UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

RODRIGO DE MORAES SANTOS

Análise do *trade-off* econômico e ambiental no transporte do etanol hidratado no Brasil: uma aplicação de um modelo de programação linear

São Carlos
2022

RODRIGO DE MORAES SANTOS

Análise do *trade-off* econômico e ambiental no transporte do etanol hidratado no Brasil: uma aplicação de um modelo de programação linear

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Marcel Andreotti Musetti

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2022

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

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues
Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

de Moraes Santos,
Rodrigo

D696a Análise do trade-off econômico e ambiental no transporte do etanol hidratado no Brasil: uma aplicação de um modelo de programação linear / Rodrigo de Moraes Santos; orientador Marcel Andreotti Musetti. São Carlos, 2022.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Processos e Gestão de Operações -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

1. Etanol Hidratado. 2. Otimização. 3. Econômico. 4. Ambiental. 5. Trade-off. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE AVALIAÇÃO OU APROVAÇÃO

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **RODRIGO DE MORAES SANTOS.**

Título da dissertação: "Análise do trade-off econômico e ambiental no transporte do etanol hidratado no Brasil: uma aplicação de um modelo de programação linear".

Data da defesa: 25/07/2022

Comissão Julgadora	Resultado
Prof. Dr. **Marcel Andreotti Musetti** (Orientador) (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)	APROVADO
Profa. Associada **Franklina Maria Bragion de Toledo** (Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/ICMC-USP)	Aprovado
Dr. **José Eduardo Holler Branco** (Secretaria de Mobilidade, Transportes e Trânsito de Piracicaba - SP)	APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção:

Profa. Dra. **Janaina Mascarenhas Hornos da Costa**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

DEDICATÓRIA

À minha família, à minha namorada e aos meus amigos, que formam o que sou hoje e que são essenciais na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Desde o início da minha graduação eu tenho o sonho de fazer um mestrado. A área acadêmica é um dos grandes centros de inovação a nível global, e nós devemos muito aos estudos realizados por todos os pesquisadores de qualquer universidade.

Esse trabalho é uma jornada, fruto de muito esforço e dedicação. Foram bons anos de estudos e trabalho para chegar até aqui. Dia após dia, hora após hora, minuto após minuto eu estive lá, estudando, me dedicando, para chegar até aqui e finalizar o meu tão sonhado mestrado.

No meio do caminho, é claro, tive muitos altos e baixos. As vezes um dos passos saia mais torto, as vezes eu tropeçava, as vezes andava no caminho errado, mas, felizmente, pude contar com diversas pessoas muito queridas que foram cruciais para que eu chegasse até aqui.

Meu primeiro agradecimento vai para a minha família, que me deu topo apoio, condições e me proporcionou uma excelente educação e mentalidade para que eu chegasse até aqui. Meu segundo agradecimento vai ao meu orientador, Marcel Musetti, por toda a parceria e paciência durante esses anos. Meu terceiro agradecimento vai para a Deborah, minha namorada, por todo o suporte, amor e companheirismo nesses anos todos. E por último, mas não menos importante, agradeço a todos os meus amigos e colegas de trabalho por todo o aprendizado. A ordem dos agradecimentos não coloca ninguém em um patamar mais importante que o outro. Todos foram igualmente especiais.

Que a jornada siga seu curso. Que a academia continue desempenhando seu papel na sociedade, e que cada vez mais novos pesquisadores com excelentes ideias venham à tona e mostrem o seu talento.

EPÍGRAFE

“Se você pode sonhar, você pode fazer”

Walt Disney (2015)

RESUMO

RODRIGO, M. S. **Análise do trade-off econômico e ambiental no transporte do etanol hidratado no Brasil:** uma aplicação de um modelo de programação linear. 2022. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

O etanol hidratado usado como combustível tem ganhado relevância na matriz energética brasileira nos últimos anos, principalmente a partir de 2003 com a chegada dos veículos *flex-fuel* no mercado nacional. O aumento do consumo do biocombustível torna a matriz energética brasileira mais sustentável em termos ambientais e contribui para o cumprimento das metas firmadas pelo Brasil no Acordo de Paris, no ano de 2015. Para que o consumo seja incentivado, é necessário que haja um aumento da oferta do produto e que ele seja mais competitivo nos postos de combustível frente à gasolina. O aumento da competitividade por ser realizado por meio de ganhos de eficiência no processo produtivo e no planejamento eficiente da logística das usinas até os postos revendedores. Uma das formas de realizar o planejamento logístico ótimo para o etanol hidratado é por meio de modelos de otimização com foco em minimizar os custos de transporte. Além de minimizar os custos, é possível minimizar os impactos ambientais na etapa do transporte, o que contribui para a redução das emissões e para o atingimento das metas firmadas pelo Brasil no acordo de Paris. No entanto, existe um *trade-off* entre minimizar os custos e as emissões, ao passo que a minimização de um dos objetivos acarreta o aumento do outro. Dentre as estratégias que podem ser utilizadas para mitigar esse *trade-off*, pode-se mencionar a precificação das emissões aos agentes produtores. A fim de quantificar e otimizar os custos de transporte e as emissões na etapa do transporte do etanol hidratado no Brasil, o presente trabalho aplicou um modelo de otimização multiobjetivo utilizando o método do e-restrito com programação linear. Os resultados indicam que existe um *trade-off* entre o planejamento de mínimo custo e mínima emissão no setor de transporte do etanol hidratado no Brasil, e que a precificação das emissões faz com que os agentes optem por alternativas menos poluentes, principalmente por soluções de transporte ferroviária, hidroviária e dutoviárias. Na intenção de minimizar os impactos ambientais e proporcionar uma otimização dos custos, investimentos em infraestrutura de distribuição e transporte intermodal são recomendados.

Palavras-chave: Etanol Hidratado. Logística. Otimização. Custo. Impacto Ambiental.

ABSTRACT

RODRIGO, M. S. **Analysis of the economic and environmental trade-off in the transport of hydrated ethanol in Brazil**: an application of a linear programming model. 2022. Dissertation (Master's) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2022.

In recent years, hydrous ethanol has gained relevance in the Brazilian energy matrix, especially since 2003 with the arrival of flex-fuel vehicles in the national market. The increase in consumption of the biofuel makes the Brazilian energy matrix more sustainable in environmental terms and contributes to the fulfillment of the goals established by Brazil in the Paris Agreement in 2015. To encourage ethanol use there must be an increase in the product offer and in its competitiveness against gasoline at gas stations. The increase in competitiveness can be achieved through efficiency gains in the production process and by the efficient planning of logistics from the ethanol mills to the gas stations. One way to carry out the optimal logistical planning for hydrous ethanol is through optimization models focused on minimizing transport costs. In addition to minimizing costs, it is possible to minimize environmental impacts at the transport stage, which contributes to the reduction of emissions and to the achievement of the goals established by Brazil in the Paris agreement. However, there is a trade-off between minimizing costs and emissions, while minimizing one of them increases the other objective. Among the strategies that can be used to mitigate this trade-off, one can mention the pricing of emissions to producing agents. To quantify and optimize transportation costs and emissions in the hydrous ethanol transport supply chain in Brazil, the present work applied a multi-objective optimization model using the e-constrained method with linear programming. The results indicate that there is a trade-off between minimum cost and minimum emission planning in the hydrous ethanol transport sector in Brazil, and that the pricing carbon emissions makes ethanol supply chain agents choose fewer polluting alternatives, mainly for alternatives from road transportation, like railways, waterways, and pipelines. To minimize environmental impacts and provide cost optimization, investments in distribution infrastructure and intermodal transport are recommended.

Keywords: Hydrous Ethanol. Logistics. Optimization. Costs. Environmental Impacts.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição espacial das usinas de cana-de-açúcar e distribuição da produção de cana-de-açúcar no território brasileiro. 31
Figura 2 – Evolução da produção de etanol anidro e etanol hidratado no Brasil entre os anos 2000 e 2021. 32
Figura 3 – Quantidade de veículos por tipo de combustível em janeiro de 2021..... 33
Figura 4 – Evolução da produção do etanol anidro e hidratado a partir do milho entre as safras 2013/2014 e 2020/2021. 34
Figura 5 – Histórico da paridade de preços “etanol hidratado/gasolina C” e vendas de etanol hidratado e gasolina C entre 2001 e 2020 no Brasil. 36
Figura 6 – Fluxograma de transporte do etanol no Brasil. 38
Figura 7 – Modelo genérico de um problema de transporte. 43
Figura 8 – Representação esquemática das variáveis de decisão do modelo 51
Figura 9 – Curva de Pareto para o modelo de mínima emissão. 107
Figura 10 – Curva de Pareto para o modelo de mínimo custo. 109
Figura 11 – Nível de aumento dos custos e redução das emissões em cada cenário.... 112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados do modelo de regressão linear. 65
Tabela 2 - Resultados do modelo de regressão log-linear. 66
Tabela 3 - Taxas de desconto utilizadas para estimar os valores de frete intermodais. . 67
Tabela 4 - Emissões de CO2 por modal de transporte e veículo 68
Tabela 5 - Detalhamento dos custos e emissões por fluxo no cenário de mínimo custo 72
Tabela 6 - Indicadores de custo médio, emissões médias e distância média para os fluxos com origem nas usinas..... 75
Tabela 7 - Indicadores de volume, custo médio, emissões médias e distância média para os fluxos com origem nas usinas e destino aos terminais de entrada intermodais 77
Tabela 8 - Volume, custo médio e emissões das rotas com destino às instalações intermodais 78
Tabela 9 - Volume, custo médio e emissões das rotas intermodais com destino às distribuidoras 80
Tabela 10 - Capacidades e volumes captados por estado 82
Tabela 11 - Indicadores de custo médio, emissões médias e distância média de recepção por estado..... 84
Tabela 12 - Indicadores de custo médio, emissões médias e distância média de distribuição por estado. 85
Tabela 13 - Custo médio, emissões médias, distância média e preço-sombra dos centroides de consumo, agrupados por estado..... 87
Tabela 14 - Detalhamento dos custos e emissões por fluxo no cenário de mínimo custo 88
Tabela 15 - Indicadores de custo médio, emissões médias e distância média para os fluxos com origem nas usinas..... 91
Tabela 16 - Indicadores de volume, custo médio, emissões médias e distância média para os fluxos com origem nas usinas e destino aos terminais de entrada intermodais 93
Tabela 17 - Volume, custo médio e emissões das rotas com destino às instalações intermodais para o cenário de mínima emissão..... 94
Tabela 18 - Volume, custo médio e emissões das rotas intermodais com destino às distribuidoras 96
Tabela 19 - Capacidades e volumes captados por estado 99

Tabela 20 - Indicadores de custo médio, emissões médias e distância média de recepção por estado..... 100
Tabela 21 - Indicadores de custo médio, emissões médias e distância média de distribuição por estado..... 101
Tabela 22 - Custo médio, emissões médias, distância média e preço-sombra dos centroides de consumo, agrupados por estado..... 103
Tabela 23 - Valores da Curva de Pareto do modelo de mínima emissão 108
Tabela 24 - Valores da Curva de Pareto do modelo de mínimo custo 109
Tabela 25 - Resultados para cada Cenário..... 111
Tabela 26 - Volume captado e preço-sombra para cada instalação de entrada intermodal. 113

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 25
1.1. Contextualização 25
1.2. Objetivos geral e específicos 26
1.3. Estrutura do trabalho 27
2. O SETOR DO ETANOL NO BRASIL E APLICAÇÕES DE MODELOS DE OTIMIZAÇÃO 29
2.1. O mercado de etanol no Brasil 29
2.2. Logística do etanol no Brasil 37
2.2.1. Descrição da logística do etanol no Brasil 37
2.2.2. O planejamento do transporte do etanol no Brasil considerando variáveis econômicas e ambientais 40
2.3. Modelos matemáticos aplicados ao planejamento de problemas de transporte mono objetivo e multiobjetivo 42
2.3.1. Teoria geral e aplicações de modelos mono objetivo no setor de transportes de biocombustíveis 42
2.3.2. Modelagem matemática multiobjetivo e aplicações em problemas de transporte 45
3. MÉTODO 50
3.1. Modelo matemático proposto 50
3.1.1. Representação esquemática do modelo 51
3.1.2. Representação matemática do modelo 52
3.1.3. Algoritmo para o cálculo da fronteira de Pareto 57
3.1.4. Cálculo dos indicadores 59
3.2. Dados utilizados na modelagem 60
3.2.1. Nível de detalhamento dos índices e parâmetros considerados 61
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 71
4.1. Resultados do cenário de mínimo custo 71
4.1.1. Usinas 74
4.1.2. Soluções intermodais 77
4.1.3. Distribuidoras 81
4.1.4. Postos revendedores 86
4.2. Resultados do cenário de mínima emissão de CO2 88
4.2.1. Usinas 90
4.2.2. Soluções intermodais 93

4.2.3. Distribuidoras 98
4.2.4. Postos revendedores 102
4.3. Comparativo entre os cenários de mínimo custo e mínima emissão 104
4.3.1. Análise das Curvas de Pareto 106
4.3.2. Recomendações de infraestrutura 112
5. CONCLUSÕES 115
REFERÊNCIAS 121
APÊNDICE A - Resultados do cenário de mínimo custo 127
APÊNDICE B - Resultados do cenário de mínima emissão 128
ANEXO A – Detalhamento dos dados de entrada 129

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar a relevância do setor do etanol no Brasil e trazer uma contextualização para o problema de pesquisa explorado no trabalho. Na sequência, são apresentados os objetivos gerais e específicos.

1.1. Contextualização

O etanol é um biocombustível que pode ser produzido a partir da cana de açúcar e do milho, na forma de etanol hidratado, utilizado diretamente como combustível pelos veículos do Ciclo Otto (ANP, 2018), e na forma de etanol anidro, utilizado como mistura na gasolina tipo A, que, juntos compõem a gasolina tipo C, também utilizada como combustível pelos mesmos veículos.

O consumo e a produção do etanol hidratado têm crescido nos últimos anos no mercado Brasileiro, principalmente a partir de 2003 com a chegada dos veículos *flex-fuel* (BACCHI; RODRIGUES, 2018), devido ao seu melhor custo/benefício em comparação com a gasolina, e devido ao aumento da preocupação dos órgãos reguladores com o impacto ambiental causado pelo consumo de combustíveis fósseis (ANP, 2018; EPE, 2020).

Na intenção de incentivar o consumo do etanol pela população, existe a necessidade de buscar alternativas que minimizem os custos ao longo da sua cadeia, de modo que o produto se torne mais competitivo para o consumidor final (CAVALCANTI, 2011). Dentre os componentes de custo do produto, podem-se destacar: o preço de realização nas usinas produtoras, os tributos e as margens de distribuição e revenda dos agentes distribuidores e dos postos revendedores (CAVALCANTI, 2011).

Autores como Xavier (2008), Tagomori et al. (2018) e Branco, Bartholomeu e Vetorazzi (2020) citam que a realização de um bom planejamento na etapa do transporte do produto pode acarretar uma redução dos custos de distribuição e revenda, e tornar o biocombustível mais vantajoso para o consumidor final.

Com a crescente preocupação com os impactos ambientais, existe um incentivo não apenas para o consumo do etanol hidratado, mas também para que os agentes do setor busquem alternativas que possam minimizar os impactos ambientais na etapa do transporte do produto das usinas com destino aos postos revendedores (CASTILLA; OLIVEIRA, 2019).

Com essa necessidade, no ano de 2020, foi dado o início da vigência do programa do RenovaBio, o qual tem como principal objetivo incentivar a busca por meios de produção e distribuição do etanol que sejam menos poluentes remunerando as usinas produtoras com créditos de descarbonização chamados “CBios” (CASTILLA; OLIVEIRA, 2019).

O Programa do RenovaBio foi um primeiro passo dado pelo governo brasileiro para incentivar alternativas de produção e distribuição menos poluentes. No entanto, Pinheiro (2008) chama a atenção para os *trade-off* existente entre realizar o planejamento do transporte visando minimizar os custos e os impactos ambientais, ao passo que a escolha por um dos objetivos acaba resultando em um impacto negativo no outro. Ou seja, as alternativas que usualmente trazem o mínimo custo acabam resultando em um maior impacto ambiental, e vice-versa.

Para mensurar esse *trade-off* e identificar quais seriam as estratégias de transporte que minimizam os impactos ambientais e os custos de transporte do etanol hidratado no Brasil, autores como Xavier (2008), Guimarães (2019) e Branco, Bartlhomeu e Vetorazzi (2020) propõem a aplicação de modelos matemáticos de otimização. Na intenção de ponderar objetivos conflitantes, Fadel (2002) e Deb (2014) mencionam o uso da técnica do e-restrito na modelagem matemática, a partir da qual é possível gerar os chamados “Pontos de Pareto” e mensurar a relação de troca entre cada um dos objetivos.

Nesse sentido, é de interesse do País incentivar o consumo do etanol hidratado com o aumento da sua competitividade frente à gasolina, e é de interesse dos agentes do setor buscar alternativas de transporte que proporcionem o menor custo e o menor nível de emissões possível. Assim, observa-se uma oportunidade de aplicação de modelos matemáticos de otimização para realizar o planejamento do transporte do biocombustível e mensurar os *trade-offs* entre o foco para minimização de custos e para a minimização das emissões de CO2.

1.2. Objetivos geral e específicos

O presente trabalho tem como objetivo aplicar um modelo de otimização para realizar o planejamento da etapa de transporte do etanol hidratado no cenário brasileiro com objetivos de minimização de custos e de minimização das emissões de CO2. Esse objetivo de desdobra nos seguintes objetivos específicos:

I. Aplicar um modelo de otimização para realizar o planejamento do transporte do etanol hidratado no Brasil com o objetivo de minimizar os custos de transporte;
II. Aplicar um modelo de otimização para realizar o planejamento do transporte do etanol hidratado no Brasil com o objetivo de minimizar as emissões de CO2;
III. Analisar os *trade-offs* entre os dois cenários aplicando a técnica do e-restrito;
IV. Identificar alternativas que possam mitigar os custos de transporte e as emissões de CO2 na etapa de transporte do etanol hidratado no Brasil.

1.3. Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado nos seguintes capítulos: “Introdução”, “O setor do etanol no Brasil e aplicações de modelos de otimização”, “Método”; “Resultados e Discussões” e “Conclusões”. O primeiro capítulo apresenta a relevância do estudo e os objetivos geral e específicos do trabalho; o segundo capítulo apresenta ao leitor uma contextualização a respeito do setor etanol hidratado no mercado brasileiro, uma descrição da sua logística desde as usinas até os postos revendedores e de modelos matemáticos aplicados ao planejamento do transporte visando minimizar os custos e as emissões de CO2.

O capítulo do “Método” detalha a estrutura matemática do modelo proposto para minimizar os custos de transporte, as emissões e o algoritmo para o cálculo dos pontos de Pareto, assim como apresenta uma descrição dos dados utilizados como parâmetros para o modelo.

O capítulo de “Resultados e Discussões” apresenta os indicadores de custo e de emissões para cada cenário (de mínimo custo e de mínima emissão), analisando os seus comportamentos em cada um dos elos da cadeia de transporte do etanol hidratado no Brasil, e apresenta os resultados obtidos com o cálculo dos pontos de Pareto.

Nas conclusões são recapitulados os principais pontos abordados no trabalho, pontuando as suas contribuições, limitações e identificando sugestões para estudos futuros.

2. O SETOR DO ETANOL NO BRASIL E APLICAÇÕES DE MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo trazer dados a respeito do setor do etanol no Brasil, os seus principais gargalos e como a aplicação de métodos de otimização para realizar o planejamento da sua logística podem trazer benefícios aos agentes do setor, em especial: i) aos consumidores, em função de uma redução dos custos de transporte e, consequentemente, uma redução do preço do combustível nos postos; e ii) aos agentes produtores e distribuidores, que podem otimizar o seu planejamento de distribuição.

A segunda parte do capítulo busca apresentar os *trade-offs* entre o planejamento voltado para o mínimo custo e o planejamento voltado para a minimização das emissões de CO2, o qual está em linha com os objetivos do programa do RenovaBio. O programa do RenovaBio tem como principal objetivo incentivar a produção do etanol e fazer com que as usinas tornem os seus processos de produção e distribuição mais eficientes em termos ambientais.

2.1. O mercado de etanol no Brasil

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o etanol é um tipo de biocombustível que tem ganhado representatividade no mercado brasileiro desde a década de 1970 (ANP, 2020a). Atualmente, ele pode ser produzido pelas usinas brasileiras a partir do processamento da cana-de-açúcar ou do milho em grão.

No ano de 2020, o Brasil e os Estados Unidos foram responsáveis por produzir cerca de 83% da oferta global de etanol, conforme o levantamento feito *pela Renewable Fuel Association* (RFA, 2021). Desse total, os Estados Unidos produziram 53%, ocupando o primeiro lugar no ranking, enquanto o Brasil produziu cerca de 30% e ocupou a segunda posição. Esses dois países se configuram, hoje, como os principais produtores de etanol do planeta, e apresentaram uma produção bastante superior à União Europeia, que ocupou o terceiro lugar do ranking com 5% da oferta global.

De acordo com as informações disponibilizadas pela ANP (2020a), existem dois tipos principais de etanol produzidos no Brasil, classificados de acordo com o seu uso-fim: o etanol anidro, utilizado como componente de mistura na composição da gasolina

C[1], e o etanol hidratado, utilizado diretamente pelos veículos com motores tipo Ciclo Otto (que geram energia por meio do processo de combustão interna).

Hoje, grande parte da produção do etanol brasileira é concentrada nos estados das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, também conhecida como "Região Centro-Sul" (MAPA, 2021a). Na safra 2019/2020, essa região foi responsável por 93,4% da produção total de etanol anidro e hidratado, enquanto a região "Norte-Nordeste" produziu 6,6% do volume total.

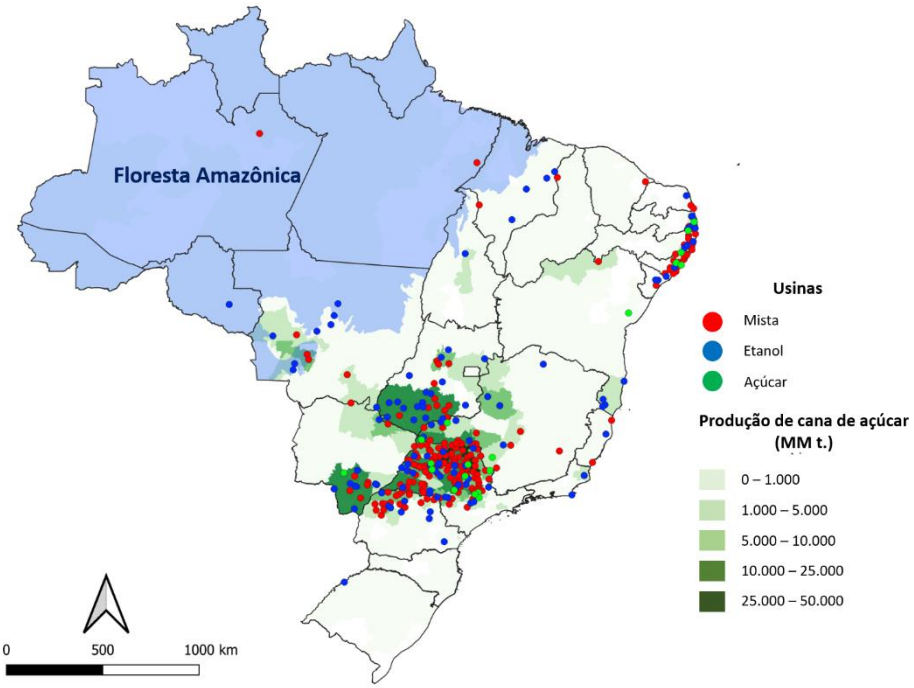
Dentre os fatores que explicam a concentração da produção do etanol na região Centro-Sul, podem-se destacar: i) a maior disponibilidade de matéria-prima (cana de açúcar e milho); ii) um menor custo de produção em comparação com a região Norte-Nordeste; e iii) uma maior proximidade com os grandes centros consumidores (BACCHI; RODRIGUES, 2018). Esses três pontos permitiram uma ampliação do número de usinas instaladas nessa região nos últimos anos, e, atualmente, ela concentra a maior parcela nas unidades produtoras de etanol.

De acordo com o MAPA (2021b), as usinas são classificadas como: usinas produtoras de etanol, usinas produtoras de açúcar e usinas mistas, as quais possuem a flexibilidade para produzir tanto o açúcar, quanto o etanol, a partir da cana-de-açúcar.

A Figura 1 mostra a distribuição espacial de cada um desses tipos de usinas ao longo do território nacional, assim como a distribuição da produção de cana-de-açúcar (IBGE, 2019; MAPA, 2021b). Nela, podem-se observar a concentração do número de usinas mistas e produtoras de etanol nos estados que compõem a região Centro-Sul, assim como a concentração da produção de cana-de-açúcar nessa mesma região.

[1] A gasolina C é uma composição de 27% de etanol anidro e 73% de gasolina A (ANP, 2020b)

Figura 1 – Distribuição espacial das usinas de cana-de-açúcar e distribuição da produção de cana-de-açúcar no território brasileiro.

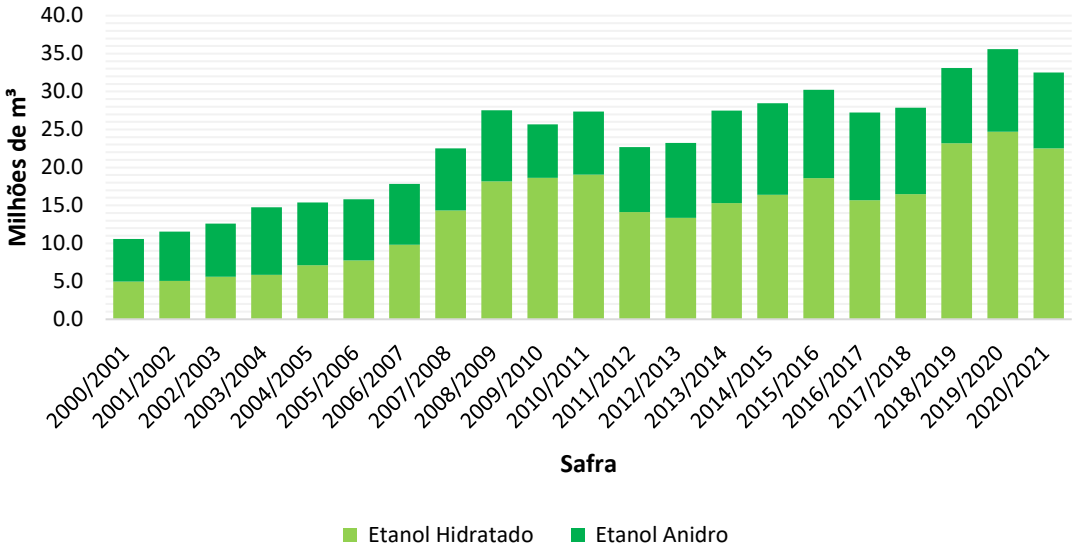


Fonte: Elaborado pelo autor com base em IBGE (2019) e MAPA (2021b).

A Figura 2 mostra a evolução da produção de etanol anidro e hidratado no Brasil entre as safras 2000/2001 e 2020/2021[2], conforme os dados disponibilizados pelo MAPA (2021). A partir dela, observa-se que a produção de etanol anidro passou de 5,62 milhões de metros cúbicos (m³) na safra 2000/2001 para 9,98 milhões de m³ na safra 2020/2021, o que representa um aumento de 77,6%. No mesmo período, a produção de etanol hidratado passou de 4,97 milhões de m³ para 22,5 milhões de m³ (+353,0%).

[2] A safra da cana-de-açúcar é se inicia em abril e é concluída no mês de março do ano seguinte.

Figura 2 – Evolução da produção de etanol anidro e etanol hidratado no Brasil entre os anos 2000 e 2021.

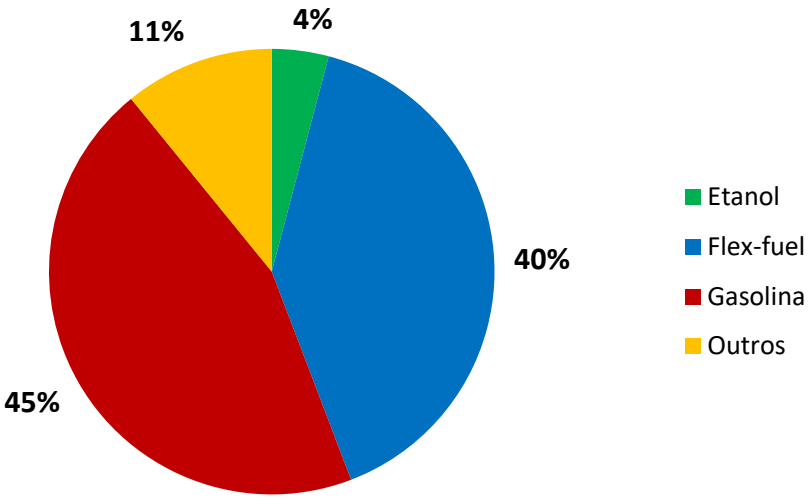


Fonte: MAPA (2021)

Para Stolf e Oliveira (2020), o principal fator que explica esse aumento na produção do etanol entre os anos 2000 e 2010 foi a chegada dos veículos tipo *flex-fuel* no mercado brasileiro em 2003. Conforme mencionado pelos autores, esse tipo de veículo pode ser abastecido tanto com o etanol hidratado, quanto com a gasolina C, trazendo um maior poder de escolha para os consumidores.

A Figura 3 mostra a distribuição dos veículos que compuseram a frota nacional no mês de janeiro de 2021, classificados pelo tipo de combustível utilizado (MINFRA, 2021). Nela, observa-se que o Brasil possuí, aproximadamente, 4% da sua frota nacional movida exclusivamente pelo etanol, e 40% da frota movida tanto por etanol, quanto pela gasolina (veículos tipo *flex-fuel*). Por outro lado, a maioria dos veículos (45%) possuí motores que são movidos exclusivamente por gasolina.

Figura 3 – Quantidade de veículos por tipo de combustível em janeiro de 2021.

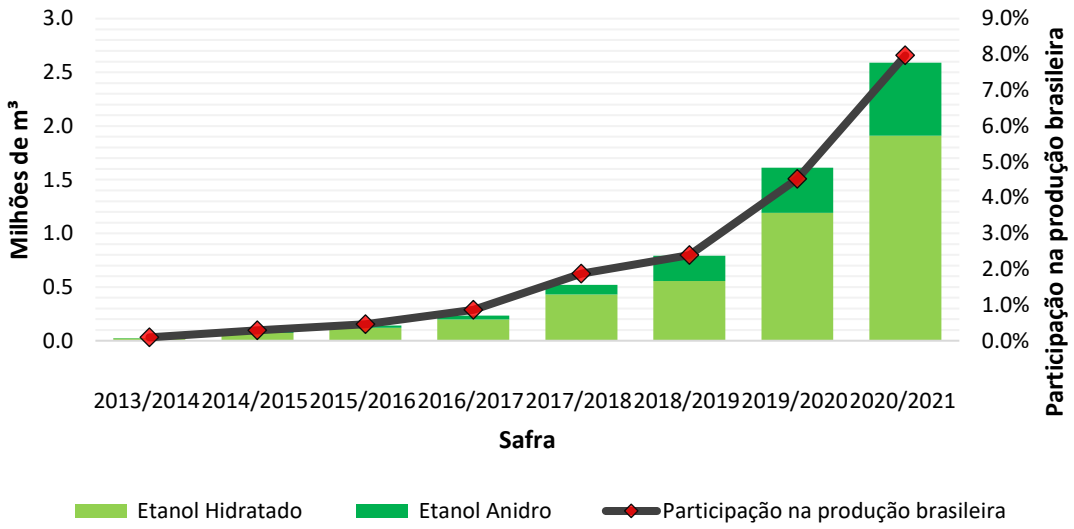


Fonte: MINFRA (2021).

Além do aumento da oferta e da produtividade da cana-de-açúcar, outros tipos de matéria-prima utilizadas como insumos para a produção do etanol também ganharam destaque entre os anos de 2010 e 2020, dentre as quais o milho ganhou forte protagonismo a partir de 2013 (SILVA et al., 2020).

Como pode-se observar na Figura 4, a produção do etanol (anidro e hidratado) a partir do milho apresentou um crescimento considerável entre as safras 2013/2014 e 2020/2021, conforme dados disponibilizados pelo MAPA (2021a). No período em questão, a produção do etanol hidratado passou de 0,023 milhão de m³ para 1,91 milhão de m³, ao passo que a produção do etanol anidro a partir do milho passou de 0,0024 milhão de m³ para 0,68 milhão de m³. Além desse incremento, a participação do etanol de milho na oferta brasileira passou de 0,1% na safra 2013/2014 para 8,0% na safra 2020/2021.

Figura 4 – Evolução da produção do etanol anidro e hidratado a partir do milho entre as safras 2013/2014 e 2020/2021.



Fonte: MAPA (2021)

Além do etanol de milho, Müller et al. (2019) destacam o aumento da produção do etanol segunda geração (etanol 2G). Segundo os autores, o etanol 2G é aquele produzido a partir da biomassa lignocelulósica, a qual é resultado do processo produtivo do etanol a partir do milho e da cana-de-açúcar (também chamado de etanol primeira geração, ou etanol 1G). Assim, o aproveitamento dos resíduos tem sido uma prática crescente entre as usinas produtoras do biocombustível, e tem contribuído para o aumento da oferta do etanol no mercado brasileiro.

Conforme exposto no Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, publicado pela EPE (2020), é esperado que a produção de etanol no Brasil atinja 46 bilhões de litros no ano de 2030, o que representa um aumento absoluto de 12 bilhões de litros que devem ser integralmente absorvido pelo mercado doméstico.

Desse volume, o etanol produzido a partir do milho deve ser de 5,7 bilhões de litros (12,3% do volume nacional esperado), e o etanol segunda geração deve representar 0,9% (0,4 bilhão de litros) do volume nacional projetado (EPE, 2020).

A EPE (2020) espera que, nos próximos 10 anos, a participação do etanol nos combustíveis dos veículos do Ciclo Otto seja de 55% (contra 49% em 2019), e que a participação do mercado nos veículos *flex-fuel* seja de 48%. Essa maior participação é justificada pela maior competitividade do etanol hidratado frente à gasolina,

potencializada pelo aumento da produtividade do setor e a intensificação das preocupações ambientais com o uso dos combustíveis.

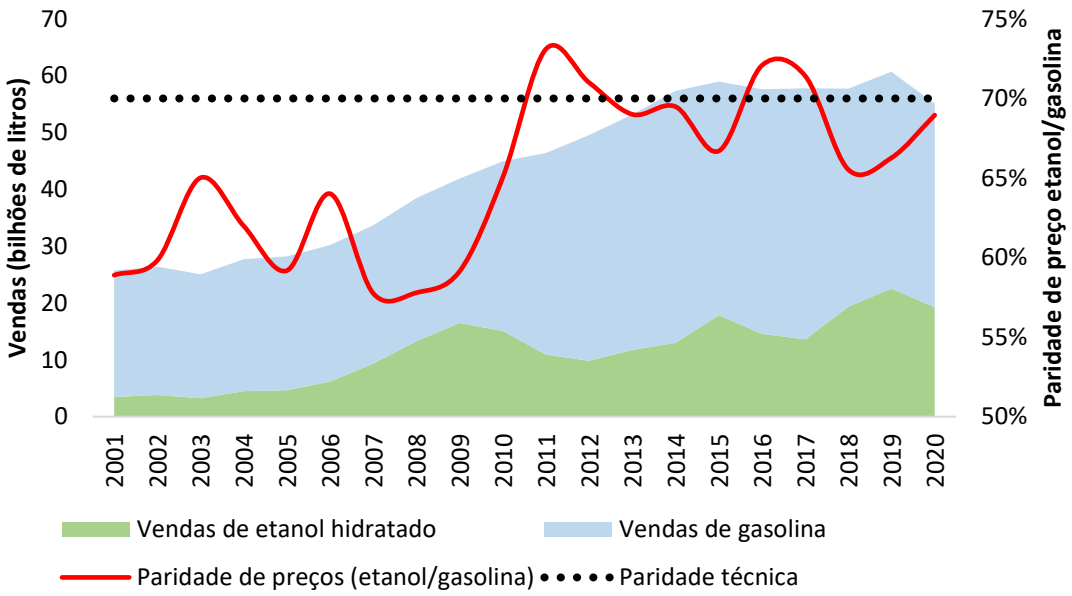
Melo e Sampaio (2014) afirmam que, além dos benefícios ambientais do uso do etanol como substituto à gasolina, existe a redução da dependência externa brasileira em relação ao petróleo. Nos dias de hoje, a produção dos combustíveis fósseis no Brasil é altamente dependente do petróleo produzido em outros países, o qual é fortemente influenciado por fatores exógenos, principalmente no que tange à taxa de câmbio real/dólar e às cotações internacionais da commodity.

No entanto, mesmo com essa série de benefícios, a escolha do combustível a ser utilizado pelo consumidor que possuí um veículo *flex-fuel* é influenciada pela relação entre os preços de etanol hidratado e da gasolina C e a eficiência energética desses combustíveis. Conforme apresentado por Alencar (2012), existe a chamada “Regra dos 70%”, a qual indica que é mais vantajoso para o consumidor utilizar o etanol hidratado caso a relação de preços “etanol hidratado/gasolina C” seja inferior à 70%, assumindo que o etanol hidratado apresenta uma eficiência energética média de 70% da eficiência energética da gasolina C.

Como pode-se analisar na Figura 5 em períodos quando a relação de preços do etanol hidratado e gasolina C está acima de 70%, observa-se uma redução no consumo do etanol hidratado e um aumento do consumo da gasolina C. De forma análoga, nos períodos em que essa paridade se encontra abaixo de 70%, há uma maior preferência dos consumidores pelo biocombustível.

Dessa forma, o interesse em aumentar a participação do etanol na matriz energética do Brasil pode ser atingido a partir do aumento da frota de veículos *flex-fuel*, acompanhando de um aumento da competitividade do etanol para o consumidor com uma redução dos seus preços ante aos preços da gasolina C.

Figura 5 – Histórico da paridade de preços “etanol hidratado/gasolina C” e vendas de etanol hidratado e gasolina C entre 2001 e 2020 no Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em (ANP, 2020a)

De acordo com o Ministério Minas e Energia (MME, 2021), o preço do etanol hidratado nos postos é formado por cinco componentes principais: i) preço de realização do produto na usina; ii) impostos federais (PIS e Cofins); iii) imposto estadual (ICMS); iv) margem de revenda e v) margem de distribuição.

As margens de revenda e distribuição são as margens dos agentes que compõem a cadeia de distribuição do etanol no Brasil, associadas, respectivamente, aos postos de combustível e às distribuidoras. Essas margens variam em função dos custos de transporte, armazenagem e manuseio do produto, acrescidos de uma margem de lucro dos respectivos agentes (MME, 2021).

A próxima seção detalha o funcionamento da logística do etanol no Brasil, ressaltando os seus principais agentes e as suas condições gerais de distribuição. O entendimento da logística do biocombustível traz uma compreensão sobre quais poderiam ser as melhores estratégias de planejamento do transporte que poderiam ser empregadas para reduzir os custos de transporte e, consequentemente, tornar o etanol hidratado mais competitivo frente à gasolina para o consumidor.

2.2. Logística do etanol no Brasil

. A presente seção tem como objetivo descrever a logística do etanol hidratado no Brasil e apresentar os *trade-offs* existentes entre o planejamento do transporte voltado para o mínimo custo e para a mínima emissão de CO2.

2.2.1. Descrição da logística do etanol no Brasil

A cadeia de transporte do etanol no Brasil é formada por três agentes principais: i) as usinas, responsáveis pela sua produção; ii) as distribuidoras, que são as responsáveis por realizar a mistura do etanol anidro com a gasolina A, e por realizar o intermédio entre os agentes produtores de combustíveis e os postos revendedores; e iii) os postos revendedores, que comercializam o biocombustível com o consumidor final (BRANCO; BARTHOLOMEU; VETORAZZI, 2020).

O etanol produzido no Brasil pode ser destinado ao mercado interno ou ao mercado externo. O transporte do etanol com destino ao mercado interno pode ser categorizado em três fluxos principais: i) fluxo de entregas, que se referem ao transporte com origem nas usinas e com destino para as bases de distribuição; ii) fluxo de distribuição, que se referem ao transporte das bases de distribuição para os postos revendedores e iii) transferências, que se referem aos transportes entre as bases de distribuição (XAVIER, 2008).

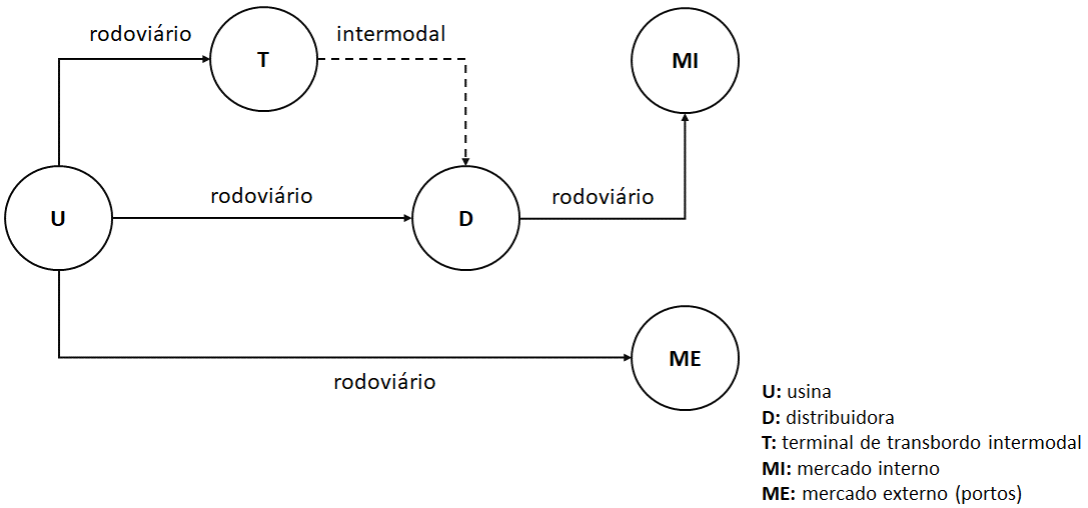
Os modos de transporte utilizados para o transporte do etanol são distintos, e os seus usos variam de acordo com o fluxo (entrega, transferência e distribuição). Enquanto os fluxos de distribuição são realizados apenas via modo rodoviário, os fluxos de entrega e transferência podem ser realizados por meio dos modos rodoviário, ferroviário, hidroviário, dutoviário e cabotagem (XAVIER, 2008).

Os modos ferroviário, hidroviário, dutoviário e cabotagem realizam o transporte de grandes volumes de etanol, os quais podem ser recebidos apenas pelos agentes distribuidores devido à sua maior capacidade de tancagem. Já o rodoviário é característico para os fluxos de distribuição devido à menor capacidade de recepção dos postos revendedores (XAVIER, 2008).

Já o transporte do etanol com destino ao mercado externo, o chamado “fluxo de exportação” (BRANCO; BARTHOLOMEU; VETORAZZI, 2020) é comumente realizado com origem nas usinas e com destino aos portos e faz uso apenas do modo rodoviário.

A Figura 6 ilustra o fluxograma do transporte do etanol no Brasil, conforme apresentado por Branco, Bartholomeu e Vetorazzi (2020) e Xavier (2008). Os fluxos com destino às distribuidoras representam os fluxos de entrega, e os fluxos com destino aos postos revendedores representam os fluxos de distribuição. Já o fluxo com destino aos portos representa o fluxo de exportação. O termo "intermodal" representa os modais ferroviário, dutoviário, hidroviário e cabotagem.

Figura 6 – Fluxograma de transporte do etanol no Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Xavier (2008) e Branco, Bartholomeu e Vetorazzi (2020).

Com relação ao transporte, a legislação da ANP (2007) impõe a obrigatoriedade de o etanol passar por uma distribuidora antes de ser entregue aos postos revendedores. Com isso, existe a garantia da qualidade do produto, com os agentes distribuidores atuando como inspetores dos padrões de octanagem, buscando garantir que o consumidor final não receba produtos adulterados.

Quando o transporte é realizado com destino ao mercado externo, a legislação brasileira não impõe a obrigatoriedade do intermédio de um agente distribuidor, delegando a responsabilidade da garantia da qualidade às usinas.

Em relação ao transporte rodoviário, a EPE (2019) aponta que existem diferenças entre os tipos de veículos utilizados para movimentar o etanol em cada um dos fluxos. Nos fluxos de entrega, comumente são utilizados os caminhões do tipo bitrem, com capacidade de movimentação de até 60 m³. Para os fluxos de distribuição, são utilizados caminhões do tipo Truck, compartimentados (levam, além do etanol, outros combustíveis,

como o diesel e/ou a gasolina) em função da menor capacidade de recepção dos postos revendedores.

A dinâmica do transporte do etanol no Brasil apresenta uma série de desafios para os agentes do setor à medida que a produção cresce de forma heterogênea entre os estados, e a demanda pelos combustíveis em todo o país tende a cresce de forma relativamente homogênea (EPE, 2020). Nesse sentido, a busca pela redução dos custos com transporte tem sido crescente pelos agentes do setor, à medida que ações dessa natureza proporcionam uma melhor margem para esses agentes, ao passo que podem acabar reduzindo o preço do produto para os consumidores.

Dadas as dimensões continentais do Brasil e a diversidade dos modos de transporte que podem ser utilizados, é essencial que os agentes atuantes no mercado doméstico realizem o planejamento logístico de modo a garantir que o produto chegue até os postos revendedores, ou aos portos, no tempo certo e com o menor custo possível.

No entanto, acontecimentos recentes, principalmente a vigência da política do RenovaBio (ANP, 2022), tem feito com que os agentes responsáveis por realizar esse planejamento voltassem as suas atenções não apenas para os fluxos de mínimo custo, mas também para fluxos que buscam reduzir os impactos ambientais.

De acordo com o informado pela ANP (2022) e sintetizado por Branco, Bartholomeu e Vetorazzi (2020), o RenovaBio é sustentado por três pilares principais. O primeiro deles diz respeito a manutenção do compromisso firmado pelo Brasil no Acordo de Paris, em 2015, de reduzir as emissões de CO2 em 42% até o ano de 2030, tendo como base as emissões observadas em 2005.

O segundo pilar do RenovaBio é o de garantir o aumento da participação dos biocombustíveis na matriz energética brasileira, assim como a regularidade do seu abastecimento (BRANCO; BARTHOLOMEU; VETORAZZI, 2020). A produção dos biocombustíveis deve ser estimulada com a possibilidade de emissão e comercialização dos chamados “CBios”, que são Créditos de Descarbonização que podem ser emitidos pelos produtores dos biocombustíveis no ato da sua venda e posteriormente comercializados com os agentes distribuidores (ANP, 2022).

Com isso, é possível embasar o terceiro pilar do RenovaBio de assegurar ganhos de eficiência energética e redução das emissões de Gases de Efeito Estuda (GEE)

considerando as etapas de produção, transporte e comercialização dos biocombustíveis (BRANCO; BARTHOLOMEU; VETORAZZI, 2020). Em suma, quanto menos poluente forem os processos de produção, transporte e comercialização, maior a nota de eficiência energética dos agentes e maior a emissão de CBios no ato da venda dos biocombustíveis.

Assim, é esperado que o programa do RenovaBio estimule à produção e a busca por métodos de produção e transporte menos poluentes pelos agentes do setor sucroenergético brasileiro (ANP, 2022), e faça com que o planejamento da produção e do transporte dos biocombustíveis incorporem não apenas alternativas que minimizem custos, mas também alternativas que minimizem os impactos ambientais nesses processos.

O programa do RenovaBio representa um marco para o olhar dos agentes do setor sucroenergético para a variável ambiental das suas operações. No entanto, a inclusão de uma variável adicional ao custo traz uma maior complexidade para a tomada de decisão desses agentes a respeito da escolha das rotas a serem realizadas e em quais das modalidades de transporte trazer a melhor relação ponderando as variáveis de custo e emissões.

2.2.2. O planejamento do transporte do etanol no Brasil considerando variáveis econômicas e ambientais

O planejamento do transporte do etanol no mercado Brasileiro é realizado com o intuito de buscar soluções logísticas que minimizem os custos operacionais dos agentes do setor. Segundo Xavier (2008), as distribuidoras são as principais responsáveis por realizar grande parte do planejamento do transporte do etanol no mercado interno, as quais tem as funções de gerenciar tanto à aquisição do biocombustível das usinas quanto à distribuição para os postos revendedores.

Uma vez que os custos de transporte influenciam na margem operacional dessas distribuidoras, a busca por alternativas logísticas que minimizam esses tipos de onerosidade tem sido amplamente visada (CAVALCANTI, 2011; XAVIER, 2008).

Além do planejamento das rotas rodoviárias menos onerosas, Coletti (2019) e Milanez et al. (2010) chamam a atenção para o papel das soluções logísticas intermodais na redução dos custos de transporte do etanol. De acordo com esses autores, os embarcadores que optam pelo uso de hidrovias, ferrovias e dutovias podem ter uma redução dos gastos com transporte em comparação com aqueles embarcadores que

optarem por utilizar exclusivamente o modal rodoviário, principalmente para as rotas de longa distância.

Considerando a expectativa de aumento na produção e na demanda pelo etanol nos próximos anos (EPE, 2020), o planejamento de transporte com o viés de minimização de custos pode trazer uma maior competitividade para o biocombustível em relação à gasolina, uma vez que a redução dos custos logísticos acaba por resultar em um menor custo de aquisição do produto pelos postos revendedores (CAVALCANTI, 2011).

Mesmo com os benefícios para os agentes da cadeia e para os consumidores, o planejamento com um enfoque exclusivo para minimização dos custos de transporte tem sido impactado nos últimos anos pela inclusão de variáveis ambientais, principalmente a partir da vigência da Política do RenovaBio a partir de janeiro de 2020 (CASTILLA; OLIVEIRA, 2019). Autores como Carvalho e Perobelli (2008), Chapman (2007) e Pinheiro (2008) chamam a atenção para a complexidade trazida com a incorporação da variável ambiental no planejamento do transporte do etanol, mais especificamente no que tange às emissões de Dióxido de Carbono (CO2).

De acordo com Pinheiro (2008), a inserção da variável ambiental na etapa de planejamento do transporte do etanol pode trazer uma maior complexidade para a tomada de decisão dos agentes do setor sucroenergético. Além disso, a autora chama a atenção para o seguinte ponto: quando o planejamento é realizado com o objetivo de minimizar exclusivamente os custos de transporte existe um aumento das emissões de CO2 em relação ao momento em que o planejamento é realizado com o objetivo de minimizar exclusivamente os impactos ambientais.

Com isso, Pinheiro (2008) ressalta que existe um *trade-off* entre o planejamento logístico voltado para minimização de custos e o planejamento logístico voltado para minimização das emissões de CO2. Para a autora, esse *trade-off* deve ser mensurado e ponderado pelos decisores durante à etapa de planejamento logístico.

A inclusão de ambas as variáveis na etapa do planejamento pode ser realizada por meio de modelos matemáticos de otimização na intenção de mensurar os *trade-offs* entre as duas escolhas e escolher, de forma otimizada, quais seriam as melhores estratégias a partir da escolha dos tomadores de decisão entre priorizar o aspecto econômico ou o aspecto ambiental.

A próxima seção tem como objetivo trazer um contexto a respeito dos modelos de transporte e alguns estudos que se propuseram a aplicar essa técnica na etapa do planejamento logístico do etanol. São detalhados modelos e técnicas que aplicados ao setor de transportes de biocombustíveis com abordagens mono objetivo e multiobjetivo, ou seja, com a inclusão de variáveis ambiental e econômico.

2.3. Modelos matemáticos aplicados ao planejamento de problemas de transporte mono objetivo e multiobjetivo

2.3.1. Teoria geral e aplicações de modelos mono objetivo no setor de transportes de biocombustíveis

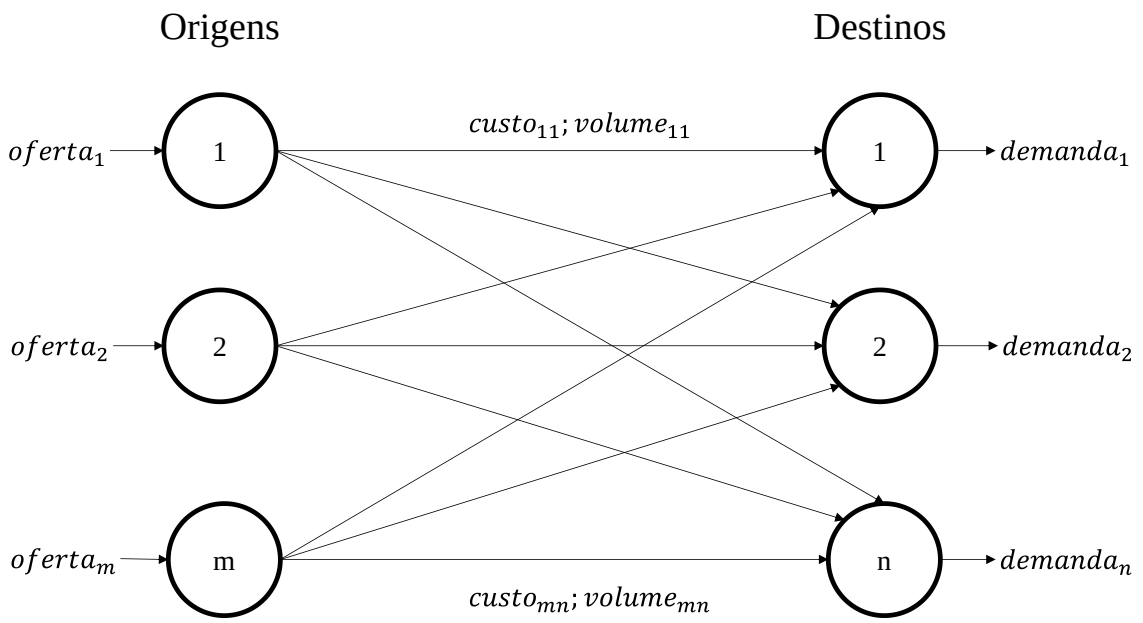
De acordo com Taylor (2007), uma das formas de realizar o planejamento de problemas de transporte é com o uso de modelos matemáticos de otimização.

De acordo com Caixeta-Filho (2001), um modelo matemático de otimização envolve a definição dos conjuntos (ou índices), variáveis de decisão e restrições. Nos problemas de transporte, os conjuntos geralmente envolvem todos os elos da rede: tomando como exemplo o setor de transporte do etanol, podem ser considerados elos da cadeia as usinas, as distribuidoras e os postos revendedores.

A definição dos elos e dos potenciais fluxos para os quais o produto pode ser transportado consiste na base de todo problema de transporte (MAGNATI; WONG, 1984). Esses fluxos representam as variáveis de decisão do problema, e compõem a chamada função objetivo, a qual pode ser minimizada ou maximizada pela estrutura matemática (CAIXETA-FILHO, 2001; MAGNATI; WONG, 1984).

Além das variáveis de decisão, é importante que sejam declaradas para o modelo as suas restrições, as quais tem como objetivo impor uma delimitação ao universo de escolha das variáveis pelo modelo (CAIXETA-FILHO, 2001). Nos problemas de transporte, essas restrições podem considerar, por exemplo, uma oferta máxima do(s) produto(s) a ser(em) transportado(s) a partir das origens da carga, ou uma demanda máxima do(s) produto(s) a ser(em) entregue(s) ao ponto de demanda.

Figura 7 – Modelo genérico de um problema de transporte.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Öztürk, Gazibey e Gerdan (2015).

Como mencionam Magnati e Wong (1984), existem uma série de técnicas que podem ser utilizadas para solucionar os problemas de transporte, como o uso de programação linear, programação inteira mista e programação não-linear (TAYLOR, 2008).

Magnati e Wong (1984) destacam o uso da técnica de programação não linear aplicada aos problemas de transporte quando a localização dos elos da rede é conhecida e pré informada ao modelo. Essa técnica faz o uso de variáveis contínuas, onde as suas relações apresentam uma ordem de grandeza menor ou igual a 1.

Para os problemas onde a localização dos elos ainda não é conhecida, a técnica de resolução recomendada por Magnati e Wong (1984) é a de programação inteira mista, onde a escolha de determinada localização para os elos assume um valor discreto entre 0 e 1.

Ambas as técnicas têm sido aplicadas em modelos de transporte por uma série de autores, inclusive no contexto brasileiro e aplicado ao setor de biocombustíveis. No cenário nacional, pode-se mencionar o estudo de Xavier (2008), que buscou selecionar a localização ótima de tanques de armazenagem de etanol no Brasil, com o objetivo de minimizar os custos de transporte e de armazenagem.

Já Pinheiro (2008) utilizou a técnica de programação linear com o objetivo de minimizar os custos de transporte e as emissões de CO2 na etapa de transporte do etanol no Brasil, semelhante ao realizado por Branco, Bartholomeu e Vetorazzi (2020), autores que buscaram aplicar a mesma técnica de Pinheiro (2008) para minimizar as emissões de CO2 na etapa de transporte do etanol, avaliando o impacto de potenciais dutovias na redução das emissões e dos custos a nível Brasil.

Tagomori et al. (2018) aplicaram um modelo de programação inteira mista para selecionar a localização ótima de usinas produtoras de etanol no Brasil, com o objetivo de minimizar os custos e o impacto ambiental nas etapas de produção e de transporte do produto.

Kostin et al. (2018), semelhante ao realizado por Tagomori et al. (2018), aplicaram um modelo de transporte com objetivo de selecionar localizações ótimas para usinas produtoras de etanol no Brasil, com o objetivo de minimizar os custos de transporte de toda a rede.

No âmbito internacional, uma série de autores se propuseram a aplicar as técnicas de programação linear e programação inteira mista para a otimização do transporte de biocombustíveis. Kesharwani, Sun e Daglil (2018) aplicaram um modelo de programação inteira mista para otimizar os fluxos dos biocombustíveis no estado do Missouri, EUA, visando minimizar os custos, impactos ambientais e maximizar os efeitos sociais, que envolvem o aumento do consumo do etanol frente aos demais combustíveis fósseis.

Com os resultados otimizados obtidos pelos autores, observou-se que o planejamento otimizado trouxe um ganho de 2% na representatividade do etanol na matriz energética do estado, uma redução nas emissões na etapa do transporte em 21% e uma redução dos custos na ordem de 33% (KESHARWANI; SUN; DAGLIL, 2018).

Shu, Schneider e Schffran (2017) aplicaram um modelo de programação inteira mista para selecionar a melhor localização de plantas produtoras de biocombustíveis na província de Jiagsu, China, que minimizasse os custos de transporte. A partir dos resultados obtidos com a modelagem, os autores indicaram que a melhor estratégia de localização dessas plantas é estarem localizadas próximos aos centros produtores em detrimento de uma maior proximidade aos centros consumidores, dada a maior complexidade e custos logísticos com a matéria-prima.

Hajibabai e Ouyang (2012) aplicaram um modelo de programação inteira mista para a construção de plantas produtoras de etanol no estado de Illinois, EUA, com o objetivo de minimizar os custos de transporte. De acordo com os autores, uma característica observada deste tipo de modelo é a sua escalabilidade para qualquer cadeia de suprimentos, inclusive para cadeias de transporte de biocombustíveis em contextos distintos.

Akgul et al. (2011), Marufuzzaman e Eksioglu (2016) aplicaram modelos de programação inteira mista visando minimizar os custos de transporte dos biocombustíveis na região Norte da Itália e no Sudeste dos Estados Unidos, respectivamente. Dentre as principais conclusões dos autores a respeitos do método estão: o planejamento visando o mínimo custo de transporte dos biocombustíveis é essencial para torná-los mais competitivos para os consumidores, incentivo o seu uso e aumentando a sua participação na matriz energética dos países (AKGUL et al., 2017); e que o uso de soluções intermodais em países com extensões continentais proporciona um ganho de competitividade na etapa do transporte (MARUFUZZAMAN; EKSIOGLU, 2016).

Os estudos que se propuseram a aplicar modelos de otimização na cadeia de transporte de biocombustíveis aplicaram, principalmente, visões de mínimo custo, com o objetivo de torna o produto mais competitivo para o consumidor. No entanto, a crescente preocupação com as variáveis ambientais, em especial às emissões de CO2 na etapa do transporte do produto tem sido crescente e cada mais visada por uma série de países (CHEN; WANG, 2016).

Assim, estudos com o de Kesharwani, Sun e Dagli (2018) acabaram incorporando a variável ambiental e, no caso em questão, social na etapa de planejamento do transporte dos biocombustíveis. A incorporação dessas variáveis promove o uso de técnicas distintas de otimização. A teoria a respeito dessas técnicas e estudos que se propuseram a aplicá-las são apresentadas na sequência.

2.3.2. Modelagem matemática multiobjetivo e aplicações em problemas de transporte

A incorporação da variável ambiental nos problemas de transporte pode resultar em um conflito ao tomador de decisão, uma vez que as alternativas que minimizam os impactos ambientais nem sempre são aquelas que minimizam os custos (GUIMARÃES, 2019). Dado esse caráter conflitante, existe a necessidade do uso de técnicas que

objetivam mensurar essas relações de trocas e dar subsídio técnico e quantitativo ao tomador de decisão.

Deb (2014) cita que existem duas abordagens clássicas para a resolução de problemas de otimização multiobjetivos. A primeira delas, e que tem sido amplamente utilizada, é a abordagem da soma ponderada. Nela, o decisor opta por agrupar duas ou mais funções-objetivo em uma única função, aplicando pesos de forma arbitrária em cada uma delas.

Como exemplo de aplicação da técnica da soma ponderada, pode-se citar o estudo conduzido por Kesharwani, Sun e Daglil (2018), que aplicou pesos distintos ao custo de transporte, impacto ambiental e social no modelo de otimização do transporte de biocombustível no estado do Missouri, EUA.

Guimarães (2019) aplicou um modelo utilizando a técnica da soma ponderada para minimizar os impactos ambientais e os custos na etapa do transporte de passageiros. O autor utilizou a estratégia de fornecer pesos distintos para cada variável e comparar os resultados obtidos. Em geral, o modelo se mostrou uma ferramenta aplicável ao planejamento do transporte considerando ambas as variáveis.

Embora mais simples, a abordagem da soma ponderada apresenta algumas limitações. Deb (2014) ressalta que a primeira delas diz respeito a qual o valor do peso deve ser considerado para cada uma das funções. Essa decisão é de grande importância para as soluções encontradas pelo modelo, e pode apresentar uma série de dificuldades para o decisor no que diz respeito à escolha os pesos corretos.

A segunda limitação refere-se ao fato de que a abordagem da soma ponderada não necessariamente traz um conjunto das soluções chamada de “Soluções Ótimas de Pareto”. Essas soluções são usualmente soluções de fronteira, onde dois ou mais recursos são alocados da forma mais eficiente possível onde a melhoria de um resulta em um impacto negativo nos demais. Para Deb (2014), o uso dos pesos pode trazer soluções que não necessariamente se remetem aos pontos ótimos de Pareto.

Dessa forma, uma abordagem alternativa à das somas ponderadas é a técnica do e-restrito (DEB, 2014). Essa abordagem consiste na incorporação da uma restrição adicional ao modelo matemático mono objetivo que considera o resultado do objetivo alternativo, e retorna ao decisor dos pontos ótimos de Pareto (FADEL, 2002; DEB, 2014).

Como exemplo, pode-se mencionar a situação em que o decisor deve escolher entre minimizar custos e as emissões de CO2, como citado por autores como Svensson e Berntsson (2010), Ku et al. (2010) e Salehi et al. (2017).

A aplicação da abordagem do e-restrito consiste em rodar um cenário de mínimo custo e um cenário de mínima emissão de forma isolada, e obter os seus respectivos valores das funções objetivo. Na sequência, o valor de uma das funções objetivo é inserido como uma restrição no modelo alternativo; ou uma restrição de custos no modelo de mínima emissão, ou uma restrição de emissões no modelo de mínimo custo. Feito isso, o decisor tem a possibilidade de relaxar o lado direito dessa restrição adicional e obter diversos pontos de Pareto com base no coeficiente de relaxamento (KIM; JANIC; WEE, 2009).

Essa técnica pode ser aplicada aos modelos de transporte do etanol, uma vez que existem relações de troca entre os objetivos de minimizar os custos e as emissões de CO2. Guimarães (2019) afirma que existe uma relação de troca entre o objetivo de minimizar o custo e minimizar as emissões, em que a escolha de apenas um deles acarreta um aumento do outro em relação ao cenário otimizado.

Como sugestões para estudos futuros, Guimarães (2019) menciona a possibilidade de aplicação do seu modelo para outras cadeias de produtos, a inclusão outras modalidades de transporte além do modal rodoviário, em especial a cabotagem, que tem se mostrado uma boa alternativa como alternativa de transporte menos agressiva ao meio ambiente, e levantamento de ações de melhorias por parte dos órgãos governamentais e por empresas privadas.

Além da cabotagem, mencionada por Guimarães (2019), Pinheiro (2008) destaca as ferrovias e hidrovias como alternativas para redução de custos e de emissões de CO2 na cadeia de transporte do etanol. Já Branco, Bartholomeu e Vetorazzi (2020) ressaltam a participação das dutovias no que tange à redução de custos de transporte e de emissões.

Dadas à aplicabilidade da modelagem matemática ao planejamento do transporte da cadeia de biocombustíveis com objetivo de mínimo custo e, mais recentemente, com o objetivo de minimizar os impactos ambientais, o presente estudo tem como objetivo avaliar o planejamento do transporte do etanol hidratado a nível Brasil, considerando um cenário de mínimo custo e de mínima emissão, semelhante ao realizado por Pinheiro

(2008), e avaliar as relações de troca através dos pontos de Pareto utilizando a técnica apresenta por Deb (2014), e seguindo o algoritmo proposto por Kim, Janic e Wee (2009).

Além da modelagem com o intuito de determinar os melhores fluxos, Chen e Wang (2016) apresentam uma discussão a respeito da relação de troca entre optar por um planejamento voltado ao mínimo custo e à um planejamento voltado à mínima emissão naquilo que diz respeito à qual seria o preço ideal do carbono que compensasse a migração de uma visão de mínimo custo para uma visão de mínima emissão.

Nesse sentido, a identificação dos pontos de Pareto também tem como objetivo, no presente trabalho, de propor nível de remuneração do carbono que compensassem a realização do planejamento voltado à mínima emissão, ou seja, em cenários onde os decisores não estariam tendo prejuízos econômicos com a adoção de estratégias menos impactantes ao meio ambiente.

3. MÉTODO

O presente capítulo tem como objetivo detalhar o modelo matemático proposto para mensurar e otimizar as emissões de CO2 e os custos de transporte do etanol hidratado no Brasil, apresentando: as equações, os parâmetros e a estrutura de cálculo dos indicadores analisados a partir dos resultados do modelo.

3.1. Modelo matemático proposto

O modelo matemático do presente trabalho tem como objetivo minimizar os custos de transporte e as emissões de CO2 na etapa do transporte do etanol hidratado no Brasil. A etapa de transporte envolve o fluxo do produto das usinas produtoras até as distribuidoras (entrega), das usinas produtoras até os portos (exportação) e das distribuidoras até os postos revendedores (distribuição).

Os fluxos de entrega podem ser realizados por meio dos modais rodoviário, ferroviário, dutoviário e hidroviário, o qual considera tanto o transporte por vias interiores, quanto o transporte por cabotagem. Já os demais fluxos (exportação e distribuição) são realizados exclusivamente pelo modal rodoviário, uma vez que: i) os postos revendedores não apresentam tamanha capacidade para receber os grandes volumes transportados via as soluções intermodais e ii) o fluxo de exportação é comumente realizado diretamente entre as usinas e os portos (não havendo necessidade de intermediação das distribuidoras) e, como é um volume relativamente pouco representativo frente ao transportado para o mercado interno, a viabilidade da construção de infraestruturas intermodais para esse fluxo não se justifica.

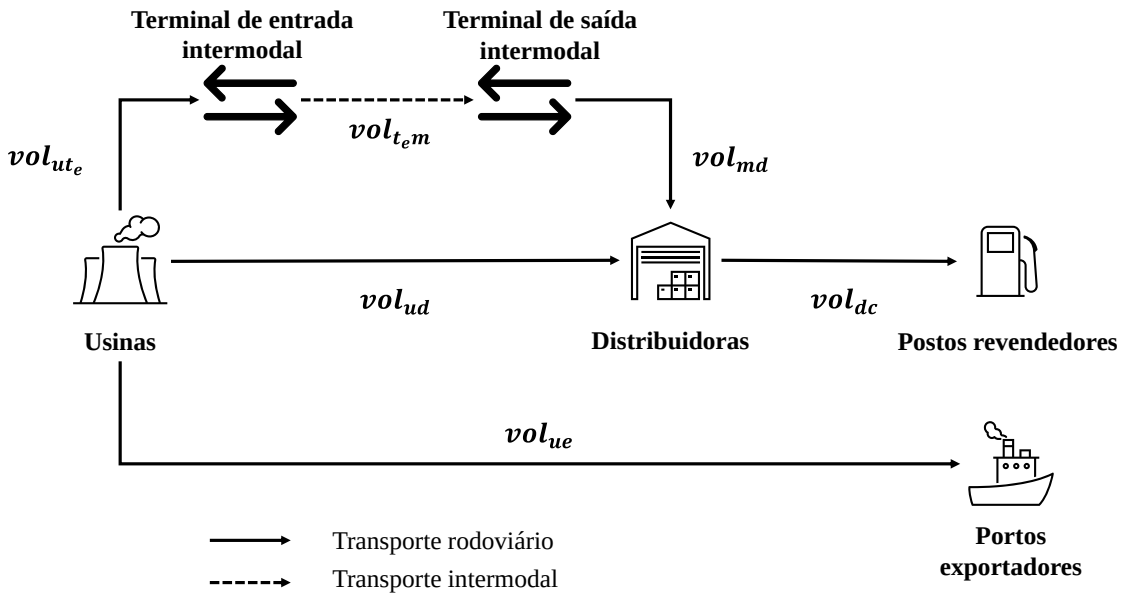
Como existe uma relação de troca entre os objetivos de minimização de custos e de minimização das emissões de CO2, optou-se por dividir o modelo nos dois objetivos propostos. Uma vez obtidos os resultados de cada um dos objetivos, a técnica do e-restrito foi utilizada para quantificar a relação de troca entre eles.

A próxima subseção deste capítulo detalha a representação esquemática do modelo matemático proposto, considerando, inicialmente, a estrutura utilizada para minimização de custos, seguida pela estrutura utilizada para minimização das emissões de CO2 e o algoritmo utilizado para a incorporação da técnica do e-restrito.

3.1.1. Representação esquemática do modelo

A Figura *8* ilustra a distribuição das variáveis de decisão do modelo matemático, as quais representam cada um dos fluxos pelos quais o etanol hidratado pode ser transportado ao longo da rede.

Figura 8 – Representação esquemática das variáveis de decisão do modelo



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os fluxos chamados de volud, volue e volute representam as saídas do etanol das usinas produtoras. Eles indicam, respectivamente, o volume de etanol hidratado movimentado entre as usinas e as distribuidoras, as usinas e os terminais de entrada das soluções intermodais consideradas, e as usinas e os portos exportadores. Quando o fluxo é destinado à exportação, o volume que chega no porto é transportado para outro país por meio de navios, fazendo o uso de rotas marítimas. No entanto, este fluxo não é contemplado no presente trabalho, uma vez que o objetivo é de minimização das emissões e dos custos inerentes às atividades de transporte realizadas dentro do território brasileiro.

Uma vez que o etanol hidratado é transportado para um dos terminais intermodais de entrada pelo modal rodoviário (volute), ele segue com destino ao terminal intermodal de saída (voltem) por meio de uma malha ferroviária, no caso das soluções intermodais ferroviárias; uma malha dutoviária, no caso das soluções intermodais dutoviária; ou uma malha hidroviária de movimentações interiores (rios) ou uma malha hidroviária de cabotagem (mar), no caso das soluções intermodais hidroviárias. Em alguns casos, é

possível que o etanol seja movimentado utilizando mais de uma solução intermodal. Nesses casos, considera-se o terminal intermodal de entrada da primeira solução (ferrovia, hidrovia ou dutovia) e o terminal de saída da segunda solução (ferrovia, hidrovia ou dutovia). A partir do terminal de saída, o etanol segue com destino às distribuidoras (volmd).

Nas distribuidoras, o etanol hidratado é transportado com destino aos postos revendedores (voldc), os quais, na modelagem adotada, representam o elo final da cadeia de transporte do produto no mercado interno. A partir dos postos revendedores, o etanol não é mais transportado para os consumidores, uma vez que eles são os responsáveis por virem até o local de abastecimento.

Cada um dos fluxos ilustrados na Figura *8* apresentam determinados níveis de custo de transporte e de emissões de CO2. A somatória total desses custos e emissões representam, respectivamente, o custo total de transporte e o nível total de emissão de CO2 na etapa do transporte do etanol hidratado no Brasil. Considerando restrições de oferta das usinas, de capacidade de captação de carga das infraestruturas intermodais, de capacidade de distribuição das distribuidoras, da demanda de exportação e dos postos revendedores, é possível aplicar um modelo matemático de otimização para realizar o planejamento da distribuição do etanol hidratado no Brasil de modo a minimizar os custos de transporte e as emissões de CO2.

3.1.2. Representação matemática do modelo

O modelo matemático do presente trabalho se divide em duas funções objetivo principais: i) minimização dos custos de transporte e ii) minimização das emissões de CO2. A primeira função objetivo é armazenada na variável Z, enquanto a segunda função objetivo é armazenada na variável W. Assim, Z e W podem ser escritos como as funções objetivos da seguinte maneira:

Funções objetivo

$$Min\ z = \sum_{u=1}^{130}\sum_{d=1}^{106} vol_{ud} * frete_{ud} + \sum_{u=1}^{130}\sum_{t_1=1}^{21}\sum_{m=1}^{88} vol_{ut_em} * frete_{ut_em} + \sum_{m=1}^{88}\sum_{d=1}^{106} vol_{md} * frete_{md} + \sum_{d=1}^{106}\sum_{c=1}^{542} vol_{dc} * frete_{dc} + \sum_{u=1}^{130}\sum_{e=1}^{2} vol_{ue} * frete_{ue} \quad (1)$$

$$Min\ w = \sum_{u=1}^{130}\sum_{d=1}^{106} vol_{ud} * emissao_{ud} + \sum_{u=1}^{130}\sum_{t_1=1}^{21}\sum_{m=1}^{88} vol_{ut_1m} * emissap_{ut_1m} + \sum_{m=1}^{88}\sum_{d=1}^{106} vol_{md} * emissao_{md} + \sum_{d=1}^{106}\sum_{c=1}^{542} vol_{dc} * emissao_{dc} + \sum_{u=1}^{130}\sum_{e=1}^{2} vol_{ue} * emissao_{ue} \quad (2)$$

Em que:

Unidades de medida

R$/m³: para os valores de frete

kgCO2/m³: para as emissões de CO2

m³: para as restrições de oferta, capacidade de distribuição, capacidade de captação de carga e demanda

Índices

u	representa as usinas produtoras de etanol hidratado, em que n_u (número total de usinas consideradas) = 130.
d	representa as distribuidoras de etanol hidratado, em que n_d (número total de distribuidoras consideradas) = 106
c	representa os postos revendedores de etanol hidratado, em que n_c (número total de postos considerados) = 542
t_e	representa os terminais de entrada das soluções intermodais, em que n_{te} (número total de terminais considerados) = 21

m	representa as rotas intermodais consideradas entre os terminais de entrada e os terminais de saída, em que n_m (número total de rotas intermodais consideradas) = 88
e	representa os postos exportadores de etanol hidratado, em que n_e (número total de portos considerados) = 2

Combinações entre os índices

Representam os conjuntos de possibilidades de combinações entre os índices considerados no modelo. Exceto pelo conjunto de combinações entre os terminais de entrada intermodais e as rotas intermodais, que apresentam uma limitação devido às infraestruturas atualmente construídas, os demais conjuntos de combinações contemplam todas as possibilidades entre os índices.

UD	Representa todas as combinações possíveis entre as usinas *u* e as distribuidoras *d*.
UTEM	Representa todas as combinações possíveis entre as usinas *u* e os terminais de entrada das soluções intermodais t_e e entre as rotas intermodais *m*. Esse subconjunto existe pelo fato de que existe uma possibilidade de combinações limitadas entre os terminais de entrada intermodal e as rotas intermodais.
MD	Representa todas as combinações possíveis entre as rotas intermodais *m* e as distribuidoras *d*.
DC	Representa todas as combinações possíveis entre as distribuidoras *d* e os postos revendedores *c*.
UE	Representa todas as combinações possíveis entre as usinas *u* e os portos exportadores *e*.

Parâmetros

$ofert_u$	Volume de etanol hidratado, em m³, produzido pela usina *u*.
$deman_c$	Demanda de etanol hidratado, em m³, do posto revendedor *c*.
$capdt_d$	Capacidade dinâmica de distribuição, em m³, da distribuidora *d*.
$capte_{te}$	Capacidade de captação de etanol hidratado, em m³, do terminal de entrada intermodal t_e.
$expor_e$	Demanda do etanol hidratado pelo mercado externo, em m³.
$frete_{ud}$	Custo de transporte entre as usinas *u* e as distribuidoras *d*, em R$/m³.

$frete_{dc}$	Custo de transporte entre as distribuidoras *d* e os postos revendedores *c*, em R$/m³.
$frete_{utem}$	Custo de transporte da solução entre as usinas *u*, terminais de entrada intermodal t_e e as rotas intermodais *m*, em R$/m³.
$frete_{md}$	Custo de transporte entre as rotas intermodais *m* e as distribuidoras *d*, em R$/m³.
$frete_{ue}$	Custo de transporte entre as usinas *u* e os portos exportadores *e*, em R$/m³.
$emissao_{ud}$	Emissões de CO2 no transporte entre as usinas *u* e as distribuidoras *d*, em KgCO2/m³.
$emissao_{dc}$	Emissões de CO2 no transporte entre as distribuidoras *d* e os postos revendedores *c*, em KgCO2/m³.
$emissao_{utem}$	Emissões de CO2 no transporte para a solução entre as usinas *u*, terminais de entrada intermodal t_e e as rotas intermodais *m*, em KgCO2/m³.
$emissao_{md}$	Emissões de CO2 no transporte entre as rotas intermodais *m* e as distribuidoras *d*, em KgCO2/m³.
$emissao_{ue}$	Emissões de CO2 no transporte entre as usinas *u* e os portos exportadores *e*, em KgCO2/m³.

Variáveis de decisão

vol_{ud}	Volume movimentado entre as usinas *u* e as distribuidoras *d* pertencentes ao conjunto UD.
vol_{dc}	Volume movimentado entre as distribuidoras *d* e os postos revendedores *c* pertencentes ao conjunto DC.
vol_{utem}	Volume movimentado entre as usinas *u*, terminais de entrada intermodal t_e e as rotas intermodais *m* pertencentes ao conjunto UTEM.
vol_{md}	Volume movimentado entre as rotas intermodais *m* e as distribuidoras *d* pertencentes ao conjunto MD.
vol_{ue}	Volume movimentado entre as usinas *u* e os portos exportadores *e* pertencentes ao conjunto UE.
z	Função objetivo para o custo de transporte.
w	Função objetivo para as emissões de CO2.

Restrições

i. *Restrição de oferta de etanol hidratado nas usinas:* o volume movimentado a partir das usinas contidas em *u* para os terminais de entrada intermodais t_e, para os portos exportadores *e* e para as distribuidoras contidas em *d* deve ser menor ou igual a produção de cada uma dessas usinas *u*. Essa restrição é matematicamente representada pela seguinte inequação:

$$\sum_{d=1}^{\mathrm{d}} vol_{ud} + \sum_{t_1=1}^{t_1} \sum_{m=1}^{\mathrm{m}} vol_{ut_e m} + \sum_{u=1}^{\mathrm{u}} \sum_{e=1}^{e} vol_{ue} \leq ofert_u, \tag{3}$$

$$\forall\, u, t_e \in UTE, u, d \in UD, t_e, m \in TEM, u, e \in UE$$

ii. *Restrição de demanda doméstica pelo etanol hidratado*: o volume movimentado das distribuidoras *d* com destino aos postos revendedores *c* deve ser igual à demanda de cada posto revendedor *c*. Como impõe a legislação da ANP, os postos revendedores podem ser atendidos apenas pelas distribuidoras. Essa restrição é matematicamente representada pela seguinte equação:

$$\sum_{d=1}^{\mathrm{d}} vol_{dc} = deman_c, \forall\, d, c \in DC \tag{4}$$

iii. *Restrição de demanda externa pelo etanol hidratado*: o volume movimentado com destino aos portos exportadores *e* deve atender a demanda de cada porto exportador *e*. Essa demanda é, hoje, atendida plenamente pelas usinas, com o fluxo direto, e pelo modal rodoviário, com origem nas usinas *u* e portos exportadores *e*. Essa restrição é matematicamente representada pela seguinte equação:

$$\sum_{u=1}^{\mathrm{u}} vol_{ue} = expor_e, \forall\, u, e \in UE \tag{5}$$

iv. *Restrição de capacidade dos terminais de entrada intermodal:* o volume movimentado com destino aos terminais de entrada intermodal deve ser menor ou igual à capacidade de movimentação de cada um dos terminais t_e. Na modelagem atual, utilizou-se como restrição do volume total captado por cada terminal de entrada intermodal em função de

alguns terminais poderem movimentar o etanol hidratado em rotas distintas. Essa restrição é matematicamente representada pela seguinte inequação:

$$\sum_{u=1}^{u}\sum_{m=1}^{m} vol_{ut_em} \leq capte_{te}, \forall\, u, t_e, m \in TEM \tag{6}$$

v. *Restrição de capacidade de distribuição:* essa restrição respeita a capacidade dinâmica de cada distribuidora *d* para realizar a distribuição do etanol hidratado. Dessa forma, todo o volume recebido a partir das usinas *u* e dos terminais intermodais *m* deve ser menor ou igual à capacidade de dinâmica de distribuição de cada distribuidora *d*. Essa restrição é matematicamente representada pela seguinte inequação:

$$\sum_{u=1}^{u} vol_{ud} + \sum_{m=1}^{m} vol_{md} \leq capdt_d, \forall\, u, d \in UD, m, d \in MD \tag{7}$$

vi. *Equação de equilíbrio das distribuidoras*: essa restrição tem como objetivo indicar que todo o volume de etanol hidratado recebido pela distribuidora *d* a partir das usinas *u* e das soluções intermodais *m* deve ser movimentado para os postos revendedores *c*. Essa restrição é matematicamente representada pela seguinte equação:

$$\sum_{u=1}^{u} vol_{ud} + \sum_{m=1}^{m} vol_{md} = \sum_{c=1}^{c} vol_{dc}, \forall\, u, d \in UD, m, d \in MD, d, c \in DC \tag{8}$$

vii. *Equação de equilíbrio das soluções logísticas intermodais*: essa restrição tem como objetivo indicar que todo o volume de etanol hidratado recebido pela solução logística intermodal contida no conjunto TEM deve ser movimentada com destino às distribuidoras *d.* Essa restrição é matematicamente representada pela seguinte equação:

$$\sum_{u=1}^{u}\sum_{t_e=1}^{t_e} vol_{ut_em} = \sum_{d=1}^{d} vol_{md}, \forall\, u, t_e, m \in TEM, m, d \in MD \tag{9}$$

3.1.3. Algoritmo para o cálculo da fronteira de Pareto

O método chamado “e-restrito” tem como objetivo transformar um determinado modelo de otimização mono objetivo em um modelo biobjetivo. Aplicando o e-restrito

no modelo do presente trabalho, é possível incorporar tanto as emissões de CO2, representada pela variável *W*, na função objetivo de minimização de custos, representada por *Z*, quanto incorporar os custos na função objetivo de minimização de CO2 a partir da inclusão de uma restrição adicional que limita, respectivamente, a quantidade de CO2 emitida e os custos.

Para isso, é necessário que um passo a passo seja seguido, como sugerem Kim, Janic e Wee (2008). Esse passo a passo pode ser replicado tanto para incorporar as emissões de CO2 no modelo de mínimo custo, quanto para incorporar os custos no modelo de mínima emissão de CO2:

i. *Passo 1:* rodar cada um dos modelos e obter os resultados otimizados para cada uma das funções objetivo. Em suma, o objetivo deste passo é obter os valores de *Z* e *W*.
ii. *Passo 2:* incorporar os resultados de cada uma das funções objetivo no modelo alternativo. Ou seja, o modelo de mínimo custo deve ter uma restrição que limita a quantidade de CO2 que deve ser emitida, e o modelo de mínima emissão deve apresentar uma restrição que limita o montante financeiro que deve ser gasto com custos de transporte.
iii. *Passo 3:* para se obter a fronteira de Pareto, é necessário estimar o número de pontos a serem gerados definindo uma quantidade de incrementos para o lado direto da restrição incorporada no *Passo 2*. Cada incremento é representado por ε_n, sendo $n \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$.

Consolidando os passos 2 e 3, as restrições adicionais e os seus incrementos são matematicamente representados pelas equações 10 e 11, sendo a inequação 10 a restrição que limita os custos de transporte, inserida no modelo de mínima emissão de CO2, e a inequação 11 a restrição que limita as emissões de CO2, inserida no modelo de mínimo custo.

$$\sum_{u=1}^{\mathrm{u}}\sum_{d=1}^{\mathrm{d}} vol_{ud} * frete_{ud} + \sum_{u=1}^{\mathrm{u}}\sum_{t_1=1}^{t_1}\sum_{m=1}^{\mathrm{m}} vol_{ut_em} * frete_{ut_em} + \sum_{m=1}^{\mathrm{m}}\sum_{d=1}^{\mathrm{d}} vol_{md} * frete_{md} + \sum_{d=1}^{\mathrm{d}}\sum_{c=1}^{c} vol_{dc} * frete_{dc} + \sum_{u=1}^{\mathrm{u}}\sum_{e=1}^{e} vol_{ue} * frete_{ue} \leq Z * (1 + \varepsilon_n) \quad (10)$$

$$\sum_{u=1}^{\mathrm{u}}\sum_{d=1}^{\mathrm{d}} vol_{ud} * emissao_{ud} + \sum_{u=1}^{\mathrm{u}}\sum_{t_1=1}^{t_1}\sum_{m=1}^{\mathrm{m}} vol_{ut_1m} * emissap_{ut_em} + \sum_{m=1}^{\mathrm{m}}\sum_{d=1}^{\mathrm{d}} vol_{md} * emissao_{md} + \sum_{d=1}^{\mathrm{d}}\sum_{c=1}^{c} vol_{dc} * emissao_{dc} + \sum_{u=1}^{\mathrm{u}}\sum_{e=1}^{e} vol_{ue} * emissao_{ue} \leq W * (1 + \varepsilon_n) \quad (11)$$

iv. *Passo 4:* para cada incremento ε_n, atualizar o lado direito de cada restrição.

v. *Passo 5:* para cada atualização do lado direito da restrição, rodar o modelo minimizando a função objetivo desejada, seja ela a função de minimização de custos com a restrição de emissões, seja ela a função de minimização das emissões com a restrição de custos.

vi. *Passo 6:* para cada resultado, definir os pares (Z_1, W_1) para todos os casos em que a solução ótima satisfaça as condições estabelecidas para o modelo.

3.1.4. Cálculo dos indicadores

Na intenção de fomentar a discussão dos resultados obtidos a partir do modelo em cada cenário, foram calculados os custos médios (em R$/m³), emissões médias (kg.CO2/m³) e a distância média (km) para cada fluxo da rede de transporte do etanol hidratado no Brasil, a saber: i) fluxo entre as usinas e as distribuidoras via modal rodoviário; ii) fluxo entre as usinas e os portos via modal rodoviário; iii) fluxo entre as usinas e as soluções intermodais via modal rodoviário; iv) fluxo entre as soluções intermodais e as distribuidoras; v) fluxo entre as distribuidoras e os postos revendedores.

O respectivo cálculo de cada um desses indicadores se deu por meio das seguintes equações:

i. *Custo médio (CM):* o cálculo do custo médio para determinado fluxo é realizado pela divisão entre o custo total e volume total de todas as rotas com origem em *n* e destino em *m* desse mesmo fluxo:

$$\mathrm{CM} = \sum_{n=1}^{n}\sum_{m=1}^{m} (custo_{nm}/volume_{nm}) \quad (12)$$

ii. *Emissões médias (EM):* o cálculo das emissões médias para determinado fluxo é realizado pela divisão entre as emissões totais e volume total de todas as rotas com origem em *n* e destino em *m* desse mesmo fluxo:

$$\mathrm{EM} = \sum_{n=1}^{n} \sum_{m=1}^{m} (emissão_{nm} / volume_{nm}) \tag{13}$$

iii. *Distância média (DM):* o cálculo da distância média de determinado fluxo é realizado a partir da somatória da distância ponderada pelo volume movimentado, considerando um conjunto de rotas com origem em *n* e destino em *m*:

$$\mathrm{DM} = \left(\frac{volume_{nm} * distancia_{nm}}{\sum_{n=1}^{n} \sum_{m=1}^{m} volume_{im}} \right) \tag{14}$$

3.2. Dados utilizados na modelagem

Cada uma das restrições do modelo especificada na seção anterior apresenta um ou mais parâmetros que foram obtidos a partir de fontes secundárias. Os parâmetros utilizados foram os seguintes:

i. Oferta de etanol hidratado, associada a cada usina produtora *U* no ano de 2019[3] (ANP, 2019).
ii. Demanda doméstica pelo etanol hidratado, associada a cada região de consumo *C* (ANP, 2019).
iii. Demanda externa pelo etanol hidratado, associada a cada por exportador *E (*SECEX, 2019*)*.
iv. Capacidade de distribuição das distribuidoras, associada a cada distribuidora *D* (ANP, 2019).
v. Capacidade de transporte intermodal das ferrovias (ANTT, 2019), hidrovias e rotas de cabotagem (ANTAQ, 2019), e dutovias (LOGUM, 2019; TRANSPETRO, 2019) associados ao conjunto *TEM*.

[3] Foi considerado o ano de 2019 por ter sido o ano com maior volume de etanol hidratado produzido pelas usinas brasileiras e consumido pela população, de acordo com dados da ANP (2021), e como consta na série histórica até o ano de 2021. Os anos de 2020 e 2021 tiveram o seu consumo de etanol hidratado impactado pelas medidas de isolamento social, ocasionadas pela pandemia da COVID-19.

vi. Tarifas de transporte rodoviário e intermodal do etanol hidratado (SIFRECA, 2019).

vii. Emissões de CO2 na etapa do transporte do etanol hidratado para as rotas rodoviárias e intermodais (ANP, 2021).

3.2.1. Nível de detalhamento dos índices e parâmetros considerados

Como observado na Figura *8*, o etanol hidratado é transportado das usinas produtoras com destino às distribuidoras e/ou portos exportadores, e das distribuidoras aos postos revendedores. Assim, para a realização da modelagem proposta, a obtenção dos seus respectivos parâmetros é necessária.

Semelhante ao realizado por Xavier (2008), a presente modelagem optou por realizar uma agregação do nível de detalhamento dos conjuntos das usinas e dos postos revendedores por microrregião geográfica, de acordo com a classificação do IBGE (2020).

Essa estratégia de agregação para esses conjuntos traz: i) um aumento na velocidade de processamento dos dados pelo modelo, ao mesmo tempo que ii) não traz mudanças significativas nos resultados em relação à agregação de maior granularidade. Como afirma Xavier (2008), em geral, as distribuidoras e terminais intermodais recebem o etanol de um conjunto de usinas agrupadas por microrregiões devido à proximidade geográfica e às questões tributárias dos fluxos entre os estados.

De forma semelhante, as distribuidoras, usualmente, têm também a sua área de atendimento dividida em microrregiões, também em função de motivos fiscais e geográficos. Os demais índices (distribuidoras, portos e terminais intermodais) foram agregados a nível municipal. O detalhamento das agregações está disponível, assim como o detalhamento dos dados explicados ao decorrer deste capítulo estão no Anexo I.

i. Detalhamento da oferta de etanol hidratado

A oferta do etanol hidratado para cada usina foi estimada a partir dos dados disponibilizados pela ANP (2019) e pelo MAPA (2019). A partir da base do MAPA (2019), foram obtidas as capacidades de produção do etanol hidratado por cada usina em m^3/dia, e a partir da base da ANP (2019) foi obtida a produção total de etanol hidratado no Brasil no ano de 2019.

Com esses dados, foi possível estimar a produção de cada usina *U* a partir da participação das suas capacidades produtivas no conjunto total de usinas *U*. Uma vez obtida essa participação, a produção total de etanol hidratado em 2019 foi rateada de acordo com a participação de cada uma dessas usinas.

Uma vez obtida essa produção estimada por usina *U*, a produção agregada por microrregião foi o resultado da soma da produção estimada de cada usina *U* correspondente à cada microrregião.

Por fim, foram definidos os municípios centroides de cada microrregião a partir do município de maior produção de etanol hidratado estimada. De acordo com Xavier (2008), a definição dos municípios centroides tem como objetivo possibilitar o levantamento das distâncias a partir de cada uma das microrregiões para os demais pontos considerados na modelagem.

ii. Detalhamento da demanda doméstica pelo etanol hidratado

Os dados de consumo de etanol hidratado foram oferecidos pela ANP (2019). As informações foram disponibilizadas por município, e são referentes ao volume de etanol hidratado comercializado pelos postos revendedores no ano de 2019, em m³.

Para realizar a agregação por microrregiões, os dados de consumo municipais foram somados e concentrados em um município centroide de cada microrregião. O centroide de cada microrregião foi o município que apresentou o maior volume comercializado no ano analisado (XAVIER, 2008).

iii. Detalhamento da demanda externa pelo etanol hidratado

A demanda externa pelo etanol hidratado foi disponibilizada pela Secretária do Comércio Exterior (SECEX, 2019). A Secretaria divulgou o volume de etanol hidratado exportado no ano de 2019 por porto, em quilogramas (kg). A exportação foi convertida em metros cúbicos levando em consideração a densidade do etanol de 0,789 kg/m³.

Para consultar os volumes de etanol hidratado, foram utilizados os códigos 2207.10.90, que corresponde ao etanol hidratado não-desnaturado, e 2207.20.19, que corresponde ao etanol hidratado desnaturado, ou carburante, na Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM).

Com base na consulta, observou-se que os portos de Santos (SP) e Paranaguá (PR) foram responsáveis por 99,36% (637,66 mil m³) das exportações totais de etanol hidratado no ano de 2019, com o porto de Santos (SP) sendo responsável por 97,76% (627,40 mil m³) das exportações totais, e o porto de Paranaguá (PR) por 1,60% (10,25 mil m³). Dessa forma, foram considerados esses dois portos como centroides para a demanda externa pelo biocombustível.

iv. Detalhamento da capacidade dinâmica de distribuição das distribuidoras

A capacidade dinâmica das distribuidoras foi estimada em função da capacidade estática de cada distribuidora e da quantidade de giros de estoque anuais de cada uma delas, conforme exposto por Xavier (2008).

A capacidade estática de cada distribuidora foi obtida a partir do Sistema de Consultas Públicas da ANP – CPL (ANP, 2019), onde foram coletadas as capacidades dos tanques de armazenagem de etanol hidratado de cada distribuidora cadastrada no sistema. Essa capacidade estática foi multiplicada por 96 para se obter a capacidade dinâmica anual. De acordo com Xavier (2008), as distribuidoras podem chegar a girar os seus estoques até oito vezes por mês, o que, quando projetado para doze meses, é obtido o coeficiente de 96 giros por ano.

v. Detalhamento da capacidade de transporte intermodal das soluções consideradas

A capacidade de transporte intermodal das soluções foi estimada de acordo com o volume efetivamente movimentado por cada solução no ano de 2019. Esses volumes foram oferecidos pela ANTT (2019) para as ferrovias; ANTAQ (2019) para as hidrovias e rotas de cabotagem; e Logum (2019) para as rotas dutoviárias consideradas.

Como o modelo apresenta a possibilidade do uso de mais de uma solução intermodal para o transporte do etanol, a restrição de capacidade foi aplicada apenas nos terminais de entrada intermodais, que considerou a somatória dos volumes praticados para as rotas com origem em cada um desses terminais de entrada.

vi. Detalhamento das tarifas de transporte rodoviário

As tarifas de transporte rodoviárias do etanol hidratado entre os elos da rede de distribuição foram obtidas a partir de modelos de regressão linear e regressão log-linear

do valor do frete em função da distância da rota, semelhante ao realizado por Xavier (2008) e Branco (2007).

O uso de modelos de regressão para estimar os valores de frete em função da distância são indicados devido à consideração de rotas de difícil obtenção dos valores reais de fretes praticados no mercado. Como a modelagem apresenta um conjunto grande de combinações, a quantidade de rotas sem informações efetivas se mostrou representativa para as rotas consideradas. Além disso, o modelo pode indicar como alternativa ótima uma ou mais rotas que não foram praticadas pelos agentes do mercado.

Para estimar os valores de frete do etanol hidratado em função da distância, foi utilizado o frete médio de 2019 para 648 rotas distintas que constavam na base do SIFRECA (2019). O modelo de regressão linear considerou os valores reais apresentados para a distância e para os preços dos fretes, e os coeficientes foram estimados pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) (BRANCO, 2007; XAVIER, 2008).

A representação matemática desse modelo de regressão linear é dada pela seguinte equação:

$$Y = \alpha + \beta * X + \varepsilon \tag{15}$$

Em que:

Y Corresponde ao valor do frete, em R$/m³.

α Corresponde ao coeficiente linear da reta.

β Corresponde ao coeficiente angular da reta.

X Corresponde à distância da rota, em km.

ε Corresponde ao erro do modelo.

Os resultados de significância dos coeficientes da regressão linear são apresentados na Tabela 1. Nela, observam-se que os valores obtidos para a inclinação e a intercepção da reta apresentaram um *p-valor* abaixo de 0,05, indicando que ambos se mostraram à um nível de significância de 5%.

Tabela 1 - Resultados do modelo de regressão linear.

Coeficiente	**Valor do coeficiente**	**Estatística *t***	**P-valor**	**R-Quadrado**
α	35,2318*	26,4819	$3{,}3658 * 10^{-105}$	0,9181
β	0,1196*	85,1494	0,0000	

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

* Valores com significância de 1% no teste *t*.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 1 e seguindo o modelo apresentado disposto na equação 13, pode-se estimar o valor do frete de etanol para uma rota genérica *i* de acordo com a seguinte equação:

$$frete_i = 35{,}2318 + 0{,}1196 * distancia_i \tag{16}$$

O modelo de regressão log-linear estima os coeficientes da reta pelo método MQO a partir dos logaritmos neperianos dos valores de frete e das distâncias das 648 coletadas na base do SIFRECA (2019) (BRANCO, 2007). A representação matemática desse modelo é dada pela seguinte equação:

$$lnY_i = \alpha_i + \beta_i * lnX_i + \varepsilon \tag{17}$$

Em que:

Y Corresponde ao valor do frete, em R$/m³.

α Corresponde ao coeficiente linear da reta.

β Corresponde ao coeficiente angular da reta.

X Corresponde à distância da rota, em km.

ε Corresponde ao erro do modelo.

Os resultados de significância dos coeficientes da regressão log-linear são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados do modelo de regressão log-linear.

Coeficiente	Valor do coeficiente	Estatística *t*	P-valor	R-Quadrado
α	0,8551*	14,4686	$2{,}6587 * 10^{-41}$	0,8637
β	0,6060*	63,9851	$9{,}0029 * 10^{-282}$	

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

* Valores com significância de 1% no teste *t*.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2, pode-se estimar o valor do frete de etanol a partir do modelo de regressão log-linear para uma rota genérica *i* de acordo com a seguinte equação:

$$frete_i = e^{\alpha} * X_i^{\beta} \tag{18}$$

Em que:

e Corresponde ao número de Euler.

vii. Detalhamento das tarifas de transporte intermodal

As tarifas de transporte intermodal foram estimadas em função dos fretes rodoviários equivalentes, como fizeram Branco, Bartholomeu e Vetorazzi (2020). A estimativa utilizou o chamado “frete relativo”, no qual o frete da solução intermodal *M* é estimado em função de um desconto *S* do frete da rota rodoviária equivalente.

A estratégia do frete relativo é utilizada devido à dificuldade de obtenção dos valores de frete intermodais praticados a preços de mercado. De acordo com Branco (2007) e Branco, Bartholomeu e Vetorazzi (2020), esses valores são firmados via contrato entre os embarcadores e as companhias que administram as instalações intermodais e variam de acordo com uma série de parâmetros, como o volume prometido a ser embarcado, credibilidade do embarcador, dentre outros. Dessa forma, os valores são sigilosos e de difícil obtenção.

Dessa forma, o frete intermodal para a rota *i* da solução *s* pode ser obtido a partir da equação 19:

$$frete\ intermodal_m = frete\ rodoviário_i * (1 - desconto_s) \quad (19)$$

No presente modelo, foram considerados como coeficiente de desconto os valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Taxas de desconto utilizadas para estimar os valores de frete intermodais.

Solução	Desconto utilizado
Ferroviária	40%
Hidroviária	60%
Dutoviária	65%
Cabotagem	65%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

viii. Detalhamento das emissões de CO2 na etapa do transporte para as rotas rodoviárias e intermodais

As emissões de CO2 para as rotas rodoviárias e intermodais foram estimadas levando em consideração os coeficientes das emissões em kgCO2/m³.km, de acordo com os dados disponibilizados pela ANP (2021) na RenovaCalc[4] para a etapa de comercialização do etanol.

A Tabela 4 apresenta os dados considerados por cada modal de transporte e veículo considerado. A discriminação pelo tipo de veículo foi incluída devido às diferenças na etapa de transporte rodoviário. Segundo a EPE (2019), o transporte rodoviário com destino às distribuidoras é comumente realizado por caminhões do tipo Bitrem, e o transporte rodoviário com destino aos postos revendedores é realizado por caminhões do tipo *Truck*. Essa distinção entre os veículos ocorre devido à menor capacidade de recepção dos postos revendedores.

[4] A RenovaCalc é a calculadora oficial do Programa do RenovaBio, utilizada para calcular as emissões nas etapas Agrícola (produção) e Distribuição do etanol. Com bases nesse cálculo das emissões, é obtida a Nota de Eficiência Energética de cada usina, a qual serve para indicar qual a quantidade de etanol que deve ser comercializado para que a usina possa emitir um CBio.

Tabela 4 - Emissões de CO2 por modal de transporte e veículo

Modal de transporte	Veículo	Unidade	$kgCO_2$ equivalente
Rodoviário	Caminhão Truck	t.km	183,80
Rodoviário	Caminhão Bitrem	t.km	72,60
Cabotagem, navio	Navio	t.km	6,10
Hidroviário	Balsa	t.km	48,60
Ferroviário	Locomotiva	t.km	39,60
Dutoviário	Duto	t.km	2,80

Fonte: ANP (2021).

Dessa forma, uma vez obtidos os níveis de emissão em kgCO2/t.km, é possível calcular as emissões de CO2 em cada rota rodoviária e intermodal da seguinte forma:

$$emissão_{iw} = \left(\frac{coeficiente_w}{0{,}789}\right) * distância_{iw} \tag{20}$$

Em que:

i	Corresponde à uma rota genérica *i* entre dois pontos *a* e *b*
w	Corresponde ao modal de transporte e veículo apresentados na Tabela 4
$emissão_{iw}$	Corresponde às emissões de CO2, em gramas/m³.
$coeficiente_w$	Corresponde ao coeficiente de emissão de CO2 para cada modal de transporte e veículo *w*, em kgCO2/t.km.
$distância_{iw}$	Corresponde à distância da rota *i* e modal de transporte e veículo *w*.

ix. Detalhamento do número de pontos de Pareto considerados

O número de pontos de Pareto considerados é análogo ao número de incrementos realizados no algoritmo proposto na modelagem para o lado direito da restrição adicionada à estrutura matemática, conforme a recomendação de Kim, Janic e Wee (2008).

Para determinar o valor do incremento, a fim de se obter os pontos de Pareto entre os dois objetivos, foi seguido o seguinte passo a passo:

i. *Passo 1*: foram obtidos os resultados ótimos para cada uma das variáveis, i.e, para *Z* (mínimo custo) e *W* (mínima emissão de CO2).
ii. *Passo 2*: para cada um dos modelos, foram obtidos os respectivos valores não otimizados das variáveis análogas. Ou seja, para o cenário ótimo de mínimo custo,

obteve-se o nível de emissões de CO2, e para o cenário ótimo de emissões de CO2, obteve-se o custo total.

iii. *Passo 3*: cálculo da diferença percentual (*DP*) entre as variáveis otimizadas e não otimizadas a partir das seguintes equações:

$$DP_z = \frac{Z_{NO}}{Z_O} - 1 \tag{21}$$

$$DP_W = \frac{W_{NO}}{W_O} - 1 \tag{22}$$

Em que:

Z_O	Corresponde ao valor ótimo para a variável *Z* no modelo de mínimo custo.
Z_{NO}	Corresponde ao valor de *Z* no modelo de mínima emissão de CO2.
W_O	Corresponde ao valor ótimo das emissões no modelo de mínima emissão.
W_{NO}	Corresponde ao valor de *W* no modelo de mínimo custo.
DP_Z	Corresponde à diferença percentual entre o valor não otimizado de *Z* e o valor otimizado de *Z*.
DP_W	Corresponde à diferença percentual entre o valor não otimizado de *W* e o valor otimizado de *W*.

Para se obter o valor dos incrementos do lado direito das restrições adicionais foi considerado o intervalo percentual da diferença valores de DP_Z *e* DP_W divido por 15. O número 15 foi determinado pelo autor após uma série de teste do número de pontos que seriam mais satisfatórios para análise: no modelo em questão, uma análise com um número maior do que 15 pontos não traria ganhos para a discussão dos resultados. Assim, uma vez definido os níveis percentuais de incremento do lado direito das restrições adicionais, foi possível aplicar o algoritmo proposto para a obtenção das curvas de Pareto para cada um dos modelos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos por meio da resolução dos modelos propostos e fomentar uma discussão fazendo um paralelo com a literatura existente sobre o planejamento do transporte do etanol sob a ótica de mínimo custo e de mínima emissão, assim como sobre as relações de troca existentes entre os dois objetivos.

Os modelos foram rodados levando em consideração as seguintes instâncias:

u número total de usinas consideradas = 130.
d número total de distribuidoras consideradas = 106
c número total de postos considerados = 542
t_e número total de terminais considerados = 21
m número total de rotas intermodais consideradas = 88
e número total de portos considerados = 2

Inicialmente, são apresentados os resultados relacionados ao modelo mono objetivo de minimização de custos (Z). Na sequência, são apresentados os resultados relacionados ao modelo mono objetivo de minimização de CO2 (W), e, posteriormente, os dois cenários são comparados.

4.1. Resultados do cenário de mínimo custo

No cenário de mínimo custo, o valor obtido para a função objetivo do modelo (Z) foi de R$ 2,449 bilhões, o que representa um custo médio de aproximadamente R$ 107,12/m³, ou de aproximadamente R$ 0,1071 por litro. Esse volume financeiro foi dividido entre os fluxos (i) usinas-distribuidoras via modal rodoviário, (ii) usinas-distribuidoras via soluções intermodais, (iii) usinas-portos via modal rodoviário e (iv) distribuidoras-postos revendedores via modal rodoviário.

Para se obter o custo supracitado para Z, a variável W (emissão de CO2) foi de 1,243 milhões de toneladas, o que representa um volume de CO2 médio emitido de 54,40 kg/m³. O detalhamento dos custos e emissões por fluxo estão detalhados na Tabela 5.

Tabela 5 - Detalhamento dos custos e emissões por fluxo no cenário de mínimo custo

Elo de origem	Elo de destino	Modal	Volume (mil m³)	Custo total (R$ milhões)	Emissão total (t.CO2)	Distância Média (km)
Usinas	Distribuidoras	Rodoviário	20.505,93	1.542,89	685,61	363,41
Usinas	Distribuidoras	Intermodal	2.038,11	210,92	52,17	919,59
Usinas	Portos	Rodoviário	637,65	42,50	39,24	666,32
Distribuidoras	Postos Revendedores	Rodoviário	22.544,05	652,64	466,59	88,86
Rede de transporte			45.725,75	2.448,95	1.243,61	257,06

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos resultados do modelo (2021).

A partir dos resultados apresentados por fluxo, observa-se que o transporte entre as usinas e as distribuidoras foi responsável por 63,00% do custo total da rede, apresentando um custo médio de R$ 75,24/m³. O segundo fluxo mais representativo nos custos foi aquele entre as distribuidoras e os postos revendedores, que correspondeu a 26,65% dos custos totais e um custo médio de R$ 28,95/m³.

Essa grande representatividade dos custos entre as usinas e as distribuidoras é explicada pela maior distância média em relação ao fluxo de distribuição. De acordo com os resultados obtidos na modelagem, a distância média entre as usinas e as distribuidoras foi de 363,41 km, contra 88,86 km para as rotas entre as distribuidoras e as regiões de consumo.

Esse comportamento é reflexo da estratégia de as distribuidoras estarem localizadas mais próximas aos centros consumidores devido ao tipo de caminhão: enquanto o fluxo entre as usinas e as distribuidoras permite o uso de caminhões de maior capacidade, o fluxo entre as distribuidoras e os postos revendedores exige caminhões de menor capacidade devido à menor capacidade de recepção dos postos. Esses caminhões de menor capacidade apresentam custos mais elevados (em R$/m³) em comparação com caminhões maiores e, por isso, o desenho da malha brasileira adota essa estratégia – a qual foi reforçada pelo modelo.

Já os fluxos entre as usinas e as distribuidoras via as soluções intermodais foi responsável por 8,61% do custo total da rede, e apresentou um custo médio de R$ 103,49/m³ e uma distância média de 919,59 km. Por fim, o fluxo entre as usinas e os portos exportadores representou 1,74% do custo total da rede, com uma distância média de 666,32 km e um custo médio de transporte de R$ 66,65/m³.

O transporte com destino aos portos é pouco representativo devido à baixa demanda externa pelo etanol hidratado se comparada à demanda interna. Já o transporte entre as usinas e as distribuidoras por meio das soluções intermodais se mostrou pouco representativo em função de alguns fatores: i) baixa capacidade de captação de carga das soluções intermodais frente ao modal rodoviário e ii) grandes distâncias rodoviárias entre as usinas e os terminais de entrada dessas soluções, o que acaba inviabilizando o transporte intermodal frente ao transporte rodoviário direto.

Analisando as emissões de CO2 em cada um dos fluxos, observa-se que o transporte entre as usinas e as distribuidoras via modal rodoviário representou 55,13% das emissões totais, se configurando como o fluxo mais representativo para esse indicador. O segundo fluxo de maior participação nas emissões foi aquele entre as distribuidoras e os postos revendedores, com 37,52%, seguido pelo fluxo entre as usinas e as distribuidoras via soluções intermodais (4,20%) e pelo fluxo entre as usinas e os portos exportadores (3,16%).

As emissões médias, por outro lado, foram maiores no fluxo entre as usinas e os portos exportadores (61,55 kg.CO2/m³), seguido pelo fluxo entre as usinas e as distribuidoras via modal rodoviário (33,4 kg.CO2/m³), pelo fluxo entre as usinas e as distribuidoras via soluções intermodais (25,60 kg.CO2/m³) e pelo fluxo entre as distribuidoras e os postos revendedores (20,70 kg.CO2/m³).

Contrapondo as emissões e os custos, observa-se que o fluxo entre as usinas e as distribuidoras via modal rodoviário perde representatividade quando comparados os seus custos totais (63,00%) com as suas emissões totais (55,13%). Em contrapartida, o fluxo entre as distribuidoras e os postos revendedores ganhou representatividade nas emissões (34,52%) em comparação com a sua representatividade de custos (26,65%).

Essa dinâmica das representatividades se deu devido ao fluxo entre as usinas e as distribuidoras utilizar caminhões com maior capacidade em relação ao fluxo entre as distribuidoras e os postos revendedores. Dados da ANP (2021) indicaram uma emissão de 72,60 kg.CO2/m³ entre as usinas e as distribuidoras e uma emissão de 183,80 kg.CO2/m³ entre as distribuidoras e os postos revendedores, o que representa um aumento de 153,16%.

Para o fluxo entre as usinas e as distribuidoras via soluções intermodais, observou-se que houve uma perda de representatividade nas emissões totais (4,20%) em relação aos custos (8,61%). Essa perda ocorreu devido ao coeficiente de emissões das soluções intermodais ser percentualmente inferior às emissões rodoviárias em relação aos custos de transporte. Por fim, o fluxo com destino à exportação apresentou aumento da representatividade das emissões totais da rede (3,16%) em relação à representatividade dos custos (1,74%).

A distribuição dos custos e das emissões ocorreu de forma heterogênea entre os estados onde estão localizadas as usinas, as distribuidoras e os postos revendedores.

4.1.1. Usinas

Na modelagem proposta, as usinas poderiam transportar o etanol hidratado com destino às distribuidoras, aos terminais de entrada das soluções intermodais e aos portos. A partir dos fluxos escolhidos pelo modelo no cenário de mínimo custo, os indicadores de custo médio (R$/m³), emissões médias (kg.CO2/m³) e distância média (km/m³) foram levantados e consolidados em cada um dos estados. Esses indicadores estão dispostos na Tabela 6.

Na Tabela 6, observa-se que os estados que apresentam os maiores indicadores de custo médio, emissões médias e distância média foram Tocantins (TO), Mato Grosso do Sul (MS), Rondônia (RO), Minas Gerais (MG) e Goiás (GO). Dentre eles, os estados de MS, GO e MG são estados com os maiores níveis de oferta de etanol hidratado do país em 2019, ficando atrás apenas do estado de São Paulo.

Tabela 6 - Indicadores de custo médio, emissões médias e distância média para os fluxos com origem nas usinas

UF	Oferta[1]	Custo Médio[2]	Emissões Médias[3]	Distância Média[4]	Preço-Sombra
SP	10,24	54,04	21,30	231,45	-133,06
MT	1,45	73,90	33,85	367,87	-31,37
MA	0,02	68,90	27,47	298,51	-235,74
MS	2,45	127,12	69,33	753,43	-72,82
GO	4,36	85,02	39,47	428,91	-95,72
PR	1,02	35,72	8,82	95,81	-121,08
MG	2,39	82,15	39,49	429,21	-133,99
SE	0,07	23,18	4,14	44,98	-256,65
RO	0,00	114,04	46,16	501,61	-66,87
RJ	0,09	28,74	7,86	85,44	-204,01
RS	0,00	47,58	13,17	143,12	-176,03
PE	0,25	28,61	5,90	64,16	-266,02
ES	0,01	55,80	17,47	189,90	-218,55
PB	0,23	37,19	9,44	102,61	-266,59
BA	0,15	79,30	38,42	417,58	-219,72
RN	0,02	20,00	3,15	34,19	-303,25
AL	0,28	51,57	17,62	191,51	-238,45
PA	0,02	56,76	18,44	200,40	-203,15
TO	0,08	156,15	92,49	1005,20	-153,79
AM	0,01	58,90	21,05	228,74	-222,82
PI	0,03	9,49	0,92	10,00	-298,16

[1]Valores em milhões de m³
[2]Valores em R$/m³
[3]Valores em kgCO2/m³
[4]Valores em km/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

Já os estados com os menores indicadores de custo médio, emissões médias e distância média foram os de Piauí (PI), Alagoas (AL), Sergipe (SE), Pernambuco (PE) e Rio de Janeiro (RJ). O estado de São Paulo (SP), maior estado produtor – com 10,24 milhões de m³ produzidos em 2019, foi o 12º lugar dentre os estados com os maiores custos médios, e o 9º lugar dentre os estados com maiores emissões médias e distâncias médias.

Em relação ao preço-sombra [5]por estado, observa-se que as unidades federativas com os menores valores foram as de RN (-303,25), PI (-298,16) e PB (-266,59). Tomando o estado de RN como exemplo, o aumento na oferta em 1 m³ resultaria em uma redução

[5] O preço-sombra mensura o impacto na função objetivo do modelo com o aumento em uma unidade no lado direito da restrição. Por exemplo, um preço-sombra de -303,25 para o estado de RN, no modelo de mínimo custo indica que o aumento em 1 m³ na capacidade de distribuição desse estado pode trazer uma redução de -303,25 reais no custo de transporte total do Brasil.

de R$ 303,25 no valor da função objetivo, caso a demanda pelo produto se mantenha constante.

Esses estados apresentaram os menores valores, ou seja, seriam aqueles mais indicados para investimentos em capacidade produtiva, no intuito de minimizar os custos logísticos do país.

Já os estados com os maiores valores do preço-sombra foram os de MT (-31,37), RO (-66,87) e MS (-72,82). Principalmente em relação aos estados de MT e MS, os quais apresentaram elevados níveis de oferta em relação aos demais estados, o aumento na oferta do etanol resultaria em uma menor redução dos custos logísticos em comparação com as demais unidades federativas. Isso é explicado por que essas unidades apresentaram, no período analisado, um superávit produtivo, e o aumento na sua oferta resultaria em um deslocamento do produto para outras unidades federativas.

A Tabela 7 apresenta os indicadores de volume, custo médio, emissão média e distância média para os fluxos entre as usinas os terminais de entrada intermodal considerados. Nela, observa-se que apenas 6 estados fizeram o uso de soluções intermodais para o escoamento da sua produção.

Em termos de volume, os estados mais representativos no uso de soluções intermodais foram os de SP (802,42 mil m³), MG (526,32), GO (522,64), PR (120,65), MT (61,58) e RO (4,51). Em termos percentuais de produção, os estados que maior alocaram a sua oferta em soluções intermodais foram os de RO (100,00%), MG (21,99%), GO (11,99%), PR (11,84%), SP (7,83%) e MT (4,25%).

Tabela 7 - Indicadores de volume, custo médio, emissões médias e distância média para os fluxos com origem nas usinas e destino aos terminais de entrada intermodais

UF	Volume[1]	% da Produção	Custo Médio[2]	Emissões Médias[3]	Distância Média[4]
SP	802,42	7,83%	24,53	3,66	39,73
MT	61,58	4,25%	180,90	97,08	1055,08
MA	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
MS	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
GO	522,64	11,99%	27,16	4,32	47,00
PR	120,65	11,84%	28,63	5,03	54,64
MG	526,32	21,99%	10,63	0,92	10,00
SE	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
RO	4,51	100,00%	114,04	46,16	501,61
RJ	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
RS	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
PE	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
ES	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
BA	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
RN	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
AL	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
PA	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
TO	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
AM	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
PI	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00

[1]Valores em mil de m³
[2]Valores em R$/m³
[3]Valores em kgCO2/m³
[4]Valores em km/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

Já os estados que, hoje, apresentam menores perspectivas de crescimento na produção do etanol hidratado, são aqueles que apresentam os menores valores de preço-sombra, e, consequentemente, se mostram como melhores alternativas para investimentos em capacidade produtiva, pensando sob a ótica de minimização dos custos de transporte.

Esses estados são aqueles que acarretariam um menor aumento do custo Brasil caso haja um aumento na sua produção, mas, em contrapartida, são aqueles onde o consumo do etanol é menor, principalmente por questões tributárias, e a produção é mais onerosa em relação aos estados da região Centro-Sul.

4.1.2. Soluções intermodais

A Tabela 8 apresenta o volume (m³), o custo médio (em R$/m³) e as emissões médias (em kg.CO2/m³) para as rotas com origem nas usinas e com destino às instalações intermodais.

Nela, observa-se que a rota com o volume mais representativo foi aquela com origem na usina localizada em Uberaba (MG) e com destino à dutovia entre os municípios de Uberaba (MG) e Duque de Caxias (RJ), com 526.319 m³ movimentados (25,8% do volume total transportado por instalações intermodais). Essa rota apresentou um custo médio de R$ 75,95/m³ e uma emissão média de 3,98 kg.CO2/m³, o que a coloca na quarta colocação dentre as rotas utilizadas quando analisado o seu custo médio, e a rota menos poluente.

A segunda rota mais utilizada foi aquela que conecta os municípios de Chapadão do Sul (MS) até o município de Paulínia (SP) através do modal ferroviário, com 522.638 m³ movimentados. Com um custo médio de R$ 107,47/m³ e uma emissão média de 51,62 kg.CO2/m³, a rota em questão ocupou a nona posição dentre as rotas mais econômicas e a décima posição dentre as rotas menos poluentes.

Tabela 8 - Volume, custo médio e emissões das rotas com destino às instalações intermodais

Usina	Rota	Modal	Volume[1]	Custo Médio[2]	Emissão Média[3]
Uberaba (MG)	Uberaba (MG)-Duque de Caxias (RJ)	Dutoviário	526.319	75,95	3,98
Chapadao Do Ceu (GO)	Chapadão do Sul (MS)-Paulínia (SP)	Ferroviário	522.638	107,47	51,62
Pontal (SP)	Ribeirão Preto (SP)-Paulínia (SP)	Dutoviário	263.827	45,29	4,37
Pontal (SP)	Ribeirão Preto (SP)-Volta Redonda (RJ)	Dutoviário	176.732	76,38	5,78
Pontal (SP)	Ribeirão Preto (SP)-Duque de Caxias (RJ)	Dutoviário	163.836	80,85	6,13
Pontal (SP)	Ribeirão Preto (SP)-Fortaleza (CE)	Dutoviário e Cabotagem	126.948	207,20	29,18
Jussara (PR)	Maringá (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	97.646	87,92	31,85
Pontal (SP)	Ribeirão Preto (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	69.811	61,42	4,85
Campo Novo Do Parecis (MT)	Porto Velho (RO)-Manaus (AM)	Hidroviário	61.583	240,07	154,33
Maringa (PR)	Sarandi (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	15.730	62,89	26,27
Maringa (PR)	Sarandi (PR)-Estrela (RS)	Ferroviário	7.270	97,71	62,98
Santa Luzia D'Oeste (RO)	Porto Velho (RO)-Manaus (AM)	Hidroviário	4.512	173,21	103,40
Buritizal (SP)	Uberaba (MG)-Fortaleza (CE)	Dutoviário e Cabotagem	1.265	222,88	31,55

[1]Valores em m³
[2]Valores em R$/m³
[3]Valores em kgCO2/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

De acordo com o exposto na Tabela 8, o modal dutoviário foi responsável, no cenário ótimo, por captar 58,90% (1.200,52 mil m³) do total movimentado entre as soluções intermodais, enquanto os modais ferroviário, dutoviário combinado com a cabotagem e o hidroviário captaram 31,56%, 6,29% e 3,24%, respectivamente.

Em termos de custo, observou-se que o modal dutoviário utilizado totalizou um custo de transporte de R$ 82,95 milhões, o que representa 43,31% do total dos custos empenhados com o uso das soluções intermodais. Já os modais ferroviário, dutoviário combinado com cabotagem e hidroviário somaram, respectivamente, R$ 66,45 (34,69%), R$ 26,59 (13,88%) e R$ 15,57 (8,13%) milhões de reais.

Em termos de emissão de CO2, o uso exclusivo do modal dutoviário totalizou um total de 5,61 toneladas de CO2 (11,16%), enquanto o modal ferroviário somou 30,96 toneladas de CO2 (61,57%), o modal dutoviário combinado com a cabotagem, 3,74 toneladas (7,45%) e o modal hidroviário, 9,97 toneladas (19,83%).

Com esses dados, é possível inferir que o modal dutoviário tem se mostrado a melhor alternativa para realizar o transporte do etanol hidratado no Brasil, dentre os demais modais apresentados. Mesmo com o maior volume captado dentre as instalações, as dutovias utilizadas apresentam o menor custo médio de transporte (R$ 69,09/m³), e os menores níveis médios de emissão de CO2 (4,67 kg.CO2/m³).

O modal ferroviário apresentou um custo médio de R$ 103,30/m³ e uma emissão média de 48,12 kg.CO2/m³, enquanto o modal dutoviário combinado com a cabotagem apresentou um custo médio de R$ 207,36/m³ e uma emissão média de 29,20 kg.CO2/m³, e o modal hidroviário, R$ 235,51/m³ como custo médio e 150,85 kg.CO2/m³.

A Tabela 9 apresenta as distribuidoras atendidas pelas instalações intermodais utilizadas. Dentre elas, a distribuidora localizada em Paulínia (SP) foi a que mais recebeu volumes através de soluções intermodais, com 786.464 m³ (38,59% do total movimentado por instalações intermodais), distribuídos entre os modais dutoviário e ferroviário. Em segundo lugar, a distribuidora de Duque de Caxias (RJ) recebeu um total de 690.155 m³ (33,86% do total movimentado pelas instalações intermodais), exclusivamente pelo modal dutoviário.

A distribuidora localizada em Manaus (AM) foi a única que recebeu etanol hidratado através do modal hidroviário, e a distribuidora localizada em Fortaleza (CE) foi a única que, no cenário de mínimo custo, recebeu etanol através da combinação de duas instalações intermodais (dutovia e cabotagem).

Tabela 9 - Volume, custo médio e emissões das rotas intermodais com destino às distribuidoras

Rota multimodal	Modal	Distribuidora	Volume[1]	Custo Médio[2]	Emissões Médias[3]
Porto Velho (RO)-Manaus (AM)	Hidroviário	Manaus (AM)	66.094	68,66	58,16
Chapadão do Sul (MS)-Paulínia (SP)	Ferroviário	Paulínia (SP)	522.638	89,80	48,22
Sarandi (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	Araucária (PR)	15.730	63,59	26,52
Maringá (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	Araucária (PR)	97.646	64,11	26,72
Sarandi (PR)-Estrela (RS)	Ferroviário	Lajeado (RS)	7.270	95,58	62,82
Ribeirão Preto (SP)-Paulínia (SP)	Dutoviário	Paulínia (SP)	263.827	30,26	1,64
Ribeirão Preto (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	Guarulhos (SP)	69.811	46,39	2,12
Uberaba (MG)-Duque de Caxias (RJ)	Dutoviário	Duque de Caxias (RJ)	526.319	74,81	3,98
Uberaba (MG)-Fortaleza (CE)	Dutovia e Cabotagem	Fortaleza (CE)	1.265	201,17	27,03
Ribeirão Preto (SP)-Fortaleza (CE)	Dutovia e Cabotagem	Fortaleza (CE)	126.948	192,18	26,45
Ribeirão Preto (SP)-Duque de Caxias (RJ)	Dutoviário	Duque de Caxias (RJ)	163.836	65,82	3,39
Ribeirão Preto (SP)-Volta Redonda (RJ)	Dutoviário	Volta Redonda (RJ)	75.936	61,35	3,05
Ribeirão Preto (SP)-Volta Redonda (RJ)	Dutoviário	Barra Mansa (RJ)	100.796	61,73	3,11

[1]Valores em mil m³
[2]Valores em R$/m³
[3]Valores em kgCO2/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 8 e 9, observou-se que as distribuidoras localizadas nos grandes centros (Paulínia e Duque de Caxias) foram aquelas que mais receberam etanol através de instalações intermodais, com destaque para o modal dutoviário.

Isso se deve, especificamente, por duas razões principais: i) há a necessidade de importação do etanol entre os estados, uma vez que a demanda nos grandes centros é maior do que as suas respectivas produções, e, do ponto de visto logístico, é mais vantajoso fazer o uso de instalações intermodais para transportes nesse nível de distância;

e ii) essas distribuidoras apresentam vantagens geográficas – a proximidade com as instalações intermodais viabiliza o transporte por meio dessas soluções.

A distribuidora localizada em Manaus (AM) apresenta uma posição geográfica onde o produto é capaz de chegar à ela somente por meio de hidrovias, e é atendida por uma usina próxima, localizada em Campo Novo do Parecis (MT).

Ao analisar as origens dos fluxos, observa-se que grande parte dos volumes movimentados pelas instalações intermodais são fluxos interestaduais. Com a crescente demanda pelo etanol no Brasil e o descompasso do crescimento produtivo entre os estados, o uso de instalações intermodais, principalmente das dutovias, pode ser bastante vantajoso do ponto de vista logístico, possibilitando um fluxo mais eficiente em termos de custo e impactos ambientais.

4.1.3. Distribuidoras

A Tabela 10 apresenta a capacidade dinâmica anual de distribuição, o volume captado e o percentual utilizado da capacidade de cada estado, considerando as respectivas somas das unidades distribuidoras consideradas.

Nela, observa-se que o estado de São Paulo (SP) foi aquele que captou o maior volume (12.145 mil m³), seguido por MG (2.133 mil m³) e PR (1.557 mil m³). Já os estados que captaram os menores volumes foram os de RR (1,59 mil m³), AC (7,67 mil m³) e RS (49,40 mil m³).

Em relação à capacidade utilizada, os principais destaques foram os estados de DF, AL, SE e PB, que utilizaram 100% das suas respectivas capacidades de distribuição. Por outro lado, os estados que fizeram o menor uso da capacidade de distribuição foram os de RR (4,74%), RN (6,30%) e RS (6,50%).

Tabela 10 - Capacidades e volumes captados por estado

UF	Capacidade de distribuição[1]	Volume Captado[1]	Capacidade utilizada	Preço-Sombra[2]
SP	22.769,80	12.145,79	53,34%	-7,89
MG	3.595,29	2.133,17	59,33%	-10,55
PR	4.034,95	1.557,16	38,59%	-4,50
MT	2.446,80	1.453,45	59,40%	-15,31
GO	2.133,26	1.315,36	61,66%	-6,11
RJ	7.060,89	964,68	13,66%	-2,21
DF	555,15	555,15	100,00%	-2,53
BA	2.948,90	517,89	17,56%	-6,40
PE	748,03	373,97	49,99%	-2,27
MS	2.112,74	344,94	16,33%	-2,03
CE	440,83	142,23	32,26%	0,00
AL	124,32	124,32	100,00%	-13,79
AM	458,88	101,27	22,07%	0,00
SE	98,74	98,74	100,00%	-9,43
RN	1.477,36	93,00	6,30%	0,00
PB	87,20	87,20	100,00%	-39,42
MA	350,01	84,80	24,23%	0,00
RO	478,00	78,51	16,42%	-8,30
SC	474,21	75,60	15,94%	-0,44
ES	171,84	66,03	38,43%	0,00
PI	106,08	58,13	54,79%	-7,94
PA	248,85	57,95	23,29%	0,00
TO	399,16	56,06	14,04%	-3,77
RS	760,29	49,40	6,50%	0,00
AC	18,24	7,67	42,05%	0,00
RR	33,62	1,59	4,74%	0,00

[1]Valores em mil m³

[2]Valores R$/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

A partir do uso percentual da capacidade, pode-se inferir que os estados que tiveram 100% da sua capacidade utilizada, na ótica de mínimo custo, apresentaram uma maior demanda por investimentos em capacidade de distribuição. Dentre eles, um destaque pode ser feito para os estados de PB, que apresentou o menor valor de preço-sombra (R$ -39,42/m³). Esse indicador significa que um aumento na capacidade de distribuição do estado em 1 m³ gera uma economia de R$ 39,42 no custo frete Brasil.

Além do estado da Paraíba (PB), os estados que apresentaram, em média, os menores valores de preço-sombra foram os de MT (-15,31), AL (-13,79), MG (-10,55) e

SE (-9,43), indicando que eles podem ser boas alternativas para avaliar investimentos em infraestrutura de distribuição de etanol hidratado.

A Tabela 11 apresenta os indicadores de custo médio, emissões médias e distância média de recepção, agrupadas por estado. A partir dela, observa-se que os estados que apresentaram os menores custos médios de recepção foram os de PB (R$ 23,45/m³), SE (27,70/m³), AL (R$ 27,86/m³), PE (R$ 33,05/m³) e RN (R$ 46,57/m³). Já os estados com os maiores custos médios de recepção foram os de PA (R$ 250,17/m³), AC (R$ 222,28/m³), CE (R$ 183,30/m³), RS (R$ 160,81/m³) e SC (R$ 149,52/m³).

Analisando a distância média percorrida e as emissões médias, observa-se que os estados com um menor volume emitido foram os de PB, RJ, SE, AL e PE, enquanto aqueles com os maiores níveis de emissão e distância percorrida foram os de PA, AC, RS, AM e SC.

Tabela 11 - Indicadores de custo médio, emissões médias e distância média de recepção por estado.

UF	Custo Médio[1]	Emissões Médias[2]	Distância Média[3]
SP	75,17	34,04	369,94
MG	95,94	44,96	488,62
PR	72,38	30,77	334,36
MT	47,89	15,58	169,28
GO	57,79	19,20	208,68
RJ	67,39	4,75	51,63
DF	65,89	22,52	244,75
BA	128,60	72,01	782,61
PE	33,05	7,53	81,86
MS	58,75	18,86	204,96
CE	183,30	28,50	309,77
AL	27,86	5,74	62,34
AM	123,09	89,04	967,63
SE	27,70	5,71	62,07
RN	46,54	13,61	147,88
PB	23,45	4,16	45,24
MA	140,23	80,87	878,86
RO	93,70	41,76	453,79
SC	149,52	86,75	942,82
ES	73,34	27,28	296,48
PI	64,54	33,21	360,93
PA	250,17	164,95	1,792,67
TO	139,20	78,37	851,72
RS	160,81	99,05	1,076,46
AC	222,28	143,79	1,562,71
RR	118,88	59,62	647,94

[1]Valores em R$/m³
[2]Valores em kgCO2/m³
[2]Valores em km/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

A Tabela 12 apresenta os indicadores de custo médio, emissões médias e distância média de distribuição, agrupadas por estado. A partir dela, observa-se que os estados que apresentaram os menores custos médios de distribuição foram os de AM (R$ 9,61/m³), RR (10,98/m³), CE (R$ 12,85/m³), PB (R$ 12,98/m³) e AC (R$ 14,73/m³). Já os estados com os maiores custos médios de recepção foram os de RO (R$ 70,18/m³), MS (R$ 68,26/m³), MT (R$ 57,06/m³), TO (R$ 50,31/m³) e PI (R$ 42,37/m³).

Analisando a distância média percorrida e as emissões médias, observa-se que os estados com um menor volume emitido foram os de RO, MS, MT, TO e PI, enquanto

aqueles com os maiores níveis de emissão e distância percorrida foram os de AM, RR, PB, CE e AC.

Tabela 12 - Indicadores de custo médio, emissões médias e distância média de distribuição por estado.

UF	Custo Médio[1]	Emissões Médias[2]	Distância Média[3]
SP	23,86	14,27	155,04
MG	34,07	24,55	266,83
PR	22,79	12,12	131,67
MT	57,06	62,29	677,00
GO	33,53	29,95	325,47
RJ	26,23	15,04	163,46
DF	27,34	18,91	205,53
BA	30,29	20,01	217,49
PE	32,71	19,83	215,46
MS	68,26	66,51	722,79
CE	12,85	4,79	52,06
AL	39,59	31,83	345,89
AM	9,61	2,49	27,10
SE	39,46	29,81	323,96
RN	28,52	20,60	223,91
PB	12,98	3,90	42,43
MA	33,41	23,62	256,68
RO	70,18	69,18	751,85
SC	25,18	13,23	143,77
ES	25,75	16,20	176,07
PI	42,37	38,43	417,64
PA	25,37	20,64	224,35
TO	50,31	43,29	470,51
RS	28,60	18,17	197,50
AC	14,73	7,01	76,23
RR	10,98	3,49	37,91

[1]Valores em R$/m³
[2]Valores em kgCO2/m³
[2]Valores em km/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

A partir dos indicadores de custo médio, emissões médias e distância média da recepção e distribuição, pode-se observar que os estados com os menores valores de distribuição e recepção são aqueles que apresentam usinas e postos revendedores próximos às distribuidoras.

Já os estados com os maiores custos de recepção são aqueles que apresentaram um maior déficit produtivo e tiveram a necessidade de importar o etanol de outros estados. Devido ao custo frete de distribuição ser maior do que o custo frete de recepção, muito

devido ao tipo de caminhão utilizado, para fins de minimização de custos de transporte, é mais eficiente que as distribuidoras estejam localizadas mais próximas aos postos revendedores do que às usinas.

Por esse motivo que os estados que apresentaram os maiores custos médios de recepção não foram aqueles que apresentam os maiores custos médios de distribuição. Já em relação aos custos de distribuição, observou-se que aqueles que registraram as maiores distâncias médias foram os que registraram os maiores custos, como os de MS e MT.

Para esses estados, uma estratégia interessante a ser adotada para reduzir os custos de transporte poderia ser a construção de distribuidoras mais próximas aos postos revendedores. Além disso, a vasta extensão territorial desses estados incentiva o uso de soluções intermodais, que podem vir a baratear o custo de transporte entre as usinas e as distribuidoras.

4.1.4. Postos revendedores

A Tabela 13 apresenta os indicadores de custo médio, emissões médias, distância média e preço-sombra, agrupados por estado, para os centroides de consumo considerados. Nela, observa-se que os estados que apresentaram os menores custos médios para o fluxo entre as distribuidoras e os centroides de consumo foram os de DF (R$ 9,49/m³), AM (R$ 10,31/m³), SE (R$ 17,91/m³), RR (R$ 18,89/m³) e AC (R$ 19,33/m³). Por outro lado, os estados que apresentaram os maiores custos médios foram os de AP (R$ 163,88/m³), MG (R$ 49,61/m³), BA (R$ 40,42/m³), MS (R$ 40,17/m³) e TO (R$ 32,91/m³).

Em relação às emissões médias e as distâncias médias, observa-se que os estados que apresentaram os menores índices foram os de DF, AM, SE, RJ e AL, enquanto os de AP, MG, BA, MS e MA apresentaram os maiores índices para ambos os indicadores.

Tabela 13 - Custo médio, emissões médias, distância média e preço-sombra dos centroides de consumo, agrupados por estado.

UF	Custo médio[1]	Emissões Médias[2]	Distância Média[3]	Preço-sombra[4]
SP	22,51	12,97	55,66	225,59
MG	49,61	44,91	192,79	264,42
GO	34,55	29,28	125,70	201,51
PR	27,78	17,55	75,33	205,07
RJ	20,27	9,39	40,31	259,72
MT	34,27	29,94	128,50	134,78
BA	40,42	33,67	144,55	343,38
PE	30,32	17,92	76,93	325,49
DF	9,49	2,33	10,00	199,71
CE	23,20	17,05	73,18	379,19
PB	35,77	25,94	111,36	349,48
AM	10,31	3,53	15,16	276,91
PI	36,31	28,67	123,08	342,30
AL	19,44	10,09	43,33	299,79
RN	29,84	22,79	97,84	351,68
SE	17,91	7,47	32,06	308,03
ES	23,60	14,68	63,02	294,60
MS	40,17	32,97	141,53	167,24
PA	24,58	18,37	78,85	296,78
MA	36,45	32,67	140,26	327,38
RS	32,91	24,77	106,31	272,67
SC	28,90	17,74	76,16	253,13
TO	37,03	27,23	116,90	247,00
RO	27,87	24,08	103,35	165,74
AC	19,33	14,55	62,46	239,78
RR	18,89	16,75	71,89	353,01
AP	163,88	250,36	1,074,72	394,90

[1]Valores em R$/m³
[2]Valores em kgCO2/m³
[3]Valores em km/m³
[3]Valores em R$/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

Analisando o preço-sombra para cada um dos estados, observa-se que as unidades federativas de AP (R$ 394,90/m³), CE (R$ 379,19/m³), RR (R$ 353,01/m³) foram aqueles que apresentaram os maiores valores. Ou seja, para cada m³ de aumento na demanda pelo etanol hidratado nesses estados, haveria um aumento dos custos de transporte do produto a nível Brasil.

A maioria dos estados que apresentaram os maiores valores do preço-sombra são aqueles que dependem do etanol vindo de outros estados. Assim, caso haja um aumento

na sua demanda, haveria a necessidade de aumentar o volume de etanol advindo de outros estados, o que tornaria mais oneroso o processo de transporte devido às maiores distâncias percorridas.

Por outro lado, o aumento na demanda nos estados de MT, RO e MS resultaria em um aumento nos custos de transporte na ordem de 134,78, 165,74 e 167,24 R$/m³, respectivamente. Estes estados são aqueles que apresentaram, no ano de 2019, um superávit produtivo (MS e MT), ou estão localizados muito próximos aos estados com superávit produtivo (RO).

Essa seção dos resultados teve como objetivo apresentar e discutir os resultados dos fluxos no cenário de mínimo custo. A próxima seção traz uma discussão em uma estrutura semelhante, com foco em analisar os resultados do modelo de mínima emissão de CO2.

4.2. Resultados do cenário de mínima emissão de CO2

No cenário de mínima emissão, o valor obtido para a função objetivo do modelo (*W*) foi de 1.130,89 toneladas de CO2, o que representa uma emissão média de aproximadamente 24,73 kg.CO2/m³. Esse montante emitido foi dividido entre os fluxos (i) usinas-distribuidoras via modal rodoviário, (ii) usinas-distribuidoras via soluções intermodais, (iii) usinas-portos via modal rodoviário e (iv) distribuidoras-postos revendedores via modal rodoviário.

Para se obter as emissões supracitadas para *W*, a variável *Z* (custo) foi de R$ 2,621 milhões, o que representa um volume financeiro médio de R$ 57,31/m³. O detalhamento dos custos e emissões por fluxo estão detalhados na Tabela 14Tabela *5*.

Tabela 14 - Detalhamento dos custos e emissões por fluxo no cenário de mínimo custo

Elo de origem	**Elo de destino**	**Modal**	**Volume (mil m³)**	**Custo total (R$ milhões)**	**Emissão total (t.CO2)**	**Distância Média (km)**
Usinas	Distribuidoras	Rodoviário	17.747,02	1.317,62	549,94	336,81
Usinas	Distribuidoras	Intermodal	4.797,04	671,47	188,45	789,70
Usinas	Portos	Rodoviário	637,65	40,72	26,87	458,00
Distribuidoras	Postos Revendedores	Rodoviário	22.544,05	590,96	365,96	69,63
Rede de transporte			45.725,75	2.620,76	1.130,89	254,29

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos resultados do modelo (2021).

A partir dos resultados apresentados por fluxo, observa-se que o transporte entre as usinas e as distribuidoras foi responsável por 48,62% das emissões totais da rede, apresentando um nível médio de emissão de 30,99 kg.CO2/m³. O segundo fluxo mais representativo nas emissões foi aquele entre as distribuidoras e os postos revendedores, que correspondeu a 32,33% das emissões totais e uma emissão média de 16,22 kg.CO2/m³.

Essa grande representatividade do fluxo entre as usinas e as distribuidoras pelo grande volume e pela maior distância média percorrida. De acordo com os resultados obtidos na modelagem, a distância média entre as usinas e as distribuidoras foi de 336,81 km, contra 69,63 km para as rotas entre as distribuidoras e as regiões de consumo.

Já os fluxos entre as usinas e as distribuidoras via as soluções intermodais foi responsável por 16,66% das emissões totais da rede, e apresentou uma emissão média de 39,28 kg.CO2/m³ e uma distância média de 789,70 km. Por fim, o fluxo entre as usinas e os portos exportadores representou 2,37% das emissões totais da rede, com uma distância média de 458,00 km e um fator médio de emissão de 42,14 kg.CO2/m³.

Analisando os custos em cada um dos fluxos, observa-se que o transporte entre as usinas e as distribuidoras via modal rodoviário foi responsável por 50,27% dos custos totais da rede, se configurando como o fluxo mais representativo para esse indicador. O segundo fluxo de maior participação nos custos foi aquele entre as usinas e as distribuidoras via soluções intermodais, com 25,62% de participação, seguido pelo fluxo entre as distribuidoras e os postos revendedores (22,55%) e pelo fluxo entre as usinas e os portos exportadores (1,55%).

Contrapondo as emissões e os custos, observa-se que o fluxo entre as usinas e as distribuidoras via modal rodoviário perde representatividade quando comparados os seus custos totais (63,00%) com as suas emissões totais (55,13%). Em contrapartida, o fluxo entre as distribuidoras e os postos revendedores ganhou representatividade nas emissões (34,52%) em comparação com a sua representatividade de custos (26,65%).

Comparando a representatividade das emissões e dos custos de cada um dos grandes fluxos da rede, observa-se que o fluxo entre as usinas e as distribuidoras via modal rodoviário apresentou participação relativamente próxima nos dois indicadores, com 48,63% das emissões totais e 50,28% nos custos totais. A mesma consideração é válida

para o fluxo entre as usinas e os portos, o qual apresentou uma participação de 2,38% das emissões totais da rede e 1,55% dos custos.

Por outro lado, o fluxo entre as usinas e as distribuidoras por meio das soluções intermodais foi mais representativo em custos (25,62%) em comparação com as emissões (16,66%). De forma semelhante, o fluxo entre as distribuidoras e os postos foi mais representativo nas emissões (32,33%) em comparação com os custos (22,54%).

Comparando o cenário de mínimo custo com o cenário de mínima emissão de CO2, destaca-se o fato de que o primeiro deles faz um menor uso das soluções intermodais em comparação com o segundo. A partir dos resultados da modelagem, observou-se que, no cenário de mínima emissão, o volume movimentado por meio das soluções intermodais foi de 4.797 milhões de m³, contra 2.038 milhões de m³ no cenário de mínimo custo.

Em compensação, o volume movimentado entre as usinas e as distribuidoras via modal rodoviário apresentou redução no cenário de mínima emissão em relação ao cenário de mínimo custo, com 17.474 milhões de m³ movimentados em comparação com 20.506 milhões de m³.

As próximas seções detalham os resultados do cenário de mínima emissão de CO2 para cada um dos elos considerados.

4.2.1. Usinas

A Tabela 15 apresenta os indicadores de custo médio, emissões médias e distância média para os fluxos com origem nas usinas analisadas, agrupados por estado. Nela, pode-se observar que os estados que apresentaram os maiores níveis de emissões médias e distância média foram os de RO (92,93 kg.CO2/m³), TO (61,22 kg.CO2/m³), GO (45,52 kg.CO2/m³), SE (44,08 kg.CO2/m³) e MS (43,93 kg.CO2/m³).

Por outro lado, os estados com os menores índices médios de emissão e distância média foram os de PI (0,92 kg.CO2/m³), PE (6,37 kg.CO2/m³), PB (9,59 kg.CO2/m³), PR (11,00 kg.CO2/m³) e RJ (12,87 kg.CO2/m³).

Já para o indicador de custo médio, observou-se que os estados que apresentaram os maiores níveis de emissão também apresentaram os maiores níveis de custo médio. O

mesmo fenômeno ocorreu para aqueles estados que apresentaram os menores indicadores de emissões e distância média.

Tabela 15 - Indicadores de custo médio, emissões médias e distância média para os fluxos com origem nas usinas

UF	Oferta[1]	Custo Médio[2]	Emissões Médias[3]	Distância Média	Preço-Sombra
SP	10,24	61,85	22,62	245,87	-110,77
MT	1,45	72,57	31,82	345,81	-19,15
MA	0,02	60,90	21,03	228,57	-162,14
MS	2,45	93,38	43,93	477,42	-64,01
GO	4,36	98,24	45,52	494,72	-79,03
PR	1,02	41,74	11,00	119,55	-98,10
MG	2,39	70,07	29,17	317,04	-107,61
SE	0,07	98,05	44,08	479,04	-136,02
RO	0,00	156,12	92,93	1009,98	-50,93
RJ	0,09	41,58	12,87	139,91	-148,73
RS	0,00	47,58	13,17	143,12	-142,18
PE	0,25	29,82	6,37	69,25	-143,69
ES	0,01	55,80	17,47	189,90	-157,14
PB	0,23	38,51	9,59	104,27	-144,32
BA	0,15	66,06	27,62	300,17	-141,70
RN	0,02	47,05	12,91	140,33	-163,40
AL	0,28	51,27	16,53	179,66	-128,51
PA	0,02	87,35	35,84	389,50	-145,28
TO	0,08	115,51	61,22	665,35	-99,96
AM	0,01	59,40	21,35	232,02	-166,62
PI	0,03	9,49	0,92	10,00	-187,18

[1]Valores em milhões de m³
[2]Valores em R$/m³
[3]Valores em kgCO2/m³
[4]Valores em km/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

Em relação ao preço-sombra por estado, observa-se que as unidades federativas com os menores valores foram as de PI (-187,18), AM (-166,62) e RN (-163,40). Tomando o estado de PI como exemplo, o aumento na oferta em 1 m³ resultaria em uma redução de 187,18 g/CO2 no valor da função objetivo, caso a demanda pelo produto se mantenha constante.

Esses estados apresentaram os menores valores, ou seja, seriam aqueles mais indicados para investimentos em capacidade produtiva, no intuito de minimizar os impactos ambientais com a etapa de transporte do etanol hidratado no país.

Já os estados com os maiores valores do preço-sombra foram os de MT (-19,15), RO (-50,93) e MS (-64,01). Principalmente em relação aos estados de MT e MS, os quais

apresentaram elevados níveis de oferta em relação aos demais estados, o aumento na oferta do etanol resultaria em uma menor redução das emissões em comparação com as demais unidades federativas.

Na intenção de mitigar essas emissões, uma alternativa poderia ser o investimento em soluções intermodais. O cenário de mínima emissão de CO2 apresentou um maior uso das instalações intermodais em relação ao cenário de mínimo custo.

A Tabela 16 apresenta os indicadores de volume, custo médio, emissão média e distância média para os fluxos entre as usinas e os terminais de entrada intermodal considerados. Nela, observa-se que 7 estados fizeram o uso de soluções intermodais para o escoamento da sua produção, em comparação com 6 estados no cenário de mínimo custo.

Em termos de volume, os estados mais representativos no uso de soluções intermodais foram os de SP (2,4 milhões de m³), GO (0,62 milhões de m³), MS (0,59 milhões de m³), MG (0,53 milhões de m³), PR (0,51 milhões de m³) e MT (0,15 milhões de m³). Em termos percentuais de produção, os estados que maior alocaram a sua oferta em soluções intermodais foram os de PR (50,01%), MS (23,96%), SP (23,45%), MG (22,16%), GO (14,12%) e MT (10,43%).

Tabela 16 - Indicadores de volume, custo médio, emissões médias e distância média para os fluxos com origem nas usinas e destino aos terminais de entrada intermodais

UF	Volume[1]	% da Produção	Custo Médio[2]	Emissões Médias[3]	Distância Média
SP	2,40	23,45%	65,09	20,51	222,86
GO	0,62	14,12%	136,43	65,88	770,03
MS	0,59	23,96%	46,45	12,73	0,00
MG	0,53	22,16%	11,12	1,09	138,39
PR	0,51	50,01%	37,49	7,57	715,92
MT	0,15	10,43%	146,85	70,85	82,22
MA	0,00	0,00%	0,00	0,00	11,80
SE	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
RO	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
RJ	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
RS	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
PE	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
ES	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
BA	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
RN	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
AL	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
PA	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
TO	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
AM	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00
PI	0,00	0,00%	0,00	0,00	0,00

[1]Valores em mil de m³
[2]Valores em R$/m³
[3]Valores em kgCO2/m³
[4]Valores em km/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

4.2.2. Soluções intermodais

A Tabela 17 apresenta o volume (m³), o custo médio (em R$/m³) e as emissões médias (em kg.CO2/m³) para as rotas com origem nas usinas e com destino às instalações intermodais. Nela, observa-se que o volume mais representativo foi aquele com origem na usina localizada em Planalto (SP) com destino à rota Paulínia (SP) – Guarulhos (SP) via modal dutoviário, com 812.838 m³ movimentados, um custo médio de R$ 100,63/m³ e uma emissão média de 37,55 kg.CO2/m³.

A segunda rota mais representativa foi aquela entre a usina de Uberaba (MG) com destino à rota entre Uberaba (MG) – Duque de Caxias (RJ) via modal dutoviário, com 526.319 m³ movimentados, um custo médio de R$ 10,63/m³ e 0,92 kg.CO2/m³. A terceira rota de maior relevância, em termos de volume, foi aquela entre a usina localizada em

Guaíra (SP) com destino a rota dutoviária entre Ribeirão Preto (SP) e Guarulhos (SP), com 513.384 m³ transportados, um custo médio de R$ 52,25/m³ e uma emissão média de 12,73 kg.CO2/m³.

Tabela 17 - Volume, custo médio e emissões das rotas com destino às instalações intermodais para o cenário de mínima emissão

(Continua)

Usina	Rota	Modo	Volume[1]	Custo Médio[2]	Emissão Média[3]
Planalto (SP)	Paulínia (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	812.838	100,63	37,55
Uberaba (MG)	Uberaba (MG)-Duque de Caxias (RJ)	Dutoviário	526.319	10,63	0,92
Guaira (SP)	Ribeirão Preto (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	513.384	52,25	12,73
Paraiso Das Águas (MS)	Chapadão do Sul (MS)-Guarulhos (SP)	Ferroviário e Dutoviário	440.668	29,37	4,92
Chapadão Do Céu (GO)	Paulínia (SP)-Salvador (BA)	Dutoviário e Cabotagem	325.542	155,95	77,37
Pontal (SP)	Ribeirão Preto (SP)-Duque de Caxias (RJ)	Dutoviário	271.410	24,52	3,65
Novo Horizonte (SP)	Paulínia (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	223.648	83,88	27,81
Pontal (SP)	Ribeirão Preto (SP)-Volta Redonda (RJ)	Dutoviário	199.403	24,52	3,65
Santo Inacio (PR)	Londrina (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	153.332	46,95	10,67
Chapadao Do Ceu (GO)	Paulínia (SP)-Fortaleza (CE)	Dutoviário e Cabotagem	148.351	155,95	77,37
Jussara (PR)	Sarandi (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	122.104	35,15	6,62
Colina (SP)	Ribeirão Preto (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	103.367	43,99	9,58
Angelica (MS)	Maringá (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	103.322	87,83	30,00
Batatais (SP)	Ribeirão Preto (SP)-Duque de Caxias (RJ)	Dutoviário	93.970	25,47	3,89
Sao Carlos Do Ivai (PR)	Sarandi (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	87.609	36,06	6,90
Lucas Do Rio Verde (MT)	Rondonópolis (MT)-Guarulhos (SP)	Ferroviário e Dutoviário	85.000	120,37	50,46
Pirassununga (SP)	Paulínia (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	84.981	45,25	10,04
Chapadao Do Ceu (GO)	Chapadão do Sul (MS)-Guarulhos (SP)	Ferroviário e Dutoviário	81.970	27,16	4,32
Campo Novo Do Parecis (MT)	Porto Velho (RO)-Manaus (AM)	Dutoviário e Cabotagem	66.094	180,90	97,08
Sao Carlos Do Ivai (PR)	Maringá (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	66.071	34,08	6,29
Patrocinio Paulista (SP)	Ribeirão Preto (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	51.683	43,81	9,52
Florestopolis (PR)	Londrina (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	44.477	34,74	6,49
Aparecida Do Taboado (MS)	Paulínia (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	44.067	120,26	50,39
Chapadao Do Ceu (GO)	São José do Rio Preto (SP)-Paulínia (SP)	Ferroviário	35.167	114,75	46,64
Barra Bonita (SP)	Santos (SP)-São Luís (MA)	Cabotagem	26.100	95,30	34,32
Chapadao Do Ceu (GO)	Paulínia (SP)-Belém (PA)	Dutoviário e Cabotagem	24.041	155,95	77,37

(Continuação)

Usina	Rota	Modo	Volume[1]	Custo Médio[2]	Emissão Média[3]
Maringa (PR)	Sarandi (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	23.000	8,79	0,67
Monte Aprazivel (SP)	Paulínia (SP)-Duque de Caxias (RJ)	Dutoviário	19.035	95,36	34,36
Jussara (PR)	Sarandi (PR)-Triunfo (RS)	Ferroviário	12.985	35,15	6,62
Ariranha (SP)	Pradópolis (SP)-Paulínia (SP)	Ferroviário	2.986	40,22	8,27
Santa Vitoria (MG)	Uberlândia (MG)-Paulínia (SP)	Ferroviário	2.850	67,13	19,25
Santa Vitoria (MG)	Uberaba (MG)-Duque de Caxias (RJ)	Dutoviário	1.265	86,24	29,11

[1]Valores em mil de m³
[2]Valores em R$/m³
[3]Valores em kgCO2/m³
[4]Valores em km/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

A partir da Tabela 17, observa-se que, no cenário de mínima emissão de CO2, o modal dutoviário foi aquele que, dentre as soluções intermodais, captou o maior volume, com 2.945 mil m³ (61,40%), seguido pelo modal ferroviário, com 654 mil m³ (13,63%), pela combinação entre o modal ferroviário e dutoviário, com 607 mil m³ (12,67%), pela combinação entre o modal dutoviário e a cabotagem, com 564 mil m³, e, por fim, pela cabotagem, com 26 mil m³ (0,54%).

A Tabela 18 apresenta o volume, custo médio e emissões médias para as rotas intermodais com destino às distribuidoras. Nela, observa-se que a distribuidora que foi mais atendida pelas instalações intermodais foi a de Duque de Caxias (RJ), recebendo 911.998 m³ de etanol hidratado, seguida pela distribuidora de São Paulo (SP), com 814.673 m³ recebidos, e pela distribuidora de São Caetano do Sul (SP), com 629.055 m³ recebidos.

Tabela 18 - Volume, custo médio e emissões das rotas intermodais com destino às distribuidoras

(Continua)

Rota multimodal	Modo	Distribuidora	Volume[1]	Custo Médio[2]	Emissões Médias[3]
Ribeirão Preto (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	São Paulo (SP)	562.017	51,19	3,00
Paulínia (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	Guarulhos (SP)	540.353	25,62	1,40
Uberaba (MG)-Duque de Caxias (RJ)	Dutoviário	Duque de Caxias (RJ)	527.584	74,81	3,98
Chapadão do Sul (MS)-Guarulhos (SP)	Ferroviário e Dutoviário	São Caetano do Sul (SP)	522.638	113,34	50,16
Ribeirão Preto (SP)-Duque de Caxias (RJ)	Dutoviário	Duque de Caxias (RJ)	365.379	65,82	3,39
Paulínia (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	Cubatão (SP)	265.337	49,99	7,98
Paulínia (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	São Paulo (SP)	252.656	30,42	2,28
Paulínia (SP)-Salvador (BA)	Dutoviário e Cabotagem	Candeias (BA)	232.322	146,87	16,98
Sarandi (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	Araucária (PR)	198.741	63,59	26,52
Londrina (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	Araucária (PR)	197.496	61,29	26,34
Maringá (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	Araucária (PR)	138.299	64,11	26,72
Ribeirão Preto (SP)-Volta Redonda (RJ)	Dutoviário	Barra Mansa (RJ)	137.280	61,73	3,11
Paulínia (SP)-Fortaleza (CE)	Dutoviário e Cabotagem	Fortaleza (CE)	133.983	171,41	25,73
Paulínia (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	São José dos Campos (SP)	107.187	49,03	7,63
Ribeirão Preto (SP)-Guarulhos (SP)	Dutoviário	São Caetano do Sul (SP)	106.417	53,80	3,58
Rondonópolis (MT)-Guarulhos (SP)	Ferroviário e Dutoviário	São José dos Campos (SP)	85.000	156,67	60,48
Porto Velho (RO)-Manaus (AM)	Hidroviário	Manaus (AM)	66.094	68,66	58,16
Ribeirão Preto (SP)-Volta Redonda (RJ)	Dutoviário	Volta Redonda (RJ)	62.123	61,35	3,05
Paulínia (SP)-Salvador (BA)	Dutoviário e Cabotagem	Feira de Santana (BA)	48.563	163,86	23,10
Paulínia (SP)-Salvador (BA)	Dutoviário e Cabotagem	São Francisco do Conde (BA)	44.008	156,20	20,09
São José do Rio Preto (SP)-Paulínia (SP)	Ferroviário	Paulínia (SP)	35.167	56,92	22,01
Sarandi (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	Itajaí (SC)	33.972	115,48	45,62
Santos (SP)-São Luís (MA)	Cabotagem	São Luís (MA)	26.100	151,23	33,58
Paulínia (SP)-Belém (PA)	Dutoviário e Cabotagem	Belém (PA)	24.041	196,98	35,66
Maringá (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	Guaramirim (SC)	23.386	105,33	40,41
Paulínia (SP)-Duque de Caxias (RJ)	Dutoviário	Duque de Caxias (RJ)	19.035	45,06	2,67
Paulínia (SP)-Fortaleza (CE)	Dutoviário e Cabotagem	Maracanaú (CE)	14.369	178,47	27,11
Sarandi (PR)-Triunfo (RS)	Ferroviário	Canoas (RS)	12.985	122,04	67,02
Maringá (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	Içara (SC)	5.759	153,49	69,78
Pradópolis (SP)-Paulínia (SP)	Ferroviário	Paulínia (SP)	2.986	45,79	15,42
Uberlândia (MG)-Paulínia (SP)	Ferroviário	Paulínia (SP)	2.850	69,02	30,69

(Continuação)

Rota multimodal	Modo	Distribuidora	Volume[1]	Custo Médio[2]	Emissões Médias[3]
Maringá (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	Jaraguá do Sul (SC)	1.948	106,59	41,02
Paulínia (SP)-Salvador (BA)	Dutoviário e Cabotagem	Jequié (BA)	648	206,21	46,15
Londrina (PR)-Araucária (PR)	Ferroviário	Brusque (SC)	312	117,76	47,97

[1]Valores em mil m³
[2]Valores em R$/m³
[3]Valores em kgCO2/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

Dentre as distribuidoras atendidas pelas instalações intermodais, observou-se que aquelas localizadas no estado de SP foram as mais representativas, captando 51,75% de todo o volume transportado via instalações intermodais. Em segundo lugar em termos de representatividade está o estado de RJ, com 23,17%, e em terceiro lugar o estado de PR, com 11,14%.

Diferente do observado no cenário de mínimo custo, o cenário de mínima emissão de CO2 direcionou os volumes com destino às distribuidoras mais próximas aos grandes centros consumidores, como São Paulo (SP) e Duque de Caxias (RJ). No cenário de mínimo custo, a estratégia adotada foi o direcionamento de carga com destino às maiores distribuidoras, como Paulínia (SP) e Uberaba (MG).

Essa mudança ocorre devido ao fator de emissão das rotas entre as distribuidoras e os postos revendedores aumentar em relação ao transporte rodoviário entre as usinas e as distribuidoras. Quando comparados os fatores de emissão das rotas rodoviárias entre as usinas e as distribuidoras e as distribuidoras e os postos revendedores, observa-se um aumento de 153,17%, com o fator de emissão passando de 0,0726 kg.CO2/m³.km para 0,1838 kg.CO2/m³.km.

Já no cenário de mínimo custo, o custo de transporte foi estimado em função da distância a partir de coeficiente fixos, como demonstrado nas Equações 15 e 16. Portanto, esse aumento no coeficiente leva o modelo a buscar as soluções mais próximas aos grandes centros, na intenção de reduzir ao máximo a distância percorrida.

4.2.3. Distribuidoras

A Tabela 19 apresenta a capacidade dinâmica anual de distribuição, o volume captado e o percentual utilizado da capacidade de cada estado no cenário de mínima emissão de CO2, considerando as respectivas somas das unidades distribuidoras consideradas.

Nela, observa-se que o estado de São Paulo (SP) foi aquele que captou o maior volume (12.133 mil m³), seguido por MG (2.193 mil m³) e PR (1.592 mil m³). Já os estados que captaram os menores volumes foram os de RR (1,66 mil m³), AC (7,91 mil m³) e RS (50,96 mil m³).

Em relação à capacidade utilizada, os principais destaques foram os estados de DF e PB, que utilizaram 100% das suas respectivas capacidades de distribuição. Diferente do cenário de mínimo custo, onde as distribuidoras de SE e AL operaram com 100% de sua capacidade dinâmica, o cenário de mínima emissão apresentou uma maior diluição de volume entre os estados.

Tabela 19 - Capacidades e volumes captados por estado

UF	Capacidade de distribuição[1]	Volume Captado[2]	Capacidade utilizada	Preço-Sombra[3]
SP	22.769,80	12.133,24	53,29%	-5,70
MG	3.595,29	2.193,86	61,02%	-12,84
PR	4.034,95	1.592,14	39,46%	-6,65
MT	2.446,80	1.199,79	49,03%	-15,33
GO	2.133,26	1.307,56	61,29%	-2,90
RJ	7.060,89	1.163,04	16,47%	-0,78
DF	555,15	555,15	100,00%	-2,86
BA	2.948,90	571,87	19,39%	-5,06
PE	748,03	382,31	51,11%	-0,90
MS	2.112,74	205,66	9,73%	-2,66
CE	440,83	177,73	40,32%	0,00
AL	124,32	91,49	73,60%	0,00
AM	458,88	101,59	22,14%	0,00
SE	98,74	70,19	71,09%	-0,44
RN	1.477,36	104,17	7,05%	0,00
PB	87,20	87,20	100,00%	-30,91
MA	350,01	71,81	20,52%	0,00
RO	478,00	79,08	16,54%	-9,67
SC	474,21	105,34	22,21%	-0,77
ES	171,84	114,64	66,71%	0,00
PI	106,08	58,13	54,79%	-4,33
PA	248,85	61,47	24,70%	0,00
TO	399,16	56,06	14,04%	-15,58
RS	760,29	50,96	6,70%	0,00
AC	18,24	7,91	43,36%	0,00
RR	33,62	1,66	4,95%	0,00

[1]Valores em mil m³
[2]Valores R$/m³
[3]Valores em kg.CO2/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

A Tabela 20 - Indicadores de custo médio, emissões médias e distância média de recepção por estado. Em relação ao nível de emissão de CO2, os estados de RJ, PB e AL apresentaram os menores valores médios por m³, na ordem de 3,74, 5,91 e 6,57 kg.CO2/m³, enquanto os estados com os maiores valores emitidos foram os de AC (114,74), AM (89,44) e RS (89,01).

Já em relação ao custo médio, os estados que apresentaram os menores indicadores foram os de PB (R$ 29,10/m³), AL (R$ 30,56/m³) e PE (R$ 34,79/m³), enquanto os estados com maiores custos médios foram os de AC (R$ 184,49/m³), PA (R$ 175,15/m³) e CE (R$ 150,97/m³).

Tabela 20 - Indicadores de custo médio, emissões médias e distância média de recepção por estado.

UF	Custo Médio	Emissões Médias	Distância Média
SP	73,22	29,15	316,77
MG	96,71	44,65	485,24
PR	63,71	23,84	259,06
MT	52,90	19,59	212,90
GO	58,71	19,72	214,36
RJ	67,07	3,74	40,66
DF	66,93	23,21	252,27
BA	119,03	24,69	268,36
PE	34,79	8,25	89,71
MS	67,47	23,78	258,48
CE	160,79	29,54	320,98
AL	30,56	6,57	71,43
AM	123,71	89,44	971,99
SE	51,94	15,26	165,82
RN	49,40	14,03	152,47
PB	29,10	5,91	64,21
MA	132,50	53,41	580,49
RO	94,19	42,15	458,13
SC	119,50	53,60	582,51
ES	76,97	29,55	321,15
PI	64,54	33,21	360,93
PA	175,15	71,78	780,13
TO	74,45	29,06	315,81
RS	150,97	89,01	967,36
AC	184,49	114,74	1.246,97
RR	118,22	59,10	642,26

[1]Valores em R$/m³
[2]Valores em kgCO2/m³
[2]Valores em km/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

A Tabela 21 apresenta os indicadores de custo médio, emissões médias e distância média de distribuição, agrupados por estado. Nela, observa-se que os estados com os menores índices de emissão foram os de AM (2,70 kg.CO2/m³), PB (3,90 kg.CO2/m³) e RR (4,89 kg.CO2/m³), enquanto os estados com os maiores níveis médios de emissão foram os de RO (66,35 kg.CO2/m³), TO (46,36 kg.CO2/m³) e ES (42,96 kg.CO2/m³).

Em relação ao custo médio de distribuição, em R$/m³, pode-se destacar os estados de AM (9,80), RR (12,64) e PB (12,98) como aqueles que apresentaram os menores valores, enquanto os estados de RO (68,74), TO (52,50) e MS (49,25) apresentaram os maiores valores.

Tabela 21 - Indicadores de custo médio, emissões médias e distância média de distribuição por estado.

UF	Custo Médio[1]	Emissões Médias[2]	Distância Média[3]
SP	22,11	11,89	129,19
MG	33,70	23,00	249,95
PR	23,05	11,98	130,19
MT	40,54	35,98	391,05
GO	27,04	17,58	191,02
RJ	30,91	19,60	213,05
DF	25,92	16,23	176,36
BA	31,21	20,29	220,47
PE	32,03	18,76	203,87
MS	49,25	40,24	437,37
CE	21,78	13,09	142,25
AL	27,49	17,89	194,42
AM	9,80	2,70	29,30
SE	27,89	17,30	187,97
RN	26,23	16,03	174,17
PB	12,98	3,90	42,43
MA	30,13	19,39	210,70
RO	68,74	66,35	721,12
SC	31,16	18,52	201,27
ES	48,85	42,96	466,87
PI	28,61	18,98	206,25
PA	25,44	18,19	197,74
TO	52,50	46,36	503,78
RS	29,51	19,05	207,04
AC	17,67	10,97	119,24
RR	12,64	4,89	53,09

[1]Valores em R$/m³
[2]Valores em kgCO2/m³
[2]Valores em km/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

Analisando os indicadores de recepção e distribuição do etanol hidratado, pode-se observar que o cenário de mínima emissão de CO2 optou por selecionar distribuidoras que estão mais próximas aos centros consumidores, uma vez que o nível de emissão pelos caminhões do tipo truck (utilizados no transporte entre as distribuidoras e os postos revendedores) foi maior em comparação com os caminhões do tipo bitrem (utilizados no transporte entre as usinas e as distribuidoras).

No cenário de mínimo custo, a distância média percorrida entre as distribuidoras e os postos revendedores foi de 224,93 km, enquanto no cenário de mínima emissão a distância média para o mesmo fluxo foi de 176,26 km.

Dessa forma, entende-se que, a fim de minimizar as emissões de CO2 na etapa de transporte do etanol entre as distribuidoras e os postos revendedores, a melhor estratégia para as distribuidoras seria abastecer os postos mais próximos. No modelo adotado, a melhor estratégia foi a de diluir mais os volumes entre as unidades distribuidoras, eventualmente escolhendo rotas mais longas entre as usinas e as distribuidoras em relação ao modelo de mínimo custo, para, na sequência, selecionar as rotas mais curtas de distribuição.

4.2.4. Postos revendedores

A Tabela 22 apresenta os indicadores de custo médio, emissões médias, distância média e preço-sombra, agrupados por estado, para os centroides de consumo considerados. Nela, observa-se que os estados que apresentaram os menores níveis médios de emissão foram os de DF (g.CO2 2,33/m³), AM (g.CO2 2,89/m³) e RR (g.CO2 4,89/m³), enquanto os estados com maiores níveis médios foram os de AP (g.CO2 130,98/m³), MG (g.CO2 32,80/m³) e MS (g.CO2 31,59/m³).

Em relação ao indicador de custo médio, os estados com os menores níveis foram os de DF, AM e RR, enquanto os que apresentaram os maiores níveis foram os de AP, MG e MS, semelhante aos indicadores de mínima emissão.

Tabela 22 - Custo médio, emissões médias, distância média e preço-sombra dos centroides de consumo, agrupados por estado.

UF	Custo médio[1]	Emissões Médias[2]	Distância Média[3]	Preço-sombra
SP	20,68	10,51	45,11	152,02
MG	42,92	32,80	140,79	184,91
GO	30,56	21,28	91,36	129,25
PR	26,14	14,99	64,35	135,79
RJ	20,22	9,34	40,09	158,62
MT	32,49	26,59	114,15	80,99
BA	34,27	23,51	100,93	195,17
PE	28,64	15,71	67,44	166,19
DF	9,49	2,33	10,00	124,74
CE	19,09	10,74	46,11	183,15
PB	33,55	22,66	97,27	189,12
AM	9,99	2,88	12,35	181,00
PI	34,08	23,92	102,70	212,47
AL	19,44	10,09	43,33	142,61
RN	23,81	14,02	60,19	178,64
SE	18,22	7,59	32,58	148,37
ES	22,47	12,92	55,48	186,92
MS	39,19	31,59	135,60	112,88
PA	23,41	16,18	69,45	184,34
MA	28,31	19,40	83,28	198,72
RS	30,02	19,40	83,27	187,39
SC	27,52	15,61	66,99	167,61
TO	33,94	22,63	97,16	152,10
RO	23,85	16,84	72,31	99,95
AC	17,64	10,95	46,99	154,74
RR	12,64	4,89	20,97	230,60
AP	108,92	130,98	562,28	312,10

[1]Valores em R$/m³
[2]Valores em kg.CO2/m³
[3]Valores em km/m³
[3]Valores em R$/m³

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

Analisando o preço-sombra dos estados, observa-se que aqueles que apresentaram os maiores níveis foram os de AP (312,10 kg.CO2/m³), RR (230,60 kg.CO2/m³) e PI (212,47 kg.CO2/m³). Isso indica que o aumento na demanda em 1 m³ no estado de AP, por exemplo, resultaria em um aumento de 170,38 kg.CO2 nas emissões totais do país.

Já os estados com os menores valores de preço-sombra foram os de MT, RO, MS, DF e GO. Neles, o aumento na demanda em 1 m³ de etanol resultaria em um aumento das emissões de CO2 a nível Brasil na ordem de 80,99 m³ para o estado de MT, 99,95 para o

estado de RO, 112,88 para o estado de MS, 124,74 para DF e 129,25 para o estado de GO.

A partir da análise dos indicadores, pode-se observar que os estados que apresentaram os maiores níveis de custo médio, emissões médias e distância média foram aqueles que estavam localizados ou distantes das bases de distribuição, ou distantes dos polos produtores. Caso haja um aumento na demanda por etanol nesses estados, as estratégias possíveis para mitigar os níveis de emissão e custo seriam a construção de infraestrutura de transporte intermodais e/ou o investimento em capacidade de produção de etanol em regiões mais próximas.

Ao analisar o preço-sombra, observou-se que os estados do Centro-Oeste apresentaram os menores valores, ou seja, traria um menor impacto nas emissões a nível nacional. Estes estados apresentaram, no ano de 2019, um dos maiores níveis de produção de etanol dentre os estados produtores, e uma baixa demanda em relação aos estados de São Paulo e Minas Gerais. Com esse superávit, é possível que haja um aumento na demanda pelo etanol nesses estados do Centro-Oeste sem elevar níveis de custo e emissão de CO2.

A próxima seção-tem como objetivo comparar as estratégias adotados nos cenários de mínimo custo e de mínima emissão de CO2 pelo modelo e apresentar a curva de pareto entre os dois cenários, como proposto por Kim, Janic e Wee (2008). Essa curva de pareto pode ser utilizada para se analisar as relações de troca entre a escolha do cenário ótimo que minimiza os custos e as emissões.

4.3. Comparativo entre os cenários de mínimo custo e mínima emissão

Ao analisar os fluxos de forma isolada, pode-se observar que, nos dois modelos considerados, as estratégias ótimas de alocação de fluxo foram distintas. No modelo de mínimo custo, os custos totais de transporte totalizaram R$ 2,449 bilhões, enquanto no modelo de mínima emissão eles foram na ordem de R$ 2,621 bilhões, o que representa um aumento de 7,0%, ou de R$ 171,8 milhões.

Por outro lado, o modelo de mínimo custo gerou uma emissão de CO2 na etapa do transporte do etanol hidratado de 1,243 mil toneladas, enquanto o modelo de mínima emissão gerou uma emissão total de 1,130 mil toneladas, o que representa uma redução de 112,72 toneladas (-9,1%).

A partir dos resultados das funções objetivos, observa-se que existe uma relação de troca entre as estratégias de minimizar os custos e minimizar as emissões de CO2. Isso acontece, principalmente, devido à dinâmica da movimentação do etanol das usinas para as unidades distribuidoras.

No modelo de mínimo custo, o volume de etanol hidratado movimentado com destino às distribuidoras via modal rodoviário foi de 20,5 mil m³, contra 2,0 mil m³ transportados via soluções intermodais. A partir desses números, observa-se que a melhor estratégia para minimizar os custos foi de movimentar, entre estes elos, 91% do volume de etanol produzido via modal rodoviário, e os 9% restantes via soluções intermodais.

No modelo de mínima emissão, observou-se uma maior taxa de utilização das instalações intermodais em comparação com o modelo de mínimo custo. No primeiro, foram movimentados 78,7% (17,7 mil m³) para as distribuidoras via modal rodoviário, e 21,3% (4,8 mil m³) via soluções intermodais.

Quando comparados os custos entre as usinas e as distribuidoras, observa-se que, no modelo de mínimo custo, R$ 1,753 bilhões foram gastos com o transporte do etanol a partir das usinas, enquanto no modelo de mínima emissão esse valor foi de R$ 1,989 bilhões. Nos dois modelos, a etapa de transporte entre estes dois elos foi a mais custosa, representando 71,6% dos custos totais da rede no modelo de mínimo custo e 75,9% no modelo de mínima emissão.

Além dos maiores custos, o escoamento do etanol a partir das usinas também representou, nos dois modelos, a maior parte das emissões de CO2. No modelo de mínimo custo, o total de gás carbônico emitido foi de 737,8 toneladas (59,3% das emissões totais da rede), enquanto no modelo de mínima emissão esse valor foi de 738,8 toneladas (65,3% das emissões totais da rede).

A estratégia de abastecimento das distribuidoras nos dois modelos foi semelhante: percorrer maiores distâncias no fluxo entre as usinas e as distribuidoras para, posteriormente, percorrer menores distâncias no fluxo entre as distribuidoras e os postos revendedores.

Quando analisadas as distâncias médias dos dois modelos, observa-se que o modelo de mínimo custo apresentou maior distância média (413,6 km) em comparação com o

modelo de mínima emissão de CO2 (433,1 km). Isso ocorreu devido ao modelo de mínima emissão de CO2 fazer um maior uso das instalações intermodais para levar o etanol hidratado das usinas para as distribuidoras mais distantes em comparação com o modelo de mínimo custo.

Quando analisadas as distâncias médias de distribuição, observou-se que cada m³ do modelo de mínima emissão percorreu cerca de 69,52 km, enquanto no modelo de mínimo custo esse valor foi de 88,84 km.

Dessa forma, observa-se que existem estratégias diferentes com base nos objetivos de cada um dos modelos. O modelo de mínimo custo, aos preços estabelecidos, acaba buscando um maior uso das soluções exclusivamente rodoviárias em detrimentos das instalações intermodais devido ao custo, principalmente, do frete ponta (custo do transporte da origem para o terminal de entrada intermodal). Para usinas localizadas a uma certa distância dos terminais de entrada intermodais, a solução mais viável em termos de custo seria a de realizar o transporte exclusivamente pelo modal rodoviário.

Já o modelo de mínima emissão faz um maior uso de soluções intermodais devido às suas menores taxas de emissão em comparação com o modal rodoviário. Assim, a melhor estratégia adotada seria a de abastecer distribuidoras mais distantes e mais próximas aos postos revendedores.

Dadas as estratégias divergentes, a próxima seção apresenta os resultados dos pontos de Pareto (DEB, 2014) considerando o modelo de mínimo custo com uma restrição de emissão de CO2, e considerando o modelo de mínimo custo com uma restrição orçamentária. A partir dos pontos, pode-se mensurar quais seriam os níveis ideais de precificação do carbono para que os decisores optassem por consideram as soluções do cenário de mínima emissão em detrimento do cenário de mínimo custo.

4.3.1. Análise das Curvas de Pareto

O cálculo da Curva de Pareto permite analisar as relações de troca entre os modelos considerados (mínimo custo e mínima emissão de CO2). Com ela, foi possível adicionar como restrição a função objetivo do modelo oposto, relaxando o seu lado direto de acordo com a escala pré-estabelecida, com base no trabalho de Kim, Janic e Wee (2008). De acordo com a metodologia utilizada, a taxa de relaxamento das restrições foi de 0,66%.

A Figura 9 ilustra o comportamento da Curva de Pareto para o modelo de mínima emissão, adicionando a restrição de custos de transporte. Nela, observa-se a redução das emissões de CO2 com o relaxamento da restrição de custos. Analisando a distribuição dos pares de custo e emissões, observa-se que o aumento dos custos em 0,66%, passando de R$ 2,448 bilhões para R$ 2,465 bilhões (aumento de R$ 16,273 milhões) possibilitou uma redução de CO2 na ordem de 6,17%, passando de 1,244 mil toneladas de CO2 emitidas para 1,167 mil toneladas (redução de 76,759 toneladas).

O segundo ponto apresentou uma redução de 1,343% nas emissões de CO2 em relação ao valor obtido no primeiro ponto, enquanto o terceiro ponto apresentou uma redução de 0,592% em relação ao segundo. A redução em relação ao cenário de mínimo custo ocorreu até o aumento de 6,820% nos custos, quando as emissões foram reduzidas em 9,064%. O resumo dos valores ilustrados na Figura 9 são apresentados na Tabela 23.

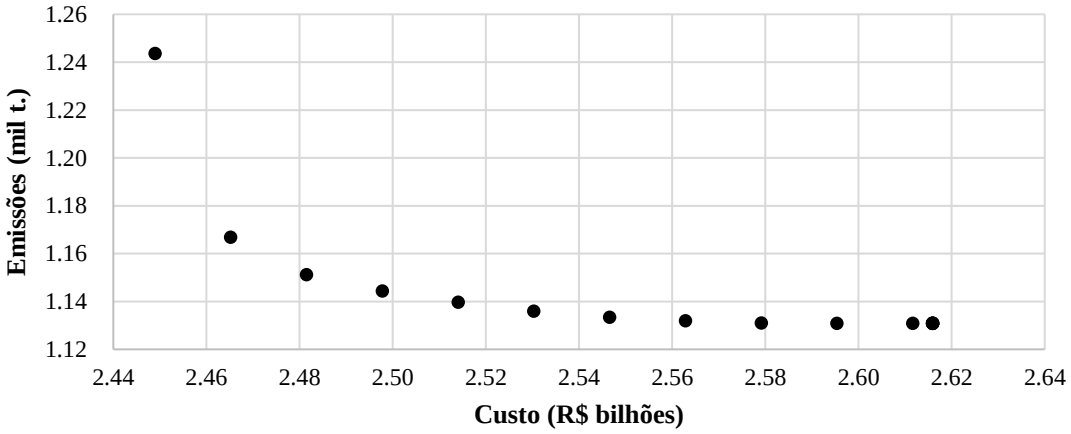


Figura 9 – Curva de Pareto para o modelo de mínima emissão.

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

Tabela 23 - Valores da Curva de Pareto do modelo de mínima emissão

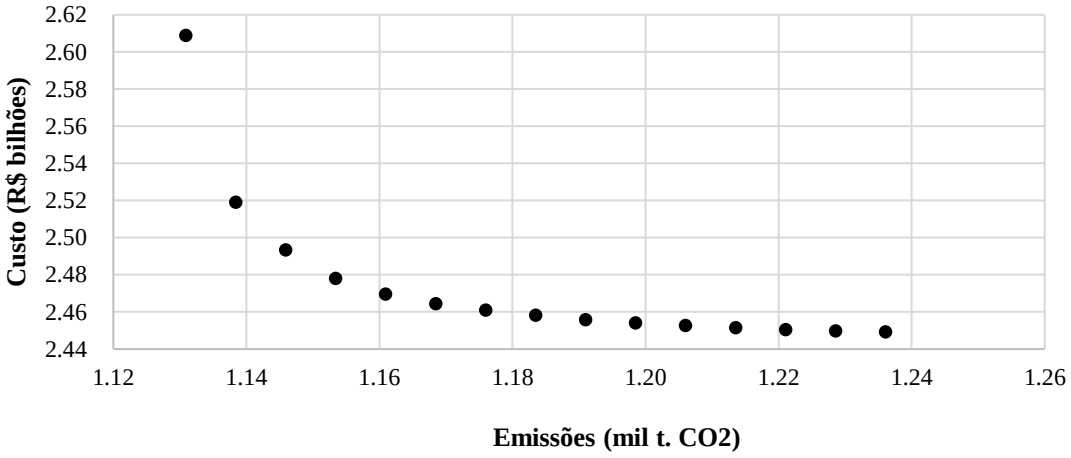
Taxa de Aumento	Custo[1]	Aumento dos Custos[2]	Emissões[3]	Redução das Emissões[4]
0%	2,45	0,00	1,24	0,00
0,66%	2,47	16.273,27	1,17	-76.759,40
1,33%	2,48	32.546,54	1,15	-92.428,63
1,99%	2,50	48.819,81	1,14	-99.246,02
2,66%	2,51	65.093,08	1,14	-103.986,40
3,32%	2,53	81.368,80	1,14	-107.609,27
3,99%	2,55	97.642,07	1,13	-110.177,86
4,65%	2,56	113.915,34	1,13	-111.691,32
5,32%	2,58	130.188,61	1,13	-112.589,47
5,98%	2,60	146.461,88	1,13	-112.723,01
6,65%	2,61	162.735,15	1,13	-112.723,01
7,31%	2,62	167.013,15	1,13	-112.723,01
7,97%	2,62	167.013,15	1,13	-112.723,01
8,64%	2,62	167.013,15	1,13	-112.723,01
9,30%	2,62	167.013,15	1,13	-112.723,01
9,97%	2,62	167.013,15	1,13	-112.723,01

[1]Valores em bilhões de R$
[2]Valores em milhões de R$
[3]Valores em bilhões de kg.CO2
[4]Valores em milhões de kg.CO2

Analisando a Tabela 23, é possível observar que a redução marginal das emissões de CO2 é decrescente à medida que o relaxamento dos custos aumenta de forma linear.

A Figura *10* ilustra o comportamento da Curva de Pareto para o modelo de mínimo custo com restrição de emissão de CO2. Nela, pode-se observar que o relaxamento da quantidade de emissões em 7,514 toneladas, do primeiro ponto para o segundo, levou a uma redução de R$ 89,914 milhões em custos (-3,446%). O aumento seguinte levou a uma redução de R$ 25,527 milhões em custos (-0,978% em relação ao segundo ponto), e assim sucessivamente até o último aumento, quando a redução de custos foi de 0%.

Figura 10 – Curva de Pareto para o modelo de mínimo custo.



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

Tabela 24 - Valores da Curva de Pareto do modelo de mínimo custo

Taxa de Aumento	Emissões[1]	Aumento das Emissões[2]	Custo[3]	Redução dos Custos[3]
0%	1,13	0,00	2,61	0,00
0,66%	1,14	7.514,74	2,52	-89.914,55
1,33%	1,15	15.029,48	2,49	-115.441,56
1,99%	1,15	22.544,22	2,48	-130.846,03
2,66%	1,16	30.058,96	2,47	-139.290,39
3,32%	1,17	37.574,83	2,46	-144.545,95
3,99%	1,18	45.089,57	2,46	-147.919,99
4,65%	1,18	52.604,31	2,46	-150.750,25
5,32%	1,19	60.119,05	2,46	-153.095,32
5,98%	1,20	67.633,78	2,45	-154.903,02
6,65%	1,21	75.148,52	2,45	-156.289,93
7,31%	1,21	82.663,26	2,45	-157.449,34
7,97%	1,22	90.178,00	2,45	-158.463,82
8,64%	1,23	97.692,74	2,45	-159.181,79
9,30%	1,24	105.208,61	2,45	-159.737,94
9,97%	1,24	112.723,01	2,45	-159.926,47

[1]Valores em milhões de toneladas de CO2
[2]Valores em mil toneladas de CO2
[3]Valores em bilhões de R$
[4]Valores em milhões de R$

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

Analisando a redução marginal do modelo de mínima emissão de CO2, observa-se que a redução das emissões é decrescente, ao passo que o aumento do custo permanece linear até a taxa de relaxamento de 6,65%, quando o modelo passa a atingir um resultado próximo ao resultado de mínima emissão apresentado no modelo sem a restrição de custos.

A partir da redução marginal, o tomador de decisão é capaz de analisar a eficiência do aumento de custos no fator de emissão total de CO2. O contrário também é verdadeiro: para o modelo de mínimo custo, o tomador de decisão, ao avaliar o efeito marginal de relaxamento dos níveis de emissão para as taxas pré-estabelecidas, é possível determinar o grau de relaxamento ideal, a depender dos interesses do usuário do modelo.

A fim de determinar o grau de relaxamento ideal, foi calculada a taxa marginal de substituição (TMS) para cada uma das curvas. Esse nível ideal ocorre quando a TMS é igual a 1. Para isso, houve a necessidade de comparar as emissões e os custos na mesma unidade de medida, o que foi feito a partir de uma estimativa para o preço do carbono.

Conforme exposto por Gerlagh e Liski (2016), existe uma expectativa de aumento nos valores das taxas de carbono a nível global, de modo que, no longo prazo, os agentes busquem por fontes de energia mais sustentáveis e menos poluentes. Segundo os mesmos autores, a rapidez e o patamar de transição vão depender, dentre muitos fatores, do preço cobrado pelos países para emissão do carbono, usualmente medida em dólares por tonelada (US$/t.CO2).

De acordo com dados apresentados pelo Banco Mundial (2021), a taxação das emissões de CO2 varia de país para país. Conforme apresentado pela instituição, o país com a maior taxa, no mês de maio de 2021, foi a Suécia, com o valor de US$ 137 para cada tonelada de CO2 emitida, enquanto o país com o menor valor foi a Estônia, com US$ 2/t.CO2 equivalente.

Na intenção de avaliar a relação de troca entre o aumento dos custos de transporte e as emissões de CO2, foram simulados cenários para comparar até que ponto valeria a pena para o tomado de decisão orientado para o mínimo custo optar por considerar o cenário de mínima emissão de CO2 a partir dos resultados obtidos com a curva de Pareto da Figura 9.

Dessa forma, foram simulados os cenários considerando o preço do carbono de US$ 2/t.CO2 equivalente até US$ 137 t.CO2 equivalente, em intervalos de US$ 27 dólares. Assim, foram considerados seis cenários, considerado os seguintes valores para o carbono:

- *Cenário 1:* US$ 2/t.CO2 equivalente;
- *Cenário 2:* US$ 29/t.CO2 equivalente;
- *Cenário 3:* US$ 56/t.CO2 equivalente;
- *Cenário 4:* US$ 83/t.CO2 equivalente;
- *Cenário 5:* US$ 110/t.CO2 equivalente;
- *Cenário 6:* US$ 137/t.CO2 equivalente.

A conversão dos valores em dólares para real considerou a taxa de câmbio de R$ 5,5152/US$, de acordo com o valor apresentado pelo Banco Central do Brasil (2021) no dia 09/10/2021. Os resultados financeiros da curva de Pareto para o modelo de mínima emissão para cada um dos cenários são apresentados na Tabela 25.

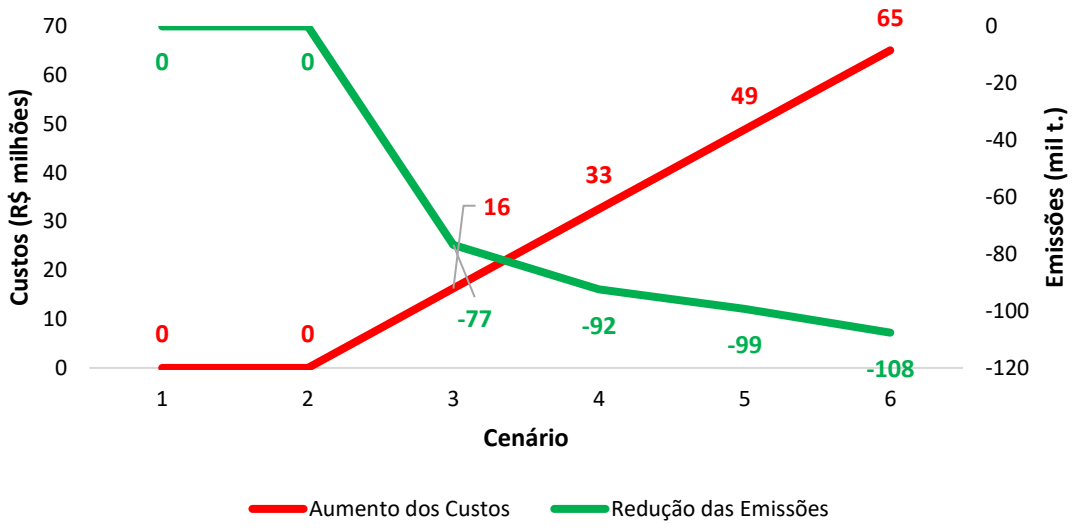
Tabela 25 - Resultados para cada Cenário.

Relaxamento do Custo	**Aumento Custo (R$ milhões)**	**Redução Emissões (mil t.CO2)**	**Lucro/Prejuízo por Cenário (R$ milhões)**					
			1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
0,66%	16	77	-15	-4	7	19	30	42
1,33%	33	92	-32	-18	-4	10	24	37
1,99%	49	99	-48	-33	-18	-3	11	26
2,66%	65	104	-64	-48	-33	-17	-2	13
3,32%	81	108	-80	-64	-48	-32	-16	0
3,99%	98	110	-96	-80	-64	-47	-31	-14
4,65%	114	112	-113	-96	-79	-63	-46	-30
5,32%	130	113	-129	-112	-95	-79	-62	-45
5,98%	146	113	-145	-128	-112	-95	-78	-61
6,65%	163	113	-161	-145	-128	-111	-94	-78
7,31%	167	113	-166	-149	-132	-115	-99	-82
7,97%	167	113	-166	-149	-132	-115	-99	-82
8,64%	167	113	-166	-149	-132	-115	-99	-82
9,30%	167	113	-166	-149	-132	-115	-99	-82
9,97%	167	113	-166	-149	-132	-115	-99	-82

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

A Figura 11 ilustra, para cada um dos cenários, o nível de aumento dos custos que valeriam a pena, financeiramente, para o tomador de decisão e a redução das emissões atingida. Nela, observa-se que, para o preço do carbono a US$ 2 e US$ 29/t, o decisor não teria incentivo para optar por rotas que sejam menos poluentes. Já a partir do carbono a US$ 56/t.CO2, há um incentivo financeiro para o uso de rotas menos poluentes, reduzindo as emissões de 77 mil t.CO2 (US$ 56/t.CO2) até 108 mil t.CO2 (US$ 137/t.CO2).

Figura 11 – Nível de aumento dos custos e redução das emissões em cada cenário



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

4.3.2. Recomendações de infraestrutura

Observa-se, também, a partir dos resultados obtidos, que a redução marginal das emissões conforme relaxamento dos custos é decrescente. Ou seja, mesmo que o decisor esteja disposto a dispender uma maior quantia monetária, existem limites estruturais, como oferta e demanda pelo etanol hidratado, capacidades de distribuição e capacidades das instalações intermodais que fazem com que não seja possível atingir uma maior redução das emissões de CO2.

Nesse sentido, a análise do preço-sombra é capaz de indicar quais as melhores infraestruturas para realizar investimentos em aumento de capacidade.

Em relação às distribuidoras, pode-se observar na Tabela 19 que os estados com os menores preço-sombra (ou seja, o aumento na capacidade de distribuição em 1 m³ resultaria em uma redução das emissões em "n" toneladas de CO2) foram os de PB (-30,91), TO (-15,58), MT (-15,3) e MG (-12,84).

A partir sob a ótica de custos, observou-se, na Tabela 10, que os estados com os menores preço-sombra para a capacidade de distribuição foram os de PB (-39,42), MT (-15,31), AL (-13,79), MG (-10,55) e SE (-9,43). Analisando os cinco destaques em cada um dos modelos, observa-se que os estados de PB, MT e MG apresentaram os menores valores de preço-sombra nos dois casos, indicando que os três podem ser indicados para

análises de investimento em capacidade de distribuição na intenção de reduzir os custos e as emissões de CO2 na cadeia de transporte do etanol hidratado.

Já em relação às instalações intermodais, pode-se observar na Tabela 26 que os terminais de entrada intermodais com os menores preço-sombra foram os de Rondonópolis (MT) (-36,43), Chapadão do Sul (MS) (-32,66), Uberaba (MG) (-29,51), Porto Velho (RO) (-23,12) e Ribeirão Preto (SP) (-20,65). Um destaque nesse conjunto de terminais de entrada intermodais utilizados pode ser feito para os de Rondonópolis (MT) e Chapadão do Sul (MS), ambos localizados na região Centro-Oeste do país. Essa região deve apresentar um aumento na produção do etanol hidratado nos próximos anos, e o investimento em instalações intermodais pode beneficiar o transporte do produto, tanto em termos de custo, quanto em termos de emissões.

Tabela 26 - Volume captado e preço-sombra para cada instalação de entrada intermodal.

Terminal Intermodal	**Capacidade[1]**	**Volume Captado - Mínima Emissão[1]**	**Emissões (Preço-Sombra)[2]**	**Volume Captado - Mínimo Custo[1]**	**Custo (Preço-Sombra)[3]**
Santos (SP)	223.956,51	26.100,40	0,00	0,00	0,00
Rio de Janeiro (RJ)	84.100,54	0,00	0,00	0,00	0,00
Porto Velho (RO)	66.094,24	66.094,24	-23,12	66.094,24	-17,69
Belém (PA)	55.199,69	0,00	0,00	0,00	0,00
Chapadão do Sul (MS)	522.637,55	522.637,55	-32,66	522.637,55	-17,50
Londrina (PR)	197.808,61	197.808,61	-1,42	0,00	0,00
Sarandi (PR)	245.697,76	245.697,76	-9,35	22.999,74	0,00
Maringá (PR)	169.392,78	169.392,78	-9,76	97.646,44	0,00
Rondonópolis (MT)	85.000,00	85.000,00	-36,43	0,00	0,00
Ourinhos (SP)	55.781,51	0,00	0,00	0,00	0,00
São José do Rio Preto (SP)	35.166,52	35.166,52	-8,72	0,00	0,00
São Luís (MA)	12.695,47	0,00	0,00	0,00	0,00
Pradópolis (SP)	2.985,58	2.985,58	-1,64	0,00	0,00
Uberlândia (MG)	2.849,87	2.849,87	-3,07	0,00	0,00
Araucária (PR)	3.728,63	0,00	0,00	0,00	0,00
Uberaba (MG)	527.584,00	527.584,00	-29,51	527.584,00	-4,12
Ribeirão Preto (SP)	1.233.216,00	1233216,00	-20,65	801.152,83	0,00
Paulínia (SP)	1.682.502,00	1682502,00	-6,91	0,00	0,00
Duque de Caxias (RJ)	351.238,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do modelo (2022).

Analisando os preços-sombra dos dois modelos para os terminais de entrada intermodais, observa-se que os terminais de Uberaba (MG), Chapadão do Sul (MS) e

Porto Velho (RO) apresentaram preço-sombra negativo em ambos os modelos. Assim, é possível recomendar que eles sejam analisados para a realização de investimentos em capacidade de recepção do produto em relação aos demais, na intenção de reduzir tanto os custos quanto às emissões de CO2 na rede de transporte do etanol hidratado no Brasil.

Em relação ao preço-sombra das usinas, agrupadas por estado, observou-se que no cenário de mínimo custo (Tabela 6), os estados que seriam os mais recomendados para a ampliação da produção do etanol hidratado seriam os de RN (-303,25), PI (-298,16) e PB (-266,59). A partir dos resultados do modelo, a ordem de prioridade, mantidas as condições de infraestrutura, seriam aqueles estados com os menores valores do preço-sombra.

Já no cenário de mínima emissão (Tabela 15), os estados recomendados para a realização de investimentos em capacidade de produção seriam os de PI (-187,18), AM (-166,62) e RN (-163,40).

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo aplicar a técnica de modelagem matemática com o intuito de otimizar os fluxos de transporte do etanol hidratado no Brasil considerando os objetivos de minimização de custos e de minimização das emissões de CO2. A partir da técnica do e-restrito foi possível analisar o *trade-off* entre os dois objetivos, uma vez que a busca por estratégias de minimização de custos tende a resultar em aumento nas emissões de CO2, e vice-versa.

No cenário de mínimo custo, obteve-se um custo de transporte total de R$ 2,449 bilhões e uma emissão total de 1.243,61 mil toneladas de CO2, para um volume total de 45,726 bilhões de litros de etanol movimentados entre as usinas e as distribuidoras, e entre as distribuidoras e os postos revendedores. No cenário de mínima emissão, obteve-se um custo de transporte total de R$ 2,621 bilhões e uma emissão total de 1,131 mil toneladas de CO2.

No cenário de mínimo custo, aproximadamente 2,038 bilhões de litros de etanol foram movimentados entre as usinas e distribuidoras fazendo o uso de soluções intermodais de transporte, enquanto no cenário de mínima emissão esse montante foi de 4,797 bilhões de litros. Dessa forma, observou-se se que, na intenção de mitigar os impactos ambientais, as soluções de transporte intermodais se mostraram uma ótima alternativa, com destaque para as dutovias, semelhante ao resultado observado por Branco, Bartholomeu e Vetorazzi (2020) e para o transporte por meio da cabotagem.

Em ambos os cenários, o modelo optou por alocar o etanol em distribuidoras mais próximas aos centros consumidores em relação às usinas produtoras. Essa estratégia acontece no Brasil e foi indicada pelo modelo devido ao menor custo de transporte e ao menor nível de emissão, resultado dos diferentes tipos de veículos utilizados nos fluxos de entrega (entre usinas e distribuidoras) e distribuição (entre distribuidoras e usinas).

Para os fluxos de entrega, comumente são utilizados caminhões maiores, que apresentam preços de frete mais vantajosos e são menos poluentes, ao passo que, para os fluxos de distribuição são utilizados caminhões menores devido à baixa capacidade de captação de volume por parte dos postos revendedores.

Em relação às recomendações de investimentos, foi feita a análise do preço-sombra para identificar quais: usinas apresentam um maior potencial de expansão da sua produção, dada a expectativa de aumento na demanda pelo etanol hidratado nos próximos anos; e quais distribuidoras e terminais de transporte intermodais se mostraram com maior potencial para ampliação de capacidade, uma vez que o investimento em infraestrutura se faz essencial para otimizar os fluxos de transporte ao longo da cadeia.

A partir dessa análise, observou-se que existe um maior potencial para ampliação da capacidade de produção em estados que apresentam déficit produtivo, com destaque para os de RN e PI, para os quais o aumento na capacidade de produção em 1 m³, mantidas as condições de demanda, resultariam em redução de R$ 303,25 e 163,40 kg.CO2 e de R$ 298,16 e 163,40 kg.CO2, respectivamente.

Em relação às distribuidoras, observou-se que os estados com maior potencial de ampliação da capacidade de distribuição foram os de PB, MT e MG. Para cada 1 m³ de aumento na capacidade de distribuição em PB poderia haver uma redução de R$ 39,42 e 30,91 kg.CO2, enquanto para o estado de MT esses valores foram de R$ 15,30 e 15,31 kg.CO2, e para o estado de MG, R$ 10,55 e 12,84 kg.CO2.

Dentre as soluções intermodais, um destaque foi dado para os terminais de Porto Velho (RO), que envolve uma rota hidroviária; Chapadão do Sul (MS), que envolve uma rota ferroviária; e Uberaba (MG), que envolve uma rota dutoviária.

Analisando os pontos de Pareto, pode-se recomendar potenciais preço do carbono que incentivariam os agentes do setor a buscarem por alternativas de menor impacto ambiental em detrimento das alternativas de mínimo custo. Foram considerados 6 cenários de preços distintos, de acordo com os dados disponibilizados pelo Banco Mundial (2021), para os quais observou-se que, caso o incentivo financeiro fosse igual ao maior preço do carbono observado atualmente (US$ 137/t.CO2), os agentes do setor poderiam optar pelo cenário onde haveria um aumento de até R$ 81 milhões em custos de transporte (em relação ao cenário ótimo de mínimo custo) e uma redução de 108 mil toneladas de CO2.

A análise da viabilidade da escolha de soluções que minimizam as emissões pode balizar potenciais programas de incentivo por parte do governo e de instituições privadas, e até mesmo ser utilizada para analisar a configuração atual do programa do RenovaBio.

Hoje, o programa remunera os agentes pela descarbonização das etapas de produção e transporte, com o preço do título de descarbonização negociado a preços de mercado. O modelo matemático proposto permite avaliar a potencial captura de mudanças de estratégia pelos agentes do setor a partir de diferentes preços do CBio, o que pode dar embasamento técnicos para incentivos adicionais por parte dos órgãos públicos, a depender das estratégias de descarbonização no curto, médio e longo prazo.

Do ponto de vista prático, a aplicação do modelo matemático de otimização e da técnica do e-restrito pode trazer contribuições no que tange: à avalição do potencial de redução de custos e emissões pelas infraestruturas intermodais, das distribuidoras e da capacidade de produção das usinas; e a partir de quais níveis do preço do carbono os agentes do setor poderiam estar dispostos a adotar uma estratégia mais voltada para minimizar as emissões em detrimento de uma estratégia de mínimo custo.

Para a literatura, o trabalho comprovou a aplicabilidade dos modelos de otimização para o planejamento do transporte, mostrando que eles podem ser transpostos para o planejamento de cadeias de suprimentos distintas à cadeia do etanol hidratado.

Já o uso da técnica do e-restrito para a obtenção dos pontos de Pareto, que até então não havia sido aplicada na literatura para a otimização do transporte do etanol hidratado no Brasil, considerando os objetivos conflitantes de minimização de custos e emissões de CO2, se mostrou aplicável para mensurar os *trade-offs* citados por Pinheiro (2008) e Guimarães (2019).

Mesmo com uma série de aplicações e contribuições, o modelo adotado no presente trabalho apresentou algumas limitações, as quais podem ser capturadas por estudos futuros. A primeira limitação foi a do horizonte de tempo do modelo: foi considerada uma janela de tempo anual e foram utilizados valores e as infraestruturas atuantes no Brasil no ano de 2019. Como o etanol apresenta uma dinâmica de produção e consumo que varia, em geral, de acordo com os meses do ano, a recomendação para estudos futuros seria a de aumentar a granularidade da janela de tempo do modelo proposto para um horizonte mensal, assim como considerar volumes de produção, demanda e instalações (distribuidoras e intermodais) mais recentes, ou até mesmo projeções de volumes e novos projetos de infraestruturas.

Uma segunda limitação diz respeito à otimização considerando apenas o custo do transporte na etapa de transporte. Estudos futuros poderiam mapear e considerar na modelagem, além dos custos de transporte, questões tributárias, como o PIS/COFINS e o ICMS.

O presente modelo considerou o *trade-off* entre os objetivos de mínimo custo e de mínima emissão de CO2. Como sugestão para estudos futuros, pode-se considerar variáveis adicionais, como, por exemplo, o tempo de transporte e o nível de serviço. Além de variáveis adicionais, pode-se estudar a aplicabilidade de outras técnicas para otimização multiobjetivo, como a dos pesos ponderados, ou até mesmo demais técnicas presentes na literatura, como apresenta Deb (2014). Adicionalmente, pode-se minimizar o custo total da rede considerando o custo de transporte e o custo das emissões, seja por meio de um modelo de precificação de crédito de carbono ou pelo custo oportunidade da emissão dos CBios.

Além dos resultados do próprio modelo, é possível analisar, também, comparações entre os tempos de processamento em cada um dos cenários, e considerando técnicas distintas, como a de programação linear e a de programação inteira mista. Como por exemplo, pode-se citar o trabalho de Akgul et al. (2017), que utilizou da técnica de programação inteira mista para selecionar a localização ótima de usinas produtoras de etanol. Diferente do modelo do presente trabalho, no qual a localização das usinas e distribuidoras era conhecida, a aplicação de Akgul et al. (2017) procurava determinar qual seria a melhor localização para a instalação de usinas de modo a minimizar os custos de transporte.

Por fim, uma outra aplicação recomendada seria a simulação de um cenário onde o etanol pode ser transportado diretamente das usinas para os postos revendedores. Mesmo com os benefícios do agente distribuidor (garantir a qualidade, gestão do transporte e estrutura para captação de grandes volumes), o fluxo direto entre as usinas e os postos pode beneficiar a logística em determinadas regiões do país onde a capacidade de distribuição é limitada, trazendo uma economia para os agentes e uma redução do preço do produto ao consumidor.

Modelos matemática de otimização e a técnica do e-restrito se mostraram aplicáveis ao contexto do transporte do etanol hidratado no Brasil no que tange à avaliação das

infraestruturas, mapeamento dos fluxos ótimos e análise dos *trade-offs* entre os objetivos de mínimo custo e mínima emissão. O presente estudo contribuiu para a literatura demonstrando a aplicabilidade da combinação das técnicas (modelagem matemática e o e-restrito), e para os tomadores de decisão e formuladores de potenciais políticas públicas com a análise dos objetivos conflitantes e o levantamento de potenciais melhoras de infraestrutura de incentivos com relação ao preço do carbono.

REFERÊNCIAS

AKGUL, O. et al. Optimization-based approaches for bioethanol supply chains. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 50, n. 9, p. 4927-4938, 2011.

ANP. **Resolução ANP nº 8 de 06/03/2007**. Estabelece os requisitos necessários à autorização para o exercício da atividade de Transportador-Revendedor-Retalhista (TRR) e a sua regulamentação. Disponível em: < https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=107405>. Acesso em: 18 jun. 2021.

ANP. **Dados Abertos**. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos>. Acesso em: 14 ab. 2021.

ANP. **Etanol**. 2020a .Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/etanol>. Acesso em: 25 maio. 2021a.

ANP. **Gasolina**. 2020b. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/gasolina>. Acesso em: 25 maio. 2021b.

ANP. **RenovaCalc.** 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/renovacalc>. Acesso em: 16 abr. 2021.

ANP. **RenovaBio.** 2022. Disponível em: < Composição e estruturas de formação dos preços>. Acesso em: 04 fev. 2022.

ANTAQ. **Anuário Antaq.** 2019. Disponível em: <http://anuario.antaq.gov.br>. Acesso em: 14 abr. 2021.

ANTT. **Anuário do Setor Ferroviário**. 2019. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/anuario-do-setor-ferroviario>. Acesso em 14 abr. 2021.

BACCHI, M. R. P.; RODRIGUES, L. **Estrutura de mercado e formação de preços na cadeia produtiva de cana-de-açúcar**. Alínea, 2018.

BRANCO, J. E. H.; BARTHOLOMEU, D. B.; VETORAZZI, A. C. Avaliação das emissões de CO2 na etapa de transporte do etanol: aplicação de um modelo de otimização. **Transportes**, v. 28, n. 1, p. 63–80, 2020.

CAIXETA FILHO, J. V. **Pesquisa operacional**. São Paulo: Atlas, v. 2, 2001.

CASTILLA, L. R. C.; OLIVEIRA, B. G. Desafios da implantação do programa RenovaBio: *insights* brasileiros para descarbonização do setor de transporte. *In:* MARCOVITCH, J.; MACHADO-FILHO, C. A.; FERREIRA, G. T. C. (Orgs.). **A Governança Ambiental e Seus Compromissos**. São Paulo: FEA/USP, 2019. p. 35-56.

CAVALCANTI, M. C. B. **Tributação relativa etanol-gasolina no Brasil:** competitividade dos combustíveis, arrecadação do estado e internalização dos custos de carbono. 2011. 177 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

CHEN, X.; WANG, X. Effects of carbon emission reduction policies on transportation mode selections with stochastic demand. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 90, p. 196-205, 2016.

DANTZIG, G. B. **Linear programming and extensions**. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1963

DE ALENCAR, K. **Análise do Balanço entre Demanda por Etanol e Oferta de Cana de Açúcar no Brasil**. [s.l.] Escola de Economia de São Paulo, 2012.

DEB, K. Multi-objective Optimization**.** *In:* BURKE, E. K.; KENDALL, G. (Orgs). **Search Methodologies:** Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques**.** New York: Springer, 2014, p. 403-449.

EPE. Considerações sobre a proposta de flexibilização do modelo de comercialização de etanol hidratado no Brasil. 2019.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>. Acesso em: 26 maio. 2021.

FADEL, G.; LI, Y. Approximating the Pareto curve to help solve biobjective design problems. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 23, n. 4, p. 280-296, 2002.

GERLAGH, R.; LISKI, M. Carbon prices for the next hundred years. **The Economic Journal**, v. 128, n. 609, p. 728-757, 2018.

GUIMARÃES, E. P. **Modelo multiobjetivo Fuzzy de análise envoltória de dados na avaliação da eficiência de máquinas industriais em um contexto sob incerteza**. 92 p.

Dissertação (Mestrado). 2019.

HAJIBABAI, L.; BAI, Y.; OUYANG, Y. Joint optimization of freight facility location and pavement infrastructure rehabilitation under network traffic equilibrium. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 63, p. 38-52, 2014.

IBGE. **Produção Agrícola Municipal - PAM**. Disponível em: < https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques>. Acesso em: 01 jun. 2021.

KESHARWANI, R.; SUN, Z.; DAGLI, C. Biofuel supply chain optimal design considering economic, environmental, and societal aspects towards sustainability. **International Journal of Energy Research**, v. 42, n. 6, p. 2169-2198, 2018.

KIM, N. S.; JANIC, M.; VAN WEE, B. Trade-off between carbon dioxide emissions and logistics costs based on multiobjective optimization. **Transportation Research Record**, v. 2139, n. 1, p. 107-116, 2009.

KOSTIN, A. et al. Optimization-based approach for maximizing profitability of bioethanol supply chain in Brazil. **Computers & Chemical Engineering**, v. 115, p. 121-132, 2018.

KU, Y. et al. Multi-objective optimization of high-speed train nose shape using the vehicle modeling function. In: **48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition**. 2010. p. 1501.

LOGUM. **Informações ANP.** Disponível em: <http://www.logum.com.br/php/informacoes-anp.php>. Acesso em: 15 abr. 2021.

MAGNATI, T. L.; WONG, R. T. Network Design and Transportation Planning: Models and Algorithms. **Transportation Science**. v. 18, n. 1, p 1-55, 1984.

MAPA. **Produção**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/producao>. Acesso em: 25 maio. 2021a.

MAPA. **Sistema de Acompanhamento da Produção Canavieria**. Disponível em: <https://sistemasweb4.agricultura.gov.br/sapcana/downloadBaseCompletaInstituicao.action>. Acesso em: 26 maio. 2021b.

MARUFUZZAMAN, M.; EKŞIOĞLU, S. D. Designing a reliable and dynamic multimodal transportation network for biofuel supply chains. **Transportation Science**, v. 51, n. 2, p. 494-517, 2017.

MELO, A. S.; SAMPAIO, Y. S. B. Impactos dos preços da gasolina e do etanol sobre a demanda de etanol no Brasil. **Revista de Economia Contemporanea**, v. 18, n. 1, p. 56–83, 2014.

MINFRA. **Estatísticas - Frota de Veículos - DENATRAN**. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/estatisticas-frota-de-veiculos-denatran>. Acesso em: 26 mai. 2021.

MÜLLER, C. et al. Resíduos De Cana-De-Açúcar E Milho Como Matéria Prima Do Etanol 2G: Atualidades E Perspectivas. In: VOIGT, C. L (Org). **Impactos das Tecnologias na Engenharia Química 3**. São Paulo: Editora Atena. 2019. p. 8–22.

ÖZTÜRK, Ö.; GAZIBEY, Y.; GERDAN, O. the Triple Test Algorithm To Get Feasible Solution for Transportation Problems. ***International Journal of Numerical Methods and Applications***, v. 13, n. 1, p. 37–50, 2015.

PINHEIRO, M. A. **Estimatva da Redução das emissões de gases de efeito estufa através da intermodalidade no setor sucroenergético**: uma aplicação de programação linear. 2012. 200 p. Tese (Doutorado). ESALQ - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', 2012.

RFA. **Annual Fuel Ethanol Production**. 2021. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/statistics/annual-ethanol-production/>. Acesso em: 3 jul. 2021.

SALEHI, S. et al. Multi-objective optimization of two double-flash geothermal power plants integrated with absorption heat transformation and water desalination. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 796-809, 2018.

SECEX. **Exportação.** 2019. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>. Acesso em: 14 abr. 2021.

SHU, K.; SCHNEIDER, U. A.; SCHEFFRAN, J. Optimizing the bioenergy industry infrastructure: Transportation networks and bioenergy plant locations. **Applied Energy**, v. 192, p. 247-261, 2017.

SIFRECA. **Etanol.** 2019. Disponível em: <https://sifreca.esalq.usp.br/mercado/etanol>.

Acesso em: 16 abr. 2021.

SILVA, H. J. T. D. A. et al. Aspectos técnicos e econômicos da produção de etanol de milho no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 29, n. 4, p. 142–159, 2020.

STOLF, R.; DE OLIVEIRA, A. P. R. The success of the brazilian alcohol program (Proalcool): a decade-by-decade brief history of ethanol in Brazil. **Engenharia Agricola**, v. 40, n. 2, p. 243–248, 2020.

SVENSSON, E.; BERNTSSON, T. Economy and CO2 emissions trade-off: A systematic approach for optimizing investments in process integration measures under uncertainty. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 1, p. 23-29, 2010.

TAGOMORI, I. S. et al. Designing an optimum carbon capture and transportation network by integrating ethanol distilleries with fossil-fuel processing plants in Brazil. **International Journal of Greenhouse Gas Control**. v. 68, p. 112-127, 2018.

TAYLOR, B. W. **Introduction to Management Science**. USA: Prentice-Hall, Inc., 2007.

TRANSPETRO. **Dutos e Terminais**. 2019. Disponível em: <https://transpetro.com.br/transpetro-institucional/nossas-atividades/dutos-e-terminais.htm>. Acesso em: 14 abr. 2021.

XAVIER, C. E. O. **Localização de tanques de armazenagem de álcool combustível no Brasil: aplicação de um modelo matemático de otimização**. 2008. 175 p. Dissertação (Mestrado). ESALQ - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', 2008.

APÊNDICE A - Resultados do cenário de mínimo custo

O detalhamento dos resultados do model de mínimo custo pode ser acessado pelo seguinte link: https://osf.io/fg5qk/, consultando o arquivo “APÊNDICE A - Resultados do cenário de mínimo custo.xlsx”.

APÊNDICE B - Resultados do cenário de mínima emissão

O detalhamento dos resultados do model de mínima emissão pode ser acessado pelo seguinte link: https://osf.io/fg5qk/, consultando o arquivo “APÊNDICE B - Resultados do cenário de mínima emissão.xlsx”.

ANEXO A – Detalhamento dos dados de entrada

O detalhamento dados de entrada pode ser acessado pelo seguinte link: https://osf.io/fg5qk/, consultando o arquivo “ANEXO A – Detalhamento dos dados de entrada.xlsx”.