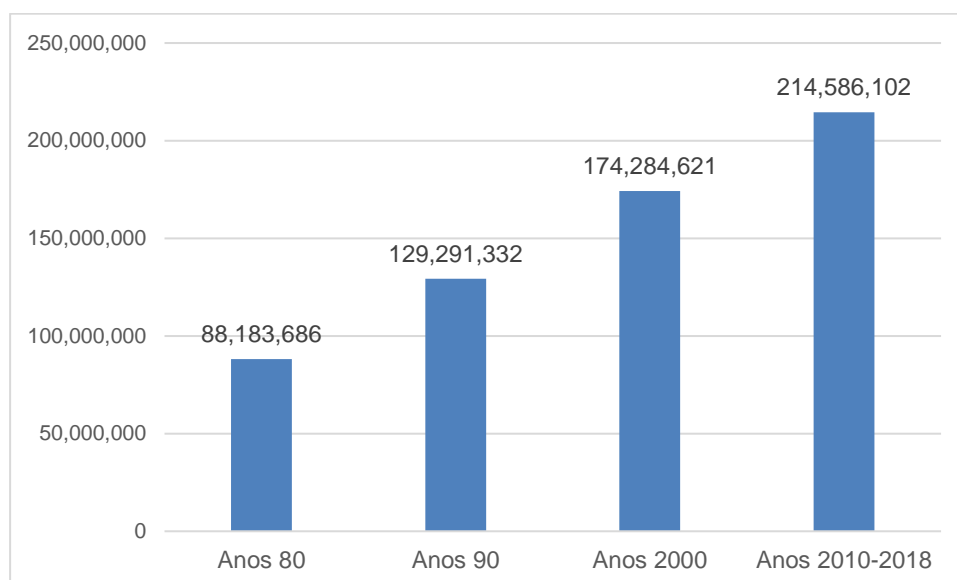
Fonte: Adaptado de López-Plaza (2014)

2.2.1.2.1 Etanol hidratado combustível (E94W6) no Brasil

O Brasil apresenta uma experiência de muitos anos na produção de etanol como combustível de automóveis. Isso se notabilizou através do lançamento do programa PRÓ-ÁLCOOL, em 1975, com o objetivo de diminuir a dependência do uso de combustíveis fósseis, reduzindo os custos com importação (SCACHETTI, 2016).

No ano de 2003, com o sucesso do lançamento dos veículos *flex-fuel*, a demanda pelo biocombustível foi novamente impulsionada, fomentando a realização de novos investimentos no setor sucroalcooleiro (GOMES, 2013). Esse fato está diretamente relacionado com o aumento na produção de etanol hidratado, o qual cresceu continuamente desde a década de 80 (figura 4).

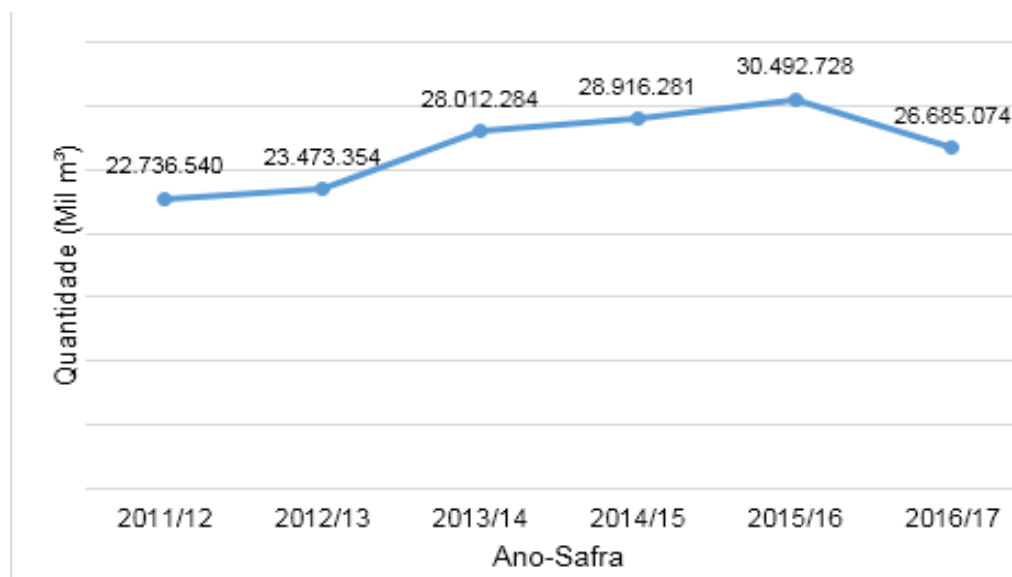
Figura 4 - Produção de etanol (anidro e hidratado) no Brasil, por década, em m³



FONTE: O autor, baseado nos dados da UNICA (2019)

Ao analisar a figura 5, percebe-se que, de 2011 até 2016, a produção de etanol apresenta uma tendência de crescimento. Mesmo com a crise econômica atingindo o setor sucroalcooleiro (fechamento de usinas e adiamento de projetos), a demanda por produtos fabricados a partir da cana-de-açúcar manteve-se crescente. Isso se deu pela necessidade de abastecimento de etanol no mercado interno e pelas diretrizes de utilização de biocombustíveis. No ano-safra 2016-2017, houve uma ligeira queda na produção. Isso se deve a introdução de impostos como o PIS e Cofins sobre os combustíveis (R\$ 120,00 / m³). Anteriormente, os combustíveis eram isentos destes impostos (UNICA, 2018)

Figura 5 - Produção de etanol (anidro e hidratado) no Brasil



Fonte: O autor, baseado nos dados da UNICA (2018)

Em relação a volatilidade do preço do etanol, pode-se associá-lo ao preço do açúcar, ainda que essa variação não seja constante. Há períodos em que o preço do etanol se estabiliza (baixa volatilidade), uma vez que o comportamento do preço do açúcar tem outras determinantes fundamentais de mercado, como: o estoque de açúcar no mundo, fatores climáticos e participação em Bolsas de Valores, através do capital especulativo. Quando ocorre alta volatilidade do preço do etanol, esta se dá por fatores como rendimento na produção açucareira, intervenção do governo no preço do etanol (através de subsídios), variação cambial, etc. (CARPIO; SIMONE DE SOUZA, 2017; LA; COBERTURA; GIRÓN, 2015)

Referente ao mercado consumidor de etanol hidratado no Brasil, de 2013 a 2015, a tendência de aumento significativo, assim como da produção no país. Porém, destaca-se que, de 2015 a 2017, houve uma queda significativa na produção e no consumo de etanol. Pode-se relacionar essa queda no consumo com a introdução de impostos como o PIS e Cofins, a partir de 2016 (UNICA, 2018). O Quadro 4 mostra o consumo e a produção de etanol hidratado no Brasil, de 2013 a 2017, segundo dados da ANP (2017).

Quadro 4 - Comparação entre produção e consumo de etanol hidratado no Brasil

ANO	PRODUÇÃO DE ETANOL (m³)	CONSUMO DE ETANOL (m³)
2013	11.754.962	15.723.378
2014	12.994.115	16.404.693
2015	17.862.739	18.615.111
2016	14.585.844	17.018.066
2017	12.144.072	16.920.221

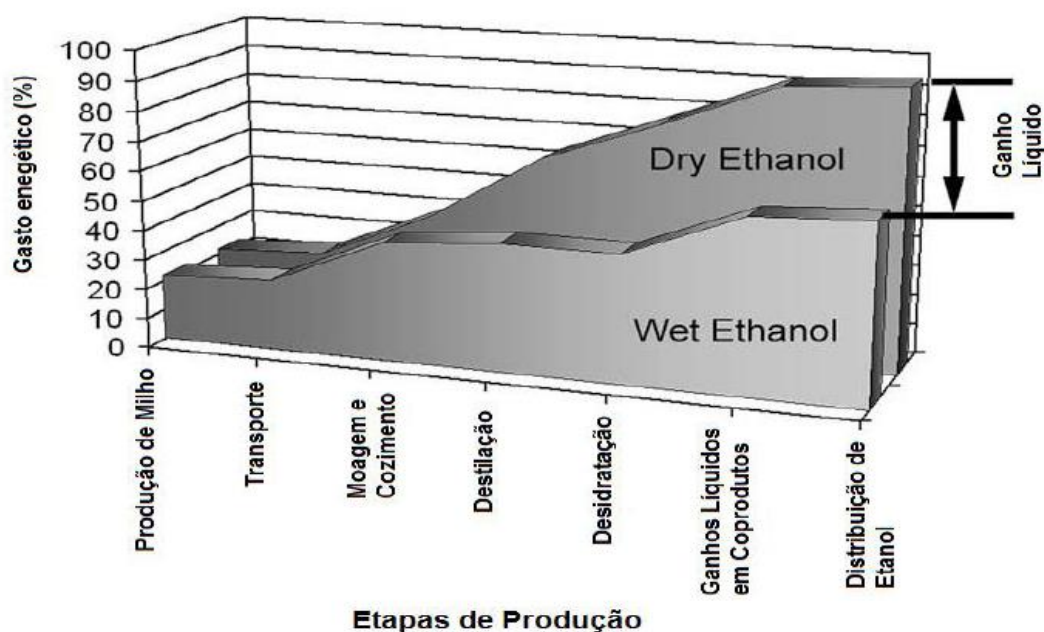
Fonte: Adaptado da ANP (2017).

Mesmo com a queda na produção no período 2015-2017, o governo brasileiro buscou incentivar a produção e consumo de etanol. Em outubro de 2017, foi aprovado no Senado Federal o programa RenovaBio, o qual objetiva dobrar a produção de etanol até 2030 (MME, 2017).

2.2.1.3 Etanol super-hidratado

As etapas produtivas do etanol super-hidratado são as mesmas do etanol hidratado, com exceção da etapa da desidratação. Para que se obtenha etanol com uma certa concentração de água (E80W20, por exemplo), é necessário interromper o processo de destilação anteriormente a obtenção do etanol E94W6. Os trabalhos desenvolvidos por Mack, Aceves e Dibble (2009) apontam que o gasto energético, em algumas etapas produtivas, ao comparar os gastos energéticos na produção de etanol anidro e etanol hidratado podem variar de 3% a 37% como pode ser visto na figura 6, que ilustra a demanda energética nas fases de produção do etanol a partir do milho.

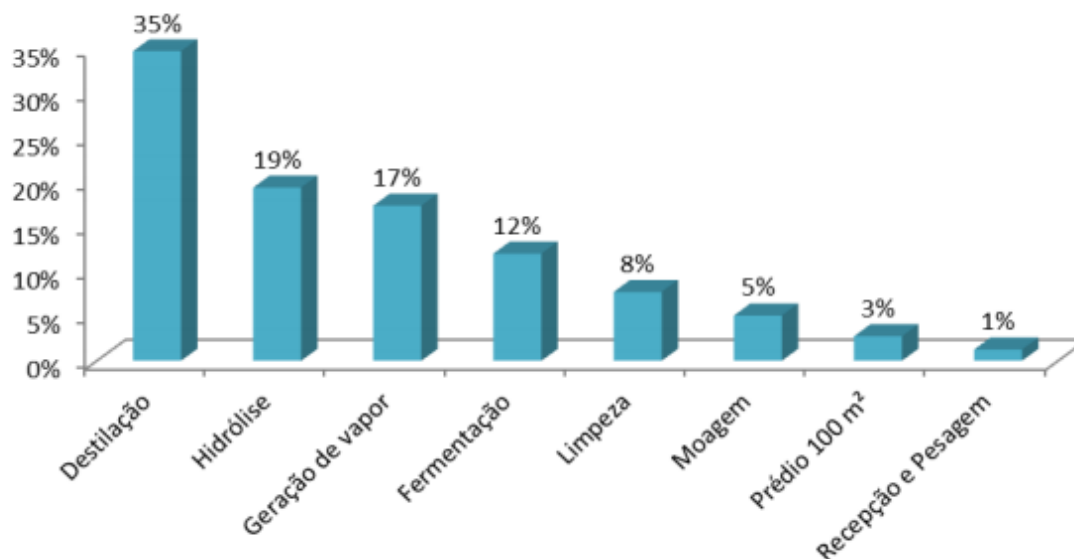
Figura 6 - Comparação do balanço energético entre o etanol anidro e o etanol hidratado (E65W35)



Fonte: Adaptado de Mack, Aceves e Dibble (2009)

O uso do etanol super-hidratado como combustível para mobilidade e geração de energia apresenta vantagens e desvantagens. Como ponto positivo tem-se uma redução dos custos de produção deste combustível, haja vista que o processo de destilação corresponde a 35% do custo total de produção de etanol a partir da batata-doce (processamento de 2000 kg), conforme a figura 7 representa. Tabora (2014) realizou estudo sobre os custos envolvidos na produção de etanol, em um prédio de 100 m². Para isso, contabilizou todas as etapas produtivas, relacionando-as com o gasto energético de cada uma. Chegou-se à conclusão de que a etapa da destilação é a mais onerosa no processo produtivo, correspondendo a 35% dos custos de produção, seguido da etapa de hidrólise (19%). Isso se dá pelo fato de a etapa da destilação possuir maior custo com mão-de-obra e energia elétrica durante o processo produtivo. Estes elementos correspondem a 94,7% do custo total da etapa “destilação”.

Figura 7 - Distribuição dos custos por atividade

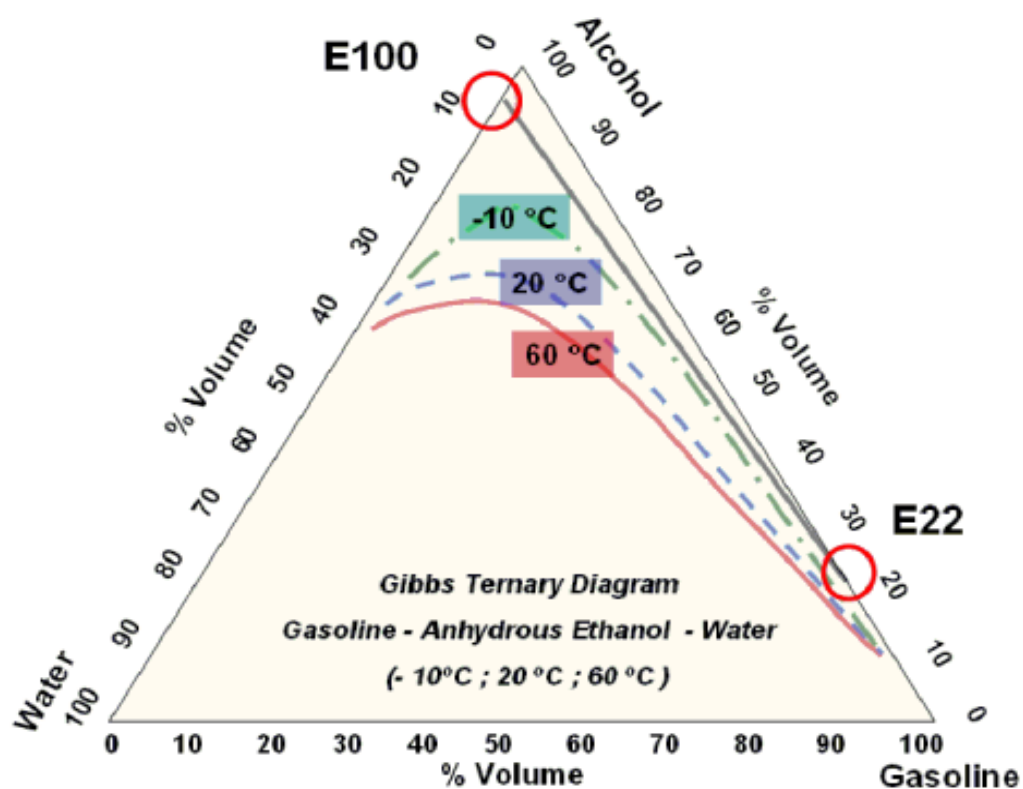


Fonte: TABORDA (2014)

Uma desvantagem no uso é o fato de o etanol com maior concentração de água na mistura impossibilitar o uso de gasolina em conjunto, como nos veículos *flex-fuel*. Água, gasolina e etanol são miscíveis, até uma proporção limite de água, em função da temperatura da mistura, conforme a figura 8. Água e gasolina são líquidos não miscíveis, embora a adição de etanol, o qual é sim miscível em gasolina, possibilita a manutenção de uma mistura ternária homogênea até certo limite de temperatura (FILHO, 2016). Nessa mesma figura é mencionada a mistura E22, a qual foi por muito tempo utilizada no mercado nacional de combustíveis, embora atualmente a gasolina comum contenha 27% de etanol em sua formulação como já mencionado, referida portanto como E27.

Motores *flex-fuel* operam de maneira satisfatória com a mistura gasolina-etanol-água, desde que um máximo de 6% de água em volume seja utilizado para as condições ambientes encontradas no território brasileiro. Caso uma mistura E80W20, por exemplo, esteja presente no tanque de combustível de um veículo, sob temperatura ambiente de 20° C, e o condutor adicionar gasolina à mistura, ocorrerá separação de fases, o que é inaceitável do ponto de vista do funcionamento do veículo (MELO et al, 2012; COSTA, SODRÉ, 2010).

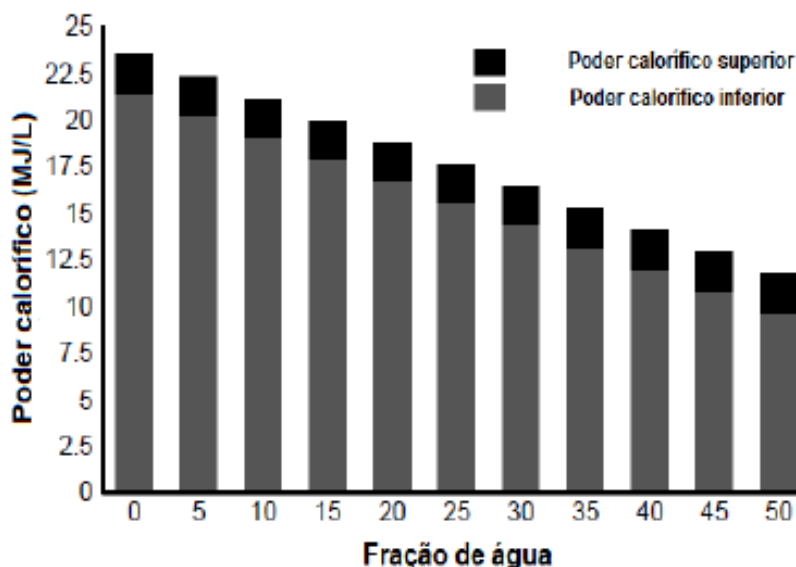
Figura 8 - Diagrama da fase de separação da mistura gasolina-etanol-água



FONTE: FILHO (2016)

Outra desvantagem do etanol super-hidratado para uso automotivo é a redução do poder calorífico do combustível em consequência da crescente fração de água, conforme pode ser visto na Figura 9. Isso tem impacto direto na autonomia do veículo e consumo volumétrico de combustível, uma vez que um mesmo volume de mistura apresenta menos energia, e portanto menor capacidade de gerar trabalho (BREAUX; ACHARYA, 2011).

Figura 9 - Efeito da água no poder calorífico do etanol



FONTE: BREAU & ACHARYA (2011)

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DISTRIBUIÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DO ETANOL NO BRASIL

A fim de melhor analisar a viabilidade do etanol super-hidratado, é necessária a análise de fatores críticos de sucesso relacionados ao combustível em estudo. O primeiro deles é o aspecto técnico, onde serão reconsiderados pontos já abordados no capítulo 2.2 desta dissertação. Outro ponto importante se refere ao aspecto financeiro, onde são discutidos os custos de produção, impostos e custos de distribuição do etanol. Finalmente, será abordado o aspecto socioambiental, através de políticas de incentivo ao uso de biocombustíveis, redução de emissão de GHG e garantia da segurança energética nacional (GARCIA; SPERLING, 2017; BELINCANTA et al., 2016; DEMCZUK; PADULA, 2017).

2.3.1 Aspectos técnicos ligados ao etanol no Brasil

De acordo com Leal e D'Agosto (2011), a infraestrutura logística é fundamental para o escoamento de produtos, seja tipo *commodities*, seja produtos oriundos de atividade produtiva industrial. Boas condições das vias, custos de manutenção de veículos, variabilidade em relação ao tempo de entrega, tempo e velocidade determinam

a escolha de como os produtos serão transportados. Especificamente sobre o etanol, este é transportado no Brasil através do modal rodoviário, aquaviário e dutoviário. Este último em menor escala, concentrado em algumas cidades do estado de São Paulo.

Todavia, a infraestrutura logística, por si só, não garante viabilidade técnica a um combustível. Também deve ser considerado o poder calorífico que possui. Em outras palavras, é a quantidade de energia contida em um determinado combustível. Por exemplo, o poder calorífico da gasolina é de 47 Mj/kg, enquanto o do etanol hidratado é de 26 Mj/kg. Isso acarreta em um maior consumo volumétrico do etanol por determinado veículo, em relação à gasolina (BREAUX; ACHARYA, 2011).

Como terceiro aspecto de análise, tem-se a miscibilidade entre elementos. Para que haja a mistura entre gasolina-água-etanol, é necessário que estes possuam determinadas concentrações para que ela ocorra. Em veículos flex-fuel, é possível que a mistura aconteça, desde que sejam respeitadas as seguintes proporções:

- 1) Gasolina: misturada ao etanol anidro (E27)
- 2) Etanol hidratado: mistura com até 6% de água
- 3) Água: 6% em mistura com etanol

Como o combustível em estudo possui uma concentração maior de água na mistura em relação ao EHC (aceito pela legislação vigente), pode ocorrer a separação das fases, não havendo a mistura. Há a necessidade de se adicionar estabilizante de fases, a fim de que haja mistura ternária entre gasolina, água e etanol. Todavia, este fato aumentaria o preço do litro do etanol de 15 a 25% (FILHO, 2016; COSTA; SODRÉ, 2010).

2.3.2 Aspectos financeiros ligados ao etanol no Brasil

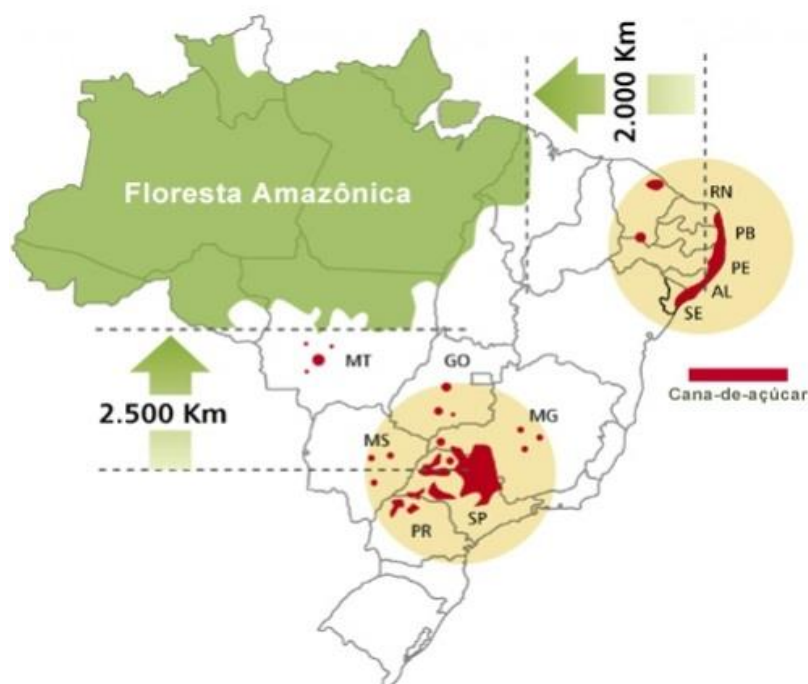
Segundo Dubois et al. (2009), custo representa todo o gasto na aquisição de um ou mais bens e serviços usados na produção de outros bens e/ou serviços e ocorre somente na atividade produtiva, constituindo-se assim, em elemento inerente ao processo de produção da empresa. O custo é um investimento em recursos que estão em processamento e que, em um período próximo, se transformarão, no caso da indústria, em bens manufaturados. Por exemplo, a matéria-prima é um investimento que se mantém como tal durante todo o tempo em que fica em estoque. No momento de sua

utilização na fabricação de um bem, seu custo surge como parte integrante do bem elaborado. Este, por sua vez, é de novo um investimento, já que também fica ativado até o momento da sua venda (SILVA; LINS, 2014).

Em relação ao custo de produção do etanol, três aspectos devem ser considerados para fins de análise: custo da biomassa, custo de processamento e taxa de conversão de biomassa em produtos. O custo de produção de vários combustíveis varia muito ao longo do tempo e também conforme a região produtiva. No caso do etanol, na região Centro-Sul do Brasil, a colheita da cana-de-açúcar (principal matéria-prima do etanol super-hidratado) ocorre entre abril e novembro; já na região Norte-Nordeste, setembro a abril. (MANOCHIO et al., 2017; SEHATPOUR et al. 2017; JONKER et al., 2016; DEPEC, 2016).

Relacionado aos custos logísticos, no Brasil, aproximadamente 90% do etanol é transportado através do modal rodoviário. Os 10% restantes são transportados por dutos ou ferrovias. Do total de 7100 km de dutos para combustíveis líquidos no país, aproximadamente 900 km são usados para transporte do etanol (BELINCANTA et al., 2016). A figura 10 mostra as regiões produtoras de cana-de-açúcar e etanol no Brasil.

Figura 10 - Distribuição das regiões produtoras de cana-de-açúcar e etanol no Brasil.



Fonte: UNICA (2017)

As principais regiões produtoras de etanol são SP, PR, MS, MT, GO, AL, SE e PE. O estado de São Paulo é o principal produtor de etanol a partir de cana-de-açúcar. Já o estado do MT, por exemplo, é o maior produtor de etanol a partir do milho. A grande desvantagem da produção de etanol mato-grossense é a grande distância do estado com os portos, para escoamento da produção. Em média, 1000 km entre os armazéns de estoque e os portos e grande parte dos produtores dependem do modal rodoviário para escoar a produção de grãos (CNT, 2015; ECKERT et al., 2018).

Esse fato faz com que a produção e o uso de etanol não sejam homogêneos entre os estados brasileiros. Por exemplo, nos estados produtores de cana-de-açúcar, o consumo de etanol é maior do que nos estados que não o produzem. Uma das razões que fazem com que haja um consumo heterogêneo do etanol é a composição do preço do combustível, pelo fato de o Imposto sobre a circulação de mercadorias e serviços (ICMS) e o PIS/COFINS (impostos que incidem sobre o etanol) terem diferentes valores entre os estados brasileiros. Estas variam, no ano de 2018, entre 17% a 20%. O quadro 5 e 6 elucidam o panorama apresentado (DEMCZUK; PADULA, 2017; MAYER et al., 2016).

Quadro 5 - Composição do preço do EHC no Brasil

ITEM	PORCENTAGEM (%)
custos + margem de lucro do produtor	55,7%
ICMS – Produtor	18,2%
PIS/COFINS - Produtor	2,2%
ICMS – Distribuidor	2,0%
PIS/COFINS – Distribuidor	5,4%
Margem de lucro do distribuidor e do posto de combustível	13,0%
ICMS – Posto de combustível	3,5%
Preço Final – Posto de combustível	100

FONTE: MAYER et al. (2016)

Quadro 6 - Valores do ICMS e PIS/COFINS sobre o etanol, por estado

ESTADO	ICMS + PIS/COFINS (R\$/L)
Acre	1,160
Alagoas	1,110
Amazonas	1,083
Amapá	1,189
Bahia	0,882
Ceará	1,034
Distrito Federal	1,245
Espírito Santo	1,148
Goiás	0,969
Maranhão	1,134
Mato Grosso	0,896
Mato Grosso do Sul	1,100
Minas Gerais	0,783
Pará	1,137
Paraíba	0,961
Pernambuco	0,954

Piauí	0,893
Paraná	0,791
Rio de Janeiro	1,160
Rio Grande do Norte	0,996
Rio Grande do Sul	1,457
Rondônia	1,145
Roraima	1,159
Santa Catarina	1,112
Sergipe	1,156
São Paulo	0,588
Tocantins	1,245

FONTE: FECOMBUSTÍVEIS (2018)

A Contribuição de Intervenção do Domínio Econômico (CIDE) não incide sobre o etanol, sendo somente aplicada sobre outros combustíveis como a gasolina e o diesel. Em relação às alíquotas do ICMS, estas variam conforme a Unidade Federativa (UF). Por exemplo, a alíquota do ICMS em São Paulo – maior produtor de etanol no Brasil – é de 12% (gasolina é 25% em SP). Já no Rio Grande do Sul, ela está em 30%. No Brasil, a relação de preços gasolina-etanol define a preferência de consumo por parte dos clientes. Relacionando com o poder calorífico dos combustíveis, o etanol se torna mais atrativo economicamente para o consumidor quando custa cerca de 70% menos que a gasolina. (FECOMBUSTIVEIS, 2018; MAYER et al., 2016)

Como resultado das diferentes áreas de produção sucroalcooleira, custos logísticos e variações nos valores dos impostos estaduais, a maior produção e consumo de etanol está concentrado no estado de São Paulo, o qual concentra 58% da produção nacional de cana-de-açúcar e 57,3% do consumo de etanol (DEMCZUK; PADULA, 2017; UNICA, 2018).

Em relação à produtividade, a região Sudeste do Brasil detém 54,74% da produção total de etanol no Brasil, seguido da região Centro-Oeste (18,49%) e Nordeste (17,76%). Isso se dá pelo clima ser favorável a produção de cana-de-açúcar e milho (este no estado de Mato Grosso) – matérias-primas para a produção de etanol (UNICA, 2018). O Quadro 7 relaciona produção e tamanho dos mercados consumidores de etanol no Brasil.

Quadro 7 - Produção e consumo de etanol hidratado combustível no Brasil, por região

REGIÃO	PRODUÇÃO	CONSUMO
Sudeste	54,74%	68,35%
Centro-Oeste	18,49%	14,14%
Nordeste	17,76%	7,66%
Sul	8,03%	8,95%
Norte	0,98%	0,90%

FONTE: adaptado de UNICA (2018)

Em relação ao transporte do etanol hidratado, no Brasil, este se dá predominantemente através do modal rodoviário (cerca de 60%). Para Bowersox e Closs (2006) os custos de transporte são influenciados, basicamente por fatores econômicos como a distância, o volume, a densidade, a facilidade de acondicionamento e de manuseio, a responsabilidade e o mercado. Um problema comum na distribuição de etanol é a localização das usinas. Pelo fato de estas estarem muito distantes das distribuidoras de combustível, o custo de distribuição aumenta, conforma a distância entre usinas-distribuidoras. Além disso, mais da metade das estradas brasileiras apresentam condições inadequadas de transporte, acarretando em um aumento de 26% no custo de distribuição de etanol hidratado. (ECKERT et al., 2018; NOVACANA, 2018). O Quadro 8 apresenta os valores de fretes de etanol no Brasil. Ressalta-se que esses valores são referentes a dezembro de 2018, podendo haver variações no valor final do frete no decorrer do tempo.

Quadro 8 - Valores de frete de etanol no Brasil

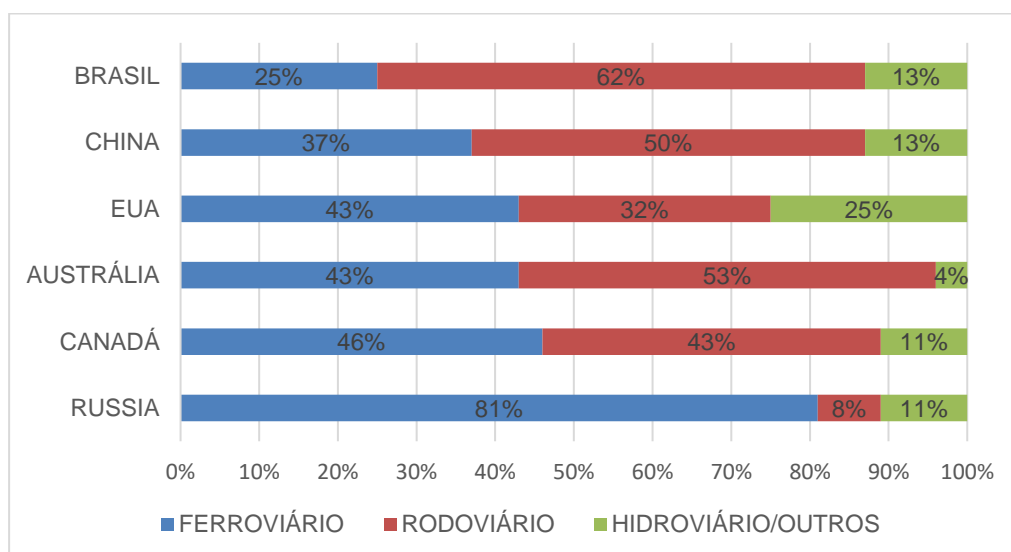
ORIGEM	UF	DESTINO	UF	FRETE (R\$/ton)	DISTÂNCIA (km)	FRETE (R\$/ton/km)
Aldeias Altas	MA	São Luís	MA	80,00	358	4,48
Araçatuba	SP	Sarandi	PR	65,01	343	5,28
Barra Bonita	SP	Paulínia	SP	58,07	221	3,81
Campos dos Goytacazes	RJ	Duque de Caxias	RJ	70,00	304	4,34
Ribeirão Preto	SP	Paulínia	SP	67,00	214	3,19

Sirinhaém	PE	Fortaleza	CE	180,00	852	4,73
Porto Calvo	AL	São Francisco do Conde	BA	150,00	690	4,60

FONTE: SIFRECA (2019)

Relacionado ao transporte de combustível, o Brasil utiliza em larga escala o modal rodoviário. De acordo com Boloventa e Biaggioni (2016), são utilizados 3 modais logísticos para o escoamento de etanol: rodoviário, ferroviário e hidroviário. Estes 2 últimos em menor escala. É abordado que existem oito centros coletores de etanol, interligados à malha ferroviária. Esse etanol pode atingir os portos de Paranaguá, Santos e São Sebastião. Iniciou-se, em 2010, a construção de um etanolduto, o qual transportaria etanol de Jataí-GO à Caraguatatuba-SP. Os maiores entraves são o alto custo de instalação e regulamentação ambiental.

Figura 11 - Comparação entre os modais dos países Brasil, Canadá, Austrália, Rússia, China e EUA



FONTE: o autor, adaptado de NOVACANA (2019)

Em comparação a outros países com grande dimensão geográfica, o Brasil não utiliza com êxito os modais ferroviário e hidroviário, os quais possuem capacidade de carga superior ao modal rodoviário. A figura 11 compara os modais utilizados no transporte de cargas por outros países de grande extensão territorial e o Brasil. Percebe-se que, na Rússia, o uso do modal ferroviário chega a 81% do escoamento de produção. Já no Brasil, esse índice chega a 25%, não sendo aproveitado de forma eficaz

2.3.3 Aspectos socioambientais relacionados ao etanol

Diante da crescente preocupação em torno da segurança energética e climática, o etanol produzido a partir de fontes renováveis é visto como uma importante alternativa aos combustíveis fósseis. De acordo com o estudo de Garcia e Sperling (2017) há uma redução potencial na emissão de GEE do etanol como combustível. Os estudos se basearam em dois cenários brasileiros: 1) consumo médio de energia e de matérias-primas (cana-de-açúcar e milho) e 2) valores de consumo energético e de matérias-primas com novas práticas e emprego de tecnologia disponível no país na produção de etanol. O estudo foi conduzido para analisar a emissão de GHG na produção e consumo de etanol. Concluíram que o emprego de novas tecnologias auxiliam na redução da emissão de GHG.

Wang et al. (2014) avaliaram o desempenho das emissões de GHG na produção e consumo de etanol de 1^a e 2^{as} gerações (lignocelulósica, por exemplo). Da mesma forma, a conclusão é que o emprego de tecnologia na produção e consumo favorece a redução na emissão de GHG. Para tanto, fazem-se necessários estudos mais aprofundados, pois em ambas pesquisas não foi considerado o intervalo de tempo entre culturas de cana-de-açúcar, bem como o número de cortes, em relação a colheita da mesma.

Relacionado aos impactos ambientais, a produção de cana-de-açúcar para etanol pode acarretar em diversos tipos de poluição, como a poluição atmosférica, através da queima da cana-de-açúcar; poluição do solo, pelo uso desenfreado de fertilizantes orgânicos e inorgânicos; emissão de GHG, etc. Outro ponto a ser considerado como sério impacto ambiental é a gestão do uso da vinhaça (resíduo pastoso e malcheiroso resultante da destilação fracionada do caldo de cana-de-açúcar). No início do Proálcool, descartava-se diretamente nos solos e cursos d'água e de forma descontrolada nos solos. Atualmente, há um maior controle no uso da vinhaça, pois esta possui nutrientes como cálcio, magnésio e potássio, enriquecendo os solos. (FILOSO et al., 2015; NOVACANA, 2019).

Diante disso, há de se considerar que, em casos de acidentes veiculares, vazamento de dutos, navios cargueiros, caminhões tanque ou até mesmo explosões de reservatórios, o ESHC acarreta em danos menores ao meio ambiente do que outros

combustíveis, como a gasolina e o diesel. Esses acidentes ocorrem, na maioria dos casos, por um problema estrutural nas usinas ou até mesmo pelas más condições das estradas. Destes tipos de acidentes, poucos resultaram em mortes (OLIVARES et al., 2015)

Em relação à segurança energética, o etanol é uma alternativa aos combustíveis consumidos em larga escala. Segundo dados da UNICA (2018), em relação à 2017, houve um aumento no consumo de etanol hidratado combustível (EHC) de 12,57%. De janeiro a setembro do ano de 2018, as vendas do biocombustível cresceram 41,3%, conforme último levantamento da Síntese de Comercialização de Combustíveis divulgado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Mesmo com esse aumento no consumo, o EHC não é um substituto perfeito à gasolina. Isso se dá em função do alto poder calorífico deste combustível. (SZULCZYK et al., 2010; DEMCZUK, PADULA, 2017).

2.4 ABORDAGEM MULTICRITÉRIO COMO APOIO A DECISÃO

A tomada de decisão é um processo inerente que envolve o cotidiano das empresas, desde tarefas simples do dia-a-dia até as decisões mais complexas que podem surtir efeitos a longo prazo. Em um nível ambiental, onde o objetivo é promover sustentabilidade, as tomadas de decisão nunca são simples. Uma das razões é a alta complexidade em melhor definir quais variáveis interferem diretamente no desenvolvimento sustentável. Em linhas gerais, aspectos econômicos, políticos, sociais e técnicos são levados em consideração ao se tomar decisões relativas à sustentabilidade (SEHATPOUR; KAZEMI; SEHATPOUR, 2017; ZANGHELINI; CHERUBINI; SOARES, 2018).

As metodologias multicritério têm sido amplamente utilizadas para avaliar o desempenho das empresas nas esferas social, ambiental e de governança, pois possuem características multidimensionais, a fim de apresentar soluções para os problemas levantados pelos tomadores de decisão, ou seja, os gestores. Contudo, considerando o grande número de meios de tomada de decisão, não há uma conclusão geral sobre qual é o melhor método multicritério de apoio a decisão (ESCRIG-OLMEDO et al., 2017; BAUDRY; MACHARIS; VALLÉE, 2018)

Ao longo dessa década, muitas pesquisas foram desenvolvidas no campo da avaliação e análise de diferentes combustíveis e biocombustíveis. Nessas pesquisas foram utilizados variados métodos de análise multicritério, dentre os quais tem-se: PROMETHEE-GAIA, amplamente utilizado em pesquisas sobre meio ambiente, fontes alternativas de energia, etc; ELECTRE (*elimination et choix traduisant la réalité*), utilizado para avaliar a sustentabilidade dos diferentes meios de transporte; *Fuzzy* TOPSIS (Técnica de ordem de preferência por semelhança a uma solução ideal), AHP (*Analytic Hierarchy Process*), entre outras. Cada um dos métodos mencionados utiliza critérios quanti e qualitativos, para melhor auxiliar na tomada de decisões (SURAWSKI et al., 2013).

De acordo com Cló; Battles; Zoppoli (2013), para realizar uma abordagem multicritério é necessário seguir quatro etapas básicas:

- 1) Ter um conjunto de múltiplos critérios relativos aos aspectos econômicos, ambientais e processuais;
- 2) Ponderar cada critério;
- 3) Avaliar as alternativas, baseando-se nas ponderações realizadas anteriormente;
- 4) Chegar a um valor único, que representa a melhor decisão a ser tomada.

As diferentes abordagens multicritério têm um grande potencial em obter o melhor resultado, a fim de melhor apoiar os gestores nas diferentes tomadas de decisão. Geralmente, diferentes cenários ou alternativas são comparadas pelos critérios previamente determinados. Ainda, diferentes metodologias ou ferramentas podem ser aplicadas para uma quantificação mais robusta do desempenho de diferentes cenários sob tais critérios (ZANGHELINI; CHERUBINI; SOARES, 2018).

Relacionando com diferentes estudos sobre combustíveis, o uso de métodos multicritério combinados é comum. Turcksin et al. (2011) aplicaram o método combinado AHP-PROMETHEE para avaliar o apoio de *stakeholders*, ou seja, de partes interessadas no uso de diferentes biocombustíveis na frota de veículos na Bélgica. Para isso, definiram como critérios de análise: economia, meio ambiente e aspectos técnicos. Já Li et al. (2019) utilizaram o método *Vlase Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje* (VIKOR), ou Solução Multicritério de Otimização e Compromisso, combinado ao método

AHP, a fim de melhor avaliar políticas de implementação de energias limpas na China. Campos-Guzmán et al. (2019) utilizaram o método combinado AHP-VIKOR-Fuzzy TOPSIS a fim de realizar a Análise do Ciclo de Vida de sistemas de energias renováveis, como o etanol, obtendo indicadores de sustentabilidade. Portanto, ao se realizar estudos de viabilidade sobre determinados biocombustíveis ou políticas relacionadas a estes, é comum o uso de métodos multicritérios combinados, como por exemplo o método *Fuzzy-AHP*. Com essas combinações, busca-se obter resultados de pesquisa mais robustos a respeito de políticas e uso de biocombustíveis, como o etanol.

2.4.1 Analytic Hierarchy Process (AHP)

O método de análise multicritério conhecido por Processo Analítico Hierárquico (AHP – *Analytic Hierarchy Process*) é uma ferramenta de apoio à tomada de decisão que permite identificar a melhor alternativa em um grupo de candidatas, através de critérios pré-definidos de seleção. É um método de análise multicritério baseado em um processo de ponderação aditiva, no qual os diversos atributos relevantes são representados através de sua importância relativa. O AHP tem sido extensivamente discutido em aplicações de engenharia que envolvem decisões financeiras associadas a atributos não-financeiros. A especialidade deste método é sua flexibilidade ao integrar diferentes técnicas de Programação Linear, Desenvolvimento da função Qualidade, Lógica *Fuzzy*, etc. Isso permite ao usuário obter benefícios a partir de métodos combinados e, conseqüentemente, atingir o objetivo desejado da melhor maneira possível (VAIDYA; KUMAR, 2006; SAATY, 1996).

No método AHP, é usada uma estrutura hierárquica multinível dos objetivos, critérios, subcritérios e alternativas. Os dados pertinentes são derivados pelo uso de um conjunto de comparações pareadas (figura 12). Essas comparações são utilizadas para obter os “valores de importância” dos critérios de decisão, e os indicadores de desempenho relativos aos termos de cada critério de decisão individual. AHP é uma abordagem de autovalor às comparações pareadas. Este método também proporciona uma metodologia utilizando escalas numéricas para mensuração de aspectos quantitativos e qualitativos (TSITA; PILAVACHI, 2013; VAIDYA; KUMAR, 2006). O quadro 9 apresenta as vantagens e desvantagens de se empregar o método AHP em pesquisas.

Figura 12 - Matriz de comparação pareada AHP

	CRITÉRIO 1	CRITÉRIO 2	CRITÉRIO 3
CRITÉRIO 1	1	3	1/5
CRITÉRIO 2	1/3	1	7
CRITÉRIO 3	5	1/7	1

FONTE: o autor, adaptado de SAATY (1996)

Quadro 9 - Vantagens e desvantagens do AHP

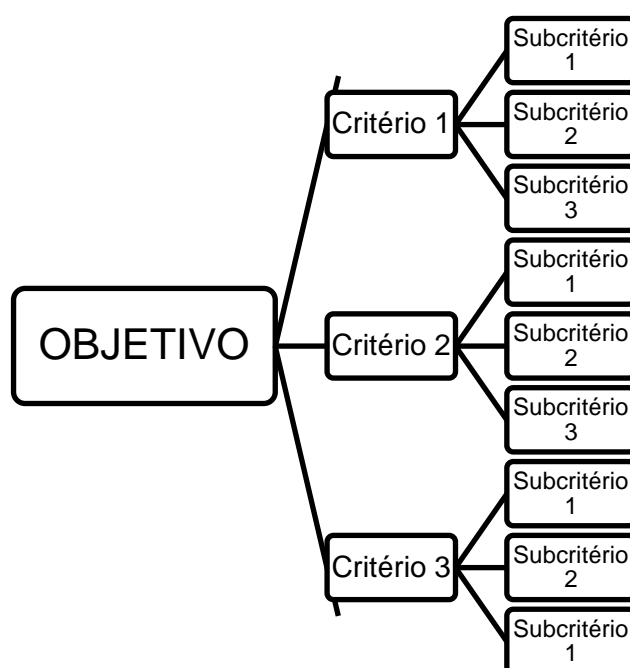
VANTAGENS	DESVANTAGENS
Considerar prioridades relativas dos critérios e alternativas e, assim, representar a melhor alternativa.	Nem sempre há uma solução em equações lineares.
Provê um modelo simples e muito flexível na resolução de problemas.	O requisito computacional é grande, mesmo para pequenos problemas.
Tanto questões objetivas quanto subjetivas ou informações quanti e qualitativas exercem um importante papel durante o processo decisório.	Em combinação com outros métodos, AHP somente permite utilizar números <i>fuzzy</i> triangulares.
É possível mensurar a consistência dos julgamentos dos tomadores de decisão.	AHP tem natureza subjetiva de modelagem do processo.
Programas de computador auxiliam na consistência dos julgamentos dos tomadores de decisão	A metodologia empregada no AHP não oferece absoluta garantia das decisões a serem tomadas.

O Tomador de decisão pode analisar a elasticidade na decisão final ao aplicar a Análise de sensibilidade.	Ao aumentar o número de ordem hierárquica, aumentam-se também as comparações a serem feitas, levando mais tempo e esforço para construir as modelagens.
---	---

FONTE: Adaptado de Oguztimur (2015)

A hierarquização dos critérios e subcritérios é visto como uma vantagem deste método, pois desta maneira auxilia em tomadas de decisões complexas nas organizações. A figura 13 representa o modelo de árvore hierárquica. Esta é fundamental para a aplicação do método, pelo motivo de ser a base de uma construção de modelagem (SAATY, 1996).

Figura 13 - Modelo de árvore hierárquica



FONTE: Adaptado de SAATY (1996)

No método AHP, assim como em outros métodos multicritério, é necessário que sejam processados dados de entrada para solucionar problemas ou dar suporte à tomadas de decisões. Em estudos utilizando métodos multicritério, são consultados

especialistas em determinadas áreas, a fim de diminuir a subjetividade das respostas e, assim, obter respostas mais próximas da realidade. Petrini et al. (2016) analisaram políticas públicas direcionadas à pequenos produtores de etanol. O painel de especialistas contou com profissionais de órgãos representativos dos pequenos agricultores, como EMATER (Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural), Cooperativa Agrícola de Ipiranga de Goiás e Rubiataba-GO e Secretaria de Agricultura do estado de Goiás. Dessa forma, torna-se fundamental a aplicação de instrumentos de avaliação, como questionários tipo *survey*, à especialistas em determinadas áreas, a fim de buscar melhores soluções a determinados problemas ou auxiliar na tomadas de decisões.

2.4.2 Lógica Fuzzy

Um conjunto *fuzzy* \tilde{A} em X é definido por uma equação:

$$\tilde{A} = \{x, \mu_{\tilde{A}}(x) / x \in X\} \quad (1)$$

em que $\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0,1]$ é chamada de função de pertinência de \tilde{A} e $\mu_{\tilde{A}}(x)$ é o grau de pertinência de x em \tilde{A} . O módulo de Fuzzificação efetua um mapeamento entre os valores numéricos das variáveis *crisp* de entrada do sistema para graus de compatibilidade com conceitos linguísticos. A atuação de um especialista na área do fenômeno a ser modelado é de fundamental importância para colaborar na construção das funções de pertinência para a descrição das entradas (GANGA et al., 2011; ZADEH, 1978).

A teoria de conjuntos *fuzzy* tem sido utilizada para modelar o processo de tomada de decisão, baseado em informações incertas ou imprecisas, tais os julgamentos de gestores ou tomadores de decisão (ZADEH, 1978). De acordo com Zimmermann (1980), existem três razões principais para se utilizar a teoria de conjuntos *fuzzy*:

- a) A utilização de variáveis linguísticas tornam mais naturais as interfaces dos sistemas tanto com os especialistas quanto com o usuário;
- b) A base de conhecimento de um sistema especialista tem como característica principal ser um repositório do conhecimento humano, o qual é impreciso por

natureza. Essa base é uma coleção de regras e fatos que, em sua maioria, não são totalmente certas nem consistentes.

- c) A incerteza armazenada na base de conhecimento induz a conclusões incertas. Dessa forma, a máquina da inferência deve estar equipada de capacidade computacional para analisar a transferência de incerteza das premissas para as conclusões, além de associá-las com alguma medida que possa ser compreendida e interpretada propriamente pelo usuário.

O número *fuzzy* é um caso especial de conjunto *fuzzy* que define um intervalo *fuzzy* nos números reais, \mathbb{R} . Para um número real cujo valor preciso não é conhecido com exatidão, este número é definido através de um intervalo *fuzzy*. Um intervalo *fuzzy* é geralmente representado por dois pontos extremos a_1 e a_3 (um valor mínimo e um valor máximo) e um ponto médio a_2 (o valor mais possível) como (a_1, a_2, a_3) (ZADEH, 1978).

Sendo os números *fuzzy* mais comuns os triangulares e os trapezoidais, os graus de pertinência formam funções com equações simples. Na presente pesquisa, serão utilizados números *fuzzy* triangulares, pois são os números mais utilizados ao serem combinados com o método AHP (OGUZTIMUR, 2015).

É representado por três pontos e expresso por $A = (l, m, u)$. Esta representação é interpretada como funções de pertinência.

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & \text{se } x \in [l, m] \\ \frac{x-u}{m-u} & \text{se } x \in [m, u] \end{cases} \quad (2)$$

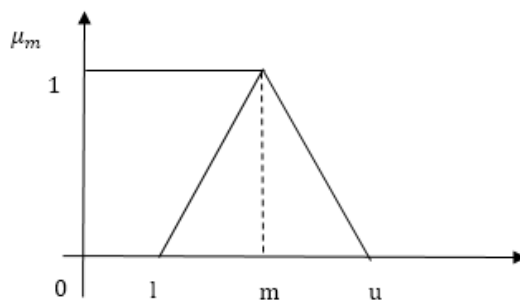
Um número *fuzzy* triangular $M(l,m,u)$ (figura 14) é dado pela função de pertinência $\mu(x)$, onde m é o valor modal e l (*lower*) e u (*upper*) os espalhamentos à esquerda e à direita, respectivamente. Estes espalhamentos caracterizam a imprecisão da quantidade tratada. Sejam $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ e $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$, números *fuzzy* triangulares, no desenvolvimento do método FAHP são consideradas as seguintes operações (KANNAN et al, 2013):

$$(l1, m1, u1) + (l2, m2, u2) = (l1+l2, m1+m2, u1+u2)$$

$$\lambda(l1, m1, u1) = (\lambda l1, \lambda m1, \lambda u1) \quad \lambda > 0, \lambda \in \mathbb{R} \quad (3)$$

$$(l1, m1, u1)^{-1} = (1/u1, 1/m, 1/l1).$$

Figura 14 - *Fuzzy triangular*



FONTE: Adaptado de KANNAN et al. (2013)

O módulo de defuzzificação deve ser entendido como um operador no sentido de que dado um subconjunto *fuzzy*. Esta etapa gera a saída do sistema de inferência *fuzzy*. Ou seja, é a etapa de interpretação da informação contida no conjunto de *fuzzy* de saída. O resultado final de uma defuzzificação é um número *crisp* (valores de saída). Esse processo é dado pela equação abaixo (WATANABE,2016):

$$D: F(x) \rightarrow x \quad (4)$$

2.4.3 Extensão *Fuzzy - Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP)*

De acordo com Chang (1996), o método híbrido (combinação de dois métodos multicritérios diferentes) *Fuzzy AHP* tem como objetivo principal decidir a importância relativa de cada par de fatores na mesma hierarquia. Utilizando números triangulares *fuzzy*, por comparações pareadas, a matriz de avaliação *fuzzy* $A = (a_{ij})_{n \times n}$, é construída. Por exemplo, se há uma forte importância do elemento i sobre o elemento j , sob um determinado critério, então $a_{ij} = (l,5,u)$, onde l e u representam grau de julgamento *fuzzy*.

Compreende-se a importância da lógica *fuzzy* em conjunto com o método AHP, pois a lógica completa as incertezas e imprecisões compostas em diversos critérios abordados em um problema. Dessa forma, a abordagem se torna mais simplificada. Sobre o AHP, este pode influenciar em uma determinada abordagem, ao identificar os pesos corretos de cada critério e subcritério analisado (OUMA et al., 2015)

Em relação ao uso do método *fuzzy* AHP em pesquisas relacionadas a energias renováveis, Suganthi et al. (2015) justificam o uso deste método para encontrar a importância relativa das variáveis. Çolak e Kaya (2017) ressaltam que o uso do *Fuzzy* AHP pode ser adequado satisfatoriamente quando há hesitação por parte dos pesquisadores em analisar a viabilidade de um determinado tipo de energia renovável. Ao usar um método híbrido de tomada de decisão, pode-se melhor verificar qual critério terá maior impacto na produção e distribuição de um determinado combustível. Chen e Ren (2018) pesquisaram quais fatores críticos de sucesso seriam mais impactantes na produção e distribuição de combustível para aviões. Chegou-se à conclusão, usando o FAHP, de que o fator “sustentabilidade” associado ao “ciclo de vida do produto” é que melhor determina o processo de produção e distribuição.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Para isso, esse capítulo é composto por duas subseções, uma destinada a detalhar o enquadramento metodológico, e a segunda para descrever o desenvolvimento da pesquisa.

3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

A metodologia busca instrumentos adequados para conduzir a pesquisa científica, ou seja, contribui para a escolha dos meios para se chegar à solução do problema (PRADO, 2011). Neste sentido, o enquadramento da metodologia a ser utilizada nesta dissertação é apresentado no Quadro 10

Quadro 10 - Enquadramento metodológico

Classificação	Enquadramento
Natureza	Aplicada
Abordagem	Qualitativa
	Quantitativa
Método Científico	Indutivo
Objetivos	Exploratória
	Descritiva
Procedimentos técnicos	Bibliográfica
	Documental
	Pesquisa de Campo

Fonte: O Autor.

Para Vergara (2000), uma pesquisa aplicada determina-se pela necessidade de resolver problemas concretos, de resolução imediata ou não. Essa pesquisa fundamenta-se como aplicada, pois ela usa de conhecimentos e ferramentas as quais que foram aplicadas para a resolução de problemas e questões levantadas dentro da realidade que está pesquisa está inserida. Com isso, serão analisados dados referentes a comercialização de etanol super-hidratado no Brasil, com o objetivo de verificar os

fatores críticos de sucesso, os quais foram estruturados em subcritérios dentro da hierarquia do FAHP, da viabilidade do etanol super-hidratado, como combustível para geração de energia e mobilidade.

Em relação a abordagem do problema, a pesquisa é qualitativa e quantitativa, pois, primeiramente, houve uma análise qualitativa do processo de obtenção e comercialização do etanol super-hidratado. Foram coletados dados e estes analisados, sendo o processo e seu significado os focos principais de abordagem. Em um segundo momento, a pesquisa foi quantitativa, pois foram realizados cálculos referentes à construção de matrizes, a fim de verificar a viabilidade econômica, socioambiental e técnica do etanol super-hidratado no Brasil. Dessa forma, foram gerados dados numéricos que embasaram a pesquisa realizada. Ainda, utilizou-se o método estendido de Chang *Fuzzy-AHP*, pelo fato de analisar e considerar as incertezas de um determinado evento, com a possibilidade de hierarquizar critérios e subcritérios de avaliação.

É possível classificar as pesquisas em: descritiva e exploratória. A pesquisa exploratória visa possibilitar um maior conhecimento sobre o problema, objetivando torná-lo mais explícito ou possibilitando a construção de hipóteses. Na pesquisa descritiva, são utilizadas técnicas padronizadas para a coleta de dados, visando analisar as características de populações ou fenômenos (GIL, 2007). Portanto, essa pesquisa é exploratória e descritiva.

Em relação ao método, esse se enquadra como indutivo, pois parte-se de dados particulares, suficientemente constatados, buscando uma verdade geral ou universal. O objetivo dos argumentos é levar a conclusões cujo conteúdo é mais amplo do que o das premissas nas quais se basearam. (MARCONI; LAKATOS, 2011).

Os procedimentos técnicos utilizados foram: bibliográfico e documental e pesquisa de campo. O procedimento bibliográfico foi devido à necessidade de realizar buscas por publicações científicas para embasar as temáticas abordadas, e documental para obter um melhor conhecimento sobre a viabilidade do etanol super-hidratado como combustível. Foram analisados dados obtidos de entidades como UNICA (União da Indústria de Cana-de-Açúcar), ANP (Agência Nacional do Petróleo), ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores), PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S/A).

3.2 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Inicialmente, pesquisou-se sobre os biocombustíveis em geral, identificando benefícios relacionados a emissão de GHG, em relação aos combustíveis fósseis. Após isso, iniciou-se uma revisão sobre o etanol hidratado e super-hidratado, apontando suas características, vantagens e desvantagens. Assim, foram lidas pesquisas relacionadas a viabilidade comercial e econômica. Complementando os assuntos anteriormente mencionados, foram pesquisadas bibliografias sobre os diferentes métodos de abordagem multicritério. Para isso, foram pesquisados artigos em revistas científicas que serviram para melhor embasar a pesquisa a ser realizada. Maior parte das revistas possuem Qualis A1, A2 e B1. As revistas mais pesquisadas foram: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *Energy*, *Energy Policy*, *Fuel*, *Applied Energy* e *Journal of Cleaner Production*.

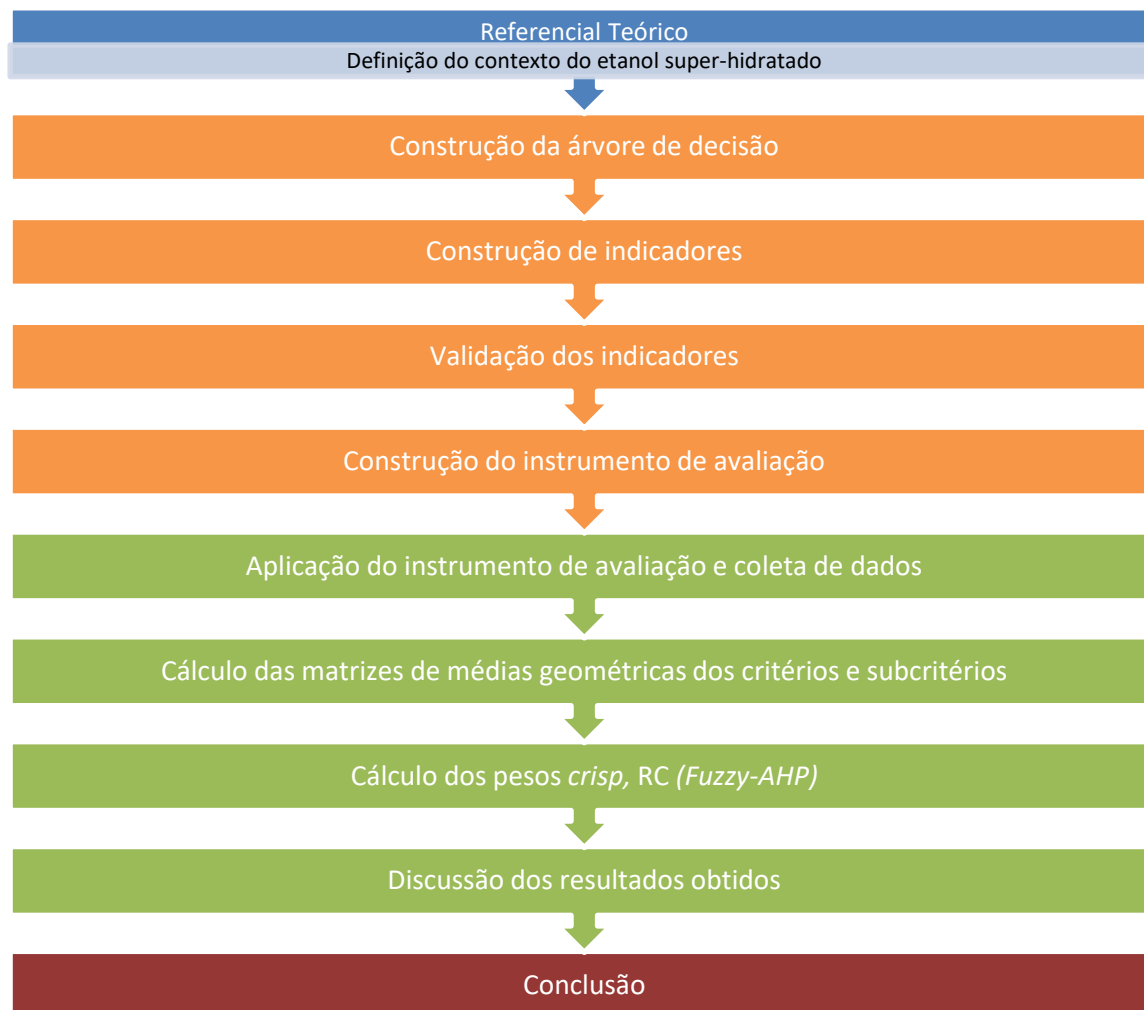
Foram coletados dados secundários sobre o número de vendas do etanol hidratado no Brasil, em litros; tamanho do mercado consumidor de etanol no Brasil; produção de EHC no Brasil, etc. Esses dados foram obtidos em sites de órgãos relacionados aos biocombustíveis produzidos no Brasil, tais como: UNICA (União Nacional dos Produtores de Cana-de-açúcar), ANP (Agência Nacional do Petróleo), MDIC (Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços), entre outros. Estudos referentes a abordagem multicritério FAHP foram incluídas, a fim de melhor justificar o uso deste método, em relação aos demais apresentados na revisão teórica. Com base nesses dados, construiu-se a base para futura análise de viabilidade técnico-financeira e socioambiental do combustível estudado.

3.2.1 Procedimentos metodológicos

Para atingir o objetivo específico “d”, foi empregado o método FAHP nas variáveis relacionadas à viabilidade técnica, financeira e socioambiental do etanol super-hidratado como combustível para mobilidade e geração de energia. O uso de método FAHP se justifica por sua robustez, pela conveniência dos critérios para que pudessem ser hierarquizados em vários níveis de dependência vertical, mantendo independência horizontal, na árvore hierárquica. Ainda, justifica-se o uso da abordagem escolhida pois

os critérios são adequados ao objetivo a ser atingido. Abaixo, a figura 15 resume quais são os procedimentos metodológicos presentes na pesquisa.

Figura 15 - Procedimentos metodológicos da pesquisa



FONTE: O autor

3.2.1.1 Método FAHP aplicado à pesquisa

As variáveis a serem analisadas foram definidas da seguinte forma. Como objetivo geral, definiu-se o uso do etanol super-hidratado como combustível para mobilidade e geração de energia. Três critérios principais foram empregados na hierarquia proposta:

Financeiro, socioambiental e técnico. Os critérios foram determinados baseados em informações referentes à revisão teórica (capítulo 2 da presente pesquisa).

A estrutura hierárquica do FAHP permite aos tomadores de decisão resolver problemas complexos de gestão, na forma de objetivo geral, critérios, subcritérios e alternativas. Comparações pareadas dos elementos permitem que o tomador de decisão foque em um conjunto de pequenas decisões e as compare entre as variáveis determinadas pelo gestor (PAPADOPOULOS et al., 2011).

Uma vez definidos os critérios, foram determinados subcritérios de avaliação para analisar os fatores que interferem na viabilidade da produção e comercialização do etanol super-hidratado como combustível. Os subcritérios serão definidos a partir da análise dos critérios apresentados no capítulo 4.

Após a hierarquização do problema, iniciou-se a avaliação com comparação por pares entre os critérios e subcritérios. Para tanto, seguir-se-á uma escala de julgamentos. A numeração que foi adotada está baseada na lógica *fuzzy*.

Quadro 11 - Escala de julgamentos do método FAHP

NÍVEL DE IMPORTÂNCIA AHP	DEFINIÇÃO	NUMERAÇÃO FUZZY
1	Importância igual	(1,1,1)
3	Importância fraca de uma sobre a outra	(2,3,4)
5	Importância forte	(4,5,6)
7	Importância muito forte	(6,7,8)
9	Importância absoluta	(9,9,9)
2,4,6,8	Valores intermediários	(1,2,3) (3,4,5) (5,6,7) (7,8,9)

FONTE: Adaptado de SAATY (1996) e CHANG (1996).

O próximo passo é a construção da matriz de comparação entre os critérios. É importante notar que o elemento mais importante da comparação é sempre usado como um valor inteiro da escala, e o menos importante, como o inverso dessa unidade. Se o

elemento-linha é menos importante do que o elemento-coluna da matriz, entramos com o valor recíproco na posição correspondente da matriz

Figura 16 - Exemplo de matriz de comparação pareada

	CRITÉRIO 1	CRITÉRIO 2	CRITÉRIO 3
CRITÉRIO 1	(1; 1; 1)	(0,67; 1; 2)	(0,4; 0,5; 0,67)
CRITÉRIO 2	(0,5; 1; 1,5)	(1;1;1)	(0,5; 0,67; 1)
CRITÉRIO 3	(1,5; 2; 2,5)	(1; 1,5; 2)	(1,1,1)

FONTE: O autor

As posições da diagonal serão sempre 1, afinal, um elemento é igualmente importante a ele mesmo. Para preencher os outros elementos da matriz fora da diagonal, fazem-se os julgamentos e determina-se a intensidade de importância, conforme quadro 9.

O autovetor dá a ordem de prioridade e o autovalor é a medida de consistência do julgamento. O método de análise hierárquica busca o autovalor máximo, λ_{\max} , que pode ser calculado pela multiplicação da matriz de julgamentos (Figura 16) pelo vetor coluna de prioridades w , seguido da divisão do novo vetor encontrado, Aw , pelo primeiro vetor w , chegando-se ao valor de λ_{\max} . Para o cálculo do λ_{\max} , utiliza-se a equação abaixo.

$$\lambda_{\max} = \frac{Aw}{w} \quad (4)$$

De acordo com Saaty (1996), para obter-se a consistência de uma matriz positiva recíproca, seu autovalor máximo deveria ser igual a n (dimensão da matriz). No caso de uma matriz consistente, precisa-se de $n-1$ comparações pareadas já que, a partir dessas, as outras podem ser deduzidas logicamente.

A consistência de uma matriz recíproca positiva ocorrerá quando o seu autovalor máximo for igual a n . Para estimar a diferença entre estes valores usa-se o Índice de Consistência, conforme equação abaixo:

$$(\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (5)$$

Uma medida de consistência pode ser estimada comparando-se esse valor com a mesma razão calculada de uma matriz recíproca de julgamentos gerados aleatoriamente, de mesma ordem. Se for maior que 10%, recomenda-se que julgamentos sejam refeitos até que a consistência aumente. Esta medida é chamada de razão de consistência (RC), dada pela seguinte equação:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (6)$$

sendo IR o índice randômico. O quadro 12 apresenta o índice randômico para matrizes de ordem de 1 a 15, proposta por Saaty (1996):

Quadro 12 - Índice Randômico de Saaty

ORDEM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

FONTE: SAATY (1996)

Para o método *Fuzzy AHP*, este utiliza o mesmo procedimento do modelo clássico AHP. São considerados como valores de entrada números *fuzzy* triangulares e utilizada a matemática específica para tais números. Na matriz recíproca A de entradas *fuzzy*, tem-se: $a_{ij} = (l, m, u)$ e $a_{ji} = (1/u, m, 1/l)$. Aplicando o princípio de extensão *fuzzy* (CHANG, 1996), obtém-se:

$$S_j = \sum_{i=1}^m M_{k \times [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{kj}]^{-1}} \quad (7)$$

O julgamento par a par é dado por:

$$\left\{ \begin{array}{l} V(M1 \geq M2) = 1 \text{ se } m1 \geq m2 \\ e \\ V(M2 \geq M1) = \mu(d) = hgt(M1 \cap M2) = \frac{l1 - u2}{(m2 - u2) - (m1 - l1)} \end{array} \right. \quad (8)$$

Desse modo, o *fuzzy* triangular é usado para identificar parâmetros que possuam variações e apontar a possibilidade de que uma única ocorrência seja maior que outras. Ainda, o método FAHP aplicado na presente pesquisa utiliza médias geométricas para calcular as matrizes e os pesos dos critérios e subcritérios. Çolak e Kaya (2017) utilizaram esta metodologia para analisar a viabilidade de um determinado tipo de energia renovável. Petrini et al. (2016) também se basearam em médias geométricas para priorizar as principais políticas públicas direcionadas à pequenos produtores de etanol.

Generalizando tem-se $V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = \text{Min } V(M \geq M_i); i=1, 2, \dots, k$ que são comparações do número *fuzzy* triangular M com os demais. Ao final, obtém-se o vetor dos pesos (dos critérios e subcritérios), dependendo da complexidade do modelo hierárquico construído. O processo de defuzzificação, por ser aplicado o método Extensão Chang *Fuzzy-AHP*, é realizado a partir dos autovetores e autovalores calculados. Para tanto, será considerado como peso de um critério o valor mínimo dos pesos, de acordo com a equação 8.

Dessa maneira, buscou-se atingir o objetivo específico “d”, verificando o melhor critério a ser considerado para analisar a viabilidade econômica do etanol super-hidratado como combustível. Ainda, buscou-se testar e validar a modelagem proposta mediante a análise da consistência dos resultados.

4 ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA E CONSTRUÇÃO DA MODELAGEM

Neste capítulo, serão mostrados os procedimentos seguidos para a estruturação do problema e para a construção da modelagem de viabilidade técnica, financeira e socioambiental do etanol super-hidratado como combustível para mobilidade e geração de energia. Esta fase foi dividida em quatro etapas: construção da árvore de decisão; construção dos indicadores; validação dos indicadores e escalas de avaliação; e construção dos instrumentos de avaliação. Nos subcapítulos que se seguem, a realização de cada uma destas é detalhada.

4.1 CONSTRUÇÃO DA ÁRVORE DE DECISÃO

Para construir a árvore de decisão, o processo se iniciou com a realização de pesquisas exploratórias sobre o contexto do etanol hidratado combustível (EHC) sob o âmbito nacional e internacional. Durante a leitura dos materiais (artigos científicos, livros, manuais, resoluções, etc), buscou-se em cada publicação quais são os elementos que melhor determinam o processo de produção, distribuição e comercialização do etanol super-hidratado. Com isso, criou-se um banco de dados referente a anotação destas leituras, mantendo-se a informação do elemento reportado e a origem da informação.

A partir da coleta dos dados de artigos, livros e materiais sobre etanol, realizou-se uma triagem dos mesmos para verificar o nível de sinergia entre os pontos abordados nas diferentes bibliografias. Dessa forma, buscou-se agrupá-los em um ponto de avaliação e também verificar a relevância destes em função do tema pesquisado.

Por outro lado, foram apontados alguns obstáculos que devem ser considerados ao analisar se determinado combustível é viável ou não para ser produzido, comercializado e distribuído. Pode-se abordar os seguintes pontos:

a) Pelo fato de o etanol super-hidratado ter uma concentração de água maior na mistura, em comparação ao EHC, tem-se um custo de distribuição maior para os donos de postos de combustíveis e distribuidoras. Conseqüentemente, haverá uma necessidade em transportar volumes maiores do combustível estudado em relação aos demais combustíveis, como gasolina e diesel.

b) À medida em que a mistura etanol-água apresenta concentrações maiores de água, o poder calorífico do etanol diminui. Isso significa dizer que, para o consumidor utilizar o etanol super-hidratado como combustível veicular, será necessário que abasteça mais vezes, comparativamente aos demais combustíveis. Portanto, refletiria em um maior dispêndio financeiro, sendo vantajoso o uso contínuo desse combustível somente se o preço final for muito abaixo dos demais combustíveis.

c) Os veículos *flex-fuel*, comercializados em larga escala no Brasil, são projetados para serem abastecidos com diferentes combustíveis. Estes podem funcionar com 2 ou 3 combustíveis simultaneamente. Os combustíveis mais utilizados nesses veículos são a gasolina e o EHC (E94W6). Isso indica que os veículos com motor *flex-fuel* operam com uma mistura ternária etanol-gasolina-água, a uma determinada concentração de cada componente. Caso o consumidor abasteça o veículo com etanol super-hidratado (com maior concentração de água na mistura), não ocorrerá a miscibilidade necessária sem que haja a adição de um estabilizante químico extra. Portanto, a adição desse produto acarretaria um custo adicional ao combustível.

Entretanto, há outros pontos positivos que devem ser considerados ao avaliarmos a viabilidade do etanol super-hidratado, para fins de geração de energia e mobilidade.

a) Por eliminar a etapa de desidratação (etapa que possui maior gasto energético) no processo produtivo, este combustível se torna mais viável economicamente do que o EHC, sob o ponto de vista financeiro. A diferença no custo de produção do ESHC pode variar entre 35% a 50% em relação ao EHC (TABORDA, 2014). Deste modo, o preço final de venda também é menor.

b) Em concordância com o Acordo de Paris, o ESHC apresenta uma taxa de emissão de GHG menor do que outros combustíveis. Em comparação ao diesel, a emissão de NOx, em geradores de energia com 20kW a 40kW, é relativamente menor ao utilizar EHC ou ESHC. Ainda, o combustível em estudo contribui para uma maior diversificação da matriz energética nacional.

Com base nos fatores mencionados, tal como as demais informações apresentadas no referencial teórico da presente dissertação, propõe-se para o estudo de viabilidade os critérios de avaliação apresentados no quadro 13. Este apresenta os critérios e subcritérios de análise, os quais visam avaliar qual critério é o mais relevante para fins de viabilizar o etanol super-hidratado para geração de energia e mobilidade. Com base nas referências bibliográficas pesquisadas, chegou-se a três critérios de

avaliação: Financeiro, Técnico e Socioambiental. Desconsiderou-se o critério político na pesquisa pelo fato de, baseado nas literaturas pesquisadas, apresentar apenas um único subcritério. O subcritério desconsiderado seria as leis e regulamentos referentes ao etanol. Baudry et al. (2018), Sagardi et al. (2014) e Turcksin et al. (2011) realizaram estudos de análise de viabilidade de biocombustíveis, da colheita até o transporte aos postos de combustíveis, utilizando métodos multicritério, desconsiderando o critério político em suas análises.

Cada critério está composto por três subcritérios cada. No quadro 13, podem ser conferidas as referências a artigos científicos e livros que dão suporte teórico à escolha de cada subcritério de avaliação.

Quadro 13 - Critérios de avaliação

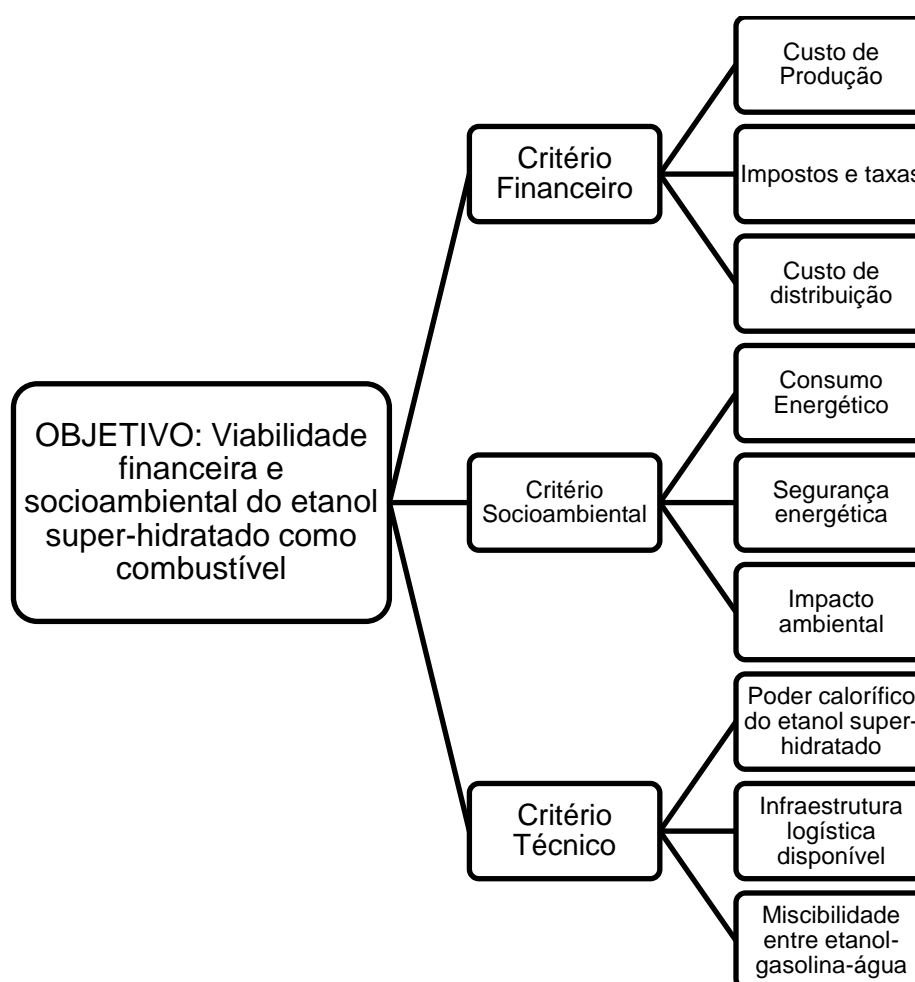
CRITÉRIOS	SUBCRITÉRIOS	REFERÊNCIAS
FINANCEIRO	- Custo de produção	Taborda (2014) Mayer et al. (2016); Sehatpour et al.(2017); Baudry et al. (2018);
	- Impostos e taxas	Mayer et al. (2016); Belincanta et al. (2016) Demczuk; Padula (2017);
	- Custo de distribuição	Bowersox; Closs (2006) Wang et al.(2014) Belincanta et al. (2016) Eckert et al. (2018);
SOCIOAMBIENTAL	- Consumo Energético	Wang et al. (2014); Garcia; Sperling (2017); Forte et al. (2018)
	- Segurança energética (em relação a Matriz energética nacional)	Szulczyk et al. (2010); EEA (2016); Demczuk, Padula (2017); ANP (2018)
	- Impacto ambiental	Lin et al. (2013) Filoso et al. (2015); Olivares et al (2015) Wang; Cheng (2018);
TÉCNICO	- Infraestrutura logística disponível	Leal Jr; D'Agosto (2011); Sehatpour et al.(2017); Eckert et al. (2018);
	- Poder calorífico do etanol super-hidratado	Breaux; Archarya (2013); Tibola et al. (2015) Roso et al. (2016); Lanzanova et al. (2016)

	-Miscibilidade entre água-gasolina-etanol	Costa; Sodré (2010) Melo et al. (2012) Machado et al. (2015) Filho (2016)
--	---	--

FONTE: o autor

Ao total, foram levantados nove subcritérios de avaliação, referentes à viabilidade do etanol super-hidratado. Abaixo, a figura 17 representa graficamente a árvore hierárquica de decisão para o estudo. Nela, estão contidos os critérios e subcritérios mencionados.

Figura 17 - Árvore hierárquica da pesquisa



FONTE: o autor

4.2 CONSTRUÇÃO DOS INDICADORES

Foram apontados indicadores baseados nas bibliografias estudadas durante o desenvolvimento da pesquisa. Chegou-se a três critérios de análise, com 3 subcritérios cada. Em um segundo momento, foi aplicada a escala de Saaty/*Fuzzy*, baseada no método multicritério *Fuzzy AHP*. Segundo este método, proposto por Chang (1996), há 5 (cinco) níveis de importância relativa entre os critérios e subcritérios analisados. Com base nesses níveis, foram construídas matrizes de comparação pareada e, conseqüentemente, gerados os resultados da pesquisa.

4.3 VALIDAÇÃO DOS INDICADORES

O processo de validação dos indicadores serve para aumentar o nível de confiabilidade da modelagem através de uma análise crítica de um profissional neutro, o qual possui conhecimento técnico sobre biocombustíveis, especificamente o etanol. Para isso, contou-se com o apoio da CEVASA (Central Energética do Vale do Sapucaí Ltda.), empresa especializada na produção de açúcar e etanol. O contato se deu via inMail (LinkedIn®). Após o contato e posterior validação, foi construído o instrumento de avaliação.

4.4 CONSTRUÇÃO DO INSTRUMENTO DE AVALIAÇÃO

Para melhor avaliar a viabilidade do etanol super-hidratado como combustível, foi necessário construir um instrumento de coleta de dados para melhor analisar essa questão. Dessa forma, objetivou-se com o instrumento melhor alimentar a modelagem e, assim, gerar os resultados esperados.

Em razão disso, o instrumento utilizado na presente pesquisa foi construído contendo questões fechadas de múltipla escolha para cada indicador da modelagem. Nelas, as alternativas estão relacionadas com os critérios de avaliação determinados. Dessa maneira, foi possível avaliar qual critério deve ser priorizado para verificar a viabilidade do etanol super-hidratado é viável como combustível para mobilidade e geração de energia.

Em algumas questões do instrumento de avaliação, foram atribuídos níveis de importância relativa entre os critérios e subcritérios da pesquisa. Esses níveis foram de 1 a 5 para cada critério analisado. O quadro 14 apresenta os níveis de importância com o correspondente significado.

Quadro 14 - Níveis de importância relativa

NÍVEL DE IMPORTÂNCIA	SIGNIFICADO	NUMERAÇÃO FUZZY
1	Igualmente importante	(1,1,3)
2	Um pouco mais importante	(1,3,5)
3	Mais importante	(3,5,7)
4	Muito mais importante	(5,7,9)
5	Extremamente mais importante	(7,9,9)

FONTE: o autor

Através deste ranking de importância, foi permitido calcular as matrizes de comparação pareada, baseadas no método *fuzzy* AHP.

A fim de assegurar a agilidade no envio e no retorno dos questionários, o instrumento de coleta de dados foi construído utilizando a plataforma Google Docs®. A figura 18 mostra parte do questionário enviado aos especialistas na área de biocombustíveis e motores. O formulário na íntegra encontra-se no apêndice.

Figura 18 - Recorte do instrumento de avaliação

Fazendo uma comparação entre os critérios, qual o nível de importância entre o MAIS importante e o MEIO importante. *

1 2 3 4 5

Igualmente importante Extremamente mais importante

Fazendo uma comparação entre os critérios, qual o nível de importância entre o MAIS importante e o MENOS importante. *

1 2 3 4 5

Igualmente importante Extremamente mais importante

FONTE: o autor

O instrumento de avaliação foi separado em 4 seções diferentes, onde se pode coletar informações comparativas entre os critérios e subcritérios para análise. Cada respondente selecionou uma alternativa e, após isso, realizou a comparação entre os diferentes critérios e subcritérios. Assim, criou-se o processo para atingir os objetivos específico “d” e “e” da presente pesquisa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão discutidos os resultados obtidos na pesquisa nas seguintes etapas: Coleta de dados, definição de matrizes e discussão dos resultados.

5.1 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi feita entre os meses de outubro de 2018 e janeiro de 2019. Foram enviados e-mails para especialistas na área de biocombustíveis, em especial o etanol (30 e-mails foram enviados). Destes, 13 foram retornados. As empresas contatadas para responderem ao instrumento de avaliação foram: CENPES/PETROBRAS (Centro de Pesquisas da PETROBRAS), UNICA e CEVASA. A razão pela qual foram contatadas estas empresas se justifica pelo amplo conhecimento técnico e de mercado que possuem, em relação ao etanol super-hidratado. Ainda, o questionário foi enviado para professores de ensino superior, os quais realizam pesquisas sobre etanol hidratado.

Apesar do baixo retorno dos e-mails, o resultado foi satisfatório, tendo em vista que, para se aplicar o método FAHP na pesquisa, o número de respostas foi suficiente para atingir os resultados esperados. O quadro 15 apresenta os respondentes que retornaram o questionário enviado sobre análise técnica, socioambiental e econômica do etanol super-hidratado. No quadro abaixo, são apresentados ainda as entidades e cargos que cada um exerce nas empresas/universidades correspondentes. Para manter a confidencialidade da pesquisa e dos respondentes, os participantes foram identificados por números.

Quadro 15 - Respondentes da pesquisa

RESPONDENTE	EMPRESA	CARGO	UF
1	UFSM	Professor de Eng. Química	RS
2	UFSM	Professor de Eng. Mecânica	RS
3	UFSM	Professor de Eng. Mecânica	RS
4	UFSM	Professor de Eng. Mecânica	RS
5	UFSM	Engenheiro Mecânico	RS
6	CEVASA	Engenheiro Químico	SP
7	UNICA	Engenheiro Químico	SP

8	PUC MINAS	Professor de Eng. Mecânica	MG
9	CENPES/PETROBRAS	Engenheira Química	RJ
10	CENPES/PETROBRAS	Engenheiro Mecânico	RJ
11	PETROBRAS	Administradora	RJ
12	UFRGS	Professor de Eng. Mecânica	RS
13	UFRGS	Professor de Eng. Química	RJ

FONTE: o autor

5.2 DEFINIÇÃO DE MATRIZES CRITÉRIOS

Nesta etapa da pesquisa, os resultados obtidos com a aplicação do instrumento de avaliação serviram de base para a construção de matrizes dos critérios e subcritérios previamente determinados. Para que os resultados da pesquisa sejam considerados válidos, a razão de consistência (RC) não pode ser superior a 10% ou 0,1.

Foi realizada como primeira etapa da análise dos dados a construção da matriz dos critérios financeiro (C1), socioambiental (C2) e técnico (C3). Com base nas respostas, obteve-se a matriz das médias geométricas dos critérios, conforme quadro 16.

Quadro 16 - Matriz das médias CRITÉRIOS

	C1	C2	C3
C1	(1;1;1)	(0,838; 1,517; 2,440)	(0,630; 1,184; 2,184)
C2	(0,410; 0,659; 1,193)	(1;1;1)	(0,339; 0,525; 0,981)
C3	(0,458; 0,844; 1,588)	(1,020; 1,905; 2,946)	(1;1;1)

FONTE: o autor

A próxima etapa da modelagem é o cálculo da matriz transposta. A título de exemplo, as equações abaixo apresentam os valores que servirão para determinar os pesos dos critérios. Os cálculos se basearam na equação 7 da presente dissertação:

$$S(C1) = (2,468; 3,701; 5,625) \times \left(\frac{1}{6,695}; \frac{1}{9,634}; \frac{1}{14,332} \right) = (0,172; 0,384; 0,840)$$

$$S(C2) = (1,749; 2,184; 3,174) \times \left(\frac{1}{6,695}; \frac{1}{9,634}; \frac{1}{14,332} \right) = (0,122; 0,227; 0,474) \quad (9)$$

$$S(C3) = (2,477; 3,749; 5,534) \times \left(\frac{1}{6,695}; \frac{1}{9,634}; \frac{1}{14,332} \right) = (0,173; 0,389; 0,827)$$

Encontra-se na equação 9 os valores individuais para cada matriz dos critérios estudados. Os mesmos serão selecionados pelos valores mínimos de cada matriz representada pela equação 8.

$$\begin{aligned}
 V(M1 \geq M2) &= 1 \\
 V(M1 \geq M3) &= 0,993 \\
 V(M2 \geq M1) &= 0,657 \\
 V(M2 \geq M3) &= 0,650 \\
 V(M3 \geq M1) &= 1 \\
 V(M3 \geq M2) &= 1
 \end{aligned} \tag{10}$$

Os valores encontrados seguem a lógica apresentada na equação 8 (presente na página 59). Se $M1 \geq M2, M3, \dots, Mk$, não há a necessidade de realizar equações. Caso as ponderações sejam menores, deve-se utilizar a segunda parte da equação 8.

$$\begin{aligned}
 V(M1 \geq M3) &= \left(\frac{0,173-0,840}{(0,384-0,840)-(0,389-0,173)} \right) = \frac{(-0,667)}{(-0,672)} = 0,993 \\
 V(M2 \geq M1) &= \frac{0,172-0,474}{(0,227-0,474)-(0,384-0,172)} = \frac{(-0,302)}{(-0,459)} = 0,657 \\
 V(M2 \geq M3) &= \frac{0,173-0,474}{(0,227-0,474)-(0,389-0,173)} = \frac{(-0,301)}{(-0,463)} = 0,650
 \end{aligned} \tag{11}$$

Após o cálculo dos pesos, é necessário normalizá-los. A importância total deve estar sempre em 100%. Para tanto, basta somar os valores dos pesos e obter o total dos mesmos. Com isso, somam-se os mínimos valores de "V", de acordo com a equação abaixo.

$$V(\text{total}) = (V_{\text{min}1} + V_{\text{min}2} + V_{\text{min}3} + \dots + V_{\text{min}k}) \tag{12}$$

$$V(\text{total}) = (0,993 + 0,650 + 1) = 2,642$$

Com o $V(\text{total})$ obtido acima, o próximo passo é normalizar os pesos. Abaixo, seguem os resultados obtidos.

$$P(C1) = \frac{0,993}{2,642} \times 100 = 37,57\%$$

$$P(C2) = \frac{0,650}{2,642} \times 100 = 24,59\% \quad (13)$$

$$P(C3) = \frac{1}{2,642} \times 100 = 37,85\%$$

Portanto, constatou-se que o critério de maior relevância apresentado na equação 12 foi o C3 (técnico), com 37,85% do peso. Seguido por financeiro (37,57%) e socioambiental (24,59%). Os cálculos para se chegar a essa ponderação se basearam no método da extensão Chang *Fuzzy-AHP*. A fim de verificar se os resultados obtidos a partir dos cálculos possuem validade, foi calculado o Índice de Consistência (IC), bem como a Razão de Consistência (RC), a qual não pode ultrapassar 0,1 ou 10%. O quadro abaixo resume os seguintes índices mencionados.

Quadro 17 - Razão de consistência sobre os critérios

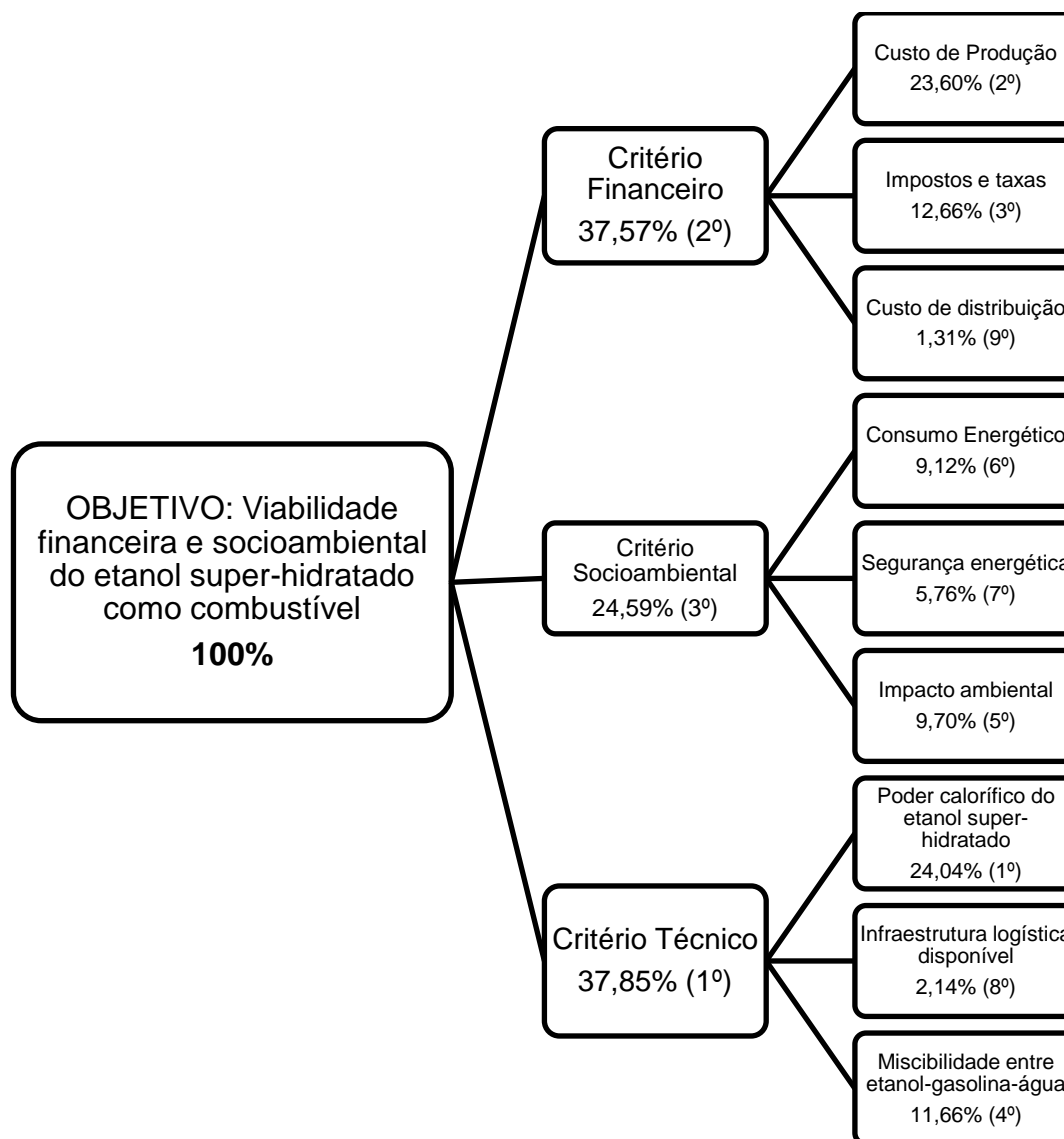
Índice de Consistência (IC)	0,009
Índice Randômico (IR)	0,58
Razão de Consistência (RC - %)	1,6

FONTE: o autor

5.3 DEFINIÇÃO DAS MATRIZES DOS SUBCRITÉRIOS

Após a construção de matrizes de importância e seus respectivos cálculos, é realizada a estrutura hierárquica FAHP para os valores dos pesos *crisp* obtidos. A figura 19 apresenta a estrutura hierárquica dos critérios e subcritérios analisados, bem como as ordens de importância.

Figura 19 - Estrutura hierárquica FAHP dos critérios e subcritérios



FONTE: o autor

Através da estrutura hierárquica, pode-se perceber que o critério técnico é o que possui maior importância relativa, em relação aos demais. Como subcritérios mais relevantes, tem-se o poder calorífico do etanol (24,04%), seguido do custo de produção (23,60%), impostos e taxas (12,66%) e miscibilidade entre etanol-gasolina-água. Esses resultados estão diretamente ligados aos entraves principais já relatados na estruturação do problema (capítulo 4 desta dissertação). Apesar de terem relativa importância, em

comparação aos subcritérios anteriormente mencionados, a infraestrutura logística disponível e custo de distribuição possuíram valores menores (2,14% e 1,31%, respectivamente).

Segundo os especialistas, a menor relevância destes subcritérios se justifica pelo fato de que o custo do volume a ser distribuído pouco varia em relação à distâncias percorridas. Todavia, verificou-se em pesquisas relacionadas com transporte de etanol que este subcritério deveria ter importância relativa maior. Além disso, o fato de o combustível ter menor poder calorífico acarreta em maiores consumos volumétricos, ou seja, há a necessidade de se abastecer com maior frequência os veículos em relação ao uso de outros combustíveis. Não obstante, uma maior concentração de água na mistura pode, além de ocorrer a separação das fases, danificar os motores *flex-fuel*.

Assim como na definição das matrizes dos critérios (financeiro, socioambiental e técnico), o procedimento para o cálculo das matrizes dos subcritérios segue a mesma metodologia anteriormente apresentada. O quadro 18 apresenta os pesos da matriz do subcritério financeiro, bem como sua RC.

Quadro 18 - Pesos da matriz subcritério financeiro

SUBCRITÉRIO	PESO DE IMPORTÂNCIA (normalizado)	λ_{max}	IC	RC (%)
Custo de produção	62,83%	3,061	0,031	5,34
Impostos e taxas	33,69%			
Custo de distribuição	3,47%			

FONTE: o autor

Verificou-se que, ao analisar o critério financeiro isoladamente, o subcritério de maior importância é o Custo de produção, com 62,83%. Seguido de “Impostos e taxas” (33,69%) e custo de distribuição (3,47%). A maior importância do custo de produção pode ser justificada pelo fato de, durante a produção do etanol super-hidratado, a etapa da desidratação não se realiza. É durante a destilação que ocorre um maior gasto energético (gasto linear até a etapa anterior - destilação), de forma exponencial, conforme a figura 2. Dessa maneira, o preço final do combustível é menor em relação ao EHC. Outro fator que contribui para um menor custo de produção é o sistema de

cogeração de energia. Este consiste em utilizar o bagaço da cana-de-açúcar como fonte renovável de energia. Ao adotar a cogeração, reduz-se a dependência energética de terceiros e também se reduz o impacto ambiental relacionado à produção energética.

Em relação aos impostos e taxas, estes possuem uma importância média em comparação aos demais subcritérios, de acordo com os respondentes. Este subcritério impacta de forma direta no preço final do combustível, pois os impostos e taxas que incidem sobre o etanol variam de estado para estado. Por exemplo, comparando os impostos incidentes sobre o etanol (PIS/COFINS + ICMS) dos estados de São Paulo e Rio Grande do Sul, o valor da tributação é de R\$ 0,549/L e R\$ 1,413/L, respectivamente. Dessa forma, para que haja uma maior diminuição dos impostos e taxas incidentes no etanol, o governo brasileiro lançou um programa de incentivo ao maior consumo de biocombustíveis, o RenovaBio (MDIC, 2018). Esta lei objetiva fornecer uma importante contribuição para o cumprimento dos compromissos nacionalmente determinados pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris. Além disso, promove a adequada expansão dos biocombustíveis na matriz energética, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis, assegurando previsibilidade para o mercado de combustíveis, ao induzir ganhos de eficiência energética e de redução de emissões de GHG na produção, comercialização e uso de biocombustíveis.

Sobre o custo de distribuição, este apresentou uma menor importância em relação aos demais subcritérios (3,47%). Apesar de os resultados mostrarem uma importância pequena dos transportes neste critério, sabe-se que o custo de distribuição interfere no preço final do ESHC, devido a forma de escoamento da produção ser, em grande parte, pelo modal rodoviário (cerca de 62%). A má condição das vias desfavorece a uma distribuição mais eficiente do combustível. Há, no Brasil, projetos para a construção de etanoldutos, a fim de melhor agilizar a distribuição de combustível. Porém, entraves como o alto custo de investimento e questões ambientais fazem com que esse modal não seja explorado de forma satisfatória. Desta forma, há uma discordância entre a literatura pesquisada e o resultado apresentado na pesquisa.

Sabe-se que, em grandes distâncias, a comercialização de ESHC fica comprometida, baseado no quadro 08 da presente pesquisa. Ademais, o custo médio do frete de etanol por km/ton é de R\$ 4,30. Este fato acarreta em um entrave significativo ao serem realizados fretes de etanol para grandes distâncias. Por exemplo, na região

Sul, o principal estado produtor de etanol é o Paraná. Neste estado, há 28 usinas de açúcar e etanol. Em pequenas distâncias entre usinas-postos de combustíveis, o custo do frete por km/ton é baixo. Porém, para que o ESHC seja distribuído para o Rio Grande do Sul, a distância média é de 875km. Isso resulta em um custo de frete de etanol R\$ 3.762,50/ton. Ainda, pelo fato de o ESHC possuir uma maior concentração de água na mistura, é necessário que o número de fretes a serem realizados aumente. Portanto, torna-se altamente dispendioso comercializar ESHC em locais distantes das usinas. Para o ESHC com 20% de água, espera-se um incremento no custo de 16% em relação ao EHC (E94W6).

O quadro 19 se refere a matriz do subcritério socioambiental. Apresentam-se suas médias, λ_{max} e RC correspondentes.

Quadro 19 - Pesos da matriz subcritério socioambiental

SUBCRITÉRIO	PESO DE IMPORTÂNCIA (normalizado)	λ_{max}	IC	RC (%)
Consumo energético	37,10%	3,025	0,013	2,24
Segurança Energética	23,43%			
Impacto ambiental	39,47%			

FONTE: o autor

Dentro do critério socioambiental, o subcritério com maior importância relativa foi o “impacto ambiental”, com 39,47%. Isso se justifica, segundo os respondentes, ao fato de estar relacionado com a capacidade de queima de um determinado combustível. Não obstante, também se considera importante pelo motivo de o ESHC ser menos danoso ao meio ambiente. Em casos extremos, como acidentes de trânsito, seja em áreas urbanas ou estradas, há vazamento de combustíveis e óleos. Comparativamente com outros combustíveis, como gasolina e diesel, o ESHC oferece menor impacto ambiental, seja pela queima ou por um eventual vazamento de combustível nas estradas ou áreas urbanas. Relacionado à produção de etanol, a energia elétrica utilizada nas usinas é gerada a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar. Apesar do alto investimento inicial, a prática da cogeração acarreta em redução no impacto ambiental, ao emitir menos GHG.

Com importância média, a emissão de GHG (37,10%) está diretamente relacionada com o consumo energético. Ao emitir mais GHG, o consumo energético aumenta proporcionalmente. Quanto maior for o consumo energético, maior será a capacidade de emitir gases poluentes na atmosfera. O motivo de o ESHC ter uma maior concentração de água na mistura com o etanol tornaria, em tese, mais aceito por países que assinaram o Acordo de Paris, no ano de 2016.

Ainda sobre a emissão de GHG, ao realizar a Análise do Ciclo de Vida (ACV) do etanol, a emissão de GHG é mais reduzida, em comparação com os combustíveis fósseis. Hoekman e Broch (2018) enfatizam que, no caso do etanol produzido a partir do milho, há gradual redução na emissão de GHG, em razão da cogeração de energia e aproveitamento das sobras de grão de milho para fabricação de ração animal. Algumas das emissões de GHG na ACV do combustível podem ser alocadas a esses coprodutos, reduzindo assim os índices gerais de GHG atribuídos ao etanol.

Finalizando o presente critério, apresenta-se como menor importância relativa a segurança energética (23,43%). Esta é fundamental para que a matriz energética nacional consiga melhor contribuir para a produção e desenvolvimento socioeconômico de uma determinada região. De acordo com a ANP (2018), o consumo crescente de etanol contribui para uma matriz energética mais diversificada. Ainda, pelo fato de os veículos *flex-fuel* representarem mais de 40% da frota veicular nacional, torna-se fundamental expandir e incentivar o uso de combustíveis renováveis na matriz energética. Com isso, o ESHC surge como uma alternativa viável aos consumidores, seja para veículos ou geração de energia, como retratam Roso et al. (2016).

Percebeu-se que, no critério socioambiental, há uma pequena disparidade entre os subcritérios analisados. Ao emitir mais GHG, há um aumento no aquecimento global, acarretando em impactos ambientais relevantes, como derretimento de geleiras nas calotas polares, mudanças no padrão climático em certas regiões, etc. No critério “impacto ambiental”, são consideradas situações extremas, como efeito de vazamento de combustível em áreas urbanas e rurais, cultivo de matéria-prima do etanol, entre outras. Já na emissão de GHG, são analisados os efeitos que estes produzem na camada de ozônio, aumentando a temperatura média global.

Encerrando esta etapa da pesquisa, foram calculadas as médias das matrizes do subcritério técnico. O quadro 20 apresenta os pesos de importância, estes já normalizados, bem como seu λ_{max} , IC e RC correspondentes.

Quadro 20 - Pesos da matriz subcritério técnico

SUBCRITÉRIO	PESO DE IMPORTÂNCIA (normalizado)	λ_{max}	IC	RC (%)
Infraestrutura logística disponível	5,65%	3,094	0,047	8,10
Poder calorífico do ESHC	63,53%			
Miscibilidade entre etanol-gasolina-água	30,82%			

FONTE: o autor

Verificou-se que, ao analisar de forma isolada o critério técnico, o subcritério “Poder Calorífico do ESHC” possui uma alta importância relativa em relação aos demais subcritérios. Este fato é justificado ao se relacionar o poder calorífico de um determinado combustível e seu consumo volumétrico. Misturas que possuam maior poder calorífico (medido em Mj/kg) consomem menores volumes líquidos em um determinado espaço de tempo. Conforme relatam Breaux e Archarya (2013), ao adicionar maiores quantidades de água na mistura com etanol, o poder calorífico diminui gradativamente. Com isso, há maior consumo volumétrico dessa mistura para que haja mesmo desempenho do motor. Apesar do baixo poder calorífico, o ESHC, em comparação com outros combustíveis, possui maior octanagem (exceto em comparação com o EHC), contribuindo para um aumento na potência do motor de um veículo.

Com média importância, porém menos da metade em relação ao anterior subcritério, destaca-se a miscibilidade ternária entre etanol-água-gasolina (30,82%). Para que os veículos com motores *flex-fuel* possam funcionar sem danos, é necessário que a mistura ternária mencionada ocorra. Esses motores são projetados para funcionarem com gasolina (mais adição de E25) e etanol (E94W6). Ao adicionar um combustível com maior concentração de água na mistura com o etanol, este se tornará super-hidratado. Porém, a miscibilidade com a gasolina não ocorre, pois há separação das fases entre as diferentes substâncias. Para que este fato não aconteça, é necessário que sejam adicionados estabilizadores de fases, o que acarretaria em maiores custos de

consumo do ESHC. Ainda, a maior concentração de água pode danificar gradativamente os motores *flex-fuel*. Da mesma maneira que ocorre com a miscibilidade, os estabilizadores de fase resolveriam esse problema.

Em relação à infraestrutura logística disponível, este subcritério foi apresentado com menor importância relativa (5,65%). A logística de um determinado combustível tem relevância significativa para que haja consumo por parte dos clientes. Porém, relacionado com o poder calorífico de um determinado combustível, pode-se tornar inviável o uso. Em áreas mais próximas das usinas sucroalcooleiras, o consumo de ESHC é maior. Pelo fato de haver uma maior concentração de água na mistura, os locais mais distantes das áreas produtoras não vêem o ESHC como economicamente viável, pois muitos não desejam custear o excesso de água a ser vendida.

6 CONCLUSÃO

Neste capítulo, serão apresentadas as considerações finais da pesquisa, a partir dos resultados encontrados. Além disso, as limitações e indicativos de estudos futuros são apresentados nas seções 6.2 e 6.3.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta pesquisa foi realizar um estudo sobre os fatores críticos de sucesso na viabilidade do etanol super-hidratado como combustível para fins de mobilidade e geração de energia, no Brasil. Por um lado, o ESHC apresenta uma concentração de água maior na mistura do que o etanol hidratado combustível (E94W6). Isso significa dizer que o consumo energético deste combustível é menor do que o EHC, resultando em uma menor emissão de GHG. Não obstante a essa visão, o custo de produção é menor, pelo fato de a etapa da desidratação não acontecer. Esta etapa é responsável por cerca de 35 a 50% dos custos de produção, em função do gasto energético exponencial que ocorre.

Por outro lado, a viabilidade do etanol super-hidratado apresenta entraves que devem ser considerados na pesquisa. O menor poder calorífico do combustível acarreta em um maior consumo volumétrico do mesmo. Dessa maneira, torna-se mais oneroso ao consumidor fazer uso constante desse combustível, mesmo este tendo a possibilidade de possuir um preço de venda mais vantajoso. Ainda, o etanol com maior concentração de água na mistura faz com que não haja a homogeneização das substâncias (etanol-água-gasolina) por si só. Para que esta ocorra, é necessário que a mistura esteja em um ponto de equilíbrio, conforme o diagrama de fases (figura 6, presente na revisão de literatura). Outro ponto importante é a questão logística. O transporte de etanol ocorre, em grande parte, em áreas próximas de usinas produtoras de açúcar e álcool. Para áreas mais distantes, são recomendados outros modais além do modal rodoviário, como dutoviário, ferroviário, para que maiores quantidades de etanol sejam transportados. Porém, estes não são explorados no Brasil de forma eficiente.

Diante do exposto, foi levantado o seguinte problema de pesquisa: Quais são os fatores que mais relevantes na produção e comercialização do etanol super-hidratado, para fins de mobilidade e geração de energia, no Brasil? A partir deste questionamento, foram elaborados os objetivos geral e específicos. O objetivo desta pesquisa foi realizar um estudo sobre os fatores críticos de sucesso na viabilidade do etanol super-hidratado como combustível para fins de mobilidade e geração de energia, no Brasil. A fim de atingir esse objetivo, utilizou-se como metodologia uma abordagem quanti-qualitativa, onde foi possível utilizar um método multicritério que melhor avaliasse os fatores críticos de sucesso na viabilidade do etanol super-hidratado, para fins de combustível de mobilidade e geração de energia, no Brasil. Foi construída uma modelagem, baseada no método estendido de Chang do *Fuzzy-Analytic Hierarchy Process*. Justifica-se o uso desse método pelo motivo de a lógica *Fuzzy* levar em conta as incertezas e imprecisões compostas nos diversos problemas a serem avaliados, simplificando os resultados. Além disso, sua combinação com o método AHP permite identificar os pesos corretos de cada critério analisado.

A partir de uma pesquisa teórica, realizada em artigos científicos (utilizando bases de dados como CAPES, *Science Direct* e *Scopus*), livros, documentos, foram levantados critérios e subcritérios de avaliação para melhor estudar os fatores críticos de sucesso da viabilidade do ESHC como combustível. Com isso, foi estruturada a árvore de decisão, bem como validaram-se os indicadores, e foi construído e aplicado o instrumento de avaliação aos especialistas (profissionais e pesquisadores sobre etanol anidro e hidratado).

Como resultados obtidos do estudo, destacam-se:

a) os critérios apontados para avaliação foram: financeiro, socioambiental e técnico. Chegou-se à conclusão de que o critério técnico teve maior importância relativa, pois questões como o poder calorífico do etanol e a miscibilidade entre etanol-gasolina-água apresentaram pesos significativos. O fato de o consumidor ter de abastecer mais vezes o veículo com ESHC e o motivo de haver possível separação das fases da mistura comprometem de forma relevante a viabilidade deste combustível.

b) o critério financeiro apresentou importância relativa média. Neste critério, o custo de produção foi o ponto mais destacado. Pelo fato de não haver a etapa de

desidratação, o gasto energético com a produção do ESHC cresce de forma linear até a concentração 80% de etanol em água. Dessa maneira, os custos de produção reduzem em uma margem de 35% a 50%, comparativamente ao EHC, que passa pela etapa de desidratação, com gasto energético exponencial a partir de 80% de etanol em água. Impostos e taxas incidentes sobre o etanol possuem influência considerável sobre o combustível. Há uma variação em cada UF do Brasil. Em estados onde a alíquota do ICMS é maior, o preço final do ESHC é maior, comprometendo a viabilidade econômica do combustível em determinadas regiões. Faz-se uma ressalva em relação ao resultado do custo de distribuição. O custo do frete de etanol por km/ton contribui para uma melhor comercialização em regiões próximas das usinas, preferencialmente dentro do mesmo estado onde foi produzido. Dessa forma, este subcritério deveria ter maior peso do que foi apontado nas análises dos especialistas.

c) no aspecto socioambiental, o impacto ambiental aparece como o subcritério com maior importância relativa. Não somente pela emissão de gases poluentes, mas também pela razão de o ESHC não agredir o meio ambiente na mesma proporção que outros combustíveis. Ainda, programas do governo brasileiro, como o RenovaBio, estão em concordância com o Acordo de Paris, o qual tem como objetivo reduzir os efeitos do aquecimento global na Terra. Por ter um consumo energético menor que o EHC, o uso etanol super-hidratado emite concentrações menores de GEE e gases poluentes, como o CO₂ e o NO_x.

Portanto, considera-se que o objetivo geral desta pesquisa foi atingido, bem como os objetivos específicos, uma vez que a modelagem baseada no método FAHP pôde ser relacionada em pesquisas de análise dos fatores críticos, a fim de buscar um maior auxílio na tomada de decisões, considerando as incertezas e imprecisões do problema apresentado. Somado a isso, pôde-se melhor avaliar o contexto onde o etanol super-hidratado está inserido, uma vez que se mostrou possível considerar este combustível como viável para ser comercializado, tornando-se uma alternativa importante na matriz energética nacional. Dessa forma, pode-se dizer que os principais fatores referentes à produção e comercialização do etanol super-hidratado, para fins de mobilidade e geração de energia, no Brasil são fatores técnico, financeiro e socioambiental.

6.2 LIMITAÇÕES

Como limitação principal à pesquisa, aponta-se o fato de haver pouca literatura específica sobre etanol super-hidratado, fato esse observado na construção da revisão de literatura. Uma hipótese para a ocorrência dessa limitação é a dificuldade em obter dados documentais relacionados diretamente ao ESHC, em instituições de pesquisa. Além disso, os dados sobre o frete do etanol hidratado serviram para dar uma ideia geral sobre os valores cobrados.

Outra limitação considerada na presente pesquisa é o caráter preliminar que a mesma possui. Por se tratar de um assunto pouco pesquisado e pelo fato de poucos especialistas participarem da mesma, há a necessidade de que sejam realizados estudos futuros em relação ao tema.

6.3 ESTUDOS FUTUROS

A presente pesquisa possui pontos que podem ser aproveitados em estudos futuros. Por se tratar de um estudo preliminar, são necessárias pesquisas mais específicas em cada critério analisado no estudo. Ainda, sugere-se a aplicação de novas técnicas de pesquisa, utilizando apenas um método multicritério de tomada de decisão, para que se tenha a possibilidade de haver diferentes conclusões sobre o mesmo tema central.

Sugere-se também um estudo técnico mais aprofundado sobre as vantagens e desvantagens do uso do etanol super-hidratado, como combustível alternativo aos combustíveis fósseis. Questões como poder calorífico, uso de estabilizadores de fases, gasto energético podem ser estudados de forma mais específica, a fim de que se obtenham conclusões mais precisas, sob a ótica técnica. Isso se justifica pela característica genérica e preliminar que esta pesquisa possui.

REFERÊNCIAS

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Anuário da Indústria Automobilística. Disponível em <<http://www.anfavea.com.br/anuarios.html>>. Acesso em 27/12/2017.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. **Dados estatísticos sobre produção e consumo de combustíveis**. Disponível em <http://www.anp.gov.br/wwwanp/dados-estatisticos>. Acesso em 05/02/2018.

_____. **Boletim do Etanol 2017**. Disponível em <http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/boletins-anp/2385-boletim-do-etanol>. Acesso em 27/02/2018.

_____. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2018**. Disponível em <http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2018>. Acesso em 16/02/2019.

ALVARENGA, R.P.; QUEIROZ, T.R. Caracterização dos aspectos e impactos econômicos, sociais e ambientais do setor sucroalcooleiro paulista. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 46, 2008, Rio Branco, **Anais**, XLVI SOBER, Rio Branco. Disponível em <http://ageconsearch.umn.edu/record/113960>. Acesso em 07/03/2018.

BARRINGTON-LEIGH, C.; OULIARIS, M. The renewable energy landscape in Canada: A spatial analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 809-819, 2017.

BAUDRY, G.; MACHARIS, C.; VALLÉE, T. Range-based Multi-Actor Multi-Criteria Analysis: A combined method of Multi-Actor Multi-Criteria Analysis and Monte Carlo simulation to support participatory decision making under uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 264, n. 1, p. 257–269, 2018

BELINCANTA, J.; ALCHORNE, J. A.; TEIXEIRA DA SILVA, M. The Brazilian experience with ethanol fuel: Aspects of production, use, quality and distribution logistics. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 33, n. 4, p. 1091–1102, 2016

BENTIVOGLIO, D.; FINCO, A.; BACCHI, M. Interdependencies between Biofuel, Fuel and Food Prices: The Case of the Brazilian Ethanol Market. **Energies**, v. 9, p. 464, 2016.

BILHÃO, J. A. **Viabilidade técnico-econômica do uso do etanol super-hidratado em motores de ciclo Otto**. 2015. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

BODEN, T. A.; MARLAND, G.; ANDRES, R. J.; **Global, Regional, and national fossil-fuel CO2 emissions**. Departamento de Energia dos EUA: Oak Ridge, Tennessee, USA, 2016.

BOLOVENTA, F. C.; BIAGGIONI, M. A. Diagnóstico energético de rotas de escoamento do etanol da região Centro-Oeste do Brasil para exportação. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 36, p. 408-419, 2016.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. **Gestão logística de cadeias de suprimentos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BREAUX, B.; ACHARYA, S. The effect of elevated water content on ethanol combustion: a feasibility study. **Proceedings of the ASME 2011 Power Conference**. Denver, EUA, 2011.

_____. The effect of elevated water content on swirl-stabilized ethanol/air flames. **Fuel**, v. 105, p. 90-102, 2013.

CÂMARA DOS DEPUTADOS FEDERAIS. **Lei nº 13.576/2017 – Política Nacional de Biocombustíveis**. Disponível em <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2017/lei-13576-26-dezembro-2017-786013-publicacaooriginal-154631-pl.html>. Acesso em 07/02/2018.

CAPUTO, M. M. **Indução da maturação por produtos químicos e sua consequência na qualidade tecnológica de diferentes genótipos de cana-de-açúcar**. 138f. 2006. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CASTRILLON, C.L.; LEON, J.A., PALACIOS-BERECHE, M.C.; PALACIOS BERECHE, R.; NEBRA, S.A. Improvements in fermentation and cogeneration system in the ethanol production process: Hybrid membrane fermentation and heat integration of the overall process through Pinch Analysis. **Energy**, v. 156, p. 468-480, 2018.

CHANG, D.-Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. **European Journal of Operational Research**, v. 95, p. 649-655, 1996.

CHEN, L.; REN, J. Multi-attribute sustainability evaluation of alternative aviation fuels based on fuzzy ANP and fuzzy grey relational analysis. **Journal of Air Transport**, v. 68, p. 176-186, 2018.

CONTRERAS-LISPERGUER, R.; BATUECAS, E.; MAYO, C.; DÍAZ, R.; PÉREZ, F.J.; SPRINGER, C. Sustainability assessment of electricity cogeneration from sugarcane bagasse in Jamaica. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, p. 390-401, 2018.

COPERSUCAR. **Academia do açúcar e do álcool**. Disponível em <http://www.copersucar.com.br/institucional/por/academia/cana_acucar.asp>. Acesso em 15/04/2019.

CORREA, G.; MUÑOZ, P.; FALAGUERRA, T.; RODRIGUEZ, C.R. Performance comparison of conventional, hybrid, hydrogen and electric urban buses using well to wheel analysis. **Energy**, v. 141, p. 537-549, 2017.

COSTA, R.; SODRÉ, J.R. Hydrous ethanol vs. gasoline-ethanol blend: Engine performance and emissions. **Fuel**, v. 89, p. 287-293, 2010.

COWI, **State of the Art on Alternative Fuels Transport Systems in the European Union**. 128 p. 2015.

ÇOLAK, M.; KAYA, I. Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 80, p. 840-853, 2017.

DEMÇZUK, A.; PADULA, A. D. Using system dynamics modeling to evaluate the feasibility of ethanol supply chain in Brazil: The role of sugarcane yield, gasoline prices and sales tax rates. **Biomass and Bioenergy**, v. 97, p. 186–211, 2017.

DIAS, M.O.S.; CUNHA, M.P.; JESUS, C.D.F.; MIRNA, I.G. Simulation of ethanol production from sugarcane in Brazil: economic study of an autonomous distillery. **Computer Aided Chemical Engineering**, v. 28, p. 733-738, 2010.

_____ ; JUNQUEIRA, T.L.; CAVALLET, O.; CUNHA, M.P.; JESUS, C.D.F.; MANTELATTO, P.E.; ROSSELL, C.E.V.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A. Cogeneration in integrated first and second generation ethanol from sugarcane. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 91, p. 1411-1417, 2013.

_____ ; MODESTO, M.; ENSINAS, A.V.; NEBRA, S.A.; FILHO, R.M.; ROSSELL, C.E.V.; Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems. **Energy**, v. 36, p. 3691-3703, 2011.

DU, X.; CARRIQUIRY, M.A. Flex-fuel vehicle adoption and dynamics of ethanol prices: lessons from Brazil. **Energy Policy**, v. 59, p. 507-512, 2013.

DUBOIS, A.; KULPA, L.; SOUZA, E. **Gestão de custos e formação de preços: conceitos, modelos e instrumentos, abordagem do capital de giro e da margem de competitividade**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

ECKERT, C.T.; FRIGO, E.P.; ALBRECHT, L.P.; ALBRECHT, A.J.P.; CHRIST, D.; SANTOS, W.G.; BERKEMBROCK, E.; EGEWARTH, V.A. Maize ethanol production in Brazil: characteristics and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3907-3912, 2018.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise da conjuntura dos biocombustíveis – ano 2012**. 2013. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-167/An%C3%A1lise%20de%20Conjuntura%20dos%20Biocombust%C3%ADveis%20E2%80%93%20Ano%202012.pdf>>. Acesso em 23/12/2017.

ESCRIG-OLMEDO, E.; RIVERA-LIRIO, J.M.; MUÑOZ-TORRES, M.J.; FERNÁNDEZ-ISQUIERDO. Integrating multiple ESG investors' preferences into sustainable investment: A fuzzy multicriteria methodological approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 1334–1345, 2017.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Final Energy consumption by mode of transport.** Disponível em: <<http://www.eea.europa.eu/data-andmaps/indicators/transport-final-energy-consumption-by-mode/assessment-6>>. Acesso em 05/01/2018.

FAGUNDES, P.M. **As relações internacionais de interdependência no setor de etanol e suas implicações na cadeia de produção brasileira.** 2013. 113f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

FAGUNDEZ, J.L.S. **Avaliação energética do uso de álcoois combustíveis em motores de combustão interna.** 2016. 171f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

FEDERAÇÃO NACIONAL DO COMÉRCIO DE COMBUSTÍVEIS E DE LUBRIFICANTES – FECOMBUSTÍVEIS. **Tributação dos Combustíveis por Estado.** Disponível em <http://www.fecombustiveis.org.br/wp-content/uploads/2018/03/Carga-tribut%C3%A1ria-estadual-Mar%C3%A7o-2018-1%C2%AA-quinzena.pdf>. Acesso em 10/03/2018.

FERNANDES, B. Á. O. F. **Análise dos fatores de competitividade que influenciaram a migração de valor entre as empresas Nokia e Apple no período de 2007 a 2012.** 2014. 96f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Municipal de São Caetano do Sul, São Caetano do Sul, 2014.

FERNÁNDEZ, J. M. M.; PALACIOS, H. M.; CABAL, J. V. Á; HUERTA, G. M. M. Methodology for industrial solid waste management: Implementation to sludge management in Asturias (Spain). **Waste Management & Research**, v. 32[11], p. 1103-1112, 2014.

FILHO, O. V. Gasoline C Made With Hydrous Ethanol. **Water**, v. 100, n. October, p. 2–9, 2016.

FILOSO, S.; CARMO, J.B.; MARDEGAN, S.F.; LINS, S.R.M.; GOMES, T.F.; MARTINELLI, L.A. Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 52, p. 1847-1856, 2015.

FORTE, A.; ZUCARO, A.; FIERRO, A. Life cycle assessment of wheat straw lignocellulosic bio-ethanol fuel in a local biorefinery prospective. **Journal of Cleaner Production**, v. 194, p. 138-149, 2018.

GALOS, J.; SUTCLIFFE, M.; CEBON, D.; PIECYK, M.; GREENING, P. Reducing the energy consumption of heavy goods vehicles through the application of lightweight trailers: Fleet case studies. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 41, p. 40-49, 2015.

GAMA, M.B.; WIDMER, J.A. Avaliação econômica e energética da distribuição direta do etanol hidratado no estado de São Paulo. **Transportes**, v.4, p. 13-20, 2015.

GANGA, G.M.D.; CARPINETTI, L.C.R.; POLITANO, P.R. Gestão do desempenho em cadeias de suprimentos usando lógica *fuzzy*. **Gestão e Produção**, v.18, p. 755-774, 2011.

GARCIA, J.C.C.; SPERLING, E. Greenhouse gas emissions from sugar cane ethanol: Estimate considering current different production scenarios in Minas Gerais, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1033-1049, 2017.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, v. 315, p. 808-810, 2007.

GOMES, P.M. **Modelagem dinâmica do uso da terra e instrumentos de política ambiental: expansão da cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do Tietê/Jacaré (UGRHI 13)**. 2013. 127f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2013.

HOEKMAN, S.K.; BROCH, A. Environmental implications of higher ethanol production and use in the U.S.: A literature review. Part II–Biodiversity, land use change, GHG emissions, and sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 3159-3177, 2018.

JONKER, J.G.G; JUNGINGER, H.M.; VERSTEGEN, J.A.; LIN, T.; RODRÍGUEZ, L.F.; TING, K.C.; FAAIJ, A.P.C.; VAN DER HILST, F. Supply chain optimization of sugarcane first generation and eucalyptus second generation ethanol production in Brazil. **Applied Energy**, v. 173, p. 494-510, 2016.

LA, E. N.; COBERTURA, R. D. E.; GIRÓN, L. E. Predicción de volatilidad de la rentabilidad diaria del mercado del azúcar y su aplicación en la razón de cobertura. **Semestre Económico**, n. 118, p. 105–136, 2015.

LADISCH, M. R.; DYCK, K. Dehydration of Ethanol: New Approach Gives Positive Energy Balance. **Science**, v. 205, p. 878-900, 1979.

LANZANOVA, T.D.M.; DALLA NORA, M.; ZHAO, H. Performance and economic analysis of a direct injection spark ignition engine fueled with wet ethanol. **Applied Energy**, v. 169, p. 230-239, 2016.

LI, L. HOFFEMAN, R. McINNIS, B.; PAIX, M.; LI, X. Impacts of alternative vehicle fuel policies on Canadian energy demand and emissions. **Transport Policy**, v. 21, p. 92-100, 2012.

LI, C.; NEGNEVITSKY, M.; WANG, X.; YUE, W.L.; ZOU, X. Multi-criteria analysis of policies for implementing clean energy vehicles in China. **Energy Policy**, v. 129, p. 826-840, 2019.

LIMA, N.C. **A formação dos preços do Etanol Hidratado no mercado brasileiro de combustíveis**. 2011. 226f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, USP, São Paulo, 2011.

LIN, Y.; ZHANG, W.; WANG, X.; ZHANG, Q.; WU, D.; HONG, H. Optimisation of simultaneous saccharification and fermentation of wheat straw for ethanol production. **Fuel**, v.112, p. 331-337, 2013.

LIU, X., MA, S., TIAN, J., JIA, N., LI, G. A system dynamics approach to scenario analysis for urban passenger transport energy consumption and CO₂ emissions: a case study of Beijing. **Energy Policy**, v.85, p. 253–270, 2015.

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

LOPEZ-PLAZA, E.L.; HERNÁNDEZ, S.; BARROSO-MUÑOZ, F.O.; SEGOVIA-HERNANDEZ, J.G.; ACEVES, S.M.; MARTINEZ-FRÍAS, J.; SAXENA, S.; DIBBLE, R. Experimental and Theoretical Study of the Energy Savings from Wet Ethanol Production and Utilization. **Energy and Emission Control Technologies**, v. 2, n. 5, p. 440-445, 2014.

KANNAN, D.; KHODAVERDI, R.; OLFAT, L.; JAFARIAN, A.; DIABAT, A. Integrated fuzzy multi criteria decision making method and multiobjective programming approach for supplier selection and order allocation in a green supply chain. **Journal of Cleaner Production**, v. 47, p. 355-367, 2013.

MACHADO, G.B.; MELO, T.C.C.; MENDONÇA SOARES, L.A. Flex Fuel Engine - Influence of Fuel Composition on the CA50 at Maximum Brake Torque Condition. **SAE Technical Paper**, nº 2015360215, 2015.

MACK, J. H.; ACEVES, S. M.; DIBBLE, R. W. Demonstrating direct use of wet ethanol in a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine. **Energy**, v. 34, n. 6, p. 782–787, 2009.

MANOCHIO, C; ANDRADE, B.R.; RODRIGUEZ, R.P.; MORAES, B.S. Ethanol from biomass: A comparative overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, n. June, p. 743–755, 2017.

MARCONI, M.A.; LAKATOS, E.M. **Metodologia Científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2011.

MAROUN, M.R.; LA ROVERE, E.L. Ethanol and food production by family smallholdings in rural Brazil: Economic and socio-environmental analysis of micro distilleries in the State of Rio Grande do Sul. **Biomass and Bioenergy**, v. 63, p. 140-155, 2014.

MATIAS-PEREIRA, J. **Manual de Metodologia da Pesquisa Científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

MAYER, F. D. et al. Small-scale production of hydrous ethanol fuel: Economic and environmental assessment. **Biomass and Bioenergy**, v. 93, p. 168–179, 2016.

MENEZES, E.; MAIA, A.G.; CARVALHO, C.S. Effectiveness of low-carbon development strategies: Evaluation of policy scenarios for the urban transport sector in a Brazilian megacity. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 114, p. 226-241, 2017.

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

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS – MDIC. Disponível em <http://www.mdic.gov.br>. Acesso em 18/01/2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Disponível em <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 18/12/2017.

_____. **RenovaBio: Cenários e simulações de impacto**. Disponível em <http://www.mme.com.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveis-renovaveis/programas/renovabio>. Acesso em 06/01/2018.

MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Acordo de Paris**. Disponível em <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>. Acesso em 07/02/2018.

MONTEIRO, M.F.; ROSA, H.A.; REIS, A.C.C.S. Produção de etanol de primeira e segunda geração. In: SEMINÁRIO ENGENHARIA DE ENERGIA NA AGRICULTURA, 1, 2016, Cascavel, **Anais**, I Sem. De Eng. De energia na agricultura, Cascavel. Disponível em <http://saber.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/viewFile/16011/10897>. Acesso em 07/05/2019.

MORAES, A.F.D.M. et al. Jet biofuels in Brazil: Sustainability challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 716-726, 2014.

NIGAM, P. S.; SINGH, A. Production of liquid biofuels from renewable resources. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 37, p. 52-68, 2011.

NOVACANA. **Propriedades Físico-Químicas do Etanol**. Disponível em <http://www.novacana.com.br/etanol/propriedades-fisico-quimicas>. Acesso em 20/01/2018.

_____. **Etanol de milho enfrenta desafios na formação do preço**. Disponível em <https://www.novacana.com/n/etanol/alternativas/etanol-milho-enfrenta-desafios-expansao-formacao-precos-escoamento-111018>. Acesso em 27/11/2018.

_____. **Logística: Infraestrutura e transporte para exportação de etanol**. Disponível em <https://www.novacana.com/etanol/logistica-infraestrutura-transporte>. Acesso em 04/02/2019.

_____. Uso da vinhaça na cultura da cana-de-açúcar. Disponível em <https://www.novacana.com/cana/uso-vinhaca-cultura>. Acesso em 20/02/2019.

OECD-FAO. **Agricultural Outlook 2016-2025**. Disponível em <<http://www.fao.org/3/a-i5778e.pdf>>. Acesso em 25/01/2018.

OGUZTIMUR, S. Why fuzzy analytic hierarchy process approach for transport problems? **European Regional Science Association Conference**. 2011. Disponível em <https://ideas.repec.org/p/wiw/wiwsa/ersa11p438.html>. Acesso em 12/02/2019.

OLIVARES, R.D.C.; RIVERA, S.S.; McLEOD, J.E.N. Database for accidents and incidents in the fuel ethanol industry. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 38, p. 276-297, 2015.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Adoção do Acordo Paris**. Convenção Quadro sobre mudanças climáticas. 2015.

OUMA, Y.; OPUDO, J.; NYAMBENA, S. Comparison of Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS for Road Pavement Maintenance Prioritization: Methodological Exposition and Case Study. **Advances in Civil Engineering**, p.17, 2015.

PAPADOPOULOS, A.; BOEMI, S.; GIAMA, E.; SLINI, T. Knowledge Transfer Research needs for preparing mitigation/adaptation policy portfolios. **Educational technology research and development**, v. 59, p.71-90, 2011.

PAZUCH, F.A.; NOGUEIRA, C.E.C.; SOUZA, S.N.M.; MICUANSKI, L.; FRIEDRICH, L.; LENZ, A.M. Economic evaluation of the replacement of sugar cane bagasse by vinasse, as a source of energy in a power plant in the state of Paraná, Brazil. **Renewable and sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 34-42, 2017.

PETRINI, M.A.; ROCHA, J.V.; BROWN, J.C.; BISPO, R.C. Using an analytic hierarchy process approach to prioritize public policies addressing family farming in Brazil. **Land Use Policy**, v. 51, p. 85-94, 2016.

PRADO, F. L. do. **Metodologia de projetos**. São Paulo: Saraiva, 2011.

ROCHEDO, P.R.R.; COSTA, I.V.L.; IMPÉRIO, M.; HOFFMANN, B.S.; MERSCHMANN, P.R.C.; OLIVEIRA, C.C.N.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Carbon capture potential and costs in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 280–295, 2016.

RODRIGUEZ, L. C.; MAY, B.; HERR, A.; FARINE, D.; O'CONNELL, D. Biofuel excision and the viability of ethanol production in the Green Triangle, Australia. **Energy Policy**, v. 39, p. 1951-1957, 2011.

ROSO, V. R.; DALLA NORA, M.; MARTINS, M.E.S.; MACHADO, P.R.M. Consumo de combustível e emissões de poluentes em um motor Diesel convertido a etanol para geração térmica de energia elétrica. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 37, p. 131-142, 2016.

SAATY, T. **The analytic hierarchy process**. RWS Publicationns. 1996.

SAFFY, H.A.; NORTHROP, W.F.; KITTELSON, D.B.; BOIES, A.M. Energy, carbon dioxide and water use implications of hydrous ethanol production. **Energy Conversion and Management**, v. 105, p. 900-907, 2015.

SAGARDI, M. A. R.; SANCHEZ-RAMIREZ, C.; CORTES-ROBLES, G.; ALOR-HERNANDEZ, G.; CEDILLO-CAMPOS, M. G. Dynamic analysis of feasibility in ethanol supply chain for biofuel production in Mexico. **Applied Energy**, v. 123, p. 358-367, 2014.

SALVI, B.L.; SUBRAMANIAN, K.A.; PANWAR, N.L. Alternative fuels for transportation vehicles: A technical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 404-419, 2013.

SANTOS, A.S.; GILIO, L.; HALMENSCHLAGER, V; DINIZ, T.B.; ALMEIDA, A.N. Flexible-fuel automobiles and CO₂ emissions in Brazil: Parametric and semiparametric analysis using panel data. **Habitat International**, v. 71, p. 147-155, 2018.

SAXENA, S.; VUILLEUMIER, D.; KOZARAC, D.; KRIECK, M.; DIBBLE, R.; ACEVES, S. Optimal operating conditions for wet ethanol in a HCCI engine using exhaust gas heat recovery. **Applied Energy**, v. 116, p. 269-277, 2014.

SCACHETTI, M.T. **Avaliação consequencial do Ciclo de Vida: discussão e aplicação comparativa com a abordagem atribucional**. 2016. 160f. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2016.

SEHATPOUR, M. H.; KAZEMI, A.; SEHATPOUR, H. EDDIN. Evaluation of alternative fuels for light-duty vehicles in Iran using a multi-criteria approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, n. May 2016, p. 295–310, 2017.

SIFRECA – Sistema de Informações de Fretes. **Frete rodoviários de etanol**. Disponível em <https://sifreca.esalq.usp.br/mercado/etanol>. Acesso em 06/02/2019.

SILVA, R.N.S.; LINS, L.S. **Gestão de custos: contabilidade, controle e análise**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2014.

SOUSA, P.N.; SCUR, G.; SOUZA, R.C. Panorama da cadeia produtiva do etanol no Brasil: gargalos e proposições para seu desenvolvimento, **Revista GEPROS**, v.3, p. 145-159, 2012.

SUGANTHI, L.; INIYAN, S.; SAMUEL, A.A. Applications of fuzzy logic in renewable energy systems – A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 48, p. 585-607, 2015.

SURAWSKI, N. C. et al. Application of Multicriteria Decision Making Methods to Compression Ignition Engine Efficiency and Gaseous, Particulate, and Greenhouse Gas Emissions. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 4, p. 1904–1912, 2013.

SZULCZYK, K.R.; McCARL, B.A.; CORNFORTH, G. Market penetration of ethanol. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 14, p. 394-403, 2010.

TABORDA, L.W. **Avaliação da viabilidade técnica e econômica da produção de etanol em planta piloto a partir da batata-doce (ipomoea batatas)**. 2014. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria, 2014.

TIBOLA, J.R.; LANZANOVA, T. D. M.; MARTINS, M. E. S.; GRÜNDLING, H. A.; PINHEIRO, H. Modeling and speed control design of an ethanol engine for variable speed gensets. **Control Engineering Practice**, v. 35, p. 54-66, 2015.

TSITA, K. G.; PILAVACHI, P. A. Evaluation of next generation biomass derived fuels for the transport sector. **Energy Policy**, v. 62, p. 443–455, 2013.

TURCK SIN, L.; MACHARIS, C.; LEBEAU, K.; BOUREIMA, F.; VAN MIERLO, J.; BRAM, S.; DE RUYCK, J.; MERTENS, L.; JOSSART, J.M.; GORISSEN, L.; PELKMANS, L. A multi-actor multi-criteria framework to assess the stakeholder support for different biofuel options: The case of Belgium. **Energy Policy**, v. 39, p. 200-214, 2011.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Vendas de etanol hidratado por município**. Disponível em <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em 03/11/2017.

_____. **Frota brasileira de automóveis e veículos comerciais leves**. Disponível em <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em 02/02/2018.

_____. **Consumo de etanol hidratado combustível**. Disponível em <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em 19/12/2018.

_____. Venda direta de etanol e aumento de biodiesel reduziram preço dos combustíveis, defendem produtores. Disponível em <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em 22/04/2019.

U. S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION: **Biofuels: Ethanol and Biodiesel. Explained 2015**. Disponível em http://www.eia.gov/Energyexplained/?page=biofuel_ethanol_home. Acesso em 08 de outubro de 2017.

VAIDYA, O. S.; KUMAR, S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. **European Journal of Operational Research**, v. 169, n. 1, p. 1–29, 2006.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em Administração**. São Paulo: Atlas, 2000.

WAGNER, L. et al. Trading Off Global Fuel Supply, CO2 Emissions and Sustainable Development. **Plos One**, v. 11, n. 3, p. e0149406, 2016

WALKER, G. M.; **Bioethanol: Science and technology of fuel alcohol**. Abertay University: Reino Unido, 2010.

WANG, L.; QUICENO, R.; PRICE, C.; MALPAS, R.; WOODS, J. Economic and GHG emissions analyses for sugarcane ethanol in Brazil: Looking forward. **Renewable and sustainable energy reviews**, v.40, p. 571-582, 2014.

WANG, Y.; CHENG, M-H. Greenhouse gas emissions embedded in US-China fuel ethanol trade: A comparative well-to-wheel estimate. *Journal of Cleaner Production*, v. 183, p. 653-661, 2018.

WATANABE, R. A. **Um Estudo sobre um Método de Defuzzificação para Eventos Fuzzy em Sistemas Baseados em Regras**. 2016. 84f. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Universidade Estadual de Campinas: Campinas, 2016.

YARA. **Produção Mundial de Cana**. Disponível em <<http://www.yarabrasil.com.br/nutricao-plantas/culturas/cana-de-acucar/fatores-chave/producaomundial>>. Acesso em 13/01/2018.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets as basis for a theory of possibility. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 1, n.1, p. 3-28, 1978.

ZANGHELINI, G. M.; CHERUBINI, E.; SOARES, S. R. How Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) is aiding Life Cycle Assessment (LCA) in results interpretation. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 609–622, 2018.

ZIMMERMANN, H.-J. Latent Connectives in Human Decision Making. **Fuzzy Sets and systems**, v.4, p. 37-51, 1980.

APÊNDICES

APÊNDICE A – INSTRUMENTO DE AVALIAÇÃO

Análise de viabilidade técnica, financeira e socioambiental do etanol super-hidratado no Brasil

Muito obrigado por participar da pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSM . O presente questionário visa avaliar o potencial de comercialização do etanol super-hidratado como combustível para fins de mobilidade e geração de energia, no Brasil. Na pesquisa, são considerados os estágios de produção, a distribuição e a aplicação do etanol super-hidratado

Para responder, podes acessar o título acima “Análise da viabilidade técnica, financeira e socioambiental do etanol super-hidratado no Brasil” ou “PREENCHER FORMULÁRIO” logo abaixo.

Ao final, ao clicar em enviar, estarás confirmando o preenchimento e enviando suas respostas.

O etanol super-hidratado é um combustível semelhante ao etanol hidratado comum vendido nos postos de abastecimento. Entretanto, por este apresentar uma maior quantidade de água em sua formulação, seu processo produtivo consome menos energia e libera menos CO2 na atmosfera.

OBSERVAÇÃO: sobre os níveis de importância, segue abaixo o significado de cada um deles:

- 1 - Iguamente importante
- 2 - Um pouco mais importante
- 3 - Mais importante
- 4 - Muito mais importante
- 5 - Extremamente mais importante



PPGEP
Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Produção



Endereço de e-mail* _____

Nessa seção, serão apresentados 3 critérios relacionados com o potencial de comercialização do etanol super-hidratado.

Ordene os três critérios, onde o 1 significa "mais importante" e 3 "menos importante", para avaliar o potencial de comercialização do etanol super-hidratado no Brasil

1) Financeiro: O Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo. Relacionado a isso, o etanol super-hidratado é um combustível com custo de produção mais baixo que o etanol hidratado comum (EHC). Os impostos que incidem sobre o etanol são o PIS/COFINS (federal) e ICMS (estadual). Quanto a distribuição, os custos relacionados são o de armazenagem, frete (quilometragem percorrida), entre outros.

2) Socioambiental: Em comparação ao etanol hidratado combustível (EHC), a emissão de gases do efeito estufa (GEE) do etanol super-hidratado é menor. Por ser menos poluente, o consumo de etanol super-hidratado deve ser fomentado pelos países produtores. Ainda, o etanol super-hidratado apresenta um menor impacto no meio-ambiente por necessitar de menos energia durante seu processo produtivo, reduzindo assim as emissões de GEE. Este critério engloba igualmente o caráter como fonte renovável de energia, assim como o custo energético desenvolvido.

3) Técnico: Pelo fato de ter um poder calorífico menor que o EHC, o consumo volumétrico do etanol super-hidratado combustível é maior. Devido à miscibilidade entre água-gasolina-etanol, o etanol super-hidratado poderia comprometer a função flex-fuel em automóveis com esse motor, tornando necessária a adição de produtos estabilizadores de fase.

- 1) Relacione os critérios acima descritos com a ordenação de importância entre eles.

Nível de importância	Financeiro	Socioambiental	Técnico
Mais importante			
Meio importante			
Menos importante			

- 2) Nas três próximas questões, serão realizadas comparações entre os critérios acima analisados: MAIS IMPORTANTE, MEIO IMPORTANTE e MENOS IMPORTANTE (de acordo com as escolhas anteriores).

2.a) Fazendo uma comparação entre os critérios, qual o nível de importância entre o MAIS importante e o MEIO importante.

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

Igualmente importante						Extremamente mais importante

2.b) Fazendo uma comparação entre os critérios, qual o nível de importância entre o MAIS importante e o MENOS importante

Igualmente importante	1	2	3	4	5	Extremamente mais importante

2.c) Fazendo uma comparação entre os critérios, qual o nível de importância entre o MEIO importante e o MENOS importante

Igualmente importante	1	2	3	4	5	Extremamente mais importante

3) Perguntas a respeito do critério FINANCEIRO

1) Custo de produção: Pré-tratamento da matéria-prima, hidrólise, fermentação, destilação e desidratação.

2) Impostos e taxas: ICMS; PIS/COFINS (para produção e distribuição).

3) Custo de distribuição: Transporte do combustível (entre usinas-distribuidoras de combustível/distribuidoras de combustível-postos de combustível), custo de armazenagem, frete (quilometragem a ser percorrida)

3.a) Relacione os subcritérios acima descritos com a ordenação de importância entre eles.

Nível de importância	Custo de produção	Impostos e taxas	Custo de distribuição
Mais importante			
Meio importante			
Menos importante			

3.b) Fazendo uma comparação entre os subcritérios, qual o nível de importância entre o MAIS importante e o MEIO importante.

	1	2	3	4	5	
Igualmente importante						Extremamente mais importante

3.c) Fazendo uma comparação entre os subcritérios, qual o nível de importância entre o MAIS importante e o MENOS importante.

	1	2	3	4	5	
Igualmente importante						Extremamente mais importante

3.d) Fazendo uma comparação entre os subcritérios, qual o nível de importância entre o MEIO importante e o MENOS importante.

	1	2	3	4	5	
Igualmente importante						Extremamente mais importante

4) Perguntas a respeito do critério SOCIOAMBIENTAL

1) Consumo energético: Emissão de gases poluentes, tais como NOx, CO e hidrocarbonetos não queimados. Durante a destilação da mistura etanol-água, o consumo energético cresce de forma exponencial para concentrações de etanol acima de 80%. O custo de produção do etanol cresce drasticamente após 80% de etanol em água, pois o consumo de energia para remover os últimos 20% de água é cerca de 50% maior que o consumo inicial do processo

2) Segurança Energética: Garantia de que a matriz energética nacional tenha fontes renováveis de energia. Os combustíveis fósseis (gasolina e diesel), consumidos em larga escala, possuem recursos finitos de produção. Dessa forma, o etanol super-hidratado surge como alternativa de fonte renovável de energia.

3) Impacto ambiental: Durante o processo de produção do etanol super-hidratado, ou até mesmo na cultura da cana-de-açúcar, há emissão de gases como o CO₂, o qual contribui para o efeito estufa. Porém, não é um gás poluente. Ainda, com a queima desse combustível, o risco de poluição no ar é menor em comparação com outros combustíveis. Outro ponto importante é que, em casos de acidentes de veículos, podem ocorrer vazamentos de combustíveis. O ESHC apresenta-se como menos danoso ao meio ambiente do que a gasolina ou diesel.

3.a) Relacione os subcritérios acima descritos com a ordenação de importância entre eles.

Nível de importância	Consumo energético	Segurança energética	Impacto ambiental
Mais importante			
Meio importante			
Menos importante			

3.b) Fazendo uma comparação entre os subcritérios, qual o nível de importância entre o MAIS importante e o MEIO importante.

	1	2	3	4	5	
Igualmente importante						Extremamente mais importante

3.c) Fazendo uma comparação entre os subcritérios, qual o nível de importância entre o MAIS importante e o MENOS importante

	1	2	3	4	5	
Igualmente importante						Extremamente mais importante

3.d) Fazendo uma comparação entre os subcritérios, qual o nível de importância entre o MEIO importante e o MENOS importante

	1	2	3	4	5	
Igualmente importante						Extremamente mais importante

5) Perguntas a respeito do critério TÉCNICO

1) Infraestrutura logística disponível: Condições das vias, modais de transporte disponíveis, capacidade de armazenamento das distribuidoras de combustíveis. O principal entrave é o transporte de água a mais, encarecendo o frete e aumentando a demanda dos postos uma vez que o consumo volumétrico do combustível aumenta.

2) Poder calorífico do etanol super-hidratado: O poder calorífico do etanol hidratado combustível (EHC) é cerca de 30% menor do que da gasolina. Isso implica em um consumo maior de EHC. Com o etanol super-hidratado, o consumo é maior do que o EHC, por ter menor poder calorífico.

3) Miscibilidade entre etanol-água-gasolina: Por se tratar de uma mistura ternária, há uma proporção certa dos três componentes para que essa mistura seja homogênea. Ao aumentar a quantidade de água, pode não ocorrer a miscibilidade, comprometendo a função flex-fuel dos automóveis com esse tipo de motor.

5.a) Relacione os subcritérios acima descritos com a ordenação de importância entre eles.

Nível de importância	Consumo energético	Segurança energética	Impacto ambiental
Mais importante			
Meio importante			
Menos importante			

5.b) Fazendo uma comparação entre os subcritérios, qual o nível de importância entre o MAIS importante e o MEIO importante.

	1	2	3	4	5	
Igualmente importante						Extremamente mais importante

5.c) Fazendo uma comparação entre os subcritérios, qual o nível de importância entre o MAIS importante e o MENOS importante.

	1	2	3	4	5	
Igualmente importante						Extremamente mais importante

5.d) Fazendo uma comparação entre os subcritérios, qual o nível de importância entre o MEIO importante e o MENOS importante

	1	2	3	4	5	
Igualmente importante						Extremamente mais importante

Muito obrigado por sua participação, suas respostas serão muito úteis em nossa pesquisa. Agradecemos o tempo e dedicação.