

Sistema FIEB



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial

EMMANUELLE SOARES DE CARVALHO FREITAS

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ECONÔMICO, AMBIENTAL E
TECNOLÓGICO DA APLICAÇÃO DE ALTOS TEORES DE BIODIESEL DE
ÓLEO E GORDURA RESIDUAL NO DIESEL UTILIZADO EM UMA FROTA
VEICULAR DO SETOR DE MINERAÇÃO**

Tese de Doutorado

SALVADOR, 2022

EMMANUELLE SOARES DE CARVALHO FREITAS

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ECONÔMICO, AMBIENTAL E
TECNOLÓGICO DA APLICAÇÃO DE ALTOS TEORES DE BIODIESEL DE
ÓLEO E GORDURA RESIDUAL NO DIESEL UTILIZADO EM UMA FROTA
VEICULAR DO SETOR DE MINERAÇÃO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em
Gestão e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC, como
requisito final para a obtenção do título de Doutor em Gestão de Tecnologias Industrial.

Orientadora: Prof.^a. Dr. Lilian Lefol Nani Guarieiro

Coorientadora: Prof.^a. Dr. Lúcia Helena Xavier

SALVADOR, 2022

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

F862a Freitas, Emmanuelle Soares de Carvalho

Avaliação do potencial econômico, ambiental e tecnológico da aplicação de altos teores de biodiesel de óleo e gordura residual no diesel utilizado em uma frota veicular do setor de mineração / Emmanuelle Soares de Carvalho Freitas – Salvador, 2022.

138 f. : il., color.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Lilian Lefol Nani Guarieiro.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Lúcia Helena Xavier.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2022.

Inclui referências.

1. Biodiesel. 2. Diesel. 3. Mistura - Diesel - Biodiesel. 4. Óleo residual - Fritura. 5. Resíduo – Biocombustível. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Guarieiro, Lilian Lefol Nani. III. Xavier, Lúcia Helena. IV. Título.

CDD 333.7938

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC**Doutorado em Gestão e Tecnologia Industrial**

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Doutorado, intitulada “**Avaliação do potencial econômico, ambiental e tecnológico da aplicação de altos teores de biodiesel de óleo e gordura residual no diesel utilizado em uma frota veicular do setor de mineração**” apresentada no dia 20 de maio de 2022, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutora em Gestão e Tecnologia Industrial.

Assinado eletronicamente por:
LILIAN Lefol Nani Guarieiro
CPF: ***.720.076-**
Data: 30/05/2022 15:10:02 -03:00

Orientadora:

Prof.^a Dr.^a Lilian Lefol Nani Guarieiro
SENAI CIMATEC

Electronically signed by:
Lúcia Helena Xavier
CPF: ***.720.357-**
Date: 5/30/2022 4:30:40 PM -03:00

Coorientadora:

Prof.^a Dr.^a Lúcia Helena Xavier
CETEM

Assinado eletronicamente por:
Alex Alisson Bandeira Santos
CPF: ***.191.765-**
Data: 30/05/2022 16:49:18 -03:00

Membro Interno:

Prof. Dr. Alex Alisson Bandeira Santos
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Francisco Uchoa Passos
CPF: ***.670.117-**
Data: 31/05/2022 14:50:35 -03:00

Membro Interno:

Prof. Dr. Francisco Uchoa Passos
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Tiago Lima da Silva
CPF: ***.605.555-**
Data: 31/05/2022 10:37:30 -03:00

Membro Externo:

Prof. Dr. Tiago Lima da Silva
UFRJ

Assinado eletronicamente por:
Antônio Gabriel Souza Almeida
CPF: ***.586.155-**
Data: 30/05/2022 15:04:25 -03:00

Membro Externo:

Prof. Dr. Antônio Gabriel Souza Almeida
IFBA

Aos meus pais, Oscar (*in memoriam*) e Glacilda, base de minha formação religiosa e moral, que nunca mediram esforços em benefício de minha educação, tendo deixado guardado em meu coração e em minha vida, que nada é impossível aos olhos de Deus.

A vida nunca foi e nunca será linear. Demorei a aprender que na vida nem tudo sai como planejamos.

Criei várias expectativas, passei por diversas frustrações e atravessei caminhos difíceis e complicados. Foi quando deixei de lado minhas expectativas que ela me surpreendeu, quando parei de tentar controlar tudo que a vida percebeu que eu estava pronta e foi nesse momento que as bênçãos aconteceram. Deixei as coisas fluírem, entendi que as pausas são importantes e canalizei minha força para trabalhar em meu benefício. Que minha trajetória seja de luz e que o universo sempre esteja a meu favor.

Manu

“An environment of infinite economic expansion is unsustainable in a world of finite resources”.

Bryant H. McGill

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre me abençoar, iluminar e guiar em todos os momentos da minha vida. Obrigada por me dar forças para seguir em frente, por trazer tranquilidade e calma para esta mente e coração tão agitados.

A mim, por todos os momentos que pensei em desistir e não o fiz!

Aos meus pais Oscar (*in memoriam*) e Glacilda, pelo amor incondicional, apoio nas minhas decisões e preocupação constante com minha saúde física e mental. Obrigada pelo apoio irrestrito, em todas as etapas da minha vida.

Aos meus irmãos Paula e Max, obrigada pelo apoio absoluto. E aos meus cunhados Eduardo (*in memoriam*) e Nayala, pela diversão e descontração nos momentos de tristeza.

A minha orientadora Lilian, por entender as minhas limitações, pela confiança e atitude positiva, sempre feliz com cada pequena conquista.

A minha coorientadora Lúcia, pela paciência, amizade e direcionamentos. Obrigada pela vontade de fazer as coisas acontecerem e por dar asas ao meu conhecimento.

Aos professores Alex Álisson, Francisco Uchoa, Antônio Gabriel e Tiago Lima por aceitarem participar da banca de defesa e pela contribuição valiosa para o aperfeiçoamento do trabalho.

Aos meus filhos, Lucas e Gabrielle, fonte de amor e afeto incondicionais, que são o meu combustível (renovável) e o verdadeiro motivo desta caminhada. Vocês são minha vida!

Ao meu marido Marcelo, pelo carinho, companheirismo, cuidado e intenção de me colocar para cima nos momentos mais aflitos. Que sempre me propõe um cafezinho e um docinho para me incentivar, que fica sentado comigo e finge ser plateia e banca para eu ensaiar minhas apresentações e que me tranquiliza dizendo: “calma pretinha, vai dar tudo certo”. Com ele divido a casa, as dificuldades, os sonhos, as conquistas e as alegrias. Obrigada, te amo.

As minhas tias, Zezé, Aurina e Graça, obrigada pelas orações, tenho certeza que Deus ouviu. Aos meus sogros (Maurício e Cleonice) e todos os meus familiares, obrigada pela torcida e certeza de que tudo daria certo.

As minhas queridas amigas de vida: Eloiza Maria, Vanessa Alves, Phayme Suzan, Maria Josefa, Estela Santana, Tatyane Camillo e Michele Nepomuceno, por todos os momentos de descontração e conversas de whatsapp, tornando essa trajetória um pouco mais leve.

Aos meus companheiros do LIPAQ (Laboratório De Pesquisa Aplicada em Química), Eliete Alves (Ninha) e Ilan Figueiredo (Nozeiro), obrigada pela companhia durante o café, pelas inúmeras conversas e risadas, vocês proporcionaram bons e descontraídos momentos durante esta jornada acadêmica. A Clara Pereira e Yan Valdez, vocês são muito especiais, obrigada pela amizade e convivência.

Aos demais amigos que fiz no SENAI CIMATEC e a minha turma de doutorado, primeira turma de doutorado do GETEC, obrigada pelo compartilhamento de conhecimentos e experiências.

Ao Programa de Pós-graduação em Gestão e Tecnologia Industrial (GETEC) do Centro Universitário Senai Cimatec por todo o suporte dado durante a pesquisa.

A FAPESB pelo apoio financeiro em forma de concessão da bolsa.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

O uso de fontes de energia renovável para a produção de combustíveis alternativos pode atenuar significativamente as questões associadas à segurança energética, problemas ambientais e a redução das emissões de gases poluentes, contribuindo para diminuir o uso de combustíveis de origem fóssil e alavancando a produção de biocombustíveis. Assim, o objetivo desta tese foi avaliar o potencial econômico, ambiental e tecnológico do biodiesel de óleo residual de fritura, adicionado ao diesel em teores maiores do que o já estabelecido por Lei (B10), para utilização em uma frota veicular do setor de mineração. Inicialmente foi identificado os possíveis fornecedores de biodiesel para empresa de mineração e que utilizassem como matéria-prima o óleo residual de fritura. O custo de aquisição do biodiesel e a distância entre a biorrefinaria e a mineradora foram avaliados. A definição da mistura ideal para ser utilizada nos testes *in loco* foi realizada através do uso de diferentes teores de misturas diesel/biodiesel (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) em um motor diesel montado sob um dinamômetro estacionário, utilizando cinco diferentes rotações (1000, 1100, 1250, 1500 e 1750 rpm) a plena carga (100%). Após a definição do melhor teor diesel/biodiesel, a mistura foi testada na frota veicular da mineradora. Foram utilizados seis veículos, três deles abastecidos com diesel comercial (S10, com 10% de biodiesel) e outros três com a mistura combustível B50 (50% biodiesel/ 50% diesel). A avaliação econômica, ambiental e tecnológica do processo de mudança da matriz energética interna da mineradora foi realizada através da análise de cenários e a avaliação de impacto (método PEIR) que serviram como base para a dinâmica de sistemas. A simulação e validação do uso desse biocombustível à luz das três dimensões foram realizadas utilizando o *software* Vensim PLE. A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que a viabilidade da utilização de biodiesel de óleo residual de fritura na matriz energética interna da mineradora. Os veículos não apresentaram problemas significativos e nem precisaram de nenhuma modificação para utilizar a nova mistura. Além disso, o uso de óleo residual como matéria prima traz uma contribuição ambiental, minimizando a contaminação de rios e solo pela utilização de um resíduo para gerar energia limpa. Em termos econômicos foi observada a redução de custos com combustível quando foi utilizado um biocombustível proveniente de uma matéria-prima de baixo custo, o que reflete no preço final do combustível.

Palavras-chaves: Biodiesel, Diesel, Mistura Diesel/Biodiesel, Óleo Residual de Fritura, Resíduo.

ABSTRACT

The use of renewable energy sources for the production of alternative fuels can significantly mitigate issues associated with energy security, environmental problems and the reduction of pollutant gas emissions, contributing to reduce the use of fossil fuels and leveraging the production of biofuels. Thus, the objective of this thesis was to evaluate the economic, environmental and technological potential of biodiesel from residual frying oil, added to diesel at levels higher than that already established by Law (B13), for use in a vehicle fleet in the mining sector. Initially, it was possible to identify possible biodiesel suppliers for the mining company that would use residual frying oil as a raw material. The cost of acquiring biodiesel and the distance between the biorefinery and the mining company were assessed. The definition of the ideal mixture to be used in the on-site tests was carried out through the use of different levels of diesel / biodiesel mixtures (10%, 20%, 30%, 40% and 50%) in a diesel engine mounted under a stationary dynamometer, using five different speeds (1000, 1100, 1250, 1500 and 1750 rpm) at full load (100%). After the definition of the best diesel / biodiesel content, the mixture was tested in the mining company's vehicle fleet. Six vehicles were used, three of them fueled with commercial diesel (S10, with 10% biodiesel) and another three with the B50 fuel mixture (50% biodiesel / 50% diesel). The economic, environmental and technological assessment of the process of changing the mining company's internal energy matrix was carried out through the analysis of scenarios and the impact assessment (PEIR method) that served as the basis for the systems dynamics. The simulation and validation of the use of this biofuel in the light of the three dimensions was performed using the Vensim PLE software. From the results obtained, it was possible to conclude that the feasibility of using residual frying oil biodiesel in the mining company's internal energy matrix. The vehicles did not present any significant problems and did not need any modification to use the new mixture. In addition, the use of residual oil as a raw material brings an environmental contribution, minimizing contamination of rivers and soil by using a residue to generate clean energy. In economic terms, a reduction in fuel costs was observed when a biofuel from a low-cost raw material was used, which is reflected in the final price of the fuel.

Keywords: Biodiesel, Diesel, Blend diesel/Biodiesel, Residual Frying Oil, Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz Energética Brasileira (2020	6
Figura 2: consumo de combustível no setor de transporte	8
Figura 3: Frota veicular Nacional 2022.	9
Figura 4: Reação de transesterificação	13
Figura 5: Reação de esterificação	14
Figura 6: Esquema simplificado do processo de produção do biodiesel de óleo residual utilizando rota ultrassônica	14
Figura 7: Evolução da mistura BX na matriz energética brasileira	19
Figura 8: Objetivos de desenvolvimento sustentável	21
Figura 9: Objetivos de desenvolvimento sustentável alinhados com o estudo	22
Figura 10: Consumo de óleos vegetais no Brasil	23
Figura 11: Destinação convencional e destinação reversa do óleo residual de fritura.	26
Figura 12: Aproveitamento do resíduo de óleo de fritura para produção de biodiesel.	27
Figura 13: Aumento da produção de biodiesel utilizando todo o resíduo de óleo de fritura gerado anualmente pela população brasileira.	29
Figura 14: Fluxo sequencial de interação para economia circular a partir do ORF	30
Figura 15: Produção anual de biodiesel no Brasil (2021)	31
Figura 16: Processo simplificado e ilustrativo de purificação de ORF	35
Figura 17: Elos da cadeia do biodiesel de óleo residual de fritura	36
Figura 18: Patentes depositadas entre 2015 e 2020 sobre a produção de biodiesel proveniente de ORF	52
Figura 19: Fluxograma das etapas da metodologia da pesquisa	54
Figura 20: Delimitação da área de estudo	55
Figura 21: Estrutura para abastecimento dos veículos com a nova mistura	61
Figura 22: Identificação dos veículos que utilizaram a nova mistura (B50)	61
Figura 23: Cenário Atual	63
Figura 24: Cenário sustentável	63
Figura 25: Cenário Não sustentável	64
Figura 26: Diagrama de loop causal	68
Figura 27: Modelo simulado	72
Figura 28: Informações sobre as biorrefinarias selecionadas	74
Figura 29: Análise para definição da melhor biorrefinaria quanto ao custo total	76
Figura 30: Emissões de CO (a), CO₂ (b) e NOX (c) para as misturas diesel/biodiesel de óleo residual	77
Figura 31: Desempenho das misturas diesel/biodiesel	79
Figura 32: Dados do consumo em ambiente laboratorial	80
Figura 33: Manutenções e Acúmulos de km dos veículos	81
Figura 34: Média de consumo dos veículos utilizados para testes	81
Figura 35 Emissões de CO₂ em ambiente relevante	83
Figura 36: Emissões de CO em ambiente relevante	84
Figura 37: Emissões de NOx em ambiente relevante	85

Figura 38: Análise de viabilidade dos cenários	91
Figura 39: Consumo doméstico	92
Figura 40: Consumo industrial	93
Figura 41: Descarte do óleo residual	94
Figura 42: Reciclagem do óleo residual	95
Figura 43: Redução da poluição da água	96
Figura 44: Produção de biodiesel	97
Figura 45: Emissões de CO₂	98
Figura 46: Modelo de loop causal pós-análise de cenários	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Estudo sobre a utilização de diesel com alto teor de biodiesel	43
Quadro 2: Vantagens e Desvantagens do biodiesel de óleo residual de fritura	46
Quadro 3: Parâmetros utilizados na modelagem dos dados	71
Quadro 4: Detalhamento da divulgação da pesquisa	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Utilização da matéria-prima por Região para a produção de biodiesel	2
Tabela 2: Países produtores de biodiesel (2020)	12
Tabela 3: Utilização do óleo residual de fritura para produção de biodiesel	28
Tabela 4: Teor de Biodiesel utilizado no diesel em diferentes países em 2021.	38
Tabela 5: Informações com custos (mensal) com combustível da mineradora	56
Tabela 6: Condições experimentais do estudo	57
Tabela 7: Especificações dos combustíveis utilizados	58
Tabela 8: Dados obtidos através do dinamômetro de motor	59
Tabela 9: Análise de custos	75
Tabela 10: Custos com diesel durante o período de testes em ambiente relevante	86
Tabela 11: Custos com biodiesel durante o período de testes em ambiente relevante	86
Tabela 12: Custos com diesel rodando a mesma quilometragem que os veículos que utilizaram biodiesel (B50)	87
Tabela 13: Resultados qualitativos e quantitativos dos cenários analisados	88

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIOVE- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS

APROBIO- ASSOCIAÇÃO DOS PRODUTORES DE BIODIESEL

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

ANP- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO

ANFAVEA- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL

BEN – BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL

B100 - BIODIESEL PURO

B02 - DIESEL COM 2% DE BIODIESEL

B05 - DIESEL COM 5% DE BIODIESEL

B08 - DIESEL COM 8% DE BIODIESEL

B10 - DIESEL COM 10% DE BIODIESEL

B20 - DIESEL COM 20% DE BIODIESEL

B25 - DIESEL COM 25% DE BIODIESEL

B30- DIESEL COM 30% DE BIODIESEL

B35- DIESEL COM 35% DE BIODIESEL

B40- DIESEL COM 40% DE BIODIESEL

B50 - DIESEL COM 50% DE BIODIESEL

CNPE- CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA

CNTT- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRABALHADORES EM TRANSPORTES

CO- MONÓXIDO DE CARBONO

CO₂- DIÓXIDO DE CARBONO

EC – ECONOMIA CIRCULAR

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA

GEE – GASES DE EFEITO ESTUFA

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS.

IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA

IPCC- *THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE*

IUPAC - *INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY*

MME- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE

MT – MINISTÉRIO DO TRANSPORTE

NO_x- ÓXIDOS NITROSOS

NREL- *NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY*

OCDE - ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO

ODS – OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

ODM- OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO DO MILÊNIO

OGR - ÓLEOS E GORDURAS RESIDUAIS

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS

ORF – ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA

PNPB- POLÍTICA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DO BIODIESEL

PNRS- POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

PNUMA – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE

UBRABIO- UNIÃO BRASILEIRA DO BIODIESEL E BIOQUEROSENE

Sumário

1	Introdução	1
1.2	Objetivos	5
1.2.1	Objetivo Geral	5
1.2.2	Objetivos Específicos	5
2	Revisão Bibliográfica	6
2.1	A matriz energética brasileira	6
2.1.1	Combustíveis fósseis	7
2.1.2	Biocombustíveis	10
2.2	Processo de produção do biodiesel	13
2.2.1	Transesterificação	13
2.2.2	Esterificação	13
2.2.3	Ultrassom	14
2.2.4	Outras rotas de produção	15
2.3	Breve histórico de regulamentações	16
2.3.1	NBR 10004, CONAMA 313 e IBAMA 13	16
2.3.2	Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)	17
2.3.3	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel	18
2.3.4	RenovaBio	19
2.3.5	Agenda 2030 (ODS)	20
3	Economia Circular	23
3.1	Conceitos e instrumentos	24
3.2	Disseminação das práticas de EC	24
3.3	Economia circular para a produção de biodiesel	25
3.4	As contribuições da cadeia de biodiesel de óleo residual de fritura para a economia circular	30
3.5	Economia circular e Química verde	32
4	Óleo Residual de Fritura (ORF) como matéria-prima para a produção de biodiesel	33
4.1	Aproveitamento de uma matéria-prima residual	34
4.2	Biodiesel de Óleo Residual de Fritura	35
4.3	Utilização de diesel com diferentes misturas de biodiesel de óleo residual de fritura	38
5	Estado da arte	47

5.1	Projetos correlatos	47
5.2	Patentes sobre a produção e uso de biodiesel proveniente de ORF	51
6	Metodologia	54
6.1	<i>Identificação da cadeia de fornecimento de biodiesel de óleo residual de fritura</i>	54
6.2	<i>Procedimento laboratorial</i>	57
6.3	<i>Procedimentos em campo</i>	59
6.4	<i>Construção de Cenários, Análise de impacto e Dinâmica de Sistemas</i>	62
6.4.1	<i>Construção de Cenários</i>	62
6.4.2	<i>Avaliação de impacto</i>	64
6.4.3	<i>Dinâmica de Sistema</i>	66
7	Resultados e discussão	74
7.1	<i>Mapeamento das biorrefinarias localizadas próximas a mineradora para integrar a cadeia de fornecimento do biodiesel.</i>	74
7.2	<i>Procedimentos relacionados aos testes em ambiente laboratorial</i>	77
7.3	<i>Procedimentos relacionados aos testes em ambiente relevante</i>	80
7.4	<i>Avaliação econômica da aplicação da mistura na frota veicular da mineradora</i>	85
7.5	<i>Avaliação dos cenários analisados utilizando dinâmica de sistemas</i>	87
8	Conclusões	102
9	Limitações da pesquisa	105
10	Sugestões de trabalhos futuros	106
11	Divulgação Científica	107
12	Referências	1089

1 INTRODUÇÃO

Os seres humanos exploram de forma insustentável seus recursos naturais, em um ritmo superior à capacidade que a natureza tem de repor esses recursos retirados, assim como descarta indevidamente seus resíduos, prejudicando os processos naturais de restauração que a natureza realiza para preservar suas características ambientais. E na busca pelo desenvolvimento sustentável, a sociedade tem se aprofundado nas reflexões sobre a necessidade de explorar, de maneira mais coerente, seus recursos naturais, modificando os atuais modelos de produção e consumo. A percepção do alto consumo de energia, a possibilidade do esgotamento dos combustíveis fósseis e as mudanças climáticas, impulsionam a necessidade de desenvolvimento de novas alternativas e soluções sustentáveis e viáveis na área da bioenergia.

Essas novas alternativas de energia deverão suprir a matriz energética nacional e mundial e ser uma fonte de menor emissão de poluentes, uma vez que os combustíveis fósseis são uma das principais fontes de energia no mundo e um dos maiores responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. A queima de combustíveis fósseis é uma das causas mais significativas dos desequilíbrios ambientais, causando impactos imensuráveis como a contaminação do ar, prejudicando diretamente a saúde humana e o meio ambiente, contribuindo para o processo de aquecimento global (SANTANA *et al.*, 2012).

A necessidade mundial de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, com o intuito de amenizar os danos causados pela emissão de gases poluentes, tem motivado o desenvolvimento, nos âmbitos técnico, ambiental e econômico, de outras fontes de energia (HASSAN e KALAM, 2013), que possam minimizar impactos ambientais negativos, suprir futuras carências de energia e diminuir a dependência dos derivados de petróleo (SHAFIEE e TOPAL, 2009). Entre as fontes de energia renovável, os biocombustíveis apresentam grande potencial, entre os quais se destaca o biodiesel, que se torna uma alternativa promissora, viável econômica e ambientalmente, uma vez que, o biodiesel pode ser produzido de uma grande variedade de matérias-primas distintas, incluindo óleos vegetais, gorduras animais, óleos usados em frituras, e até matérias graxas de alta acidez (RAMOS *et al.*, 2017). (Tabela 1). Geralmente, fatores como a geografia, o clima e a economia local determinam quais óleos vegetais representam maior interesse e melhor potencial para emprego como biodiesel.

Tabela 1: Utilização da matéria-prima por região para a produção de biodiesel

Matéria-prima	Nordeste	Centro-Oeste/Norte ¹	Sudeste	Sul
Óleo de Soja	48,4%	78,5%	15,4%	73%
Sebo Bovino	11,6%	3,11%	33,77%	7,48%
Óleo Residual de fritura	0,3%	0,30%	18,11%	1,82%
Óleo de Algodão	11,27%	2,65%	0%	0%
Outros Materiais Graxos ²	4,03%	14,63%	13,05%	16,22%
Gordura de Porco	0%	0,63%	19,67%	1,48%
Óleo de Palma / Dendê	24,4%	0,18%	0%	0%

Fonte: Elaborado a partir de dados da ANP (Fev/2022).

¹A ANP compilou as regiões Centro-Oeste e Norte devido à pouca produção da região Norte, apenas duas unidades produtoras (Rondônia e Tocantins).

² O termo “ outros materiais graxos” contempla outras matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel.

A soja é identificada como a matéria-prima que mereceu maior atenção, embora a hegemonia da soja na matriz energética brasileira em relação a outras matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel reflète a desinformação a respeito do aproveitamento de outros insumos, incluindo os residuais. Entre as várias matérias-primas residuais para produção de biodiesel, está o óleo residual de fritura (ORF), proveniente do processo de cocção de alimentos, utilizando óleos vegetais comestíveis virgens refinados (RAMOS *et al.*, 2017). E a sua utilização para a produção de biodiesel, pode expressar boas práticas industriais no segmento produtivo deste biocombustível, como também ações menos nocivas ao meio ambiente, por meio da utilização de uma matéria-prima que seria descartada e que possui um alto potencial poluidor, tendo em vista que cada litro de óleo residual descartado de forma incorreta pode contaminar até 25 mil litros de água potável, deixando de ser um passivo ambiental para se tornar insumo produtivo (TOKARSKI, 2021).

Os ORF's, quando descartados de forma inadequada pelos ralos, vasos e solo vão diretamente para as redes de esgoto sanitário, onerando o processo de tratamento das estações de esgoto, provocando incrustações nas paredes das tubulações, entupimento, ruptura e o uso de produtos tóxicos como a soda cáustica para a remoção da gordura, conjunto de fatos que aumentam em até 45% o custo de tratamento do esgoto (LIMA, 2007), além de causar a poluição dos mananciais de água, contaminando lençóis freáticos e ocasionando danos à fauna aquática (RIZZO, 2013). Diante de todo este contexto é que veio a motivação e originalidade para a realização deste trabalho que envolve desde a

etapa da reciclagem óleo residual de fritura até a utilização do biodiesel proveniente desta matéria-prima para testes em veículos da frota automotiva de uma indústria do segmento de mineração.

A utilização dessas matérias-primas residuais representa ações com um grande apelo ambiental, uma vez que a utilização desta matéria-prima oferece uma alternativa energética e econômica para ser utilizada como fonte de energia limpa (OLIVEIRA e GONÇALVES, 2016), considerando-se como fonte de energia limpa toda aquela gerada através de fontes renováveis, com redução de emissão de poluentes ou impactos ao meio ambiente. Quando são destinados de forma correta, podem ser reaproveitados como matéria-prima e serem inseridos em novas cadeias produtivas com a fabricação de sabão, tintas, resina, plástico, verniz, ração para animais e, dentre outros, na produção do biodiesel (SUAREZ e MELLO, 2011).

As propostas desta pesquisa sobre o uso de ORF para o desenvolvimento de uma energia limpa estão baseadas no conceito de sustentabilidade, tendo como perspectiva a utilização de um recurso secundário como insumo produtivo. Assim, ancorando-se nos pilares econômico, ambiental e tecnológico, assumindo formas de gestão mais eficientes, pautadas na sustentabilidade do processo, sustentabilidade pensando no meio ambiente através de práticas identificadas com a produção mais limpa, tendo a sustentabilidade como propriedade do todo e não das partes.

As razões para encorajar o aproveitamento e uso do ORF como matéria-prima para a produção de biodiesel são relevantes, desde o fato de estar disponível em um volume considerável, estima-se a geração de cerca de 2 bilhões de óleo residual por ano (UBRABIO, 2020), ao fato de seu ciclo reverso evitar a degradação ambiental e contribuir consideravelmente para reduzir os problemas e os custos no sistema de tratamento de água e esgotos do Brasil.

A análise do potencial do uso do ORF para a produção de biodiesel apresenta três justificativas que devem ser consideradas. A primeira se refere ao custo da matéria-prima. Por ser um resíduo, é significativamente mais barata, apresentando uma vantagem econômica em relação as outras matérias-primas virgens, uma vez que o preço da matéria prima contabiliza cerca de 80% do custo total da produção (JIAQIANG *et al.*, 2017). E uma das grandes preocupações relacionada à viabilidade econômica da produção de biodiesel é a redução do custo total de produção, e uma alternativa seria a utilização de

matéria-prima de baixo custo (GEBREMARIAM e MARCHETTI, 2018). Assim, a necessidade de matérias-primas mais baratas pode colocar o ORF no centro das atenções e a sua utilização na produção de biodiesel pode representar um importante papel, economicamente (VIEIRA *et al.*, 2018).

A segunda questão é a não competição com a indústria de alimentos, atualmente são poucas as matérias-primas provenientes de fontes não alimentícias. E uma das principais preocupações com a produção de biodiesel a partir de óleos vegetais é a segurança alimentar (SUAREZ *et al.*, 2009), pois a utilização de terras que eram destinadas para a produção de alimentos agora são destinadas para a produção de biodiesel, nesse caso, um crescimento rápido e expressivo na produção desse biocombustível resultaria na elevação dos preços dos alimentos, visto que muitos agricultores trocaram as culturas destinadas à alimentação humana, por culturas destinadas à produção de biodiesel (PAULI *et al.*, 2020).

E a terceira questão são os efeitos deletérios ao meio ambiente decorrente do descarte incorreto deste resíduo, proveniente de atividades industriais e urbanas, que estão chegando a situações cada vez mais preocupantes (PASQUALETTO e BARBOSA, 2008).

Portanto, a adoção de novas fontes de energia renovável para a produção de combustíveis alternativos atenuaria significativamente as questões associadas à segurança energética, problemas ambientais e a redução das emissões de gases poluentes, contribuindo para diminuir o uso de combustíveis de origem fóssil e alavancando a produção de biocombustíveis. E para o caso da produção de biodiesel a partir de uma matéria-prima residual, que ainda reflete uma pequena parte no universo das matérias-primas destinadas para este fim, representa uma alternativa energética que pode ser otimizada em razão da mitigação das consequências que resultariam a partir do despejo deste resíduo no meio ambiente.

Diante do exposto, a utilização de ORF para a produção de biodiesel pode trazer diversos benefícios para as dimensões ambiental e econômica. Na dimensão ambiental simboliza uma solução desejável para um produto em seu fim de vida útil, considerando o ciclo reverso deste resíduo, contribuindo para mitigar os efeitos nocivos que o descarte inadequado deste resíduo pode trazer ao meio ambiente. Na dimensão econômica haveria a possibilidade de aumentar a produção e a utilização de biodiesel com a inserção de uma

nova matéria-prima em potencial. Destarte, é importante mencionar a originalidade esta tese que evidencia a utilização de uma matéria-prima residual, para a produção e uso de biodiesel, a fim de analisar o potencial ambiental, econômico e técnico deste biocombustível, sendo utilizado em altas proporções diesel/biodiesel (50% / 50%) em uma frota veicular de uma empresa do setor de mineração.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial econômico, ambiental e tecnológico da aplicação de altos teores de biodiesel de óleo residual de fritura no diesel utilizado em uma frota veicular do setor de mineração aplicado a um estudo de caso.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Identificar possíveis fornecedores para fazer parte da cadeia de fornecimento de biodiesel de óleo residual de fritura para a mineradora;
2. Analisar os resultados de estudos experimentais realizados em laboratório e em campo para definir o melhor teor de biodiesel a ser aplicado na frota de veículos;
3. Avaliar o uso de diesel com alto teor de biodiesel de óleo residual de fritura considerando as dimensões econômicas, técnicas e ambientais para a análise de cenários.

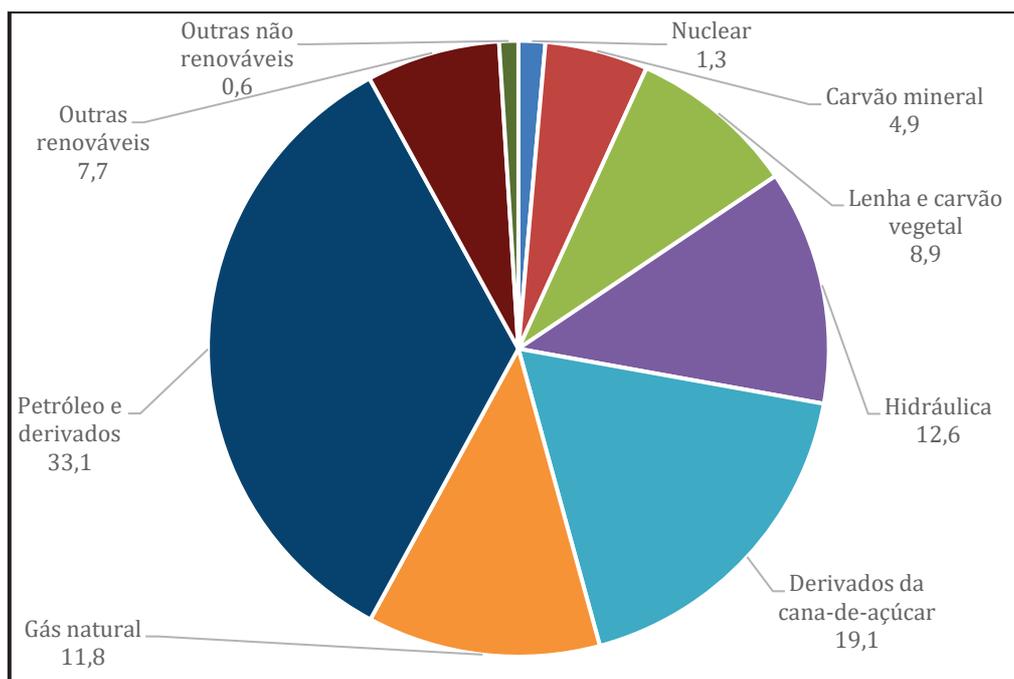
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A matriz energética brasileira e mundial

O Brasil alcançou uma posição almejada em relação ao desenvolvimento de fontes renováveis de energia, tornando-se a matriz energética mais renovável do mundo, sendo o maior produtor de etanol e o segundo maior produtor de biodiesel do mundo (ANP, 2022). Desta maneira, assumindo um papel importante no que tange as alternativas energéticas e estratégicas para substituir os combustíveis de origem fóssil, em quantidades suficientes para atender a demanda nacional e mundial.

Apesar do consumo de energia de fontes não renováveis ainda ser superior ao de fontes renováveis, a matriz energética brasileira, diferentemente de outros países, se destaca pelo uso de fontes renováveis. A utilização de energia renovável totaliza 48,3% (hidráulica, derivados de cana, lenha/carvão vegetal e outras fontes renováveis), quase metade da matriz energética nacional (Figura 1).

Figura 1: Matriz Energética Brasileira (2020)



Fonte: EPE (BEN), 2021.

Entre todos os setores que demandam energia, o setor de transporte é o que lidera o consumo (RODRIGUES E LOSEKANN, 2015). E, ao longo dos anos, no Brasil e no mundo, para atender a demanda nacional e mundial de combustíveis veiculares uma série de recursos são necessários, geralmente associados à exploração de vários recursos naturais e finitos, o que fortifica a busca por fontes que utilizem recursos limpos e

sustentáveis para a produção de energia, posto que grande parte destes recursos ainda são desvalorizados.

Neste contexto, apesar de existir diversos tipos de combustíveis e biocombustíveis líquidos veiculares, o biodiesel, por suas propriedades de caráter renovável, apresenta-se como uma boa opção na substituição aos combustíveis derivados do petróleo (TANG *et al.*, 2018).

2.1.1. Combustíveis fósseis

Em um país de dimensões continentais como o Brasil, as fontes de energia renováveis como o etanol e o biodiesel competem diretamente com a gasolina e o diesel no atendimento a demanda dos consumidores por combustíveis. Atualmente, o Brasil ocupa a quinta posição do *ranking* de maiores consumidores de derivados de petróleo do mundo (BP Statistical Review of World Energy, 2020).

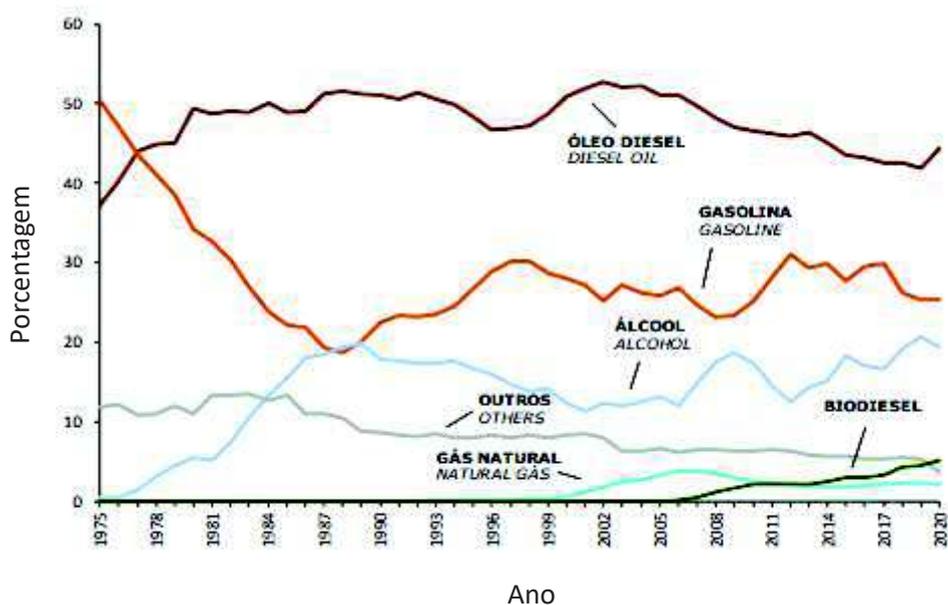
No Brasil, os combustíveis fósseis possuem a maior participação no setor de transportes (69,4%), no entanto, a participação das fontes renováveis continua em crescente expansão (ANP, 2020). O petróleo é fonte da maior parte dos combustíveis líquidos no mundo e também matéria-prima para outros diversos produtos. A principal utilização do petróleo é a sua conversão em gasolina e óleo diesel para veículos automotivos (RIBEIRO e SCHIRMER, 2017).

Além dos combustíveis supracitados, também se faz uso do carvão mineral, que é formado pela fossilização da madeira. O carvão mineral, ao ser queimado, libera de uma grande quantidade de óxidos de enxofre que reagem com a água da chuva e formam a chuva ácida, além da formação de cinzas como resíduos. Atualmente o carvão corresponde a 5% da oferta de energia primária no Brasil (BEN, 2020).

O gás natural, outro tipo de combustível fóssil, tem componentes semelhantes aos do petróleo e também é utilizado como combustível veicular no Brasil e em diversos países. O gás natural também é matéria-prima para inúmeros produtos petroquímicos importantes, destacando-se as matérias plásticas, alguns produtos farmacêuticos e, principalmente, os fertilizantes nitrogenados, dos quais cerca de 80% vêm do gás natural (CARVALHO, 2008).

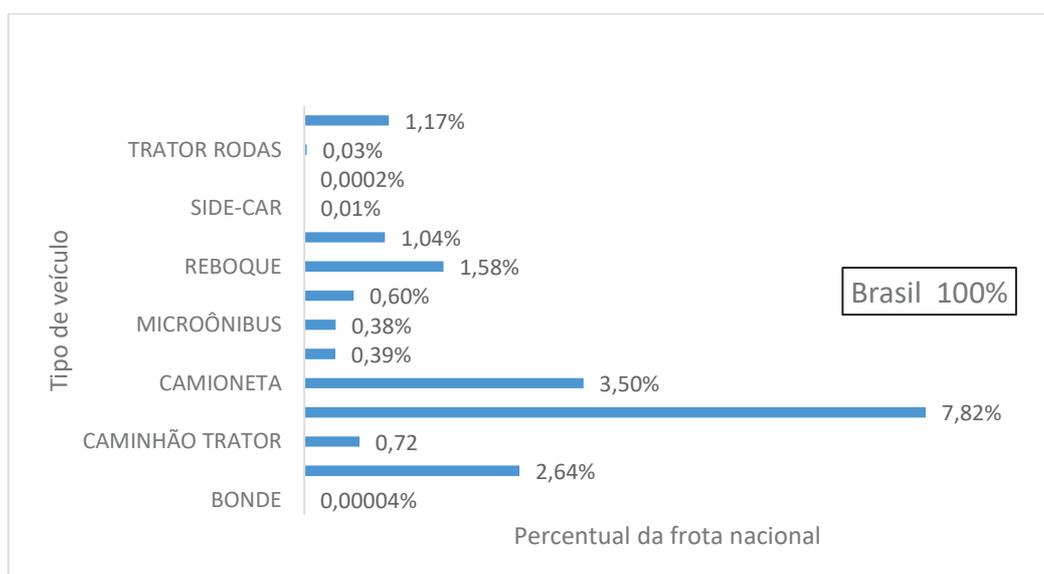
Os combustíveis mais utilizados em motores de combustão interna são a gasolina, o gás natural e o diesel, este último mais utilizado pelo transporte de cargas e frota de ônibus urbanos (MMA, 2013). De acordo com os dados do Balanço Energético Nacional – Ano Base 2019, o setor de transporte rodoviário correspondeu a cerca de 33% do consumo final de energia no país, entretanto, o uso de óleo diesel no setor de transporte correspondeu a 41,9% do consumo total de energia, enquanto o uso do biodiesel correspondeu a apenas 4,5% (EPE, 2020) (Figura 2).

Figura 2: Consumo de combustível no setor de transporte



Fonte: BEN (ano base 2020), 2021.

O setor de transportes, principalmente, o transporte rodoviário, representa aproximadamente 60% das cargas transportadas no país, caracterizando-se como o modal com maior representatividade na economia do Brasil (CNTT, 2020). De acordo com dados do Denatran (Fev/2022), a frota nacional veicular é composta por 111.899.817 veículos, dos quais quase 20% equivalem a veículos que utilizam o diesel como combustível, conforme Figura 3.

Figura 3: Frota veicular Nacional Fev/2022.

Fonte: Elaborado a partir de dados do Denatran, 2022.

No mundo, o uso dos recursos energéticos é quase que exclusivamente marcado pela dominância dos combustíveis fósseis. O petróleo ainda mantém sua predominância na oferta de combustíveis, embora o setor de transportes no Brasil apresente aproveitamento satisfatório em relação ao uso das fontes renováveis de energia, composta por quase 25% em 2019 (EPE, 2020).

O alto consumo de óleo diesel (41,9% em 2019 no setor de transporte), por esses veículos, mostra a necessidade de uma alternativa para a diminuição da dependência dos derivados de petróleo com o intuito de reduzir a poluição atmosférica, em particular nos grandes centros urbanos. O setor de transporte tem um papel ativo no aumento dos níveis de poluição, especialmente em grandes centros urbanos (GUARIEIRO E GUARIEIRO, 2012). Atualmente, do total da frota veicular nacional, cerca de 3,36% são representados por caminhões/caminhões trator, que são responsáveis pelo principal modal de transporte utilizado no país, o rodoviário, por meio do transporte de cargas interestaduais.

O Brasil ainda depende das importações para conseguir manter seu mercado de combustíveis suficientemente abastecidos com óleo diesel. De acordo com dados da UBRABIO (2021) cerca de 20% do diesel utilizado é importado, devido à incapacidade de nossas refinarias de refinar grande parte do óleo produzido no país, então exportamos óleo e importamos combustíveis e derivados. A dependência e o consumo do diesel associado a crescente emissão de gases poluentes provenientes de sua utilização, demonstram a importância da adição de biodiesel ao diesel, como uma alternativa para

tentar solucionar os problemas que envolvem o consumo de diesel no país e no mundo. Além disto, a adição do biodiesel ao diesel pode ser uma alternativa para a dependência energética, reduzindo a importação de diesel (GUARIEIRO *et al.*, 2011).

2.1.2 Biocombustíveis

Os biocombustíveis surgiram como uma alternativa promissora aos combustíveis de origem fóssil. O caráter renovável torna o produto uma fonte importante de energia no longo prazo e devido às suas vantagens a nível ambiental, foi inserido na matriz energética nacional como uma resposta às necessidades de redução de emissões de gases de efeito de estufa, evidenciada pelo Protocolo de Quioto e acentuada pela nova política global: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.

As questões ambientais e a segurança energética motivam a adição de biocombustíveis na matriz energética, visando melhoria das condições ambientais através da utilização de fontes de energia mais limpas utilizando matérias-primas renováveis, competitivas e de menor custo (AWUDU e ZHANG, 2012).

O Brasil é o pioneiro na utilização de biocombustíveis, utilizando o etanol em larga escala desde o fim da década de 70. O etanol é um combustível ambientalmente correto, podendo ser usado puro ou em misturas com a gasolina e assim como o biodiesel, pode ser produzido através de diferentes fontes vegetais, contudo, a cana-de-açúcar apresenta mais vantagens energéticas e econômicas, mostrando grande potencial devido ao aumento da demanda por produtos menos poluentes (LIMA, 2004).

Outro combustível de caráter renovável é o diesel verde (do inglês: *Hydrotreated vegetable oils* - HVO), que é um combustível molecularmente igual ao diesel fóssil, mas com a vantagem de ser renovável e sustentável. De acordo com a Ubrabio (2020), o HVO é obtido através de biorrefinarias, onde no mesmo processo é obtido o bioquerosene de aviação, além de outros produtos da chamada química verde. A ideia é que o HVO seja um aliado do biodiesel na substituição do combustível fóssil por energia renovável e não um substituto, pois o biodiesel e o HVO devem ser usados juntos, em misturas ternárias com o diesel fóssil, sempre diminuindo a proporção de diesel. O processo produtivo do HVO ainda é bastante complexo (UBRABIO, 2020), embora emita em menor quantidade gases de efeito estufa, ele ainda não é considerado verde, pois ele também necessita de

insumos fósseis, no caso, o gás hidrogênio advindo do gás natural (PROFISSÃO BIOTEC, 2020).

E o bioquerosene de aviação pode representar uma oportunidade de redução de emissões neste setor, já que o setor de aviação cresce cerca de 5% ao ano e é responsável por 2% das emissões de gases de efeito estufa no mundo todo, valor que até 2030 pode chegar em 3%. Estes dados realçam a necessidade de encontrar soluções para cumprir o compromisso de reduzir o impacto ambiental e as metas estipuladas durante a Assembleia da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) de 2013, com participação do Brasil, em atingir um crescimento neutro de carbono e até 2050 reduzir até a metade suas emissões de CO₂, com base nos níveis de 2005.

O biodiesel além de ser um combustível alternativo, competitivo e compatível com as necessidades de proteção ambiental (GUARIEIRO *et al.*, 2008), pode ser utilizado em motores do ciclo diesel, sem necessidade de adaptação dos veículos (WASELL JR. E DITTMER, 2006). E devido a finitude dos recursos naturais e os benefícios ambientais, o biodiesel tem se tornado cada vez mais atrativo (ENWEREMADU e MBARAWA, 2009), sendo capaz de funcionar em um motor por compressão sem danificá-lo (GUARIEIRO *et al.*, 2008), podendo ser miscível com o diesel de petróleo em qualquer proporção e tendo menos efeitos nocivos sobre a saúde humana em comparação com o diesel, apresentando uma menor emissão de GEE (gases de efeito estufa) e baixa toxicidade (CHANG *et al.*, 2014, SHEINBAUM-PARDO *et al.*, 2013 e TAN *et al.*, 2015).

O uso do biodiesel como substituto do combustível fóssil é uma solução para reduzir a dependência da importação do diesel e para fomentar a industrialização nacional, posto que cada litro de biodiesel produzido no país deixa-se de importar 1 litro de diesel fóssil. A vantagem do biodiesel, é que é um produto nacional, que agrega valor e que hoje é produzido por 14 estados da federação em todas as regiões do Brasil (TOKARSKI, 2021).

O biodiesel apresenta uma maior taxa de crescimento no mundo entre os biocombustíveis, conforme NREL (2016). Deve-se isto ao avanço nas políticas de consolidação e estímulo ao crescimento da indústria de biodiesel. E de acordo com dados do *Renewable Energy Policy Network* (REN, 2021), a produção global de biodiesel aumentou 13% em 2019, atingindo a marca de 47,4 bilhões de litros. Contudo, em 2020,

a produção global de biocombustíveis caiu 5% devido aos impactos da pandemia de COVID-19. A produção de etanol caiu cerca de 8%, com queda de 11% na produção nos Estados Unidos, o grande produtor. A produção global de biodiesel aumentou ligeiramente para atender a níveis mais altos de mistura na Indonésia (o maior produtor de biodiesel) e no Brasil, além da maior demanda nos Estados Unidos. Em 2019, a Indonésia assumiu a liderança como o maior produtor do mundo, permanecendo em 2020 como líder (17% da produção global), ultrapassando Estados Unidos (14,4%) e Brasil (13,7%). Os próximos maiores produtores foram Alemanha (7,4%), França (5%), Argentina (5,3%) e Holanda (4,6%) (Tabela 2).

Tabela 2: Países produtores de biodiesel (2020)

País	Biodiesel milhões m³/ano (2018)	2019	2020
Estados Unidos	6,9	4,0	6,8
Brasil	5,4	5,9	6,4
Alemanha	3,5	3,8	3,5
Indonésia	4,0	7,9	7,95
Argentina	2,8	2,5	1,6
França	2,2	2,8	2,4
Tailândia	1,6	1,7	1,7
Holanda	0,7	1,0	2,1

Fonte: REN21, 2021.

A Indonésia está realmente se consolidando como a grande locomotiva do mercado global do biodiesel. Dados publicados pela Associação dos Produtores de Biocombustíveis da Indonésia (APROBIO, 2020) informam que o país asiático fabricou quase 8,6 milhões de m³ de biodiesel ao longo de 2020. Embora os números da produção brasileira e norte-americana ainda não sejam finais, os dados do Brasil vão até novembro e os dos EUA até outubro, o volume reportado praticamente garante que o país permanecerá no topo do ranking pelo segundo ano consecutivo.

A ascensão da Indonésia se deu pela expansão do número de plantas de produção ocasionando um aumento na capacidade produção de biodiesel que quase dobrou em 2019 para 7,9 bilhões de litros, acima de 4 bilhões de litros em 2018. Em contrapartida, a produção de biodiesel nos Estados Unidos caiu 7%, para 6,8 bilhões litros, abaixo dos 6,9 bilhões de litros em 2018, isso ocorreu porque várias indústrias fecharam ou estavam

operando com capacidade reduzida. No Brasil, produção de biodiesel continuou crescendo em 2019, alta de 11% para um recorde de 5,9 bilhões de litros (REN21, 2020).

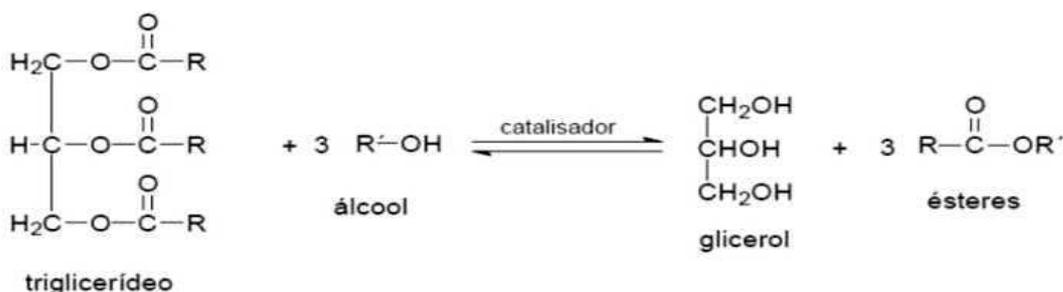
2.2 Processos de produção do biodiesel

A produção do biodiesel pode ser realizada através de diferentes processos, tais como: Transesterificação, Esterificação, Pirólise, Hidroesterificação e Irradiação Ultrassônica.

2.2.1 Transesterificação

O método mais tradicional de obtenção de biodiesel ocorre através da reação de transesterificação entre óleos vegetais e álcool, na presença de um catalisador. Os produtos dessa reação química são um éster (o biodiesel) e glicerol (Figura 4).

Figura 4: Reação de transesterificação



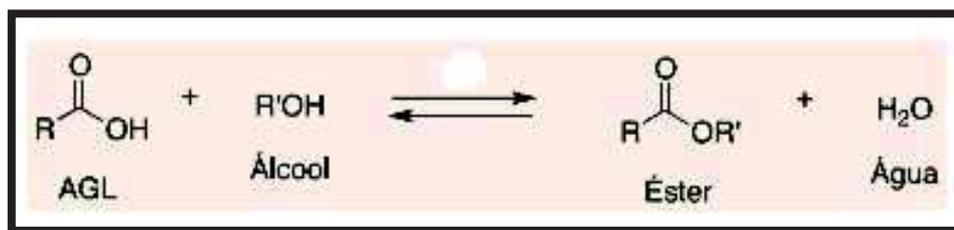
Fonte: Costa Neto e Rossi, 2000.

A transesterificação transforma o óleo vegetal ou óleos e gorduras residuais em combustível, promovendo a quebra da molécula dos triglicerídeos, liberando glicerina como subproduto e gerando mistura de ésteres dos ácidos graxos correspondentes, que tem propriedade semelhante ao do óleo diesel. Durante o processo, o glicerol é retirado mediante decantação, onde o produto final do processo de transesterificação é o Biodiesel (PARENTE, 2003).

2.2.2 Esterificação

As matérias-primas utilizadas no processo de esterificação devem apresentar alto teor de ácido graxo, 3% a 40% de ácidos graxos livres e na reação de esterificação esses ácidos graxos livres são convertidos em ésteres e água (MARCHETTI e ERRAZU, 2008). A reação de esterificação (Figura 5) utiliza, de forma preferencial, álcoois de baixo peso molecular, como o metanol e o etanol.

Figura 5: Reação de esterificação



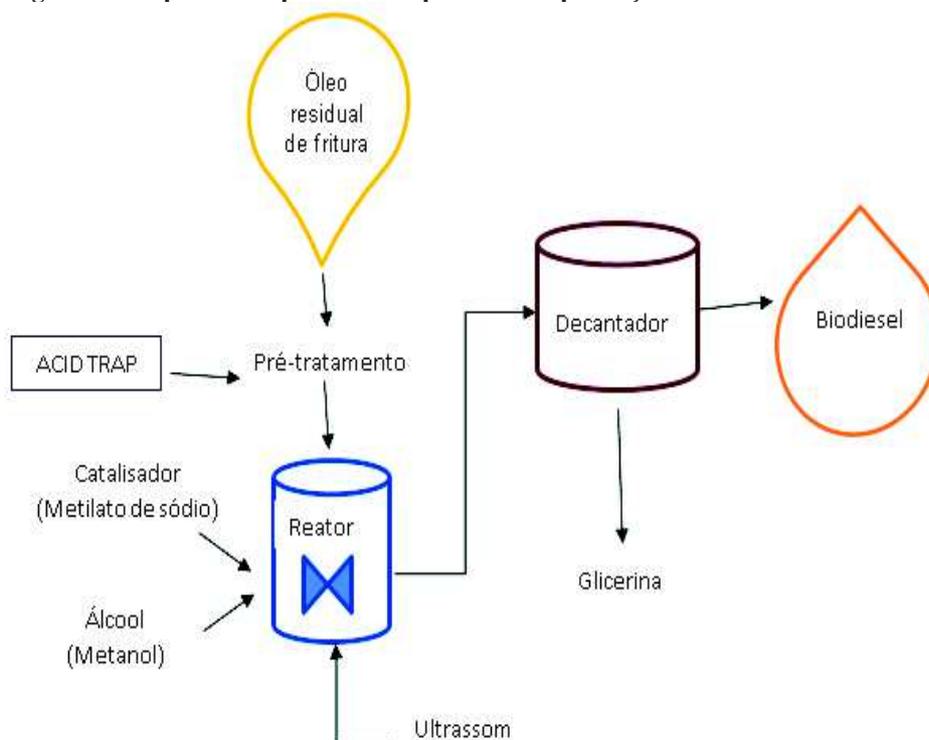
Fonte: SILVA, 2013.

A reação de esterificação é considerada uma reação reversível de álcool junto com um ácido orgânico ou inorgânico, produzindo éster e água.

2.2.3 Ultrassom

O processo de produção de biodiesel utilizando ultrassom vem como alternativa ao processo convencional, uma vez que as cavitações (formação, aumento e implosão de bolhas no meio reacional) geradas pelo ultrassom, aumentam a miscibilidade entre os reagentes e fornecem energia necessária para a reação (YU *et al.*, 2010 e MARTINEZ, 2000), conforme Figura 6.

Figura 6: Esquema simplificado do processo de produção utilizando rota ultrassônica



Fonte: Adaptado de Brasil, 2012.

Observa-se que são diversas as rotas tecnológicas para produzir biodiesel, o que mantém a competitividade nacional em uma importante posição estratégica, permitindo com que o Brasil continue a ser referência na produção e uso de biocombustíveis.

2.2.4 Outras rotas de produção

Além das rotas de produção comumente conhecidas, existem diversas outras rotas que são menos populares, tais como: Hidroesterificação, que é um processo que permite a utilização de qualquer matéria-prima graxa (óleo de frituras, borras ácidas de refino de óleos vegetais, óleo vegetal e gordura animal) independentemente de sua acidez ou de sua umidade. O processo é uma hidrólise seguida da esterificação, se apresenta como alternativa para a produção de biodiesel (LIMA, 2007).

A pirólise, que é uma modificação química causada pela aplicação de energia térmica na presença de ar ou nitrogênio, produzindo combustíveis líquidos com alto rendimento. A composição dos produtos obtidos através da pirólise depende do tipo de óleo utilizado como matéria-prima (SRIVASTAVA e PRASAD, 2000). O óleo resultante da pirólise de biomassa, denominado genericamente de bioóleo, além de ser um combustível líquido renovável, sendo esta a principal vantagem sobre derivados do petróleo, pode ser usado para a produção de inúmeras substâncias químicas (CZERNIK E BRIDGWATER, 2004). As características dos produtos da pirólise em termos de quantidade e qualidade dependem das condições de operação do processo. Neste sentido, a temperatura, a granulometria do material, a velocidade ou taxa de aquecimento, o tempo de residência, o fluxo do gás de trabalho (geralmente nitrogênio) e as características próprias da biomassa são variáveis importantes no desempenho do processo (LORA *et al.*, 2012)

A microemulsão pode ser feita com óleos vegetais, um éster e um dispersante (cosolvente), ou com óleos vegetais, um álcool e um surfactante, com ou sem óleo diesel. A microemulsão de óleos vegetais com metanol pode ter desempenho bem semelhante ao óleo diesel comum (YUSUF, 2011). As microemulsões são sistemas termodinamicamente estáveis, isotrópicos e de baixa viscosidade, constituídos por gotículas de tamanho nanométrico dispersas em uma fase contínua de um solvente imiscível com a fase dispersa (FANUN, 2012).

O Brasil, além de deter tecnologias industriais competitivas, voltadas para a produção de biodiesel, possui a capacidade para atender as condições necessárias para

assegurar a sustentabilidade nesse processo de produção. Contudo, implantar um modelo de energia sustentável, a partir da produção e uso do biodiesel requer considerar os aspectos legais da implantação dos biocombustíveis na matriz energética nacional.

2.3 Breve histórico de regulamentações

O estabelecimento de normas e regulamentações determina obrigatoriedades da mistura diesel/biodiesel, ampliando e incentivando o mercado de biodiesel no país, em função do uso de recursos renováveis para substituição dos combustíveis fósseis. E diante da necessidade de autonomia energética, o Brasil ao longo dos anos, fortaleceu seus aspectos legais relativos ao uso e produção do biodiesel, assim também, como se tornaram necessárias à criação e o aperfeiçoamento de Leis e regulamentações relacionadas às matérias-primas utilizadas no processo de produção do biodiesel.

2.3.1 NBR 10004, CONAMA 313 e IBAMA 13

A NBR 10.004/04 define resíduos sólidos como os resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, saúde, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Assim como determinados líquidos, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpo d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. Também estabelece os critérios para classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde do homem. Para os efeitos desta Norma (NBR 10004) os resíduos são classificados em: a) resíduos classe I – perigosos; b) Resíduos Classe II – não perigosos; Resíduos classe II A – não inertes; Resíduos classe II B – inertes (ABNT, 2004).

Classe I - Resíduos Perigosos: São aqueles que apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente, possuem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Classe II A- Resíduos Não inertes: Aqueles que não são resíduos classe I – perigosos ou resíduos classe II B – inertes. Podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Classe II B- Resíduos Inertes: São resíduos que não são solúveis, nem inflamáveis, não sofrem qualquer tipo de reação física ou química, nem afetam negativamente outras

substâncias que entrem em contato com esse tipo de resíduo. Podem ser dispostos em aterros sanitários ou reciclados, pois não sofrem qualquer tipo de alteração em sua composição com o passar do tempo.

De acordo com a classificação da NBR 10.004/04, o óleo residual de cozinha é classificado como resíduo perigoso por se enquadrar nas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade (ERBE; PERES, 2004).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (Resolução 313 de 2012), também dispõe sobre os resíduos sólidos, abordando sobre o inventário dos resíduos sólidos, que é o conjunto de informações e instruções gerais sobre a geração, características, armazenamento, transporte, tratamento, reutilização, reciclagem, recuperação e disposição final desses resíduos pelas indústrias do país. Enquanto o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) pela Instrução Normativa do IBAMA nº 13/2012, que tem um papel importante na implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, descreve a lista brasileira dos resíduos sólidos. E os resíduos citados nessa lista e que estão indicados com asterisco (*) são classificados como resíduos perigosos pela sua origem e em função de suas características, apresentando risco à saúde pública e ao meio ambiente.

2.3.2 Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

A PNRS define como resíduo todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade (BRASIL, 2010). Em seu artigo 16, parágrafo 3º, aborda sobre a responsabilidade dos geradores, abrangendo as atividades de coleta seletiva, recuperação e reciclagem, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos ou outros resíduos, de acordo com as peculiaridades microrregionais. Já o artigo 17, da mesma Lei, aborda sobre a proposição de cenários, com metas de redução, reutilização, reciclagem, com o intuito de reduzir a quantidade de resíduos, propondo uma disposição final ambientalmente adequada, o que representa um alinhamento com este estudo e endossa a metodologia utilizada.

O Decreto 7404/ 10, que estabelece normas para a execução da PNRS, em seu artigo 13º, aborda sobre a logística reversa como um instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado pelo conjunto de ações, procedimentos e meios

destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada. Portanto, o ciclo reverso do óleo residual de fritura, pode evitar e/ou minimizar a degradação ambiental, sendo reaproveitado como fonte de energia.

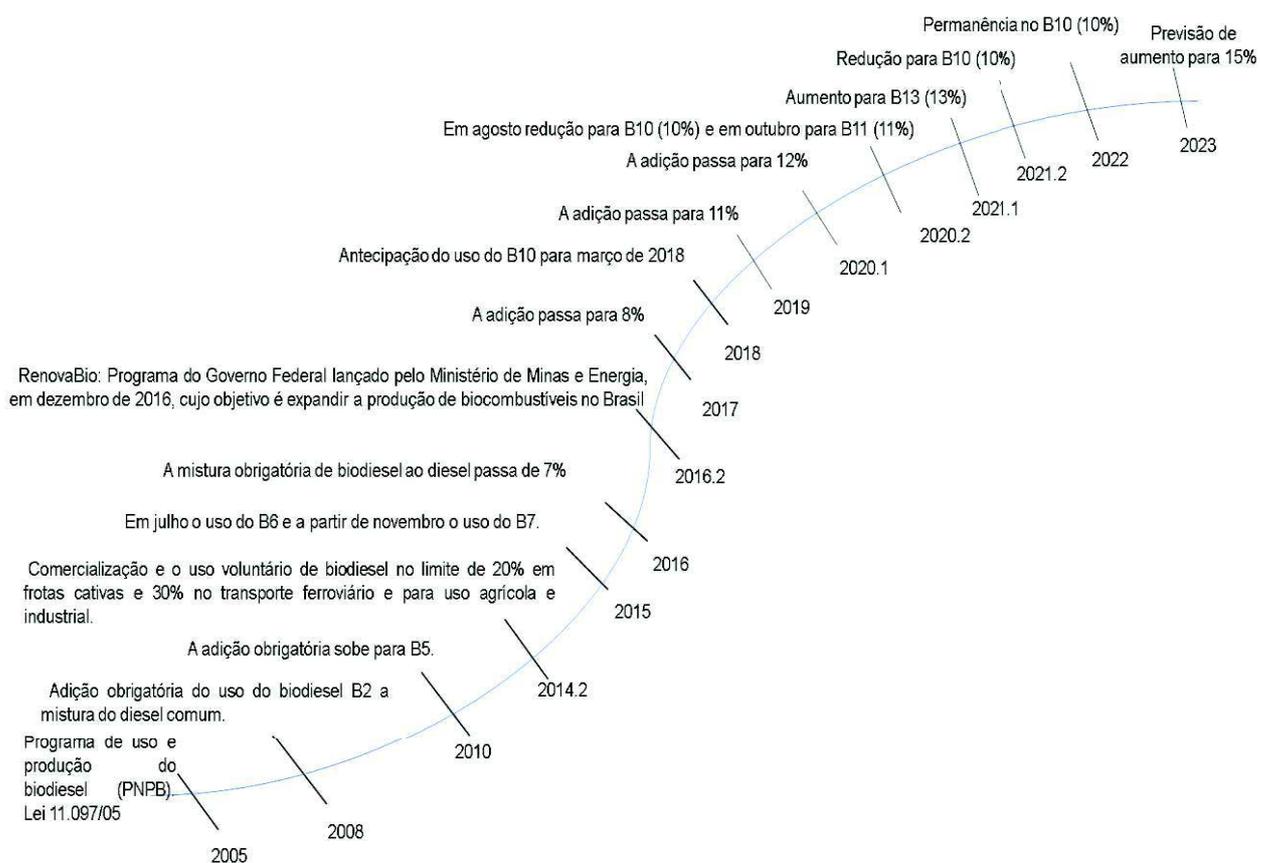
À luz dos aspectos legais e ambientais, vale ressaltar a importância da participação e atuação do governo, envolvendo diversas ferramentas de incentivo aos biocombustíveis (uso obrigatório, isenção tributária, subsídio ao produtor, etc.) com o intuito de desenvolver e consolidar o setor.

2.3.3 PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DO BIODIESEL (PNPB).

Em 2002 foi criado O PROGRAMA BRASILEIRO DE BIOCMBUSTÍVEIS (Probiodiesel), um programa nacional de desenvolvimento tecnológico de biodiesel, que mobilizou todos os setores envolvidos no desenvolvimento de biocombustíveis para avaliar a viabilidade técnica, socioambiental e econômica, visando sua utilização no país. Sua ideia original era substituir até 2005 todo o diesel consumido no Brasil por B5 (mistura de 5% biodiesel e 95% de diesel mineral) e, em quinze anos, por B20 (MCT, 2002). O probiodiesel foi um avanço no desenvolvimento do biodiesel brasileiro, contudo, o destaque no marco do biodiesel é a POLÍTICA NACIONAL DE USO E PRODUÇÃO DE BIODIESEL (PNPB), que promove a inclusão social, o desenvolvimento regional, progresso e inovação em toda cadeia produtiva, abrangendo desde a fase inicial (agrícola ou pecuária) até os processos de produção industrial, incluindo subprodutos (MME, 2005).

Diante das grandes possibilidades de matérias-primas renováveis a serem utilizadas na produção de biocombustíveis, em 13 de janeiro de 2005, foi promulgada a Lei nº 11.097 que dispõe sobre a introdução do biodiesel e a obrigatoriedade da adição ao óleo diesel. O biodiesel é miscível com o diesel fóssil em qualquer proporção e estas misturas binárias (diesel/biodiesel) são designadas pelo acrônimo BX (onde “B” significa mistura (*blend*, em inglês) e “X” refere-se à porcentagem em volume do biodiesel que é misturado ao diesel comum). Contudo, apenas em 2008, entrou em vigência a obrigatoriedade da mistura de 2% (B2), essa mistura foi aumentando ao passar dos anos, chegando a 13% em março de 2021 (ANP, 2021). É possível verificar a evolução da mistura BX na matriz energética brasileira, conforme Figura 7.

Figura 7: Evolução da mistura BX na matriz energética brasileira



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANP (2022).

De acordo com a Figura 7, é possível perceber que tem ocorrido um contínuo aumento desse percentual. Além das vantagens ambientais e econômicas com a introdução e o aumento progressivo do biodiesel ao diesel, advindas pela implantação de um programa deste porte, a produção em larga escala deste combustível renovável, pode trazer a geração de empregos e a possibilidade do Brasil ser autossuficiente na produção e uso de diesel, visto que o país ainda depende do mercado internacional para atender a demanda interna.

2.3.4 RenovaBio

Em 2017 entrou em vigor a Lei 13.576 que cria a RenovaBio, Política Nacional de Biocombustíveis, com objetivo de contribuir nos compromissos assumidos no Acordo de Paris, promover a expansão e confiabilidade dos biocombustíveis na matriz energética nacional e assegurar o mercado de combustíveis, induzindo ganhos de eficiência energética e redução de emissões (ANP, 2020). Assim, o RenovaBio surgiu como um programa do Governo Federal, cujo objetivo é expandir a produção de biocombustíveis

no Brasil, baseada na previsibilidade, na sustentabilidade ambiental, econômica e social, e compatível com o crescimento do mercado (MME, 2020).

O principal instrumento do RenovaBio é o estabelecimento de metas nacionais de redução de emissões para o setor de combustíveis, de forma a incentivar o aumento da produção e da participação de biocombustíveis na matriz energética nacional (UBRABIO, 2020). Através das metas nacionais de redução de emissões para a matriz de combustíveis que foram definidas para o período de 2019 a 2029 pela Resolução do conselho nacional de política energética (CNPE) nº15, de 24 de junho de 2019 (ANP, 2020). Essas metas estabelecidas pelo CNPE serão anualmente desdobradas em metas individuais compulsórias para os distribuidores de combustíveis, conforme suas participações no mercado de combustíveis fósseis, nos termos da Resolução ANP nº 791/2019, de 12 de junho de 2019 (ANP, 2020).

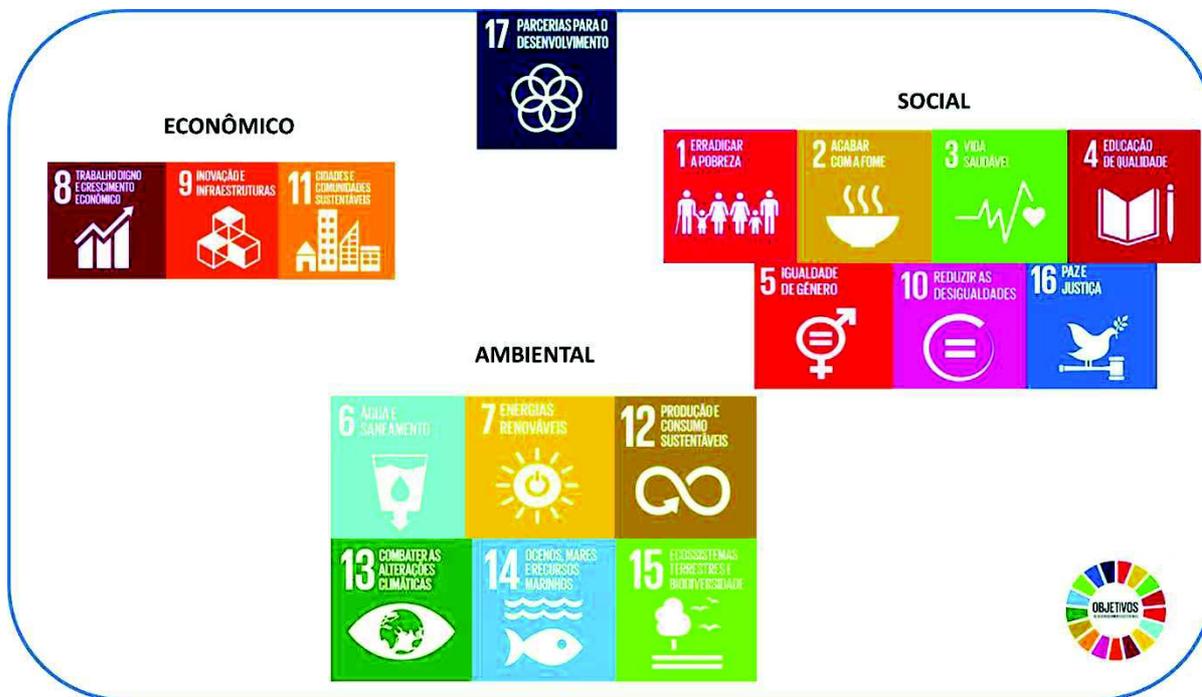
As distribuidoras de combustíveis deverão comprovar o cumprimento de metas individuais compulsórias por meio da compra de Créditos de Descarbonização (CBIO), ativo financeiro negociável em bolsa, derivado da certificação do processo produtivo de biocombustíveis com base nos respectivos níveis de eficiência alcançados em relação a suas emissões (ANP, 2020). Os produtores e importadores de biocombustíveis que aderirem voluntariamente ao programa poderão, a partir dessa produção certificada, comercializar esses créditos. O mercado de créditos de carbono pode ser uma alternativa para o controle das emissões de gases de efeito estufa, e um significativo passo o avanço de uma política global de desenvolvimento sustentável.

2.3.5 Agenda 2030 (ODS)

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável se baseiam nos oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM). Os ODM's foram estabelecidos em 2000 e incluem oito objetivos assumidos pelos países-membros da Organização das Nações Unidas (ONU), os quais tinham como meta eliminar a pobreza e a fome do mundo, e esses objetivos deveriam ser alcançados até o final de 2015. Em setembro de 2015, com o fim do prazo para os ODM's, líderes de todo o mundo tiveram a oportunidade de adotar a nova agenda de desenvolvimento sustentável e chegar a um acordo global sobre a mudança climática. Estabeleceram um plano de ação para proteger o planeta nos aspectos, sociais, econômicos e ambientais, estabelecendo a agenda 2030 para o Desenvolvimento

Sustentável, a qual contém o conjunto de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2020), conforme Figura 8.

Figura 8: Objetivos de desenvolvimento sustentável



Fonte: Adaptado de Agenda 2030, 2022.

Os ODS's precisam ser cumpridos até 2030. E afirmam a necessidade de ações que sejam capazes de melhorar a vida das pessoas em todo o mundo. A prática dessas ações determinará o futuro do planeta, desde acabar com a pobreza no mundo a promover o desenvolvimento sustentável e o bem-estar para todos, protegendo o meio ambiente dos efeitos deletérios das mudanças climáticas.

Assim, considerando-se os objetivos de desenvolvimento sustentável, o grande desafio é desenvolver estudos científicos que possam estar alinhados, senão com todos, com alguns ODS's e suas metas (itens) são integrados, de forma a contribuir para o desenvolvimento sustentável até 2030.

Desta forma, é possível identificar com quais ODS's esta tese está alinhada, associando com o compromisso de contribuir com o desenvolvimento sustentável, ao apresentar uma maneira ecologicamente correta de destinação de um resíduo, estimulando a redução de possíveis impactos negativos ao meio ambiente, transformando um resíduo em fonte de energia limpa e sustentável (Figura 9).

Figura 9: Objetivos de desenvolvimento sustentável alinhados com o estudo

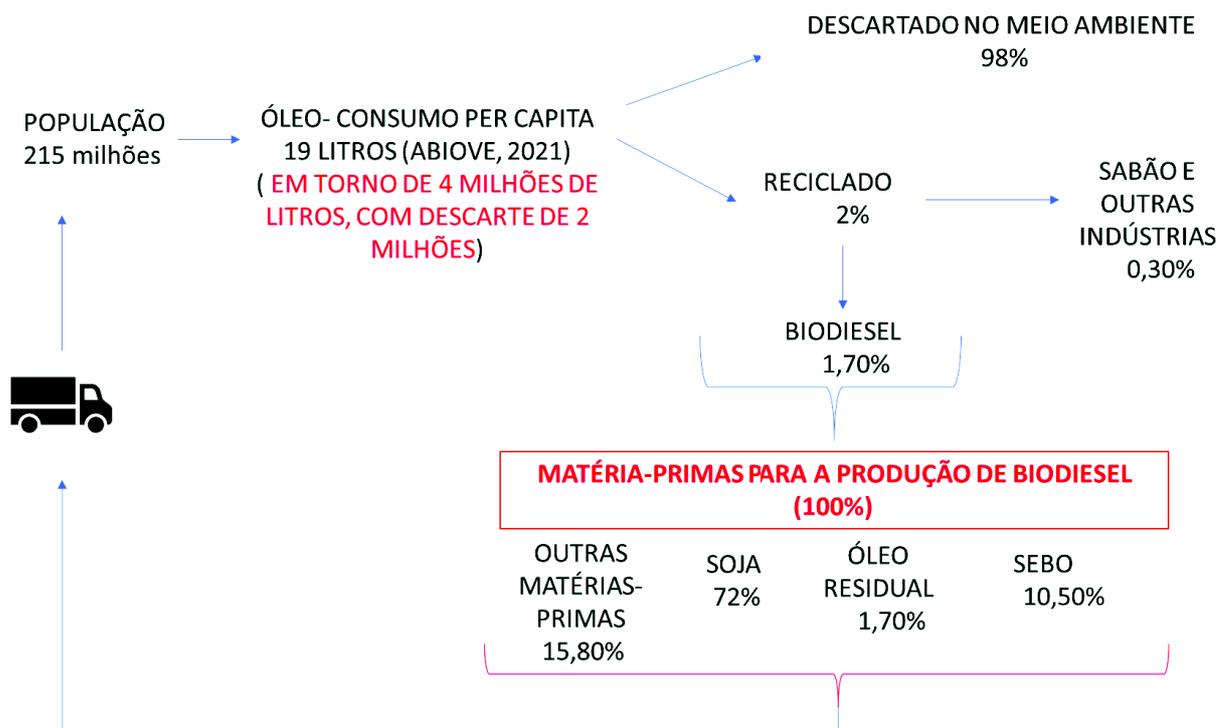


Fonte: ONU, 2022.

A utilização de uma matéria-prima que seria descartada pode trazer vários benefícios para a matriz energética mundial, pois além de evitar o descarte inapropriado deste resíduo, evitando a contaminação dos rios, lagos, lençóis freáticos e do solo, ainda possibilita o aumento da produção pela inserção de um novo insumo energético, representando uma alternativa a escassez de recursos de natureza finita.

Atualmente o Brasil possui uma população com cerca de 215 milhões de habitantes e de acordo com a associação brasileira de óleos vegetais (IBGE, 2022). De acordo com dados da Abiove (2021), o consumo de óleos vegetais é em torno de 19 litros/ano per capita, neste sentido, consome-se cerca de 4 bilhões de litros de óleo. No processo de cocção de alimentos existe uma perda em torno de 50% dos óleos vegetais, devido a evaporação ou absorção dos alimentos, assim, no Brasil gera-se 2 bilhões de litros de óleo residual, apenas relacionado ao consumo de óleos vegetais nas residências. Ainda segundo dados da Abiove (2021), o Brasil recicla apenas 2% de todo o resíduo de óleo que é gerado (Figura 10). E o atendimento a ODS 11, vem no intuito de promover a gestão desse resíduo, reduzindo o impacto ambiental causado por descartes inadequados.

Figura 10: Consumo e descarte de óleos no Brasil



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ABIOVE e ANP (ano base 2021), 2022.

Pensar em um modelo de gestão circular, ressignificando a forma como se produz e se consome, para desenvolver uma economia regenerativa e restaurativa, evoluindo de um modelo econômico linear (produzir-consumir-descartar) para um modelo econômico circular. E no que tange o setor dos biocombustíveis, estaria alinhado a esse modelo econômico circular, o uso de matérias-primas residuais, que não possuíam nenhum valor, para a produção de biodiesel.

Desta forma, o uso de ORF como matéria-prima para a produção de biodiesel, pode representar a reestruturação da cadeia produtiva de bicombustíveis com a reintegração de um resíduo em seu ciclo produtivo.

3 ECONOMIA CIRCULAR (EC)

O atual modelo econômico e produtivo provoca diversos impactos negativos ao meio ambiente, devido aos seus processos de produção de forma linear, onde se extrai grandes quantidades de recursos naturais, ocasionando uma grande geração de resíduos. Assim, a economia circular propõe uma mudança desse processo linear para um processo cíclico, onde os resíduos são reinseridos na cadeia produtiva. Sendo uma proposta inovadora, resultando em impactos positivos, como a redução da demanda por matérias-primas, redução do consumo de recursos básicos, e a criação de emprego, bem como

prevenir impactos negativos resultantes da exploração e processamento de recursos naturais (XAVIER *et al.*, 2019).

3.1 Conceitos e instrumentos

A demanda humana sobre o planeta supera a capacidade de repor os recursos naturais. Nos últimos 50 anos, 60% do ecossistema da terra foi destruído e até 2030 o planeta terá três bilhões de novos consumidores, produzindo mais, consumindo mais e descartando seus resíduos (WEETMAN, 2019).

Desta maneira, nos últimos anos, os esforços para se desenvolver produtos e serviços mais sustentáveis e eficientes, com redução dos impactos ambientais, são questões que impulsionam a necessidade de reduzir o desperdício e ainda obter ganhos econômicos e ambientais. Verifica-se, portanto, a inevitabilidade da transição de uma economia linear para uma economia circular. O modelo tradicional (linear) segue um determinado padrão “*produce-use-dispose*”, que se baseia no uso de fontes não renováveis e finitas, com descarte de forma inapropriada. A economia circular, por sua vez, pressupõe sistemas regenerativos, restaurativos e circulares (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013).

Neste sentido, a economia circular se apresenta como um novo modelo de gestão que atrelado aos conceitos de sustentabilidade interfere em diversos aspectos na forma como se produz e consume, para desenvolver uma economia regenerativa e restaurativa, evoluindo de um modelo econômico tradicional para um modelo econômico circular. Ainda que seja simples de entender a importância dessa mudança, é uma dificuldade implementá-lo em países com situações econômicas e tecnológicas diferentes (XAVIER *et al.*, 2019).

3.2 Disseminação das práticas de EC

A utilização de um novo modelo econômico pautado na economia circular, que faz uso de tecnologias baseadas na reinserção dos resíduos e produtos pós-consumo na cadeia produtiva, visando ampliar as oportunidades e perspectivas na cadeia de produção de biodiesel, permitindo que o resíduo de um processo se torne matéria-prima de outro, maximizando o aproveitamento de recursos.

A transformação de um resíduo em fonte de energia limpa, representa uma valorização desta matéria-prima, por meio da utilização em um outro processo. Essa definição é conhecida como *upcycling*, que promove um processo de reconversão de resíduos em novos materiais ou produtos de maior valor acrescentado (QUARTIM, 2011). O *Upcycling* é um processo de modificação de um usado em outro produto/material com maior qualidade e durabilidade como também acrescido valor ambiental. Tem como benefícios a redução da quantidade de resíduos produzidos que passariam largos anos em aterros ou lixeiras; a diminuição da necessidade de exploração de matérias-primas para a fabricação de novos produtos e a redução do desperdício de materiais fazendo uso de outros já existentes.

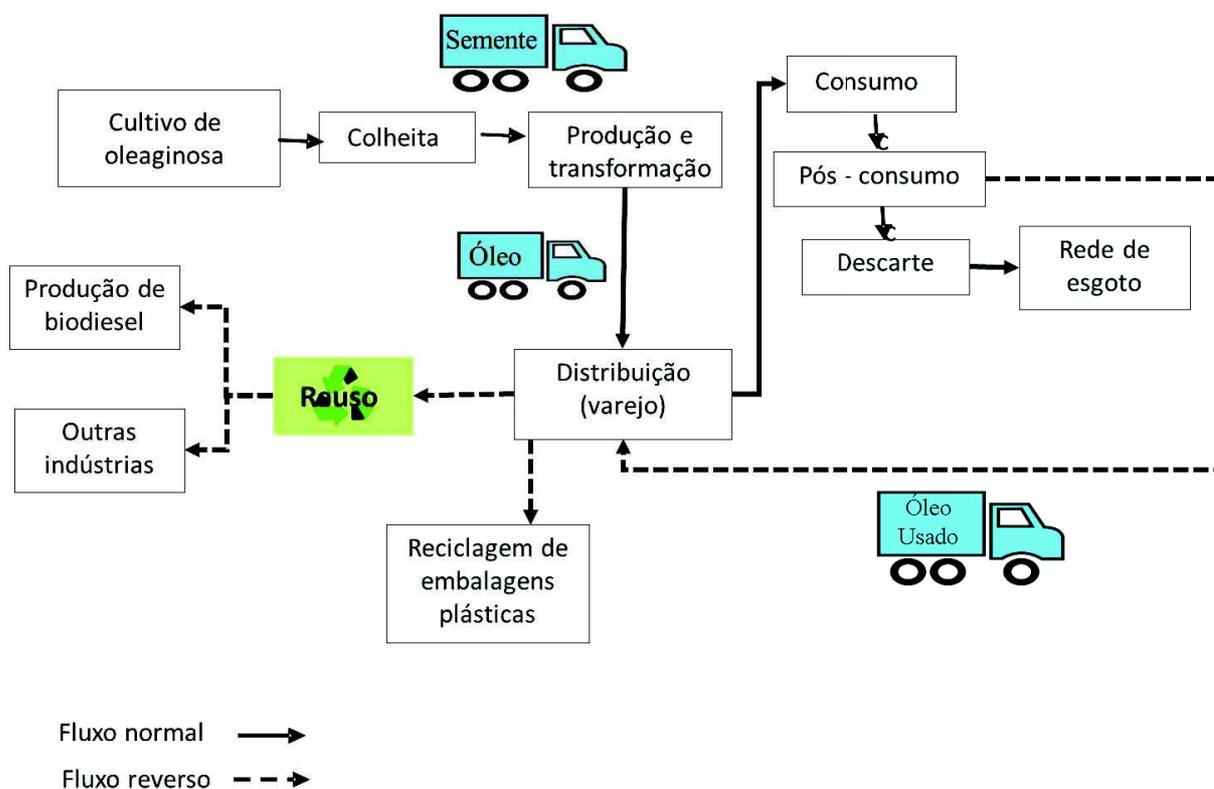
Assim, a economia circular ultrapassa os conceitos relacionados apenas a gestão de resíduos e de reciclagem, visando o desenvolvimento de novos produtos e serviços que sejam economicamente viáveis e ecologicamente eficientes, seguindo um conceito restaurativo e regenerativo (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013). E de acordo com os princípios da EC, os resíduos não devem ser descartados, mas passar por um processo de *upcycling* (LEITÃO, 2015). O *upcycling* é uma ferramenta que mais se adequa ao modelo de economia circular, transformando resíduos, sem nenhum valor pós-consumo e que seriam descartados, em produtos de igual ou maior valor que o produto original antes de sua utilização, uma vez que o *upcycling* apresenta soluções circulares sustentáveis, eliminando a necessidade de um novo produto a partir de materiais virgens e reconhecendo o valor da transformação e adaptação de material residual para utilizá-los em algo totalmente novo (SUNG, 2015).

3.3 Economia circular para a produção de biodiesel

A economia circular é um instrumento que tem como premissa a circularidade dos recursos, ampliando o conceito de sustentabilidade. A disponibilidade e sustentabilidade dos recursos energéticos e secundários mostra a importância de recursos alternativos mostra que os combustíveis alternativos e sustentáveis na matriz energética nacional. Além da redução da poluição ambiental, há o aspecto social, de fundamental importância, sobretudo considerando a possibilidade de desenvolvimento sustentável e regional, especialmente na geração de emprego e renda. (SILVA FILHO, 2010).

A economia circular pode ser uma alternativa para promover a dissociação entre o crescimento econômico e o aumento no consumo de recursos, relação até aqui vista como inexorável (MONTEIRO, 2018), promovendo um modelo estruturado, através da coordenação dos sistemas de produção e consumo em circuitos fechados, como o caso do biodiesel, que permite que se estabeleça um ciclo fechado de carbono, no qual o CO₂ é absorvido quando a planta cresce e é liberado quando o biodiesel é queimado na combustão do motor. A economia circular está ganhando destaque em nível global como alternativa atraente ao modelo de economia linear de extração, transformação e descarte, o que oferece uma oportunidade para que a sociedade prospere ao mesmo tempo em que reduz sua dependência de materiais finitos e fontes de energia não renováveis (Figura 11).

Figura 11: Destinação convencional e destinação reversa do ORF.



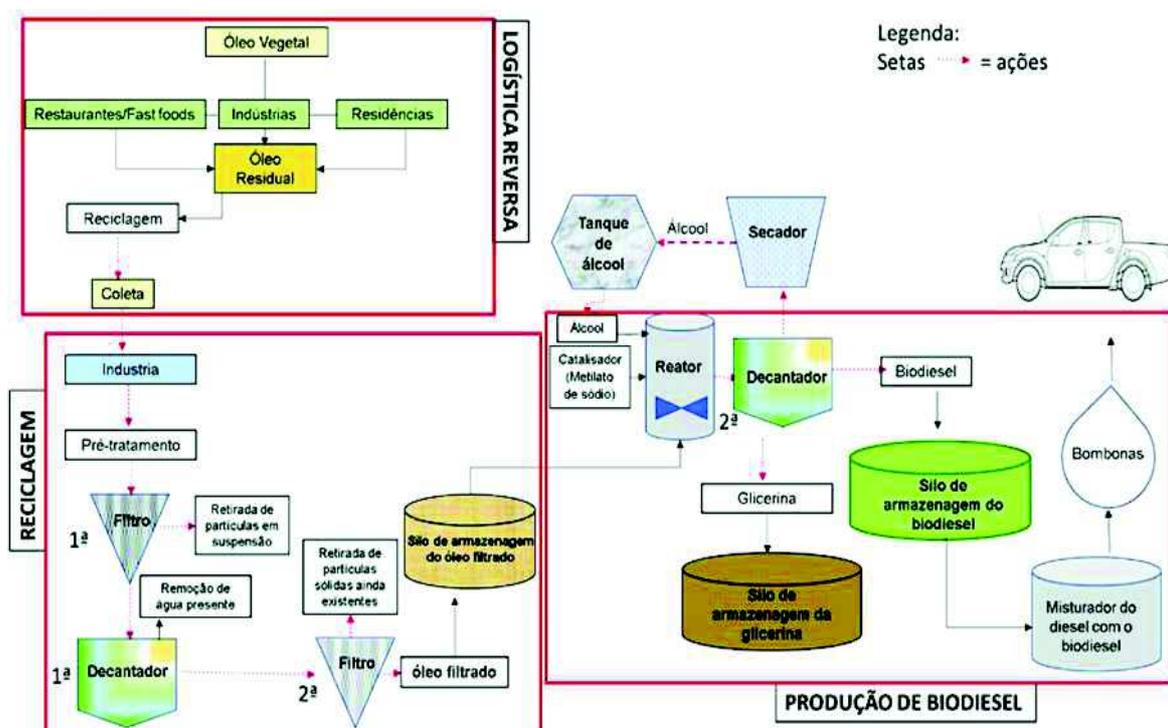
Fonte: Elaboração própria, 2021.

Segundo Wu *et al.*, (2010) a disponibilidade da matéria-prima será um fator determinante para o desenvolvimento da cadeia produtiva do biodiesel. Desta maneira, a utilização de matérias-primas secundárias, passa a ser uma ferramenta importante para o desenvolvimento da indústria energética mundial e a economia circular pode aumentar a participação de matérias-primas residuais na produção de biodiesel, potencializando a

competividade nacional frente ao mercado internacional de produção de biocombustíveis, levando em consideração que a utilização do óleo de fritura para produção de biodiesel é o valor agregado à reutilização de um resíduo industrial.

O reaproveitamento de uma matéria-prima residual é um aspecto que reforça a importância econômica da circularidade dos produtos, para manter o processo de fluxo de materiais e produtos em sua maior utilidade, transformando um resíduo em um novo recurso. A Figura 12 apresenta um esquema de recirculação do óleo de fritura pós-consumo para a produção de biodiesel.

Figura 12: Aproveitamento do resíduo de óleo de fritura para produção de biodiesel.



Fonte: Elaboração própria, 2021.

A partir do esquema proposto é possível identificar a importância do processo de coleta do insumo (restaurantes/fast foods, indústrias e residências), da reciclagem, do pré-tratamento da matéria-prima onde é gerado o óleo filtrado, que segue como insumo para a cadeia de produção do biodiesel.

Embora ainda tenha uma participação incipiente na produção de biodiesel, são grandes as motivações para o uso desta matéria-prima, desde a disponibilidade de oferta da matéria-prima ao custo reduzido por se tratar de um insumo residual até a minimização do impacto ambiental. A ressignificação deste insumo representa um aumento da

participação do óleo residual de fritura na matriz energética nacional. A introdução do óleo residual de fritura na cadeia de biodiesel ainda é bastante modesta (Tabela 3), contudo, pode representar uma fonte potencial de abastecimento de energia futura.

Tabela 3: Utilização do óleo residual de fritura para produção de biodiesel

Matéria-prima	Outubro/21	Novembro/21	Dezembro/21	Janeiro/2022	Fevereiro/2022
Óleo de Fritura	1,08%	1,11%	1,60%	1,64%	1,70%

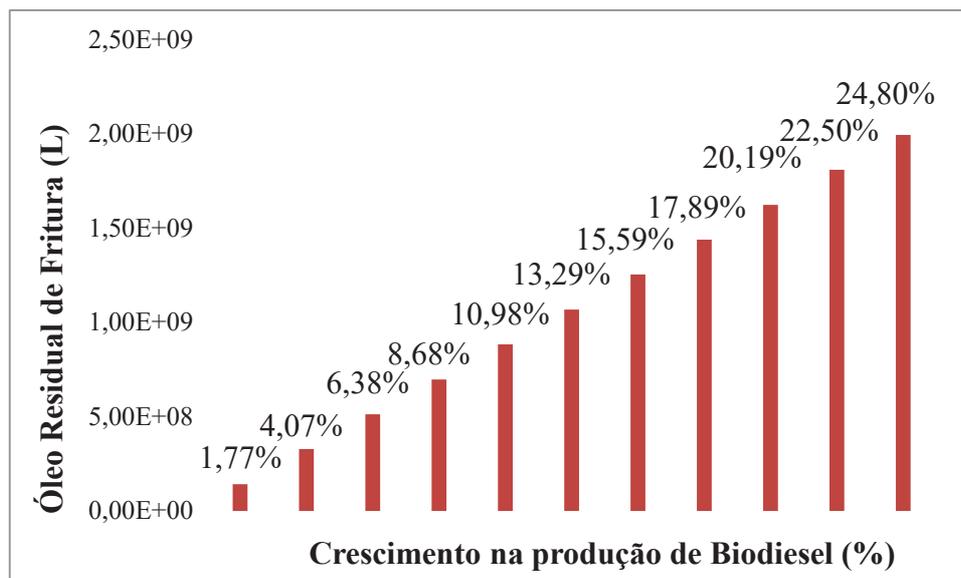
Fonte: Elaborado a partir de dados da ANP, 2022.

*O percentual de matéria-prima apresentado se refere ao total de matéria-prima processada e foi extraído do Sistema de Movimentação de Produtos da ANP, última atualização em 05/02/2022.

No momento utiliza-se em média cerca de 1,70% de todo óleo residual gerado no Brasil para a produção de biodiesel. No mesmo período em 2021 foi utilizado cerca de 1,60% de todo óleo residual gerado.

O total de produção de biodiesel anual (2021) foi cerca de 6.8 bilhões de litros, desses, em torno de 1,70% é proveniente de óleo residual, cerca de 113.829.000 L são de biodiesel de óleo residual de fritura (ANP, 2022). A conversão do óleo residual de fritura em biodiesel é de 80%, ou seja, para cada 1L de óleo residual gera-se 0,8 L de biodiesel (PASQUALETTO e BARBOSA, 2008). Utilizando-se desta conversão, para gerar 113.829.000 L de biodiesel, foi necessário o uso de 142.286.250 L de óleo de fritura, uma parte ínfima de todo o resíduo que é gerado anualmente, somente pela população brasileira. Caso todo o resíduo de óleo de fritura, que atualmente é descartado, fosse utilizado para este fim, a produção nacional de biodiesel aumentaria em quase 25%, conforme Figura 13.

Figura 13: Produção de biodiesel utilizando todo o resíduo de óleo de fritura gerado anualmente pela população brasileira.



Fonte: Elaboração própria, 2022.

A participação majoritária da soja na matriz energética brasileira em relação as outras matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel, reflete ainda a desinformação a respeito do aproveitamento de outros insumos, incluindo os residuais, como o óleo residual de fritura. E a produção de biodiesel impulsionada pela utilização de matéria-prima residual vem crescendo nos últimos anos, mostrando grande potencial devido ao aumento da demanda por produtos menos poluentes e promissora ascensão para o segmento da economia.

O uso de matérias-primas residuais para a produção de um biocombustível movimenta diferentes modelos de negócio sustentável desde a coleta e processamento do insumo até a produção, representando um conjunto de boas práticas industriais no segmento produtivo de biodiesel, podendo ser uma solução desejável no âmbito da economia circular na esfera mais ampla da gestão ambiental, contribuindo para mitigar os efeitos negativos que o descarte inadequado deste resíduo pode trazer ao meio ambiente.

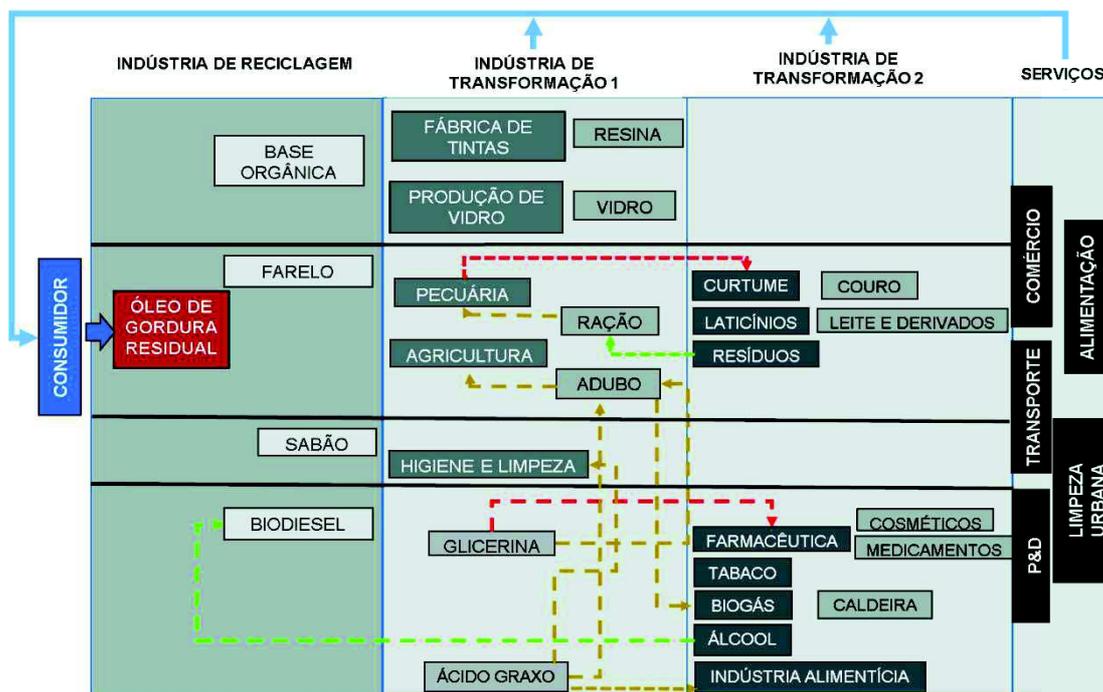
Desta forma, apesar do biodiesel poder ser produzido a partir de qualquer tipo de matéria-prima oleaginosa, os óleos residuais de fritura se tornaram uma opção atrativa, uma vez que mitigam o impacto do descarte inadequado dos resíduos e permitem a redução do custo do insumo e da viabilidade do processo como um todo.

3.4. As contribuições da cadeia de biodiesel de óleo residual de fritura para a economia circular

A utilização do ORF está associada à competitividade industrial, visto que é uma matéria-prima que é um subproduto da cocção de alimentos e possui um custo inferior à soja, principal matéria-prima utilizada na produção de biodiesel. Apesar de o óleo residual ser uma matéria-prima em ascensão, por apresentar benefícios econômicos à produção do biodiesel, como uma matéria-prima de baixo custo, o óleo residual de fritura, também deixa de representar problemas em sua disposição final, visto que atualmente grande parte de seu destino é a produção de biodiesel.

Nesse contexto, o fortalecimento dos princípios da economia circular no país, quanto ao desenvolvimento de fontes mais limpas de energia, se torna uma estratégia para aumentar a participação de insumos residuais na matriz energética brasileira, a fim de potencializar a competitividade nacional frente ao mercado internacional, criando uma plataforma bioenergética sólida, abrangendo e beneficiando novos mercados (Figura 14).

Figura 14: Fluxo sequencial de interação para economia circular a partir do ORF



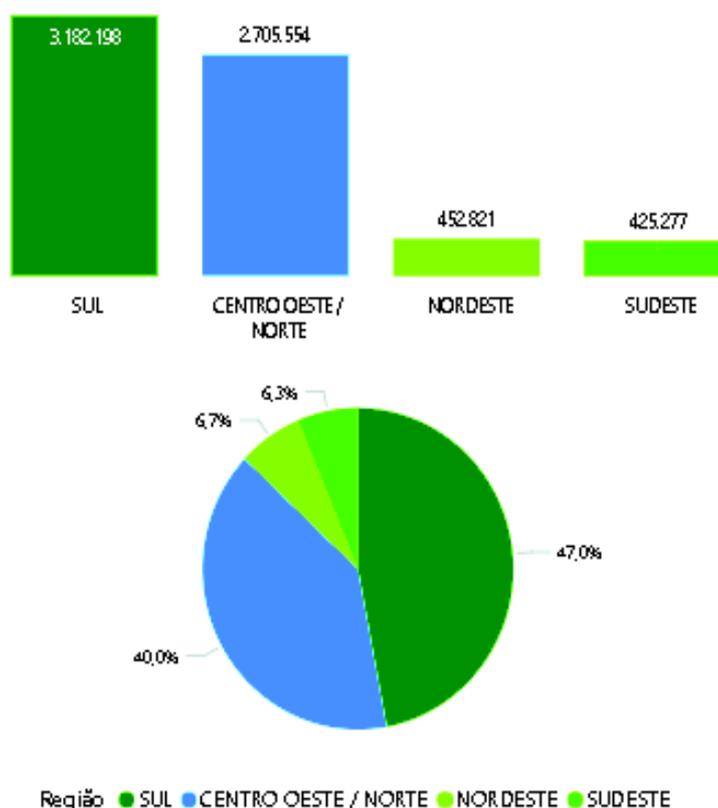
Fonte: Elaboração própria, 2022.

Quanto a beneficiar novos mercados, a EC busca por meio da sinergia entre as indústrias, o compartilhamento dos produtos. O reuso de resíduos, dentro de uma nova

alternativa de produção, pode estimular competitividade ao setor energético nacional, ao estabelecer uma ligação entre inovação e sustentabilidade.

A indústria de biodiesel tem crescido ao longo da última década. Em 2020 a produção chegou a quase 6.43 bilhões de litros e em 2021 chegou a produzir 6.75 bilhões de litros (Figura 15).

Figura 15: Produção anual de biodiesel no Brasil (2021)



Fonte: ANP (Ano base 2021), 2022.

Este crescimento da produção de biodiesel, provavelmente acontece devido ao aumento da mistura diesel/biodiesel que estimula a adição de biocombustíveis no cenário energético brasileiro, o que favorece, de certa forma, a inserção de novos insumos, que podem representar soluções, de forma equilibrada e sustentável, para a matriz energética nacional, trazendo respostas para possíveis escassezes de matérias-primas ou representar uma possibilidade de recurso em situações emergenciais, que podem trazer instabilidade para o setor de biocombustíveis no país. Embora o setor de biodiesel tenha sofrido com as turbulências da pandemia, as usinas conseguiram colocar um total de 6,75 bilhões de litros de biodiesel no mercado.

3.5 Economia circular e Química verde (QV)

A QV é definida pela IUPAC (*International Union for Pure and Applied Chemistry*) como: “Invenção, projeto e aplicação de produtos químicos e processos para reduzir ou eliminar o uso e geração de substâncias perigosas” (AYRES & AMARAL, 2016). A QV pode ser uma importante ferramenta na integração com a economia circular, oferecendo oportunidades de tecnologias limpas, menos poluentes, sustentáveis e seguras, onde se vislumbra um futuro sustentável e um meio ambiente menos poluído. Desta forma, com intuito de desenvolver processos mais sustentáveis e limpos, onde pouco ou nenhum resíduo é gerado, foram desenvolvidos os 12 Princípios da Química Verde (PQV), a fim de ajudar os processos químicos a alcançarem a sustentabilidade (ANASTAS e EGHBAL, 2009 e MESTRES, 2013). São eles:

- 1.Prevenção:** evitar a formação de resíduos tóxicos.
- 2.Eficiência Atômica:** incorporar o maior número possível de átomos dos reagentes no produto final.
- 3.Síntese Segura:** metodologias sintéticas que utilizam e geram substâncias com pouca ou nenhuma toxicidade à saúde humana e ao ambiente.
- 4.Desenvolvimento de Produtos Seguros:** produtos que não causem danos ao ambiente
- 5.Uso de Solventes e Auxiliares Seguros:** utilização de substâncias auxiliares inócuas ou facilmente reutilizáveis como solventes, agentes de purificação e secantes.
- 6.Busca pela Eficiência de Energia:** desenvolvimento de processos que ocorram à temperatura e pressão ambientes.
- 7.Uso de Fontes de Matéria-Prima Renováveis:** uso de biomassa como matéria prima deve ser priorizado.
- 8. Evitar a Formação de Derivados:** evitar processos que envolvem intermediários com grupos bloqueadores, proteção/desproteção, ou qualquer modificação temporária da molécula.
- 9.Catálise (Seletividade):** em substituição aos reagentes estequiométricos.
- 10. Produtos Degradáveis:** biocompatibilidade; não devem permanecer no ambiente, degradando-se em produtos inócuos.
- 11.Análise em Tempo Real para a Prevenção da Poluição:** possibilidade de formação de substâncias tóxicas deverá ser detectada antes de sua geração.
- 12. Química Intrinsecamente Segura para a Prevenção de Acidentes:** minimização do risco de acidentes, como vazamentos, incêndios e explosões.

Assim, a EC e a QV, compartilham da mesma intenção: a sustentabilidade dos processos. Desta forma, os PQV podem ser utilizados como uma ferramenta para auxiliar na implantação do modelo econômico circular em empresas e organizações, tornando seus processos mais sustentáveis e circulares, sem perder sua eficiência e qualidade.

O ORF se encaixa perfeitamente neste modelo circular de retorno a cadeia produtiva com valor econômico agregado. O óleo residual utilizado como matéria-prima

para a produção de biodiesel é um exemplo de EC e QV na prática, pois caracteriza a tentativa de reduzir ao máximo o impacto sobre o meio ambiente, promovendo o desenvolvimento sustentável através da eliminação de um resíduo extremamente nocivo ao meio ambiente, fornecendo um produto (biodiesel) sustentável através da valorização e utilização de uma matéria residual.

4 ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA (ORF) COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A PRODUÇÃO DE BODIESEL

Atualmente, a maior parte da produção de biodiesel no Brasil é de origem vegetal. Essas oleaginosas apresentam um grande potencial para plantio e exploração do óleo para fins energéticos (CASTELLANELLI, 2016), com notável predominância da soja, que tem fornecimento contínuo e de grande escala, com participação entre 75% a 80% do total da produção nacional (ANP, 2020). E dentre os recursos secundários, destacam-se o sebo bovino e o óleo residual de fritura.

A utilização do óleo vegetal residual, resultante da alimentação, não representa nem 2% da produção nacional de biodiesel (ANP, 2020), demonstrando que este insumo ainda tem baixa representatividade, evidenciando um segmento ainda pouco investigado. Wust (2004), aborda sobre três benefícios com a utilização de óleos residuais de fritura como insumo para a produção de biodiesel:

1. Ponto tecnológico: define-se pela dispensa do processo de colheita, extração e esmagamento, que os óleos vegetais precisam passar;
2. Ponto econômico: define-se pelo custo, por se tratar de uma matéria-prima residual, o preço de mercado é baixo e estabelecido;
3. Ponto ambiental: define-se pela destinação do resíduo, que em sua maioria é descartado indevidamente, impactando o solo e o lençol freático.

O aproveitamento de óleo residual de fritura para geração de energia traz um incentivo a novas perspectivas para a matriz energética brasileira e mundial acerca da utilização de insumos residuais na cadeia produtiva de um biocombustível. E segundo Tsoutsos *et al.*, (2019) o uso do biodiesel produzido a partir de óleo residual de fritura pode trazer algumas vantagens energéticas, tais como:

i) redução da distância para transporte de combustível, tendo em vista que a produção e consumo podem ocorrer por meio de usinas piloto e próximo ao local de geração do resíduo;

ii) o aumento da segurança energética em virtude da consolidação de uma opção sustentável;

iii) o aumento potencial da produção energética descentralizada.

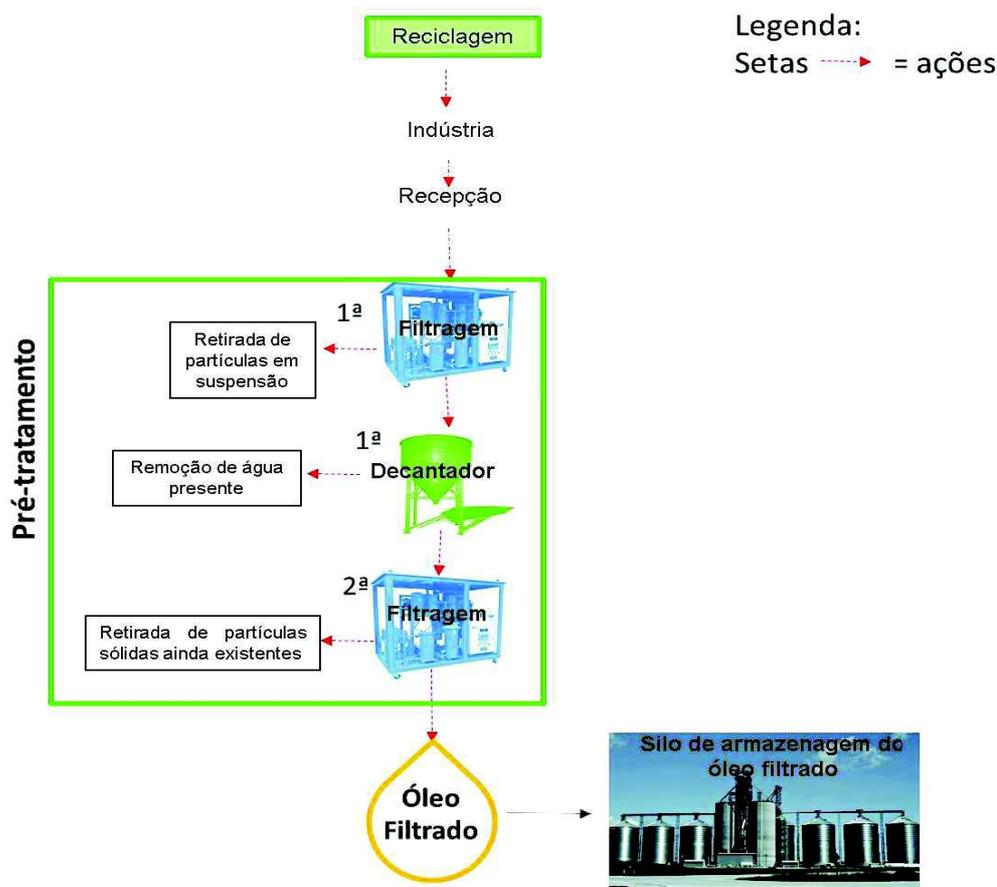
A utilização desse rejeito como matéria-prima para a produção de biodiesel, pode se estabelecer como uma nova alternativa energética para suprir as crescentes demandas por combustíveis renováveis no cenário nacional e internacional. O uso de ORF pode ter uma importante atuação como uma nova potencial matéria-prima para ser utilizada na produção de biodiesel, representando o aperfeiçoamento de toda cadeia produtiva de biodiesel, visto que, o segmento necessita mobilizar esforços, recursos e conhecimentos na busca pelo desenvolvimento do setor (COSTA NETO, 2000) e independência energética.

E no Brasil, ficou clara a necessidade de agregar valor à produção nacional com mais sustentabilidade. Devido a diversidade da riqueza natural e imenso potencial produtivo, o Brasil encontra nos biocombustíveis provenientes de material residual, a combinação ideal de desenvolvimento econômico, social e ambiental.

4.1 Aproveitamento de uma matéria-prima residual

Alguns fatores, porém, poderão limitar a utilização do óleo residual de fritura como matéria-prima, devido ao fato de existirem impurezas que para serem eliminadas precisam de um pré-tratamento, podendo gerar custo no processo. Os óleos residuais de fritura necessitam de processos de purificação antes de serem utilizados nos processos de produção do biodiesel (Figura 16).

Figura 16: Processo simplificado e ilustrativo de purificação de ORF



Fonte: Elaboração própria, 2021.

Inicialmente, o óleo residual de fritura passa por diversos processos de filtração, para remover as partículas que se encontrem em suspensão e as impurezas sólidas, em seguida, passa por um processo de decantação para remover a água presente. A partir destes processos de filtração e decantação, o óleo, limpo e filtrado, passa a estar apto para ser inserido no processo de produção do biodiesel.

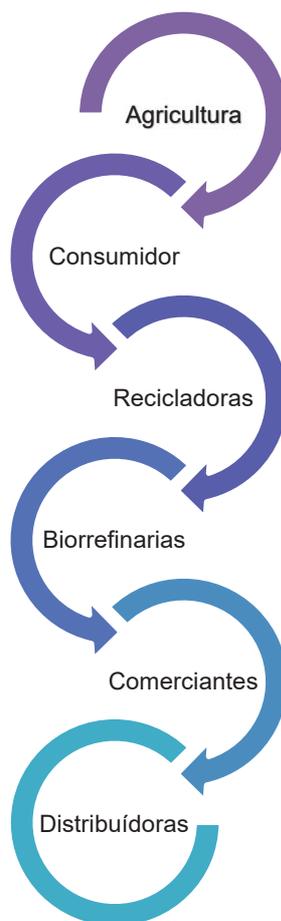
4.2 Biodiesel de Óleo Residual de Fritura

De acordo com dados da Ubrabio (2021), até 2012, o óleo residual de fritura ainda não possuía representatividade na cadeia produtiva do biodiesel, somente a partir de 2013 que passou a corresponder por 1,5% na produção. As matérias-primas residuais podem ser promissoras na substituição aos insumos vegetais e virgens, pois apresentam um custo inferior a estes (SHEINBAUM-PARDO *et al.*, 2013). E o custo da matéria-prima ainda é um entrave para tornar o biodiesel um recurso competitivo de energia e a necessidade de matérias-primas mais baratas pode colocar o óleo residual de fritura no centro das

atensões dos grandes produtores e com o incentivo e impulso do biodiesel, os óleos residuais de fritura tornam-se uma opção atraente de matéria-prima em razão do potencial de reinserção como insumo a um baixo custo (ATABANI *et al.*, 2011).

Um estudo realizado por ZHANG *et al.*, (2012) aponta como fator limitante para se produzir biodiesel de óleo residual de fritura, a cadeia de fornecimento, dado que a disponibilidade desses materiais residuais dependem da logística de captação desses óleos e gorduras. A cadeia de fornecimento dos óleos residuais possui diversos elos e eles precisam trabalhar de forma estruturada e alinhada, para que suas atividades sejam coordenadas buscando a otimização dessa cadeia, desde o elo inicial (fornecedor) de matéria-prima (óleo residual) ao elo final (Consumidor). Existem seis grandes elos que fazem parte da cadeia de produção do biodiesel de óleo residual de fritura, sendo fundamentais para o mercado do biodiesel de óleo residual e as dinâmicas do fornecimento de biodiesel até o consumidor final (Figura 17).

Figura 17: Elos da cadeia do biodiesel de óleo residual de fritura



Fonte: Elaboração própria, 2021.

O primeiro agente é o setor agrícola onde planta-se a oleaginosa, que após a colheita seguirá para a extração do óleo, que terá como destino, a produção de farelo proteico e o óleo, este último seguirá para exportação e consumo interno (ABIOVE, 2020). O segundo agente, o consumidor, utiliza o óleo para fins alimentícios, e deste consumo é gerado o óleo residual, que além de ser descartado de forma indevida, parte dele segue para as recicladoras.

O terceiro agente são as recicladoras independentes, elas apenas processam o óleo pós-consumo, elas circulam em pequenas e grandes indústrias, recolhem esse material que não seria utilizado, filtram as impurezas e produzem o óleo refinado para ser reutilizado em outros tipos de mercado.

O quarto agente são as biorrefinarias, que em sua maioria possui tudo de forma integrada, compra-se a semente, possui esmagadora própria, produz e vende o farelo proteico e o óleo. As biorrefinarias são indústrias análogas às refinarias de petróleo, entretanto, integram processos de conversão da biomassa em combustíveis e em energia. Estas biorrefinarias, quando bem estruturadas, podem conseguir produções com quase nenhum resíduo, produzindo em grande escala bioetanol, biogás, biometano e biocombustíveis.

As biorrefinarias estão relacionadas a processos industriais que empregam rotas tecnológicas capazes de converter matéria-prima de origem renovável (biomassa) em outras de maior valor agregado, como biocombustíveis, eletricidade, calor e insumos químicos (BNDES, 2017).

O quinto agente que são os comerciantes, que circulam entre as pequenas empresas que produzem pequenos volumes de óleo residual de fritura, coletam esse óleo, faz um volume considerável, e vende para um grande produtor de biodiesel, para uma grande indústria saboeira, ganhando comissão em cima disso, fazendo a intermediação, entre donos de recicladoras e as biorrefinarias.

O sexto e último agente que são as distribuidoras, que compram o biodiesel pronto, abastecem os postos de gasolina. Essas distribuidoras que compram o biodiesel das biorrefinarias misturam com o diesel mineral e produzem o diesel que é vendido nas bombas, contudo, esse biodiesel é comprado através da dinâmica dos leilões. O mercado funciona desta forma, a distribuidora compra da Petrobrás, considerada pela ANP, a única adquirente de biodiesel, que compra das biorrefinarias.

4.3 Utilização de diesel com diferentes misturas de biodiesel de óleo residual de fritura

A introdução do biodiesel na matriz energética nacional foi antecedida por testes e ensaios para analisar o desempenho do motor, a durabilidade e necessidade de manutenção, em função da utilização de uma nova composição do combustível e de acordo com dados da literatura, o biodiesel atende os quesitos de qualidade e as especificações estabelecidas por Lei, tendo desempenho e resultados semelhantes aos do diesel. O uso dessas misturas diesel/biodiesel colabora com o comprometimento dos países para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (OMENA, 2013) e a ampliação do uso do biodiesel no país e no mundo. Alguns países utilizam a mistura B10 e outros fazem uso de uma mistura com maior teor de biodiesel adicionado ao diesel, conforme Tabela 4.

Tabela 4: Teor de Biodiesel utilizado no diesel em diferentes países em 2021.

País	Biodiesel
Argentina	B10
Brasil	B10
Colômbia	B12
Costa Rica	B20
Índia	B20
Indonésia	B30
Malásia	B20
Irlanda	B10
Estados Unidos	B10

Fonte: Adaptado a partir de REN2, 2021.

O aumento da adição do biodiesel ao diesel, reforça a posição de destaque que o Brasil ocupa em relação a participação na produção e uso de biocombustíveis. O biodiesel e suas misturas com o diesel são atualmente investigados como uma solução viável para os problemas de esgotamento dos combustíveis fósseis e degradação ambiental (ABED *et al.*, 2018 e MOHD *et al.*, 2018). O uso de uma mistura mais rica em combustíveis renováveis pode contribuir para a autossuficiência energética, com a redução da dependência externa de energia e colabora de forma significativa para impulsionar o setor energético no país.

Existem diversas pesquisas publicadas, na qual analisaram diferentes proporções de misturas diesel/biodiesel de óleo residual de fritura, para determinar o desempenho,

avaliar o consumo e as emissões de gases poluentes, a fim de verificar a efetividade do aumento do teor nas misturas. A seguir uma breve revisão de algumas dessas pesquisas.

Segundo Mittelbach e Tritthart (1988), a utilização de biodiesel de óleo de fritura em motores do ciclo diesel apresentou bons resultados. Os testes foram realizados em bancada dinamométrica e em veículo de carga média com motor turbinado a diesel. Quanto à avaliação da emissão de gases, demonstrou que houve um aumento relativo na liberação de gases nitrogenados, particularmente quando o biocombustível foi comparado ao diesel convencional, enquanto os níveis de hidrocarbonetos, monóxido de carbono e materiais particulados foram inferiores ao diesel.

De acordo com Peterson e Reese (1994), testes nas emissões mostraram uma diminuição de 54% em HC (Hidrocarboneto), 46% de CO₂ (Dióxido de carbono) e 14,7 de NOx (Óxido Nítrico) na utilização do biodiesel obtido através de óleo de fritura residual, em comparação ao diesel convencional.

Ali *et al.*, (1996), realizaram uma das pesquisas precursoras do uso de biocombustíveis, produzidos pela mistura de óleos residuais com óleo diesel, em um motor diesel, em uma bancada dinamométrica. Foi observado que o desempenho do motor foi similar ao obtido com óleo diesel indicando que não haveria efeito no desempenho do motor após 200 horas do funcionamento no dinamômetro. Além disto, estudaram o efeito do uso do B20, em relação ao desempenho e desgaste do motor, mostrando que o motor operou de forma satisfatória e adequada por 148 horas, tendo a potência, o torque e o consumo específico de combustível mantendo-se constantes.

Silva *et al.*, (2004), utilizaram o óleo residual de fritura e obtiveram as misturas B50 e B100 para pesquisar a potência do motor diesel. Estes autores observaram reduções médias de 3,4% e 6,3% para a potência na TDP (Tomada de Potência), em relação ao diesel. Na avaliação de Maziero *et al.*, (2005), em um motor de 92kW, a redução média na potência foi de 7,6% enquanto o aumento do consumo específico de combustível foi de 9,8%.

Oliveira *et al.*, (2005) estudaram as misturas B2, B5, B20 e B100 a partir do óleo de soja residual, em um trator. Concluíram que a potência com o uso de B100 foi pouco inferior (-3,25%) que a apresentada com diesel. Enquanto as misturas B5 e B20 chegaram a apresentar potência igual ou superior ao diesel.

Castellanelli *et al.*, (2007), relatam um acréscimo de consumo de aproximadamente 5% na utilização de Biodiesel obtido através do óleo de fritura (usado em motores diesel), porém sem prejudicar seu desempenho. Ainda, relataram a redução de emissões sendo, -43% de CO₂, -37% DE HC e -13,4% de NO_x.

Barbosa *et al.*, (2008) apresentaram uma pesquisa com as misturas B2, B5, B20 e B100, utilizando um dinamômetro para se obter os valores de torque e potência. Relataram que o uso de óleo diesel apresentou a curva de potência superior à curva de potência utilizando biodiesel. Entretanto, observaram que com as misturas B5 e B20, a potência chegou a superar a potência utilizando o óleo diesel.

Ozsezen e Canakci (2011) mostraram que o consumo de combustível aumentou em 9-10% e as emissões de CO e CO₂ diminuíram em 59-67% e 5-8%, respectivamente, com o uso de biodiesel de óleo residual de palma em diversas concentrações, enquanto as emissões de NO_x aumentaram em 11-22%.

Silva *et al.*, (2012) pesquisaram sobre a utilização do B20 de óleo residual e concluíram que a mistura não proporciona perdas significativas em consumo específico de combustível e eficiência.

De acordo com Valente *et al.*, (2012), testou misturas de combustível com 25%, 50% e 75% da concentração de biodiesel no óleo diesel, variando carga do motor de 0 a 25 %. E as configurações originais do motor para operação com óleo diesel foram mantidas as mesmas durante os experimentos com as misturas de biodiesel de óleo residual. Os resultados mostram que a adição do biodiesel no combustível aumenta os óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), hidrocarboneto (HC) e dióxido de carbono (CO₂). Um grande aumento de NO_x foi observado em baixas cargas, enquanto CO e HC foram aumentados principalmente em altas cargas. Ao utilizar 50% de biodiesel no óleo diesel, o aumento médio de CO₂, CO, HC e NO_x em toda a faixa de carga investigados foi de 8,5%, 20,1%, 23,5% e 4,8%, respectivamente.

Tesfa *et al.*, (2013) avaliaram as misturas combustíveis diesel/biodiesel de óleo residual com diferentes proporções de 0%, 10%, 20%, 50%, 75% e 100%. Nessa avaliação concluíram que o consumo específico utilizado as misturas diesel/biodiesel de óleo de gordura residual não apresentaram variação significativa quando comparado ao diesel convencional.

Can (2014), analisou dois tipos de misturas biodiesel/diesel (5% e 10%) sob quatro cargas diferentes e velocidade do motor de 2200 rpm. Verificou-se que a adição de 5% e 10% de biodiesel resultou em um incremento leve no consumo específico de combustível para interrupções (até 4%) e redução na eficiência térmica de interrupções (até 2,8%). As adições de biodiesel também aumentaram o NO_x até 8,7% e redução da fumaça e das emissões totais de hidrocarbonetos para todas as cargas do motor. Embora não tenha havido alterações significativas nas emissões de CO nas cargas baixas e médias do motor, algumas reduções foram observadas na carga total do motor. Além disso, as emissões de CO_2 foram levemente aumentadas para todas as cargas do motor.

Chuah *et al.*, (2015), estudaram as características de desempenho e emissão de misturas 10, 30 e 50% de biodiesel de óleo residual. Os testes foram realizados usando um motor a diesel de seis cilindros e em diferentes rotações do motor, variando de 1000 a 2000 rpm sob carga de aceleração total. Durante os testes de desempenho do motor, as misturas de biodiesel apresentaram maior consumo específico (2,1–9,0%) e temperatura dos gases de escape (1,0–6,8%), enquanto menor potência (1,6–6,7%), torque (0,6–5,2%) e eficiência térmica (1,9–8,4%) do que o diesel. As emissões do motor apresentaram maiores liberações de dióxido de carbono (8,7–38,5%) e óxido de nitrogênio (4,7–19,0%), com diminuição da quantidade de monóxido de carbono (3,3–26,3%) em comparação com o diesel.

Segundo Datta (2016) e Shamshirband *et al.*, (2016), testaram o B0, B25, B50, B75, o biodiesel de origem residual emite 20%,30% e 50% menos HC, CO e fumaça, respectivamente, em comparação com combustível diesel. Contudo, a eficiência energética do biodiesel é 2% menor que a do diesel e seu consumo específico de combustível é 13% superior ao do diesel.

Pölczmann *et al.*, (2016) realizaram um importante estudo que avaliou a degradação do biocombustível produzido a partir de óleo de fritura ao longo de, pelo menos, 150 semanas. O estudo endossa a importância da adição de agentes antioxidantes para conter a degradação no período de estocagem. Desta forma, deve-se considerar a adição desse insumo na cadeia de suprimentos do biocombustível para fins de análise da viabilidade econômica.

Khalife *et al.*, (2017), analisaram a adição de água em baixos níveis na mistura biodiesel de óleo residual ao diesel (B5), comparando as características de combustão das

misturas em um motor diesel em carga total e em diferentes velocidades. Os resultados do revelaram que a adição de água em baixo nível em B5 poderia reduzir consideravelmente as emissões de CO, HC, CO₂ e NO_x. Entre as emulsões de combustível B5 contendo água, o nível ótimo de adição de água em termos de parâmetros e emissões de desempenho do motor foi encontrado em 4% em peso. Em particular, os CO₂, HC e NO_x emitidos diminuíram mais de 8, 5%, 28% e 24%, respectivamente, na velocidade máxima de 2500 rpm.

Gharehghani *et al.*, (2017) realizaram um teste sobre as características de combustão, desempenho e emissões de escape do diesel convencional e biodiesel (B25, B50, B75) produzido a partir de óleo de peixe usado. Os resultados indicaram que o biodiesel de óleo de peixe usado tem cerca de 2, 92% mais eficiências térmica bruta e cerca de 1,1% menor perda de combustão quando comparado ao diesel. Quanto à concentração de emissões de CO para biodiesel e suas misturas é reduzida com declividade suave (5,2 e 27%), enquanto houve redução significativa HC (11,6 e 70%), também houve aumento de CO₂, cerca de 7, 2% em média, enquanto a emissão de NO_x também aumentou (1,9 e 12,8%).

García-Martins *et al.*, (2018), analisaram a produção de biodiesel a partir de óleo residual (azeite e girassol) nas misturas B50 e B100 em um reator de fluxo oscilatório no modo batch. Quando aplicado a motores de veículos as misturas B50 e B100, aumentaram o consumo específico de combustível, comparado ao diesel. Contudo, o maior consumo específico de combustível foi encontrado para o B100. Além disso, o biodiesel aumentou as emissões de NO_x do motor. O B50 foi o combustível mais eficaz para reduzir as emissões de NO_x e SFC foram inferiores às do B100, pode-se concluir que o B50 foi o combustível mais adequado para o motor diesel entre os dois biocombustíveis testados (B50 e B100).

O Quadro 1 resume os resultados obtidos para os estudos que investigaram e analisaram o uso de diesel com alto teor de biodiesel de origem residual.

Quadro 1: Estudos sobre a utilização de misturas diesel com alto teor de biodiesel

Combustíveis	Resultados relevantes	Ref.
B10, B20 e B50	Encontraram uma diminuição nas emissões de HC, CO ₂ e NO _x (não utilizou carga ou condições de operação) na utilização do biodiesel obtido através de óleos de fritura usados comparados ao diesel.	PETERSON E REESE (1994)
B20	A potência, o torque e o consumo específico de combustível mantiveram-se constantes.	ALI <i>et al.</i> , (1996)
B50 e B100	Nas duas proporções encontraram reduções para a potência, em relação ao diesel.	SiLVA <i>et al.</i> , (2004)
B50 e B100	Redução na potência e aumento no consumo específico.	MAZIERO <i>et al.</i> , (2005)
B100	Redução de emissões de CO ₂ , de HC e de NO _x (sem utilização de carga ou condições de operação) e aumento do consumo específico.	CASTELLANELLI <i>et al.</i> , (2007)
B2, B5, B20 e B100	Para as misturas B5 e B20, a potência chegou a superar a potência com diesel em rotações específicas	BARBOSA <i>et al.</i> , (2008)
B2, B5, B20, B100	O B100 apresentou uma potência inferior ao diesel. Enquanto as misturas B5 e B20 chegaram a apresentar potência igual ou superior ao diesel	OLIVEIRA <i>et al.</i> , (2005)
B5, B10, B20, B30, B50, B70, B100	Houve aumento do consumo de combustível e diminuição das emissões de CO e CO ₂ e NO _x . Contudo, a plena carga as emissões de NO _x aumentam.	OZSEZEN e CANAKCI, (2011)
B20	A mistura não proporcionou perdas significativas em consumo específico de combustível e eficiência.	SILVA <i>et al.</i> , (2012)
B25, B50, B75	Observou-se o aumento de CO ₂ , CO, HC e NO _x . com o uso de biodiesel de óleo de cozinha usado.	VALENTE <i>et al.</i> , (2012)
B0, B10, B20, B50, B75, B100	Utilizando as diferentes proporções, o biodiesel de ORF não apresentou variação significativa quando comparado ao diesel convencional.	TESFA <i>et al.</i> , (2013)
B5, B10	Aumento das emissões de NO _x e consumo específico. Todavia, houve redução das emissões de CO e da eficiência térmica.	CAN (2014)
B10, B30, B50	Houve um maior consumo de combustível específico, temperatura dos gases de escape e menor potência do freio, torque e eficiência térmica. Também uma maior emissão de CO ₂ e NO _x . Contudo, teve uma menor emissão de CO.	CHUAH <i>et al.</i> , (2015)

Continuação Quadro 1...

B0, B25, B50, B75	A eficiência energética do biodiesel se apresentou menor que a do diesel e seu consumo específico superior ao do diesel.	DATTA (2016) e SHAMSHIRBAND <i>et al.</i> , (2016)
B10, B30 e B50	Verificou-se que com o aumento da proporção de óleo de cozinha usado no óleo vegetal utilizado como matéria-prima para o biodiesel as reações de oxidação ocorreram em maior quantidade durante o armazenamento do produto biodiesel. O biodiesel feito de óleos vegetais contendo apenas 10% de óleo de cozinha usado foi o mais aplicável para a mistura; no caso dos outros biodieseis é muito necessário o uso de maior quantidade de aditivos antioxidantes para minimizar a degradação.	PÖLCZMANN <i>et al.</i> , (2016)
B5	O nível ideal de adição de água em termos de parâmetros e emissões de desempenho do motor é de 4%. Em particular, os CO ₂ , HC e NO _x emitidos diminuíram mais de 8,5%, 28% e 24%, respectivamente, na velocidade máxima de 2500 rpm.	KHALIFE <i>et al.</i> , (2017)
B25, B50, B75	Menor perda de combustão quando comparado ao diesel e aumento de CO ₂ , e na emissão de NO _x .	GHAREHGHANI <i>et al.</i> , (2017).
B50 e B100	Aumento do consumo de combustível específico, com misturas diesel/biodiesel. O B50 foi o combustível mais adequado para o motor diesel entre os dois biocombustíveis testados (B50 e B100).	GARCÍA-MARTINS <i>et al.</i> , (2018).

Fonte: Elaborado a partir dos dados dos estudos apresentados, 2020.

Dada à discussão acima apresentada, é possível perceber que os diversos pesquisadores que estudaram sobre as diferentes misturas de combustíveis diesel/biodiesel de óleos residuais objetivaram trazer importantes contribuições sobre a utilização de uma matéria-prima residual e alternativa para a produção do biodiesel.

Os estudos mencionados estimulam as pesquisas sobre biodiesel como uma alternativa de combustível mais verde produzida a partir de recursos renováveis. Através da análise desses estudos, foi possível perceber que o consumo específico aumenta com o aumento do biodiesel na mistura diesel/biodiesel, ou seja, foi consumido mais combustível para as misturas de maior teor de biodiesel para conseguir manter a mesma potência que as misturas com menor teor de biodiesel. Este aumento pode ser atribuído

ao maior teor de oxigênio e densidade do biodiesel. E o maior percentual de adição de biodiesel na mistura diesel/biodiesel resulta em mais biodiesel sendo injetado no cilindro para atingir o mesmo desempenho que o motor teria se usasse misturas com um maior volume de Diesel.

Alguns pesquisadores relataram que o aumento do teor de biodiesel em misturas com o Diesel proporciona diminuição de torque e potência do motor. Embora a oxigenação, proveniente de um maior teor de biodiesel em mistura com o diesel, aumentar a eficiência do consumo do combustível, este reduz ligeiramente a potência do motor devido ao poder calorífico ser menor do que o combustível com menos percentual de biodiesel. Ainda que haja diminuição de alguns parâmetros de desempenho do motor, nenhuma pesquisa apontou mudanças severas de comportamento e degradação do mesmo, evidenciando que o uso de altos teores de biodiesel em misturas com diesel não traz desvantagens significativas.

Apesar de alguns pesquisadores (Peterson e Reese (1994), Castellaneli *et al.*, (2007) e Ozsezen e Canakci (2011)) relatarem uma diminuição das emissões de NO_x e de CO₂, contudo, Peterson e Reese (1994) e Castellaneli *et al.*, (2007) não mencionam que o estudo utilizou para a avaliação das emissões algum tipo de carga ou condições de operação (rotações), podendo isto ser o motivo para a divergência entre os dados com os demais estudos. Enquanto Ozsezen e Canakci (2011) relatam o aumento de NO_x quando em condição de plena carga. Todavia, grande parte dos pesquisadores observou e relatou que a quantidade de cetano e de oxigênio intrínseco do biodiesel aumentam o processo de combustão, o que leva a reduções de HC, CO e fumaça. E que o teor de oxigênio presente no biodiesel também é responsável pela maior emissão de NO_x e de CO₂. No entanto, o uso de novas tecnologias para tratamento de gases de exaustão pode ser empregado para reduzir as emissões de NO_x. Além disso, as emissões de CO₂, analisando todo o ciclo de vida do biodiesel, são menores do que o diesel, pois as matérias-primas básicas consomem CO₂ durante o seu cultivo.

Os resultados desses estudos demonstraram que a substituição do diesel por algum desses combustíveis não traria nenhuma diferença operacional no veículo em um cenário real. Estes estudos fornecem dados comparativos, sobre as vantagens e desvantagens da utilização de diesel com alto teor de biodiesel de ORF (Quadro 2).

Quadro 2: Vantagens e Desvantagens do biodiesel de óleo residual de fritura

Características	Vantagens
Menos poluente, reduzindo as emissões de gases poluentes (considerando toda a cadeia).	Combustível Renovável
Diferente dos óleos vegetais virgens que precisam da extração do óleo s sementes, o que representa economia no processo de produção.	Dispensa o processo de extração do óleo
Permite a valorização de uma matéria-prima que seria descartada no meio ambiente.	Reaproveitamento de um resíduo, contribuindo para a diminuição dos resíduos em aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto.
Baixo custo da matéria-prima, por se tratar de um resíduo, e não compete com a indústria alimentícia.	Matéria-prima economicamente competitiva
Reduz aquecimento global e evita o descarte nas redes de esgoto.	Ambientalmente benéfico
A produção intensiva da matéria-prima de origem vegetal leva a um esgotamento das capacidades do solo.	Não utiliza área de plantio
Características	Desvantagens
Necessita de pré-tratamento, gerando custo no processo de produção.	Pré-tratamento
Pode fazer com que o biodiesel obtido não se enquadre dentro de especificações mínimas recomendadas para o seu uso	Características físico-químicas
A alta acidez pode interferir diretamente na qualidade do óleo	Alta acidez
Sem o pré-tratamento, mencionado anteriormente, gera problemas para o sistema de injeção, produz depósitos na câmara de combustão, em excesso, além de queimar de forma muito ineficiente. A utilização direta do óleo de fritura nos motores não é recomendável.	Utilização dependente de um pré-tratamento

Fonte: Adaptado de FERNANDES *et al.*, 2008.

É possível observar no Quadro 2 que as vantagens superam as desvantagens. A reintegração de um resíduo ao ciclo produtivo pode representar uma nova reestruturação da cadeia produtiva de biocombustíveis. É importante mencionar sobre a importância da logística de captação é um fator crucial na cadeia de coleta de óleo de cozinha usado para a produção desse biocombustível. Assim, é importante identificar os fatores que podem funcionar como barreiras ou facilitadores para essa coleta.

5 ESTADO DA ARTE

O Estado da arte aborda sobre trabalhos correlatos, projetos e patentes, no âmbito nacional e internacional, que sejam semelhantes ao desenvolvido nesta tese. Avaliando especificamente o uso de biodiesel proveniente de uma matéria-prima residual sendo aproveitado como fonte de energia.

5.1 Projetos correlatos

No âmbito nacional, em 2014, foi criado o fundo verde de desenvolvimento e energia (Fundo Verde - UFRJ). Elaboram alternativas sustentáveis para o atual sistema de transportes internos da Ilha, com a finalidade de atender a busca por alternativas sustentáveis desenvolveram o projeto de reaproveitamento de resíduos de óleo vegetal e criação da linha “Rota dos Restaurantes”. Esta trata-se de uma alternativa de energia sustentável visando à melhoria do sistema de transporte interno da Cidade Universitária, a partir da produção de biocombustível utilizando como matéria-prima resíduos gerados na própria Universidade e tendo como objetivo fomentar projetos de infraestrutura sustentável nos setores de geração e racionalização do uso de energia e de mobilidade urbana (FUNDO VERDE,2014). Atualmente o projeto recolhe em torno de 270 litros de óleo residual por semana, com uma eficiência de produção de 100%, produzindo assim 270 litros de Biodiesel. Além do caráter ambiental do projeto, a Biovan tem auxiliado na mobilidade interna do campus, em um dos seus horários de picos, transportando uma média de 120 passageiros por dia em cinco viagens. Infelizmente o projeto fundo verde não teve continuidade, desde 2019.

Ainda no Rio de Janeiro, em 2008, foi criado o Programa de Reaproveitamento de Óleos Vegetais do Estado do Rio de Janeiro (PROVE) pela Secretaria de Estado do Ambiente (SEA/RJ), com o objetivo de evitar o descarte inadequado do óleo residual de fritura e estimular sua coleta e reutilização para a produção de sabão e biodiesel. O PROVE incentiva a criação de cooperativas de coleta seletiva de resíduos, contribuindo para a geração de trabalho e renda para os catadores associados. Em 2010, o PROVE ultrapassou as fronteiras da Região Metropolitana, chegando à Região Central e à do Sul Fluminense. E em 2011, atingiu todas as regiões hidrográficas do Rio de Janeiro, alcançando a maioria dos municípios do estado, neste mesmo ano, em parceria com o Instituto Estadual do Ambiente (INEA), a coordenação do PROVE contabilizou 5,5 milhões de litros de óleo recolhidos por suas 45 cooperativas filiadas em vários

municípios do Estado do Rio de Janeiro (400/500 mil litros/mês) (INEA, 2013). No último trimestre de 2015 o Programa recolheu 421 mil litros de óleo de cozinha usado.

Segundo o Ambiente Brasil (2008), no final do ano de 2008 doze ônibus começaram a circular com biodiesel proveniente de óleo de fritura na cidade de Curitiba-PR. Tal iniciativa foi tema da segunda Reunião do Grupo de Trabalho de Avaliação das Mudanças Climáticas. Segundo a companhia responsável pelos doze ônibus, estes iriam demandar por dia cerca de dois mil litros de óleo de fritura. Em 2007, a Prefeitura de Volta Redonda começou com o Programa Ecoóleo - Associação de Coletores de Resíduos Líquidos e Sólidos, que recicla o óleo residual de fritura para ser transformado em biodiesel. Todo óleo coletado serve de matéria-prima para a produção de biodiesel pela Cesbra Química S/A (ECOOLEO, 2020).

Criado em 1998, o programa ReÓleo, tem o intuito de reduzir o impacto que o descarte do óleo de cozinha provoca no sistema de esgoto de Florianópolis, o Programa já coletou mais de 3 milhões de litros de óleo. Em 22 anos, o ReÓleo colocou Florianópolis no Guinness Book (2015), como a cidade que mais recicla óleo de cozinha no mundo. Atualmente foram recolhidos mais de 4,9 milhões de litros de óleo de cozinha usados, 4,9 trilhões de litros de água preservados e cerca de 60 mil pessoas impactadas (ACIF, 2021).

O Instituto São Francisco, órgão social da Companhia Sulamericana de Distribuição, em parceria com a Prefeitura Municipal de Maringá (PR), Secretaria da Educação e a empresa BF Ambiental do Grupo Big Frango de Londrina-PR lançou nas escolas municipais de Maringá o Programa Recicla Óleo, transformando 45 escolas em pontos de coleta de óleo para a produção de biodiesel (INSTITUTO SÃO FRANCISCO, 2021).

No final de 2005, Campinas iniciou a utilização do biodiesel na frota do transporte público coletivo. Com a inserção de 2% de biodiesel à mistura do diesel houve redução no consumo de combustível em 2,8%, bem como redução de até 190 kg de material particulado. Atualmente a frota circula com B20, fazendo diversas rotas e continua em expansão (EMDEC, 2021).

Em janeiro de 2017, nove veículos movidos a biodiesel começaram a circular em Campinas, uma nova linha de ônibus abastecidos com B20 (20% de biodiesel adicionado ao diesel fóssil), começou a circular na área central de Brasília. Esses ônibus possuem o

piso mais baixo, dispensando a necessidade de escadas, além de contar com ar-condicionado. Ainda, têm câmbio automático, motor traseiro, carroceria moderna e velocidade controlada para 60 km/h.

No âmbito internacional, a BrocklesbyLtd., situada no Reino Unido, passou a reutilizar óleo de cozinha e resíduos gordurosos de alimentos para a produção de biodiesel e, em conjunto com a *joint-venture* Greenergy, comercializa diesel B7 (BROCKLESBY, 2017).

A ASB Biodiesel, a maior refinaria de óleo usado de Hong Kong, transforma óleo de cozinha usado em biodiesel, que pode ser utilizado em máquinas convencionais, sem nenhuma modificação. A empresa foi fundada em 2007 e coleta óleos de Hong Kong, Cingapura e Guangdong. E este biodiesel produzido pela ASB é vendido principalmente na Europa e na China, apenas uma pequena porção é utilizada em território asiático (VALOR ECONÔMICO, 2016).

Na Áustria, a cidade de Graz em 2013, foi a primeira do mundo a abastecer a própria frota de ônibus 100% com biodiesel produzido de óleo residual de fritura (RECOIL, 2013).

Em 2007, na Espanha, em Palma de Mallorca, foi lançado um projeto de educação escolar entregando material promocional como garrafas de plástico aos alunos das escolas no território. Estes jovens eram promotores da reciclagem do óleo nas próprias famílias, retornando os recipientes de armazenamento para o ponto de entrega voluntária (PEV) instalado nas instituições escolares (RECOIL, 2013). O Projeto Recoil - The Power of Used Cooking Oil (2012-2015) visou o aumento da produção sustentável de biodiesel pela otimização do processo de recolha e conversão de óleos residuais gerados em residências.

O *Grand Canyon Railway*, tradicional passeio de maria-fumaça dos Estados Unidos, transporta turistas por mais de 100km de trilhos que ligam Williams, no Arizona, ao sul do Grand Canyon. Desde 2013 ele faz isso de maneira ecologicamente correta, movido a óleo reciclado. O material para o combustível é obtido em restaurantes, pousadas e parques nacionais da região.

Em setembro de 2013, Shanghai colocou em circulação o seu primeiro ônibus desta gama. Até junho de 2018, mais de 100 ônibus haviam sido abastecidos com biodiesel, percorrendo uma distância total de 11 milhões de quilômetros. E desde maio

de 2019, mais de 2000 ônibus públicos de Xangai, na China, vão às ruas usando biodiesel como combustível. A providência faz parte de uma missão chinesa de utilizar, biocombustíveis como alternativa aos tradicionais diesel e petróleo. Dessa forma conseguem reduzir sua emissão de poluentes. O biodiesel usado é o B5, feito com 5% de óleo de cozinha coletado via descarte correto ou em esgotos, e mais 95% de combustível diesel derivado de petróleo. Atualmente, Shanghai conta com 231 estações de abastecimento de biodiesel B5, cujo preço é mais barato que o convencional (XINHUANET, 2021).

Em 2017, a Hainan Airlines, a maior companhia aérea privada chinesa, transportou 201 pessoas de Beijing a Chicago, em um Boeing 787 que contou com muita ajuda de biocombustível. 15% da mistura que levantou o voo era óleo de cozinha usado, enquanto 85% dela era combustível aeronáutico tradicional, o derivado de petróleo. Declarações coletadas tanto da tripulação quanto dos passageiros comprovam que o avião voou com estabilidade e segurança. Devido ao sucesso dessa e de outras operações, diversas outras companhias aéreas vêm fazendo testes com combustíveis alternativos (OLEO PELO FUTURO, 2019).

Em MAN Lion's City, cidade de Trondheim, terceira maior cidade da Noruega, introduziu 189 ônibus ecológicos movidos a biogás e biodiesel em sua frota de transporte público, em uma tentativa de reduzir as emissões de carbono. Operando desde agosto de 2019, pelas principais empresas de transporte Vy Buss AS e Tide Buss AS (UDOP, 2019).

A Finlândia fez parceria com a cidade de Oakland (Califórnia, EUA) e desde 2019 para abastecer a frota da cidade com biodiesel fabricado de óleo de cozinha usado e outros resíduos provenientes de empresas na área metropolitana (REN 2021).

Em 2020 autoridades públicas na Cidade do México (México), em parceria com o Instituto Politécnico Nacional, construiu uma usina de produção de biodiesel que usa óleo de cozinha residual de famílias locais, instalações de fabricação de alimentos e restaurantes para produzir 500 litros de biodiesel por dia, com o objetivo de abastecer 200 veículos de transporte público (GOVERNO DA CIDADE DO MÉXICO, 2020).

Em Veneza, na Itália, em 2020, óleo de cozinha residual começou a ser coletado e transformado em biodiesel para uso local uma empresa de transporte, que utilizou o biodiesel de origem residual para abastecer sua frota de barcos (C40 CITIES 2020). Ainda

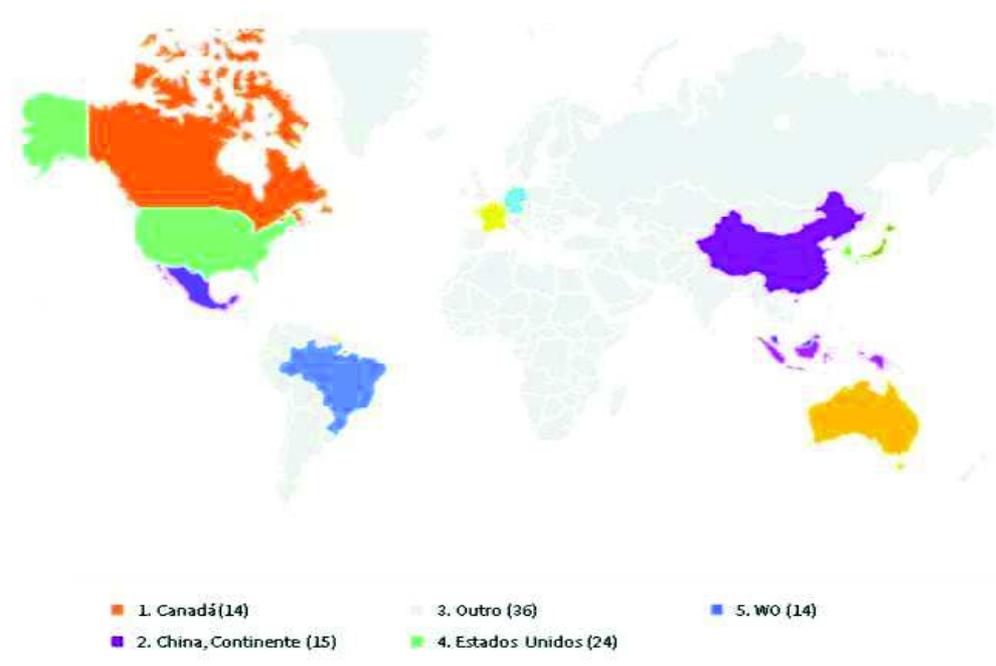
na Itália, uma antiga planta petroquímica em Gela foi convertida em 2019 em uma unidade de produção de biodiesel, podendo processar até 750.000 toneladas anuais de óleo de cozinha usado, animal gordura, outros subprodutos e algas (KOTRBA, 2019).

5.2 Patentes sobre a produção e uso de biodiesel proveniente de ORF

As informações baseadas em patentes são consideradas importantes fontes de informações técnica e tem sido uma ferramenta útil e cada vez mais utilizada para identificar os fatores motivadores envolvidos no processo de decisão estratégica das empresas quanto à exploração das informações públicas contidas nestes documentos, funcionando como fonte de pesquisas desenvolvimento e aquisição de novos processos ou produtos (VALENTE *et al.*, 2019).

A fim de avaliar a produção e uso de biodiesel proveniente de ORF por meio da pesquisa e análise de informações extraídas de documentos de patentes depositados em todo o mundo, com o intuito de identificar os principais países detentores da tecnologia pesquisada. A primeira etapa foi caracterizada pela escolha da base de dado para consultada, para isso, foi realizada uma pesquisa no banco de dados Derwent Innovation Index (DII) (de documentos depositados em todo o mundo). A segunda etapa caracterizou-se pela elaboração das estratégias de busca. Em um primeiro momento, a busca foi realizada utilizando-se apenas o termo “biodiesel” no título e no resumo, gerando mais de 700 documentos. Quando o termo “biodiesel” foi procurado junto ao termo “waste frying oil” foram identificados 103 documentos de patentes na área pesquisada e avaliados quanto ao país de origem do depositante, nos últimos 5 anos. Os principais países depositantes foram Brasil, China, Estados Unidos e Coreia (Figura 18).

Figura 18: Patentes depositadas entre 2015 e 2020 sobre a produção de biodiesel proveniente de ORF.



*O código “WO” (Organização Mundial de Propriedade Intelectual) é utilizado em relação à publicação internacional sob o Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes – PCT de pedidos internacionais depositados em qualquer repartição receptora de pedidos PCT.

Fonte: Elaborado a partir de dados da plataforma *Thomson Innovation*, 2021.

Historicamente, a primeira patente mundialmente registrada de um processo de produção industrial de biodiesel (transesterificação) foi concedida ao engenheiro químico cearense Expedito Parente, em 1977. Foram identificados um total de 103 documentos de patentes, utilizando como filtro as patentes depositadas nos últimos 5 anos, todos relacionadas ao uso e produção de biodiesel proveniente de ORF. Os Estados Unidos é o maior detentor de patentes depositadas sobre biodiesel de ORF, talvez o fato dos Estados Unidos ser um importante importador de petróleo, as pesquisas voltadas para a produção e o uso de um combustível alternativo proveniente de uma matéria-prima ainda pouco explorada, pode significar uma redução na quantidade importada de óleo diesel, gerando impactos positivos em sua balança comercial. Portanto, o tema pesquisado tem se mostrado uma área promissora para produções científicas e tecnológicas com crescente interesse no cenário mundial.

Vale ressaltar que apesar de existirem diversas pesquisas, patentes e trabalhos correlatos sobre a produção e uso de biodiesel de óleo residual de fritura, não existe na literatura estudo deste tipo. Não existem dados no Brasil, sobre o uso *in loco* de uma

empresa, neste caso uma empresa mineradora, utilizando biocombustível proveniente de uma matéria-prima residual em sua frota veicular. Atualmente os dados encontrados na literatura discutem sobre a utilização de óleos vegetais e residuais como combustível alternativo ao diesel convencional, suas características, benefícios e alguns testes realizados em motor estacionário. Todavia, nenhum dado sobre o uso de biodiesel de óleo residual de fritura, na mistura diesel/biodiesel em 50% / 50% em testes *in loco* e utilizando veículos da própria frota e que não passaram por nenhum tipo de modificação para operar com o novo combustível.

E embora a produção e uso de biodiesel seja um tema amplamente pesquisado, ainda se faz necessário ser constantemente estudado o uso de fontes alternativas como o uso de matérias-primas residuais em sua cadeia produtiva. A produção de biodiesel oferece uma alternativa para o gerenciamento dos resíduos de óleo de fritura, ao mesmo tempo, apresenta uma maneira sustentável de destinação deste resíduo, estimulando a circularidade na cadeia de suprimentos.

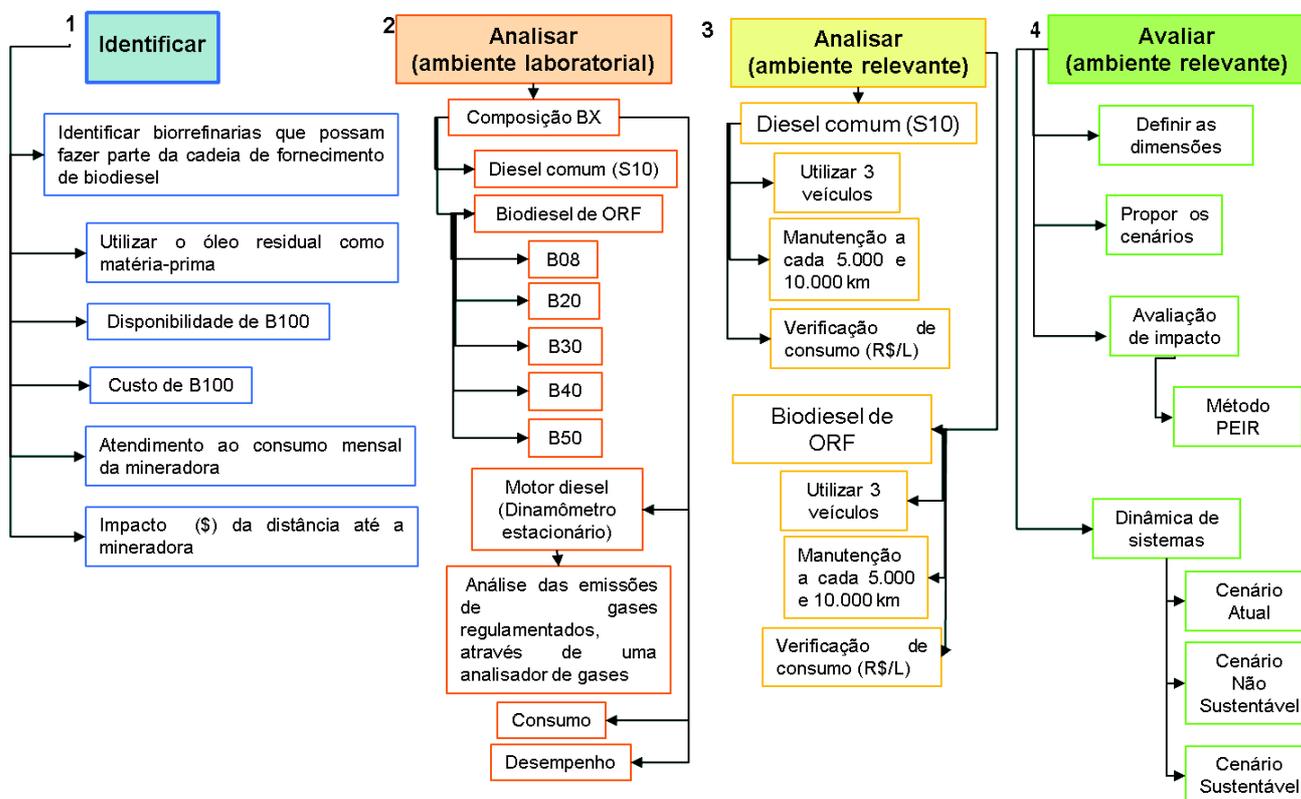
Vários pesquisadores relatam o uso e produção de biodiesel de óleo residual de fritura, no entanto, poucos trabalhos apresentados na literatura se referem aos testes com o biodiesel de óleo de fritura em uma empresa do setor de mineração. Este fato, aliado à fundamentação teórica apresentados nesta tese, permite justificar plenamente a realização deste trabalho, cujo maior objetivo reside no estudo do potencial econômico, ambiental e tecnológico da utilização de diesel com alto teor de biodiesel sendo utilizado na frota veicular de uma empresa do setor de mineração, que deseja modificar sua matriz energética interna no intuito de reduzir os impactos ambientais substituindo o diesel comum por esta nova mistura diesel/biodiesel de ORF.

6 METODOLOGIA

Este estudo visou avaliar o potencial econômico, ambiental e tecnológico do uso do diesel com alto teor de biodiesel em uma frota veicular de uma empresa do setor de mineração. Para o desenvolvimento deste trabalho foram estabelecidas algumas etapas metodológicas que estão esquematizadas na Figura 19. As etapas de atividades adotadas

nesta metodologia permitiram coletar os dados, e propor um estudo utilizando a análise de cenários nas dimensões econômicas, técnica e ambiental.

Figura 19: Fluxograma das etapas da metodologia da pesquisa.



Fonte: Elaboração própria, 2020.

6.1 Identificação das biorrefinarias para fazer parte da cadeia de fornecimento de biodiesel de óleo residual de fritura

O estudo de caso foi baseado em uma empresa mineradora, localizada em Vazante-MG. Tendo como premissa que os fornecedores são as biorrefinarias com o biodiesel pronto e que pudessem fazer parte da cadeia de fornecimento de biodiesel e que fossem localizadas próximas das instalações da mineradora, a fim de avaliar o cenário econômico quanto ao preço praticado do biodiesel e a logística quanto a distância entre a biorrefinaria e a mineradora.

Foram selecionadas quatro biorrefinarias, sendo apenas uma no Estado de Minas Gerais, onde está localizada a unidade da mineradora, as outras três são biorrefinarias localizadas próximas a Vazante- MG, todas estão autorizadas a produzir biodiesel (Figura 20).

Figura 20: Delimitação da área de estudo



Fonte: Elaborado a partir do sistema interativo google maps, 2021.

Ao longo do período de um ano, o número de volume produzido por algumas biorrefinarias aumenta/diminui, devido a disponibilidade da matéria-prima utilizada, ocasionando um maior/menor volume de biodiesel ofertado durante os leilões.

A maior parte das biorrefinarias não trabalha com biodiesel elaborado com 100% de óleo residual, elas trabalham com *blends* de óleo de soja e outras matérias-primas. Contudo, a partir de informações pessoais obtidas durante entrevistas, foi identificado que algumas biorrefinarias possuem esmagadora própria, estas, geralmente fazem uso apenas da soja como matéria-prima. Importante mencionar, que as biorrefinarias que possuem esmagadoras próprias, possuem a vantagem de produzirem o próprio óleo que será utilizado na produção de biodiesel, facilitando os aspectos logísticos em torno da terceirização desse serviço, como também um impacto econômico positivo relacionado com uma biorrefinaria integrada (usina e esmagadora), evitando custos associados com uma terceirização. Todavia, as que não possuem esmagadora própria, fazem uso de diversas matérias-primas além da soja. Então, a partir destas informações, foram selecionadas as biorrefinarias que atendiam a proposta deste estudo sobre a utilização do óleo residual de fritura para produção de biodiesel. Em seguida foi realizado um estudo

sobre a análise econômica, levando em consideração alguns fatores, tais como: preço final do combustível e a distância entre a biorrefinaria e a mineradora.

O custo de transporte foi determinado considerando as rotas entre as biorrefinarias e a mineradora e o custo padrão do combustível para o período. Todos esses valores correspondem aos preços de mercado obtidos por meio de dados estabelecidos pela ANP, no leilão do biodiesel (L78).

É importante mencionar que esta cadeia de fornecimento do biodiesel precisa atender ao consumo mensal da mineradora. Durante o período das avaliações do consumo da frota, foi possível identificar os custos relacionados com combustível (Tabela 5).

Tabela 5: Informações com custos (mensal) com combustível da mineradora

Mês	jan/18	fev/18	mar/18	abr/18	mai/18	jun/18
Consumo diesel S10 (L)	367.798.000	358.071.000	336.117.000	361.781.000	304.449.000	380.919.000
Custo diesel S10 (R\$/L)	R\$ 2,57	R\$ 2,54	R\$ 2,65	R\$ 3,18	R\$ 3,22	R\$ 3,04
Consumo Teccon (L)	367.80	358.07	336.12	336.12	304.45	380.92
Custo Teccon (R\$/L)	R\$ 47,25					

Fonte: Elaborado a partir de dados do projeto 2018.

Assim também como os custos relacionados com o aditivo. É utilizado um aditivo na proporção 1 para 1000 litros de combustível (TECCOM), que é um otimizador de combustíveis, tornando o diesel, um combustível de alta qualidade, promovendo uma melhor eficiência de combustão do motor. O mesmo foi utilizado em todas as misturas combustíveis (diesel/biodiesel).

6.2 Procedimento laboratorial

Nesta etapa foi avaliado as misturas diesel com alto teor de biodiesel de óleo residual para definir a mistura ideal para ser utilizada nos testes em campo. Para determinação da concentração de ideal diesel/biodiesel foi utilizado um motor diesel fabricante MWM motores e gerados, modelo MS 3.9T, 4 cilindros, cilindrada de 3870 cm³, taxa de compressão de 15:1, arrefecimento líquido, injeção direta de combustível,

turbo comprimido, com rotação máxima de 1800 rpm. O motor foi conectado a um dinamômetro de bancada (AVL DP 240) para a avaliação de desempenho e emissões.

Foram utilizadas oito condições de operação (1000, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700 e 1750 rpm) alterando a carga de cada uma dessas condições em 50%, 75% e 100%, desta forma, foi possível um melhor mapeamento de como o motor estava funcionando com os diferentes combustíveis, utilizando mais pontos para obter uma maior precisão no comportamento do motor. Para a aquisição de dados em dinamômetro foi utilizado o *software* AVL PUMA Open. As variáveis coletadas foram: potência, torque e variação de massa de combustível (consumo). Foram realizados seis ensaios no motor estacionário para as misturas combustíveis de diesel/biodiesel de óleo residual de fritura. Estas misturas foram: B08, B20, B30, B40 e B50 (Tabela 6).

Tabela 6: Condições experimentais do estudo

Combustível	Viscosidade cinemática a 40°C (mm ² /s)	Massa específica a 20°C (kg/m ³)	Teor de água (mg/kg)	Diesel (%)	Biodiesel (%)
B08	4,35	835,5	250	92	08
B20	4,63	841,2	600	80	20
B30	4,64	846,5	700	70	30
B40	4,67	851,9	400	60	40
B50	4,68	856,2	1100	50	50
B100	4,99	884,0	522	0	100

Fonte: elaborado a partir de dados do projeto, 2019.

Essas amostras foram preparadas no volume de 140L para cada mistura combustível, onde foi adicionado 0,1% do volume da mistura de um aditivo otimizador de combustível (TECCOM), para proteger o combustível contra a deterioração, a oxidação, a formação de fungos e bactérias, na busca por garantir sua qualidade por mais tempo, conforme Tabela 7.

Tabela 7: Especificações dos combustíveis utilizados

DESEMPENHO				
Mistura BX	Volume da mistura(L)	Volume de Diesel B10(L)	Diesel (%)	Volume de Biodiesel B100 (L)
B20	90	80,00	80	10,00
B30	90	70,00	70	20,00
B40	90	60,00	60	30,00

B50	90	50,00	50	40,00
B08	90	90,00	92	0,00
TESTES DE EMISSÕES				
TESTE DE EMISSÕES	Volume da mistura(L)	Volume de Diesel B10(L)	Diesel (%)	Volume de Biodiesel B100 (L)
B20	50	44,44	80	5,56
B30	50	38,89	70	11,11
B40	50	33,33	60	16,67
B50	50	27,78	50	22,22
B08	50	50,00	92	0,00
VOLUME DE DIESEL/BIODIESEL(OGR) POR MISTURA COMBUSTÍVEL				
Mistura BX	Volume da Mistura(L)	Volume de Diesel B10 (L)	Volume de Biodiesel B100 (L)	
B20	140	124,44	15,56	
B30	140	108,89	31,11	
B40	140	93,33	46,67	
B50	140	77,78	62,22	
B08	140	140,00	0,00	
VOLUME TOTAL				
Combustível		Volume (L)		
Diesel		544,44		
Biodiesel		155,56		
Total (mistura)		700,00		

Fonte: Elaborado a partir de dados do projeto, 2019.

A duração do ensaio de desempenho se refere aos testes que foram realizados com três cargas diferentes (50%, 75% e 100% do torque máximo), ou seja, para cada combustível foram necessários 60 minutos. Os demais ensaios foram realizados em triplicata e a duração da soma das triplicatas está descrita na Tabela 8.

Tabela 8: Dados obtidos através do dinamômetro de motor.

ENSAIO	DURAÇÃO	ROTAÇÃO (rpm)	Carga
DESEMPENHO	± 60 minutos	1000, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1750	50%, 75% e 100% do torque máximo
REGULAMENTADOS	± 10 minutos	1500	50%, 75% e 100% do torque máximo
Emissão de Compostos CARBONÍLICOS	± 15 minutos	1500	185Nm
Emissão de MATERIAL PARTICULADO	± 90 minutos	1500	185Nm

Morfologia de nanopartículas (NanoGRID)	± 5 minutos	1500	185Nm
CONTADOR DE PARTÍCULAS	± 30 minutos	1500	185Nm

Fonte: Elaborado a partir de dados do projeto, 2019.

A análise de emissões foi realizada na rotação de 1500 e carga de 100% visando o impacto do uso dos diferentes tipos de combustíveis nas emissões dos gases. Um túnel de diluição parcial a volume constante do tipo CVS (do inglês: *Constant Volume Sampling*) foi conectado ao escapamento do motor, captando parte dos gases de exaustão e diluindo com ar limpo em uma proporção de aproximadamente 1/20 (exaustão/ar de diluição).

Na análise para medição da concentração dos gases poluentes (CO₂, CO e NO_x) foi utilizado um analisador de gases multifuncional modelo GA-21plus calibrado, da Madur Electronics. Para isto, a sonda deste analisador de gases foi inserida no final do túnel de diluição, para conseguir realizar as medições da concentração dos poluentes presentes. Para o início das coletas, foi necessário que o motor trabalhasse com o combustível a ser ensaiado até atingir a temperatura de 80 °C (temperatura de operação) e assim estabilizasse nas condições determinadas de rotação e torque. Foram realizadas coletas em triplicata, para cada tipo de combustível (B08, B20, B30, B40 e B50), com média de 3 minutos para cada coleta.

A empresa de mineração desejava trabalhar com o maior teor possível de biodiesel adicionado ao diesel, de forma que não prejudicasse o desempenho dos motores. Após realizar diversos testes e análises com as misturas na bancada dinamométrica, os resultados mostraram que seria possível chegar à mistura B50, sem qualquer prejuízo para a mineradora.

6.3 Procedimentos em campo

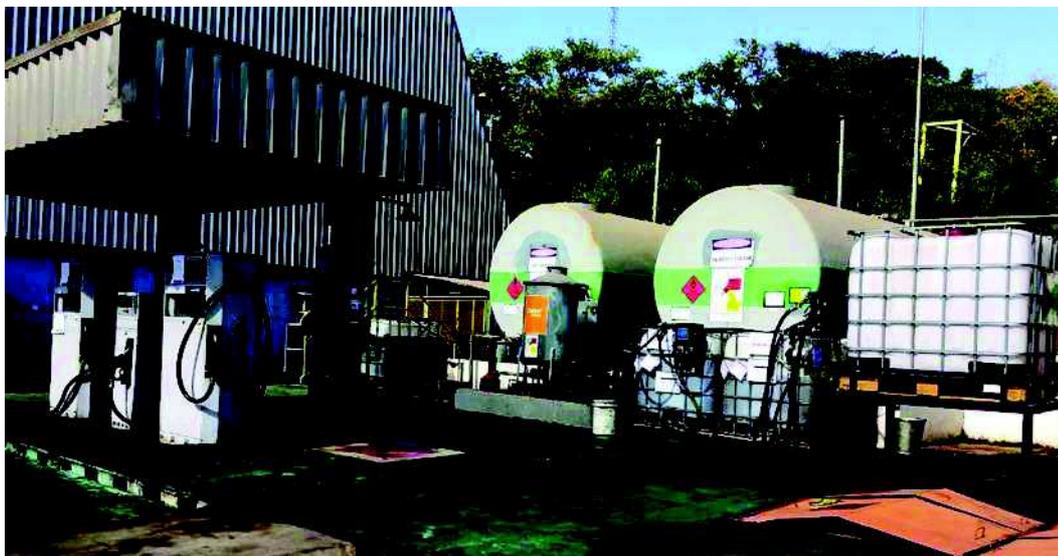
Nesta etapa, aconteceram os testes em ambiente relevante, na unidade da mineradora em Vazante – Minas Gerais, onde foi utilizada a mistura identificada como sendo ideal pelos testes em ambiente laboratorial. Esta mistura foi usada em 3 veículos da frota da mineradora e outros 3 veículos foram utilizados como “branco” para que os mesmos pudessem servir de parâmetro de comparação na avaliação do uso de diesel com alto teor de biodiesel de óleo residual de fritura. Estes veículos foram selecionados de acordo com a disponibilidade de utilização e que, entre eles, tivessem quilometragem parecida.

Os veículos usados nos testes em ambiente relevante foram Caminhonetes da marca Mitsubishi, modelo L200 Triton GL diesel 3.2 MT-180 CV – Manual (2017). Os veículos acumularam a quilometragem de 10.000 km num período de 4 meses. Assim, as manutenções dos veículos foram dividida em três etapas: A primeira manutenção que foi realizada com 0 km, considerada a manutenção inicial para dar *start* ao processo de acúmulo de quilometragem, a segunda manutenção foi realizada após 5.000 km e a terceira e última, foi ao fim do acúmulo dos 10.000 km. Durante o período de testes nos veículos, foram coletadas amostras de óleo lubrificante, filtro de combustível e verificação da necessidade de troca de peças, como também, a realização de manutenção no veículo e avaliação do consumo de combustível antes e após o acúmulo de 5.000 km e 10.000 km.

Apesar dos veículos terem sido conduzidos por diferentes motoristas, os mesmos foram orientados sobre o preenchimento de formulários para registros diários dos veículos, com a finalidade de monitorar todas as atividades dos testes em campo.

Para abastecimento da frota veicular da mineradora com a nova mistura diesel/biodiesel de ORF, foi utilizado o próprio posto de abastecimento da unidade da mineradora (Figura 21).

Figura 21: Estrutura para abastecimento dos veículos com a nova mistura



Fonte: Dados do projeto, 2019.

Durante o período de realização dos testes em ambiente relevante, os abastecimentos transcorreram normalmente e os dados foram registrados mediante abastecimento dos veículos e no período de testes, os veículos que utilizaram a nova

mistura foram identificados para que não tivesse nenhum tipo de confusão durante o período de abastecimento (Figura 22). A partir dos registros obtidos das planilhas de abastecimento, foi possível verificar a média de consumo de cada veículo do projeto.

Figura 22: Identificação dos veículos que utilizaram a nova mistura (B50)



Fonte: Dados do projeto B50, 2019.

Desta forma, ficou claro que os testes em ambiente relevante aconteceram de forma transparente e clara, e os dados obtidos com os testes são inteiramente confiáveis. Desta forma, foi proposta a construção de cenários para avaliação de impacto, utilizando-os como base para a abordagem da dinâmica de sistemas (DS), à luz das dimensões econômicas, tecnológicas e ambientais que envolvam a utilização do diesel com alto teor de biodiesel de óleo residual de fritura.

6.4 Construção de Cenários, Avaliação de Impacto e Dinâmica de Sistemas

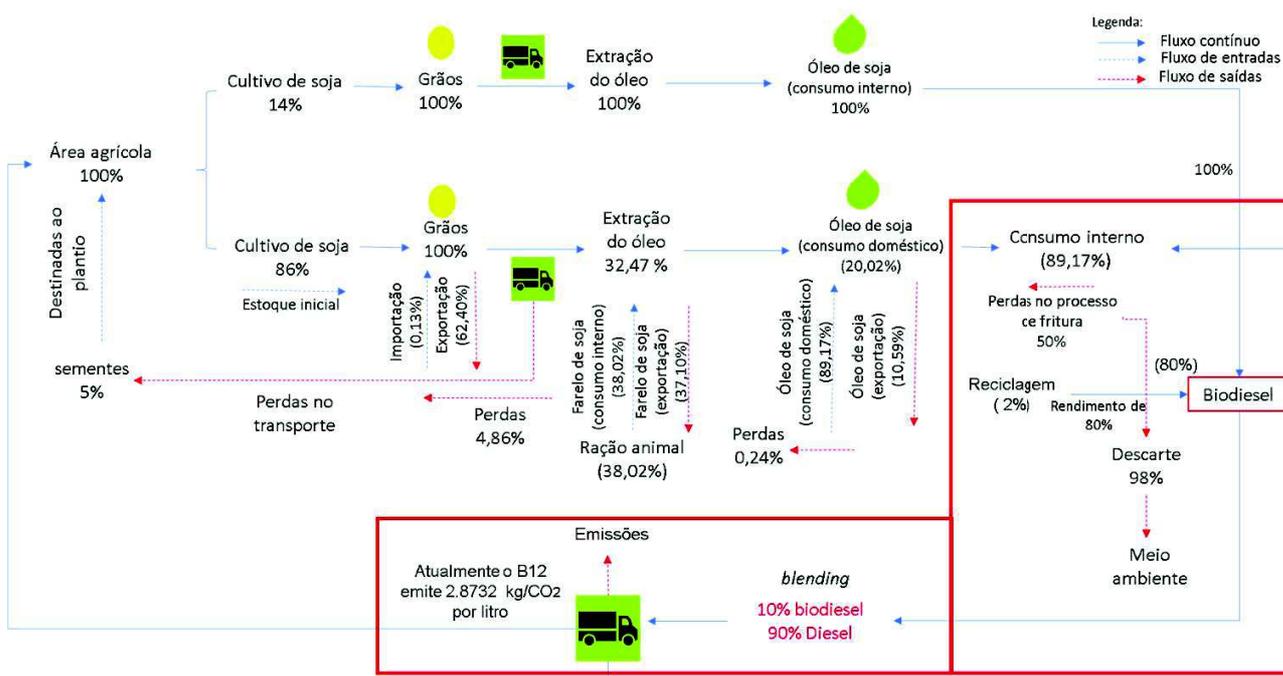
As três abordagens se complementam, a construção de cenários é uma importante ferramenta que possibilita uma visualização mais clara do cenário atual levando em consideração alguns fatores para definição de outros cenários. Desta forma, é importante fazer uma avaliação dos possíveis impactos (positivos e negativos), a partir da proposta dos cenários, para avaliar os ganhos e perdas que cada um dos possíveis cenários pode apresentar. Essa avaliação serviu como base para a abordagem da dinâmica de sistemas, que avaliou o comportamento do sistema, através dos cenários e avaliação de impacto definidos.

6.4.1 Construção de Cenários

A construção dos três cenários foi baseada sob a ótica das dimensões econômica, ambiental e tecnológica, que representaram um ponto importante no embasamento para a proposta de construção dos cenários. Para efeito de análise foram sugeridos três cenários, um atual, um sustentável e um não sustentável. O primeiro cenário buscou trabalhar com a situação atual que se encontra a produção de biodiesel de ORF, o segundo, um cenário otimista, pressupõe um arranjo próspero, com uma melhor eficiência do sistema, propiciando vantagens e eficiência necessárias para a implantação, melhoramento e ampliação da produção do biodiesel de ORF e o terceiro um cenário pessimista, com deficiência do sistema, onde se pressupõe um ambiente desfavorável, em diversos aspectos, para a cadeia de biodiesel de ORF, com deficiência na integração entre as dimensões ambientais e econômicas (Figuras 23, 24, 25).

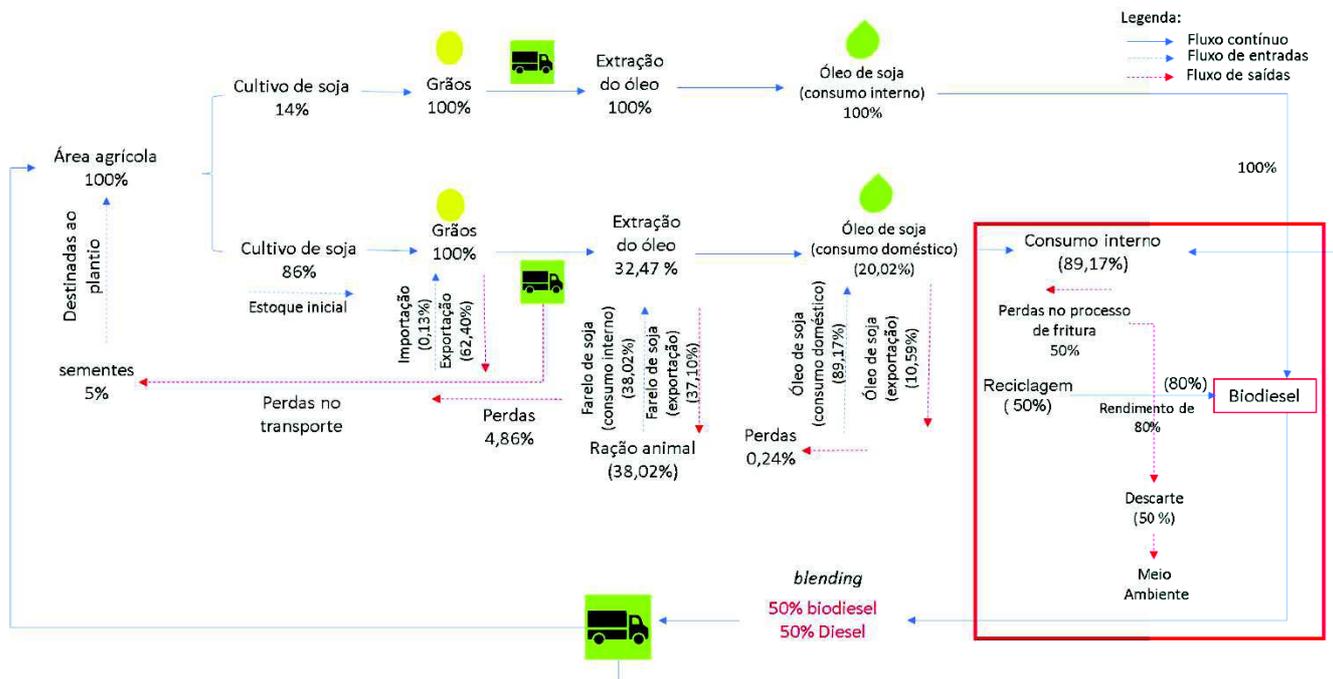
Para a análise desses três cenários, foi utilizada duas abordagens, a abordagem intuitiva que depende do conhecimento qualitativo, de ideias e percepções, a partir dos quais os cenários foram elaborados mediante a exploração da criatividade. E a abordagem analítica que versa sobre a quantificação das incertezas identificadas e emprega tanto modelos conceituais quanto simulações obtidas por *softwares* (VAN NOTTEN, 2006), nesta fase da abordagem analítica, a dinâmica de sistema ofereceu vantagens com a avaliação da estrutura de um sistema e no comportamento resultante do decorrer do tempo, alinhando-se as dimensões ambiental, econômica e tecnologia.

Figura 23: Cenário Atual



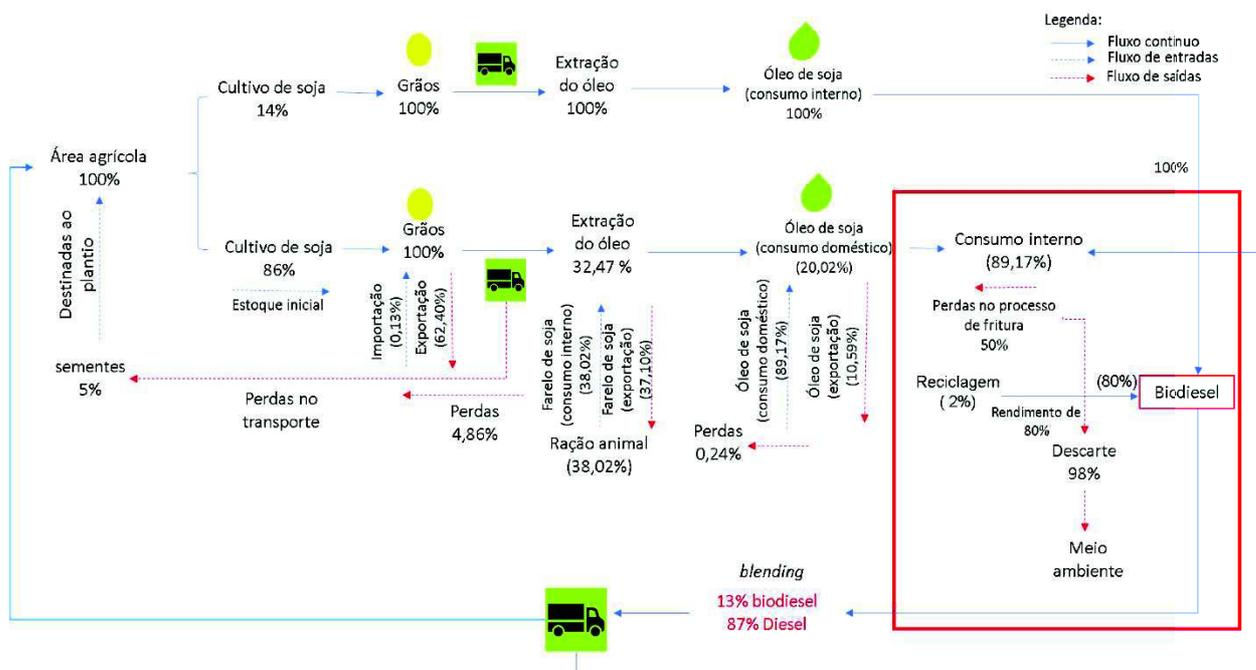
Fonte: Elaboração própria a partir de dados da Abiove e ANP, 2021.

Figura 24: Cenário Sustentável



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da Abiove e ANP, 2021.

Figura 25: Cenário Não Sustentável



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da Abiove e ANP, 2021.

A partir da visualização de cada cenário, foi possível integrar as dimensões abordadas anteriormente com os critérios e indicadores para a avaliação dos possíveis impactos negativos e positivos dos três cenários. Impactos positivos representam ações que resultam na melhoria da qualidade de um aspecto ou parâmetro e impactos negativos, quando a ação resulta em um dano à qualidade de um aspecto ou parâmetro (SÁNCHEZ, 2013).

6.4.2 Avaliação de Impacto

Para a análise de impacto negativo e positivo, de forma qualitativa e quantitativa, foi necessária uma análise sistêmica de forma que integrasse a abordagem da análise de cenários e avaliação de impacto à dinâmica de sistemas. Para a avaliação de impacto, adotou-se o método descrito por PEIR (Pressão-Estado-Impacto-Resposta). A metodologia PEIR, desenvolvida pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), foi adaptada pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 2003) é uma ferramenta que pode analisar problemas ambientais, e pode ser ajustável a diferentes realidades, podendo ser um importante instrumento de suporte para a compreensão dos possíveis impactos com o uso do biodiesel de óleo residual.

O modelo PEIR adotado possibilitou avaliar as pressões exercidas pela atividade do uso do biodiesel de óleo residual sobre o meio ambiente e as respostas relacionadas a estas mudanças, associando as dimensões econômicas, ambientais, legais e tecnológicas. O objetivo desta análise é apresentar um *overview* dos aspectos relacionados ao uso do biodiesel de ORF através da identificação e interação de indicadores e devido a conexão entre as quatro dimensões que compõe o (P-E-I-R), é perceptível um efeito de que uma dimensão influencia a outra, ou seja, existe uma relação de causa e efeito entre as quatro dimensões (SILVA E CÂNDIDO, 2012). Na matriz PEIR são compreendidos como: “pressão”, que se refere às atividades humanas que pressionam o meio ambiente, sensibilizando seus recursos naturais, ou seja, modificando seu “estado”, que é composto pelo conjunto das suas condições ambientais. As consequências da alteração do “estado” resultam nos “impactos” e a “resposta” (ARIZA E ARAÚJO NETO, 2010).

No PEIR, a pressão pode ser entendida como um conjunto de fatores que stressam o meio ambiente e modificam de forma negativa, por exemplo, o volume de resíduo sólido per capita e volume de resíduo hospitalar. O estado é a amostra atual de

como o meio se encontra, sem a pressão citada anteriormente, podendo ser entendido através da qualidade do ar, corpos hídricos e existência de licenciamento ambiental. O impacto são as principais alterações visíveis em consequência da pressão, podendo ser observada através da poluição e doenças envolvendo a população. A Resposta são as medidas tanto de iniciativa pública, privada ou popular que proporcione ações que reduzam os impactos e podem ser analisado através da existência de associação ou cooperativa, tratamento de resíduos sólidos urbanos e ações regulatórias do poder público (SILVA, 2012)

Após a identificação e interação de indicadores sob a ótica das dimensões supracitadas, ocorreu uma integração com a abordagem da dinâmica de sistemas, de forma qualitativa e quantitativa. A escolha da dinâmica de sistema como parte da metodologia deste estudo, aconteceu pela possibilidade de analisar a dinâmica do funcionamento da cadeia de biodiesel de ORF ao longo dos anos, pelas análises qualitativas (pelo diagrama de causa e efeito, com a identificação das estruturas das relações que rege o comportamento do sistema) e quantitativas (Pelo diagrama de estoque e fluxo, onde os valores atribuídos influenciam o comportamento de um sistema ao longo do tempo).

6.4.3 Dinâmica de Sistemas

Um sistema é um conjunto de elementos que interagem continuamente e a DS compreende como um sistema evolui no tempo e as mudanças que influenciam no comportamento desse sistema, para simular e avaliar os possíveis cenários prospectivos, a partir das decisões que serão tomadas (NEGRINI *et al.*, 2019). De acordo com Wright, Silva e Spers (2010), a análise de cenários é uma ferramenta que possibilita avaliar alternativas futuras, sendo necessário analisar como um todo o conjunto de forças que atuam sobre o sistema que se pretende estudar.

A DS estabelece uma conexão entre as variáveis que serão analisadas e qualquer alteração em uma dessas variáveis, afeta uma ou mais variáveis, por meio dos seus fluxos de forma dinâmica. Dentro da DS, existem processos de realimentação, onde toda ação produz uma reação do sistema, alterando o estado desse sistema (STERMAN *et al.*, 2015).

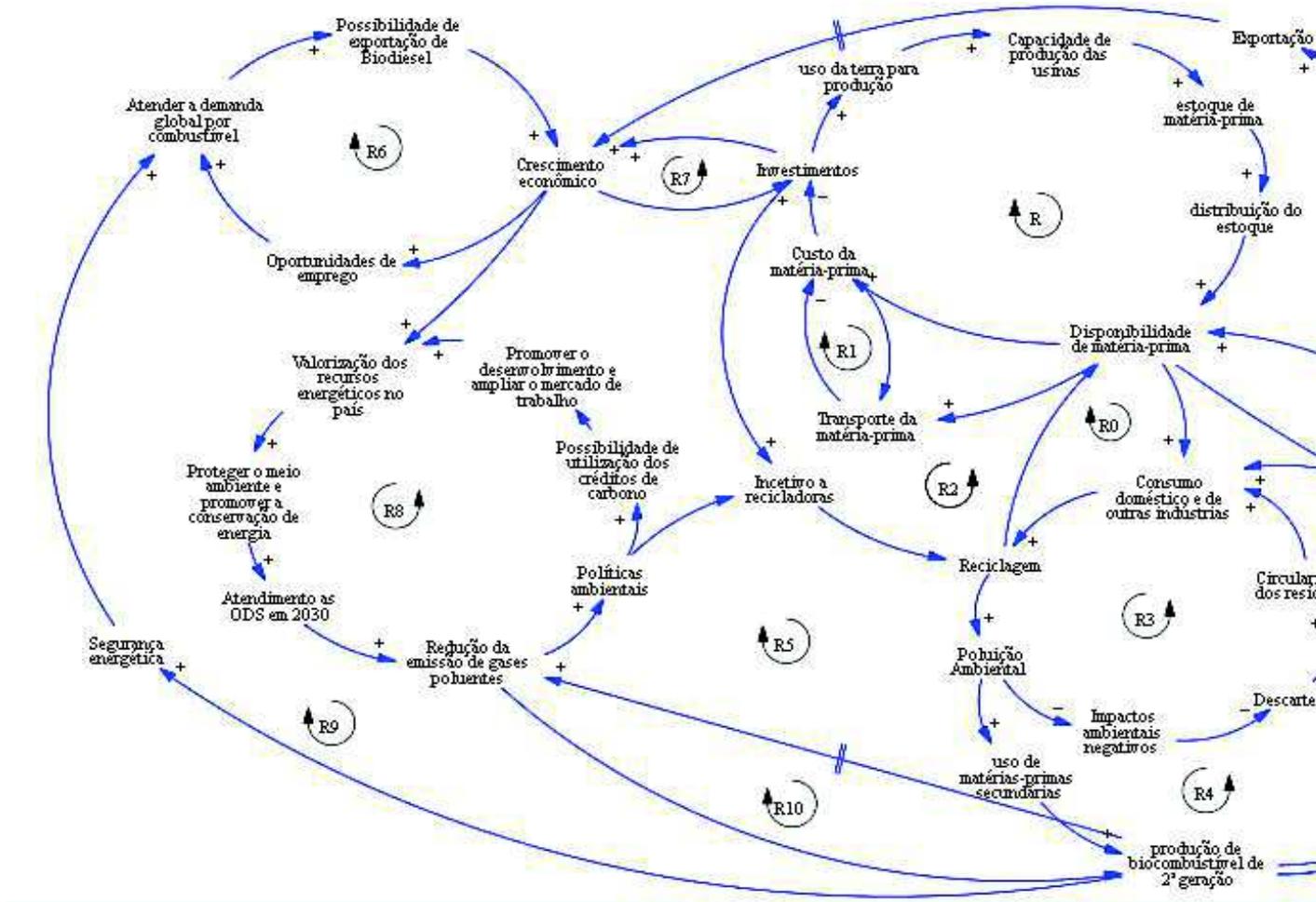
A DS permite analisar as cadeias de eventos circulares (loops) através de diversos tipos de diagramas (causais; estoque e fluxo) e a partir disto, é possível expressar graficamente um sistema, através da utilização de um *software*, possibilitando visualizar

o comportamento e a dinâmica das relações de um sistema e suas variáveis ao longo do tempo. Os diagramas circulares de *looping* de causa e efeito (realimentações) permitem visualizar qualitativamente as relações de causa e efeito que ocorrem entre as variáveis de um sistema. Enquanto os modelos de estoque e fluxo representam de forma quantitativa estas mesmas relações de causa e efeito, com o auxílio de um *software* onde são inseridos dados numéricos.

O *software* utilizado é o VENSIM PLE, que é uma ferramenta que mostra visualmente, a partir da introdução de dados nas variáveis que serão estudadas, as possibilidades de melhorias e/ou retrocesso em um determinado processo. Após a simulação, os resultados são analisados, a fim de definir as melhores estratégias para a tomada de decisão.

A concepção dos cenários e dos critérios e indicadores levando em consideração as dimensões analisadas contribuíram para a construção de um diagrama de *loop* casual (Figura 26) que foi usado como base para o desenvolvimento do modelo. Este modelo de diagrama de *loop* causal foi essencial para fornecer detalhes sobre a relação de causa e efeito no processo de produção do biodiesel de óleo residual, permitindo a análise de todas as variáveis que fazem parte do sistema (SILVA, 2009).

Figura 26: Diagrama de loop causal



Fonte: Elaboração própria utilizando o *software* Vensim PLE, 2022.

A partir deste diagrama, com todas as variáveis de causa e efeito, foi possível desenvolver de forma mais clara o modelo, tendo como base o reaproveitamento do óleo residual de fritura para a geração de biodiesel, sob os aspectos do descarte, reciclagem, quantidade de óleo destinado a produção de sabão, quantidade de óleo destinado a produção de biodiesel.

O desenvolvimento do modelo foi baseado na necessidade de se evidenciar o desempenho do uso de óleo residual de fritura como insumo produtivo na cadeia do biodiesel. Para tanto, utilizou-se a análise de cenários três cenários, um não sustentável e um sustentável em comparação ao cenário atual. Estes cenários estão relacionados com a participação do óleo residual de fritura no processo de produção do biodiesel, em um período de 10 anos (2020 a 2030). Para isto, foi necessário identificar algumas variáveis, constituído pelos seguintes passos: (1) estudo exploratório elaborado a partir de relatórios, dados estatísticos relevantes, utilizando como fontes de informações dados da (UBRABIO, ABIOVE e APROBIO, 2020), que juntas representam 90% de todo o biodiesel nacional e esses dados serviram para validação do modelo que foi desenvolvido; (2) construção de um modelo que represente a situação a ser estudada, utilizando o *software* VENISM PLE para representar o problema (Figura 27); (3) análise dos cenários obtidos; e (4) identificação do melhor cenário a partir das informações anteriores.

No cenário brasileiro atual, o diesel consiste em um combustível composto por 10% de biodiesel e 90% de diesel (B10). Quanto a matéria-prima secundária, apenas 2% do óleo de fritura residual é reciclado e o descarte representa 98% do total pós-consumo. Desses 2 % que são reciclados, 0,3% são para a produção de sabão, verniz, resina entre outros e, uma ínfima parte (1, 70%) vai para a produção de biodiesel (ABIOVE e UBRABIO, 2020). O cenário pessimista, denominado NS (não sustentável) foi estruturado na possibilidade do surgimento de gargalos, como a inserção de novas matérias-primas, implicando em uma menor participação do óleo residual de fritura na cadeia de produção do biodiesel. Enquanto o cenário otimista SUS (sustentável) apresenta o oposto, uma maior participação do óleo residual de fritura na produção de biodiesel, alavancando a produção deste biocombustível no país e aumentando o percentual de adição ao diesel.

Em relação ao modelo desenvolvido e às variáveis propostas, estas fornecem diversas explicações e são utilizadas para analisar a relação entre elas, cujos valores determinam o melhor aproveitamento desse resíduo e o destino para a produção do

biodiesel. Para isto, o modelo integra diversos parâmetros relevantes para o este estudo, tais como:

- (1) O óleo vegetal, que tem como estoque (entrada), a variável óleo para consumo interno e possui três fluxos de saída: (i) para a variável indústria alimentícia, que vai para a produção de maionese, gorduras e preparações alimentícias; (ii) para a variável consumo por indústrias, restaurantes e *fast foods*, que é cerca; e (iii) para a variável consumo doméstico. Os valores iniciais de entrada foram estabelecidos de acordo com dados da ABIOVE, 2020;
- (2) O consumo doméstico de óleo possui três fluxos de saída: (i) o óleo que vai para descarte; (ii) perdas no processo de fritura, por evaporação ou absorção pelos alimentos, que pode chegar a 50% de perda neste processo de cocção; e (iii) o óleo disponível para reciclagem;
- (3) O descarte foi determinado a partir dos valores atuais de descarte do proveniente do consumo doméstico, que varia de acordo com o óleo que é destinado ao consumo residencial (variável “percentual destinado ao consumo doméstico” que é influenciada pela variável *TIME*, onde o percentual de óleo destinado ao consumo residencial oscila durante o horizonte de tempo de 10 anos) e a variável taxa de descarte (98%). A variável taxa de descarte foi influenciada pela variável *TIME*, que indica a unidade de tempo durante a execução do modelo, neste caso, um período de 10 anos (2020-2030). Esta variável também foi determinada pelos cenários que foram estudados, aumentando e diminuindo a taxa conforme as informações do cenário que estava sendo simulado;
- (4) Para poluição da água, cujo resultado é obtido através produto da variável descarte pelo potencial poluidor deste resíduo, foi utilizado definido que para cada litro de óleo descartado 25.000 litros de águas são contaminados (TOKARSKI, 2021);
- (5) A variável óleo para reciclagem depende dos valores obtidos a partir das variáveis taxa de reciclagem (onde também foi utilizada a variável *TIME*) e a quantidade de óleo disponível para a reciclagem (2%) que foi sendo alterado conforme o cenário simulado (UBRABIO, 2020). Dois fluxos de saída foram definidos: (i) o que vai para o segmento de sabão, vernizes e outras indústrias,

que é determinada pela variável percentual destinado a indústria de sabão etc, esta também é influenciada pela variável *TIME*, modificada de acordo com o cenário simulado; e (ii) para a variável óleo para biodiesel, que tem outras duas variáveis determinantes, a variável taxa de conversão, onde foi utilizado o valor de 80% (SANTOS, 2009), e a variável percentual destinado ao biodiesel, que também utilizada a variável *TIME*;

- (6) A variável biodiesel é o resultado do óleo para biodiesel. Desses, 90% vai para o biodiesel, e os outros 10% são transformados em glicerina. Esta variável tem como fluxo de saída o biodiesel para mistura, que é determinada pela variável biodiesel e pela variável *TIME STEP*, que é uma variável que indica a quantidade de ciclos de cálculo em cada unidade de tempo;
- (7) A variável BX é determinada pelo somatório da quantidade de biodiesel para mistura, taxa de diesel para mistura menos as emissões. A taxa de diesel é definida pela variável diesel para mistura, que é influenciada pela variável *TIME* e pelo diesel disponível (ANP, 2020);
- (8) A variável emissões é definida pela multiplicação da variável BX e pela variável taxa de emissão, que também é determinada pela variável *TIME*. As taxas de emissões foram definidas de acordo missão de Gases de Efeito Estufa – 2050: Implicações Econômicas e Sociais do Cenário de Plano Governamental (CENTRO CLIMA/COPPE/UFRJ, 2015).

A partir destes dados, foram definidas as equações que foram utilizadas no modelo. Todas as equações estão descritas no Quadro 3.

Quadro 3: Parâmetros utilizados na modelagem dos dados

Variável	Parâmetros
Óleo para consumo interno (L)	8 bilhões de litros
Óleo vegetal (L)	Óleo para consumo interno (L)- "Consumo industrial, restaurantes, fast foods e outros" (L)- Consumo residencial (L)-Indústria alimentícia(L)
Indústria alimentícia (L)	Óleo vegetal (L)* Percentual destinado ao consumo na industria alimentícia / <i>time step</i>
Consumo industrial (L)	Óleo vegetal(L)* Percentual destinado ao consumo industrial / <i>time step</i>
Consumo residencial (L)	Óleo vegetal (L)* Percentual destinado ao consumo residencial / <i>time step</i>
Consumo doméstico (L)	Consumo residencial (L)-Descarte (L)-Perdas no processo de fritura (L)-Reciclagem(L)
Percentual destinado ao consumo doméstico/industrial/indústria alimentícia (%)	Usando a variável <i>time</i> de acordo com os cenários
Descarte (L)	Taxa de descarte*Consumo doméstico (L)

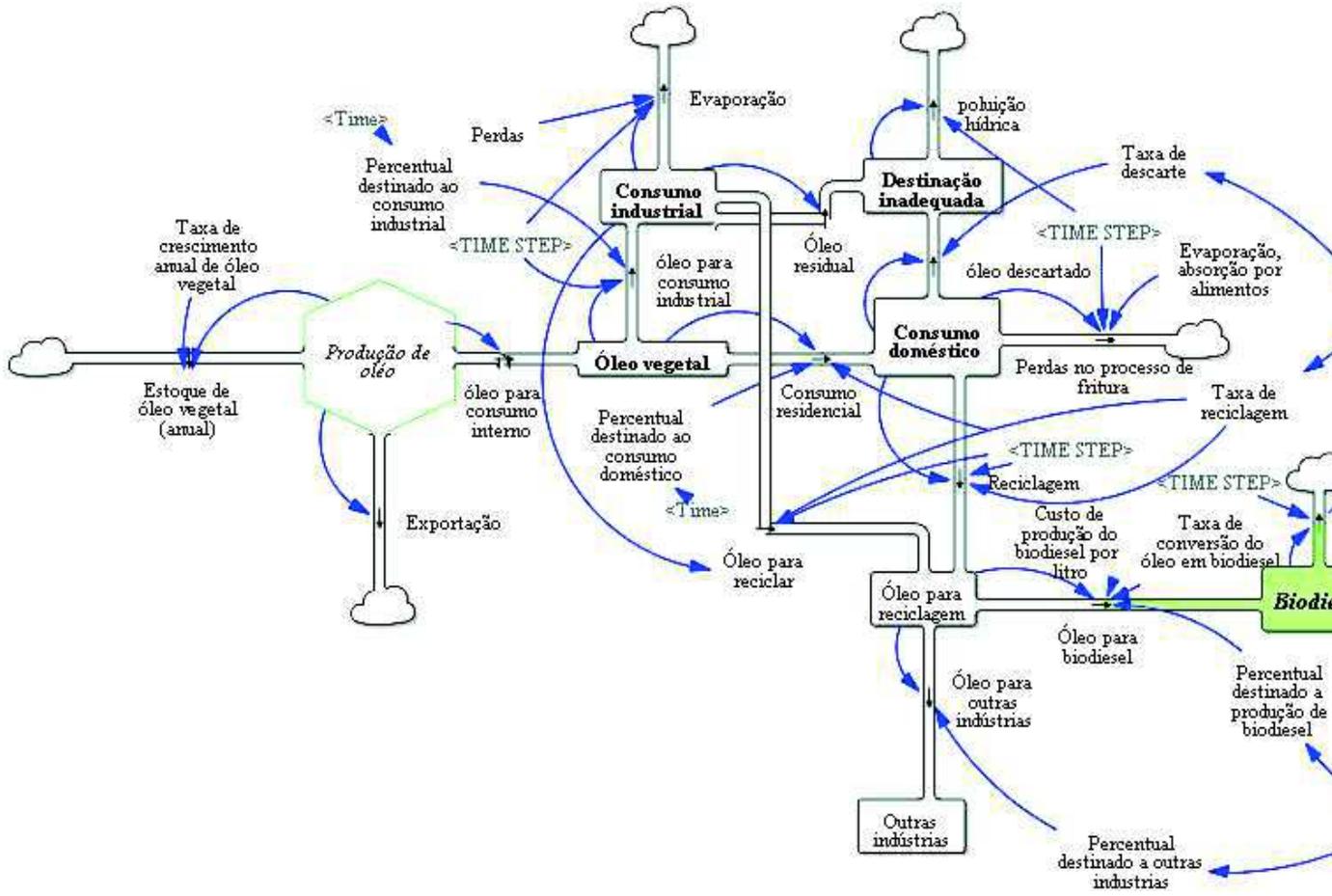
Taxa de descarte (%)	98% usando a variável <i>time</i>
Poluição de água (L)	Descarte (L)*25000
Reciclagem (L)	Taxa de reciclagem*Consumo doméstico/ <i>time step</i>
Taxa de reciclagem (%)	2% usando a variável <i>time</i>
Óleo para reciclagem (L)	Reciclagem (L)-"Indústria sabão, verniz, tinta e etc"(L)- Óleo para biodiesel (L)
Biodiesel (L)	Óleo para biodiesel (L) - Biodiesel para mistura (L) – Glicerina (L)
Biodiesel para mistura (L)	$V_{B100} * 0.9 / \textit{time step}$
Glicerina (L)	Biodiesel (L)*0.1/ <i>time step</i>
BX (L)	Biodiesel para mistura (L) +Taxa de diesel para mistura-Emissões (L)
Emissões (L)	BX (L)*Taxa de emissão
Taxa de emissão	<i>Time</i> (de acordo com o cenário simulado)

FONTE: Elaboração própria, 2022.

Onde: V_{B100} = volume em Litros de biodiesel puro;
0.9= 90% da produção de biodiesel;
0.1=10% de glicerina.

Em relação ao conteúdo do modelo construído, foram apresentadas todas as possíveis variáveis do tipo nível, do tipo taxa e as variáveis auxiliares, além das relações entre elas, a partir da problemática sobre a utilização do óleo residual para produção de biodiesel. Na análise dos diagramas de fluxo é possível perceber as estruturas causais, com elos de inter-relação. Esses elos se dão da seguinte forma: quando diminuirmos o volume de óleo descartado, diretamente estaremos diminuindo a taxa de descarte e a taxa de poluição do meio ambiente (água), com isso, aumentando o volume de óleo destinado à reciclagem.

Figura 27: Modelo desenvolvido



Fonte: Elaboração própria utilizando o software Vensim PLE, 2022.

O objetivo do desenvolvimento do modelo é apresentar graficamente a dinâmica entre as variáveis, explicando as relações diretas e indiretas entre as variáveis e suas diversas interpretações. O modelo desenvolvido proporciona diversas análises e vale ressaltar que o modelo é aberto a novas configurações, onde novos dados podem ser inseridos, de acordo com a realidade do cenário que deseja ser simulado. A partir da modificação nos valores das taxas e variáveis, novos resultados são gerados para análise.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Identificação das biorrefinarias localizadas para fazer parte da cadeia de fornecimento do biodiesel de óleo residual de fritura.

Os resultados obtidos pela análise da prospecção e mapeamento das biorrefinarias foram divididos em duas partes. A primeira, a apresentação e análise de um conjunto de informações acerca das quatro biorrefinarias localizadas próximas a mineradora (Vazante–MG) e que atuariam como fornecedoras de biodiesel para ser utilizado em sua frota (Figura 28).

Figura 28: Informações sobre as biorrefinarias selecionadas



Fonte: Elaborado a partir do sistema interativo google maps e dados da ANP, 2022.

Com o intuito de fazer a análise sobre a viabilidade econômica da definição da melhor biorrefinaria para fazer parte da cadeia de fornecimento de biodiesel para a mineradora, foi necessário definir os custos de aquisição e transporte do biodiesel. Os custos de aquisição tratam-se dos preços de mercado obtidos por meio de dados estabelecidos pela ANP, no último leilão do biodiesel (L82) (Tabela 9).

Tabela 9: Análise de custos

Biorrefinaria	Distância até a Mineradora (Km)	Preço B100 (R\$/L)	Custo de Transporte (R\$)	Quantidade de Tanques cheios	Custo do Volume de Biodiesel (R\$)	Custo total (R\$)
Petrobrás biocombustíveis	494	6	829,92	2,07	360000	R\$ 360.829,92
Binatural	355	5,97	596,40	1,49	358200	R\$ 358.796,40
Granol	445	6	747,60	1,87	360000	R\$ 360.747,60
Olfar	780	5,94	1310,40	3,28	356400	R\$ 357.710,40

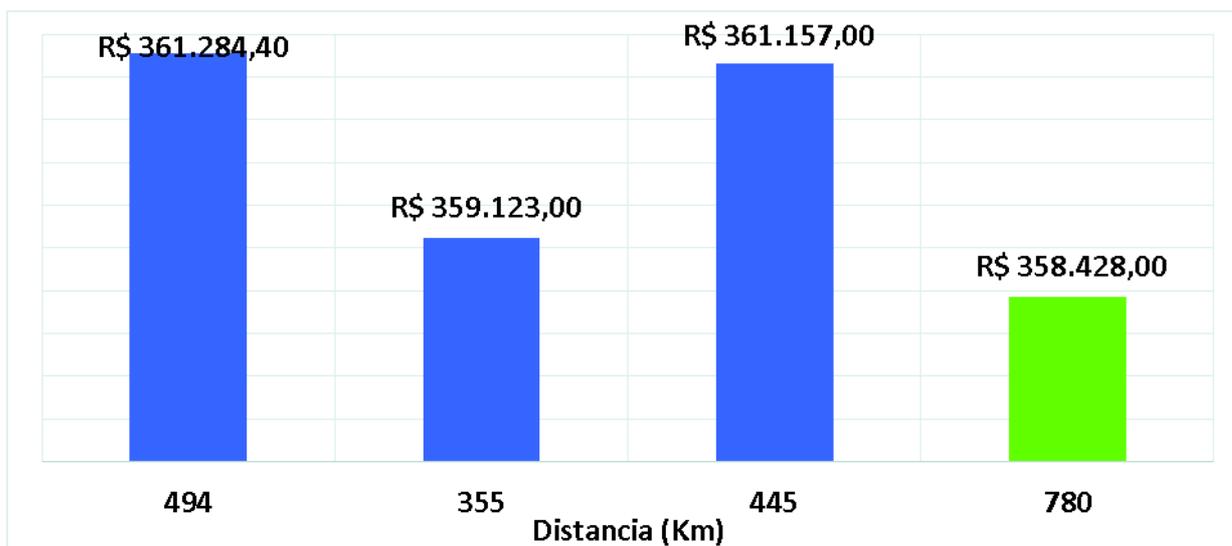
*Tanques cheios= tanques necessários para ir da biorrefinaria até a mineradora.

Fonte: Elaboração própria, 2022.

Todas as biorrefinarias selecionadas possuem capacidade para atender ao volume mensal de combustível utilizado pela frota. E os custos relacionados ao volume adquirido foram baseados na capacidade de produção total da biorrefinaria. Já os custos de transporte foram determinados considerando as rotas das biorrefinarias até a mineradora e o gasto com combustível, levando em consideração a utilização hipotética de um caminhão com capacidade de carregamento para 60.000L e tanque de combustível de 400L, percorrendo 2,5 km/L em média.

Desta maneira, foi possível definir qual a biorrefinaria que tem o menor custo total com relação ao preço final do biodiesel e o custo com o transporte (Figura 29). Para uma análise quanto à definição do custo total, foram utilizados os dados mencionados na Tabela 9, referentes ao custo do transporte e ao custo do volume de biodiesel. O custo do transporte envolve dados quanto a distância entre a biorrefinaria e a mineradora, o consumo do caminhão para fazer este trajeto (biorrefinaria/mineradora) e o preço atual do diesel (Abril/2022 - R\$ 6,50). Já o custo do volume de biodiesel foi definido utilizando dados do volume de carga do caminhão (60.000L) e o preço do B100 (R\$/L) praticado pelas biorrefinarias.

Figura 29: Análise para definição da melhor biorrefinaria quanto ao custo total



Fonte: Elaboração própria, 2022.

A Olfar, apesar de ser a biorrefinaria mais distante da mineradora com uma distância de 780 km, teve o menor preço médio de venda (R\$ 5,94), com um custo final de R\$ 358.428,00, para o lote de 60.000 litros. Enquanto que a Binatural ofertou o biodiesel ao preço médio de venda R\$ 5,97 e a Granol e a Petrobras biocombustíveis, ofertaram ao preço médio de venda com o valor mais alto (R\$ 6), tiveram um custo final de R\$ 359.123,00, R\$ 361.157,00 e R\$ 361.281,00 respectivamente.

Assim, os resultados indicam que levando em consideração as vantagens econômicas relacionadas ao preço do biodiesel, a biorrefinaria ideal para fornecer biodiesel para a mineradora, é a OLFAR, localizada em Porto Real - RJ, visto que a mesma apresentou o melhor preço final de aquisição do biodiesel para o lote de 60.000 L.

A Olfar se destaca pela sustentabilidade por gerar biodiesel a partir de óleo residual de fritura, gordura animal e óleo de soja. A produção é feita através de reações de transesterificação e esterificação, extraindo a glicerina bruta ao longo do processo. Além de contribuir com o meio ambiente, produzindo biodiesel ecologicamente correto, evitando o descarte de óleos e gorduras nas redes hídricas. Por meio de programas específicos, a Olfar realiza um trabalho colaborativo com cooperativas, através do recolhimento do óleo de reuso em suas comunidades. Toda a receita da venda do óleo reutilizável é revertida para os programas culturais e de esportes, destinados às crianças carentes desses locais. A Usina em Porto Real foi uma das primeiras unidades produtoras

de biodiesel no país a obter a certificação RenovaBio, concedida pelo Governo Federal, com objetivo de expandir a produção de biocombustíveis no Brasil, baseada na previsibilidade, na sustentabilidade ambiental, econômica e social, e compatível com o crescimento do mercado.

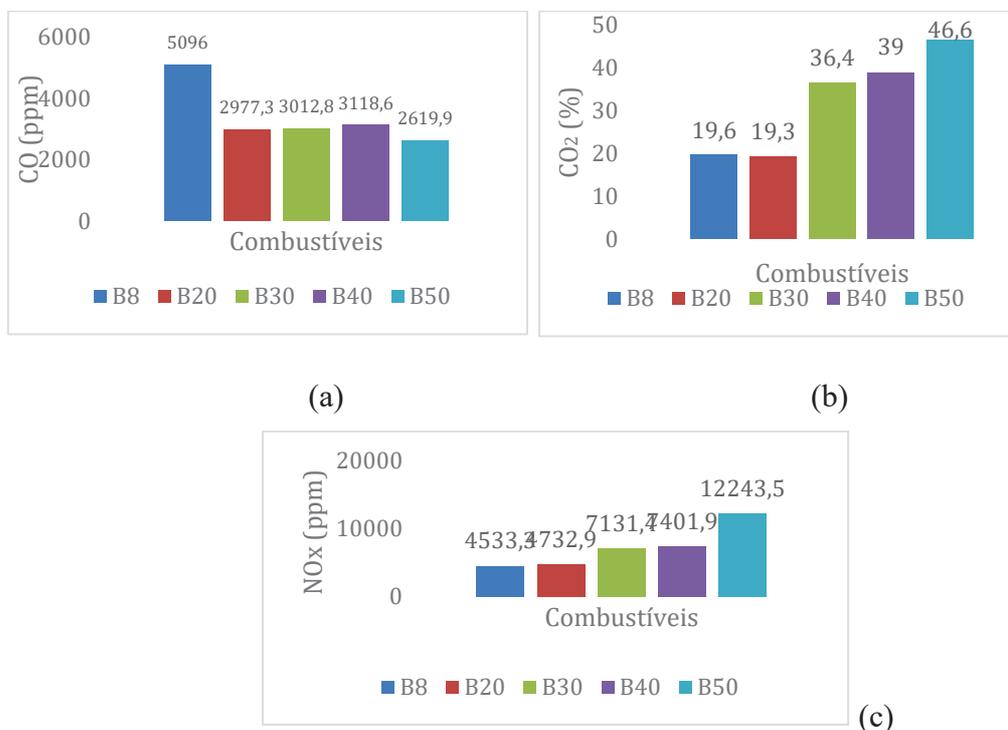
7.2 Procedimentos relacionados aos testes em ambiente laboratorial.

Durante os testes em ambiente laboratorial nenhuma mudança expressiva foi constatada, mostrando que o uso de altos teores de biodiesel em misturas com diesel, todos com o aditivo TECCOM, não apresentaram nenhum prejuízo significativo.

Os ensaios realizados com as misturas combustíveis nas condições de operação (rotações 1500 e carga de 100%) permitiu avaliar o impacto do uso desses combustíveis nas emissões de CO₂, CO e NO_x (Figura 30).

Para análise de comparação entre as emissões das misturas diesel/biodiesel, o presente trabalho considerou o B08 como a mistura padrão (100%), em razão de durante o período dos testes laboratoriais, a mistura obrigatória, de acordo com a Resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), era estabelecida, em volume, de oito por cento de biodiesel ao óleo diesel.

Figura 30: Emissões de CO (a), CO₂ (b) e NO_x (c) oriundas da queima de misturas diesel/biodiesel de óleo residual.



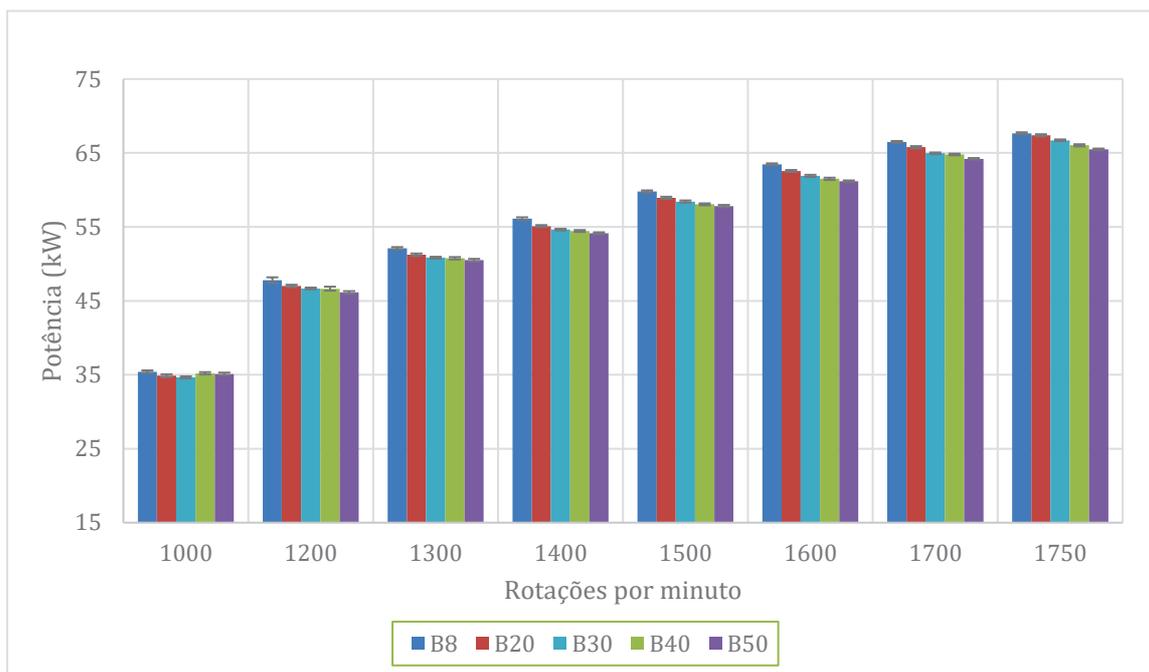
Fonte: Elaborado a partir de dados do dinamômetro, 2019.

A menor emissão de CO₂ em plena carga foi obtida com o B20, diminuiu 1,58% em relação ao B08. Enquanto que a maior emissão foi obtida com o B50, que obteve um aumento de 137,13% em relação ao B08. De uma forma geral, foi observado que a medida que se aumenta o teor de biodiesel na mistura. Com relação aos resultados para emissão de CO, a menor emissão foi obtida com B50, diminuiu 48,59% em relação ao B08 e maior emissão de foi obtida com o B08. Deste modo, o aumento do teor de biodiesel na mistura diesel/biodiesel, resultou na redução nas emissões de CO. Quanto ao resultado das emissões de NO_x, a maior emissão foi obtida com B50, um aumento de 170% em relação B08. Contudo, o aumento de NO_x se justifica pelo fato do biodiesel possuir um maior teor de oxigênio, o que eleva a temperatura durante a combustão e quanto maior a temperatura da câmara de combustão, maior a formação de NO_x (GHAZALI, 2015; ÖZTÜRK, 2015).

As mudanças climáticas vêm gerando grandes discussões sobre os compromissos dos países com a redução da emissão de gases do efeito estufa, principalmente do CO₂ que tem o setor de transporte como uma das principais fontes de emissão. Contudo, é importante mencionar que as emissões de diesel, contemplam desde o processo de exploração até a combustão, passando pela energia consumida no refino e pelo transporte e distribuição. Desta maneira, na elaboração do balanço ambiental, o uso de diesel com alto teor de biodiesel (B50) pode contribuir para a redução das emissões, por ser proveniente de fonte renovável e pela utilização de um insumo residual, que em decomposição no meio ambiente, emite metano, gás que é 28 vezes mais nocivo ao meio ambiente que o gás carbônico como agente responsável pelo efeito estufa (CETESB,2016).

Em relação a avaliação de desempenho utilizando as misturas diesel/ biodiesel de óleos residual de fritura, a carga plena (100%) e em oito condições de operação (1000, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700 e 1750 rpm). Os resultados mostraram que quanto maior for o percentual de biodiesel, os valores para potência permanecem próximos e com pouca variação (Conforme Figura 31).

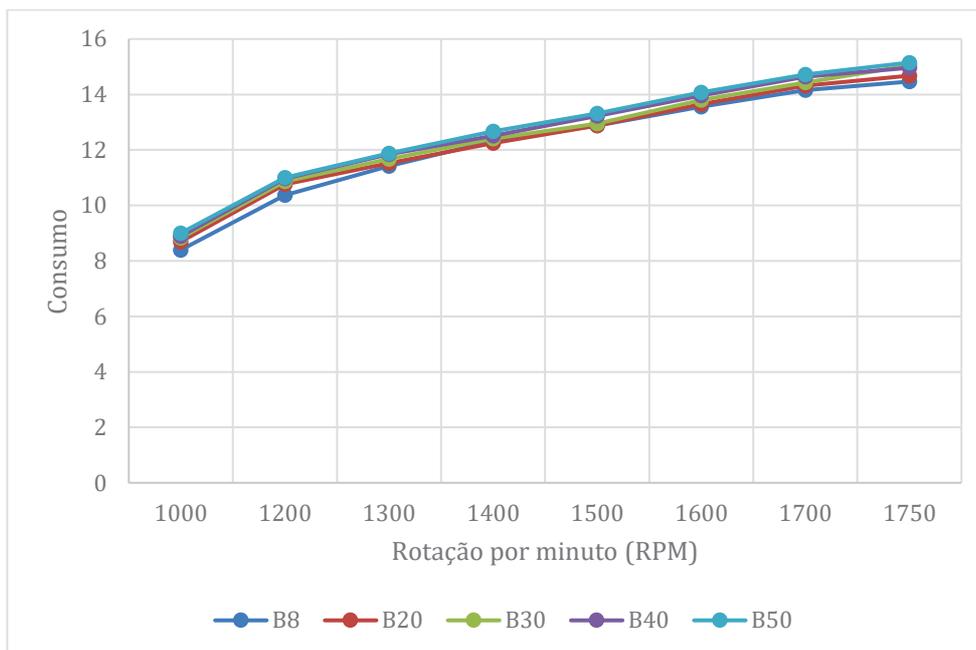
Figura 31: Desempenho das misturas diesel/biodiesel (Potência 100% de carga)



Fonte: Elaborado a partir de dados coletados em ambiente laboratorial, 2019.

Os valores de desempenho obtidos para todas as misturas diesel/biodiesel (B08, B20, B30, B40, B50), em 1750 rpm, não demonstram diferenças significativas, evidenciando que uma mistura diesel com alto teor de biodiesel de óleo residual pode ser utilizada em um motor ciclo diesel sem apresentar qualquer desvantagem operacional no veículo.

Enquanto os valores relacionados ao consumo apresentaram uma diferença, pouco significativa, com relação ao consumo entre as misturas diesel/biodiesel de óleo residual utilizadas nos testes em ambiente laboratorial (Figura 32).

Figura 32: Dados do consumo em ambiente laboratorial

Fonte: Elaborado a partir de dados coletados em ambiente laboratorial, 2019.

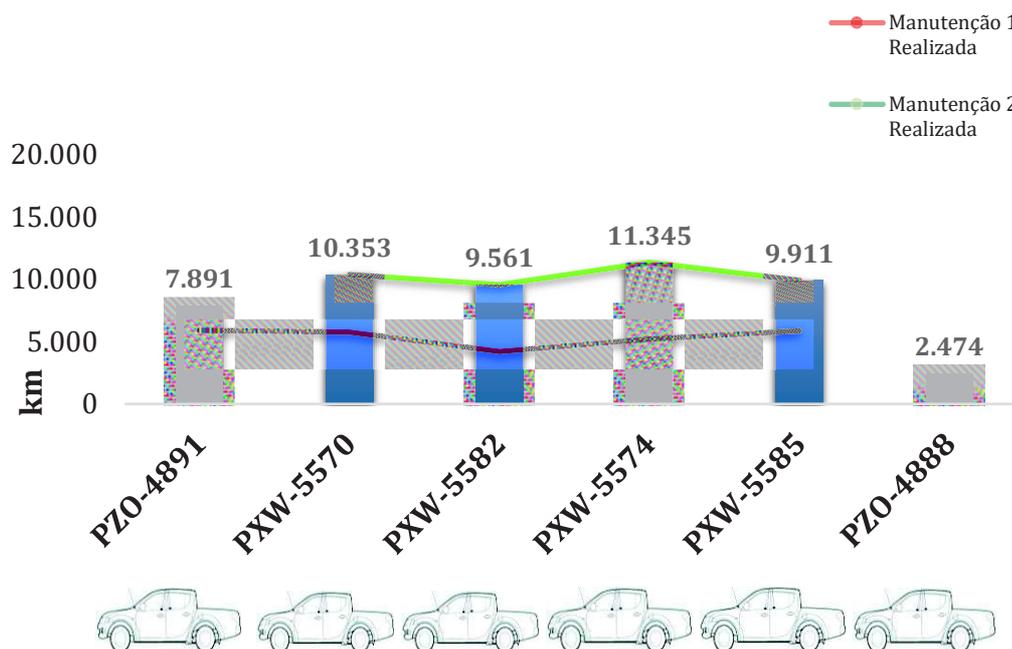
Os dados obtidos em relação ao consumo entre as misturas diesel/biodiesel utilizadas para testes, foi constatado um maior consumo de combustível para as misturas com maior teor de biodiesel. Nada significativo que justifique o não uso de diesel com altos teores de biodiesel, o que justifica a escolha do B50 como a mistura ideal para ser utilizado nos veículos dos testes em ambiente relevante.

7.3 Procedimentos relacionados aos testes em ambiente relevante

Os veículos utilizados para os testes em ambiente relevante foram submetidos a diversos percursos das áreas de trabalho dentro da mineradora e foram divididos em dois grupos, veículos de controle e veículos utilizando o B50. Os veículos de controle tinham placas (PZO-4888, PXW 5574, PZO-4891) e os veículos que utilizaram o B50 tinham placas (PXW-5585, PXW-5582, PXW-5570). Apenas o veículo com placa PXW-5585, era modelo 2018, os demais eram modelo 2017.

Durante o período de testes, o veículo PZO-4888 apresentou problemas mecânicos e foi desvinculado dos testes antes mesmo de atingir a quilometragem necessária para a 1ª Manutenção. E o veículo PZO-4891 não atingiu a quilometragem necessária para realizar a 2ª Manutenção, realizando apenas a primeira (Figura 33).

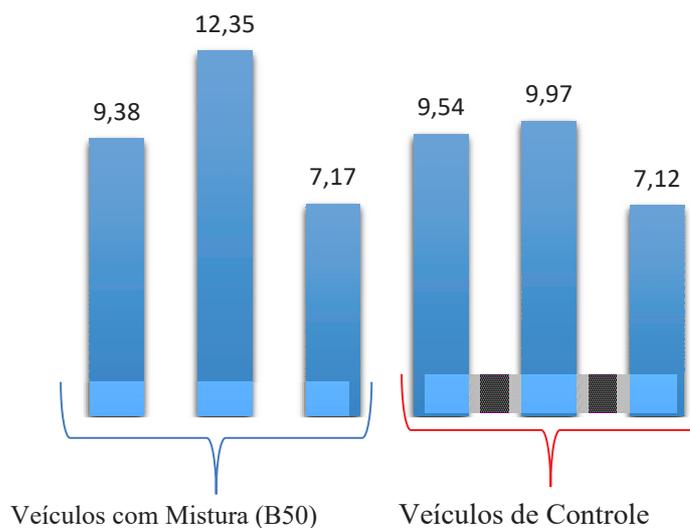
Figura 33: Manutenções e Acúmulos de km dos veículos



Fonte: Elaborado a partir de dados do projeto, 2019.

Os veículos que foram abastecidos com a nova mistura (B50) (Veículos 1, 2 e 3) não apresentaram diferença de desempenho quando comparados aos veículos que foram abastecidos com diesel comercial (S10). O consumo de combustível (km/L) se manteve (ou em alguns casos aumentou) mesmo com a utilização do B50. A partir da planilha de abastecimento, foi possível determinar qual a média de consumo por cada veículo, conforme demonstrada na Figura 34.

Figura 34: Média de consumo dos veículos utilizados para testes



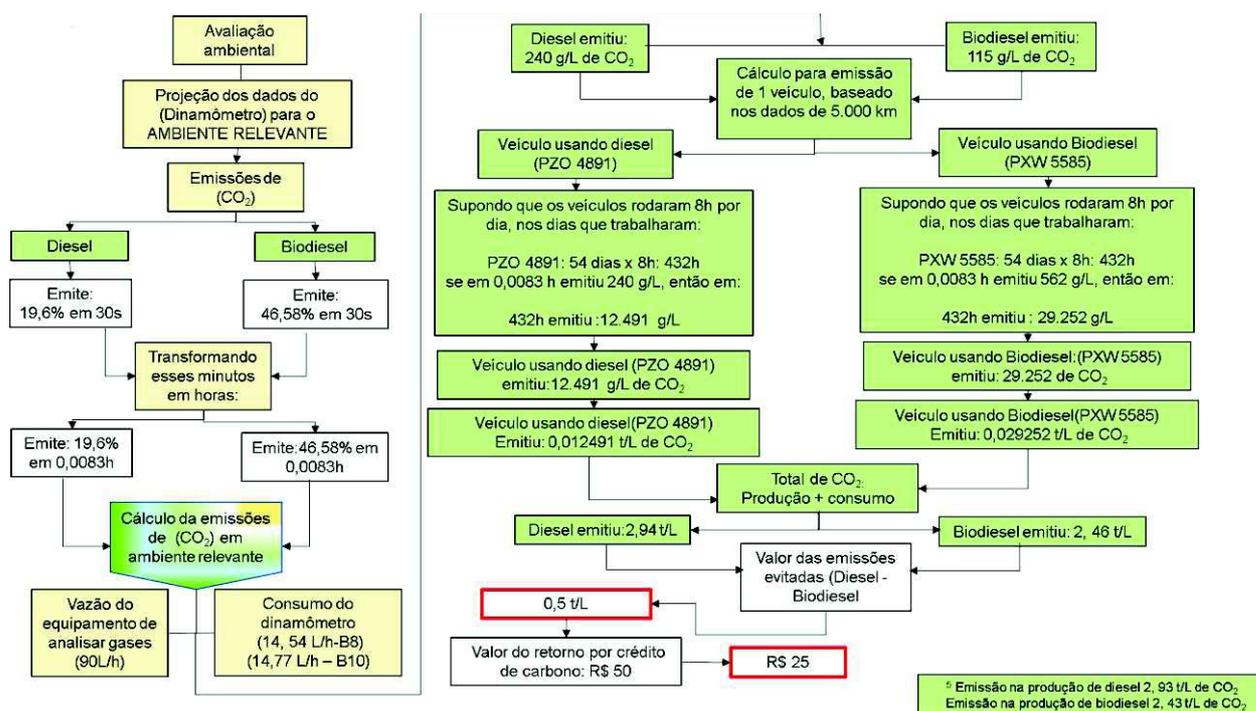
Fonte: Elaborado a partir de dados do projeto, 2019.

Foi possível observar que o consumo dos veículos ficou entre 7,12 a 12,35 Km/L. Desta forma, ficou evidente que os veículos que utilizaram o B50 apresentam resultados estatisticamente semelhantes aos veículos que utilizaram o S10, os veículos de controle.

Em relação ao desempenho da frota utilizando a nova mistura, foram reportadas algumas intercorrências de apenas um único veículo, como duas trocas do bico injetor em menos de 1 mês, além de um pouco de vibração e perda de aceleração. Essas trocas podem ter relação com o uso da nova mistura ou não, visto que o mesmo veículo precisou usar o diesel S10 durante a greve dos caminhoneiros (21 a 30 de maio de 2018), podendo isto justificar a troca do bico injetor e as falhas reportadas pelos motoristas. Diferente de outras peças, os bicos injetores não possuem uma quilometragem ou periodicidade específicas para serem trocadas, e só devem ser substituídos quando algum defeito for detectado. Ademais, no que tange o desempenho dos veículos utilizando a nova mistura, não foram encontrados nada que indique comportamento negativo quanto ao uso diesel com alto teor de biodiesel de óleo residual.

No que tange a avaliação dos filtros de combustível e óleo lubrificante dos veículos utilizados para testes em campo, os resultados obtidos mostraram que as análises de massa específica e teor de água, dos veículos/testes que utilizaram diesel com alto teor de biodiesel de óleo residual, mostraram-se dentro das especificações e compatíveis com os testes realizados com diesel S10, não havendo prejuízo nos veículos que utilizaram a nova mistura (MASSI, 2019).

Para avaliação das emissões em ambiente relevante, foi utilizado um mapa processual para facilitar a análise dos dados, foram utilizados os valores do ambiente laboratorial referente a vazão do coletor de gases e o consumo (horas) do dinamômetro (Figura 35). Também foram utilizados dois veículos que tivessem quilometragem semelhantes e dessa forma a análise fosse fiel a realidade das emissões de CO₂ na mineradora. Na avaliação das emissões também foram utilizados os dados da compensação de crédito de carbono (na substituição do diesel pelo biodiesel, considera-se 3,5 créditos por tonelada de carbono) e o valor de retorno por crédito de carbono (R\$ 50/tonelada).

Figura 35: Emissões de CO₂ em ambiente relevante

Fonte: Elaborado a partir de dados coletados em ambiente relevante, 2019.

- O preço do crédito de carbono foi baseado nos valores de venda dos CBIOs, RenovaBio (2020).

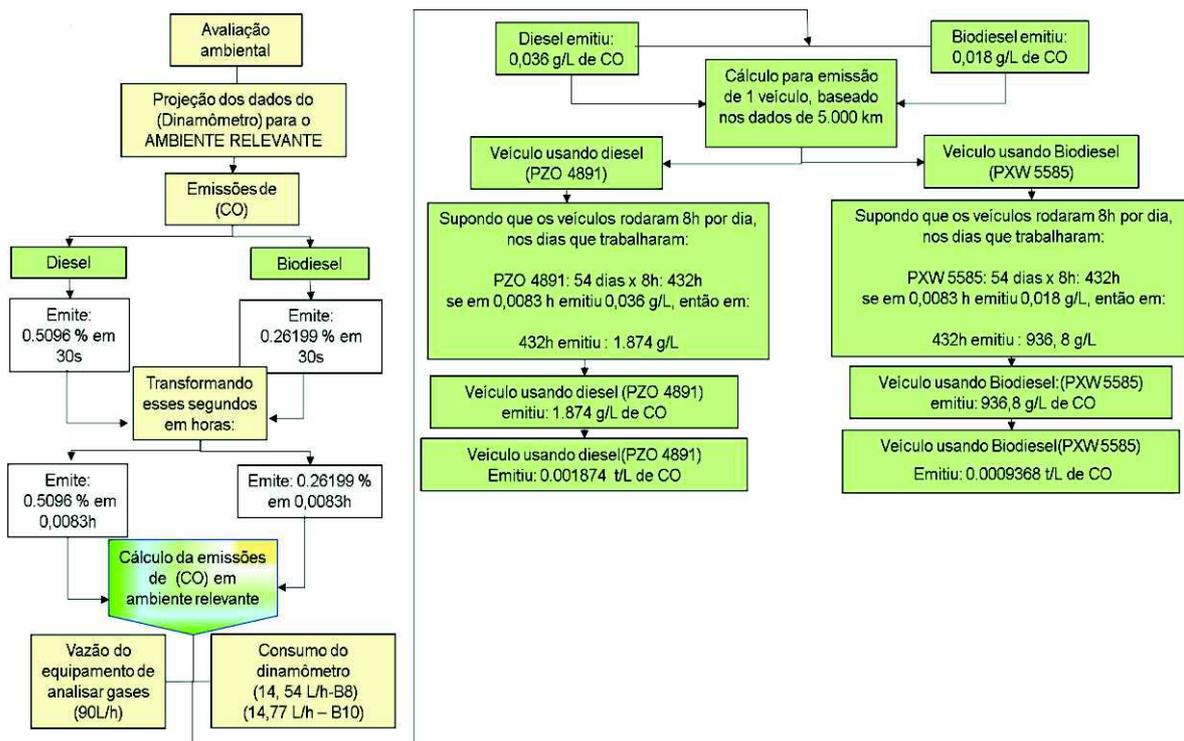
Assim como em ambiente laboratorial, demonstraram um significativo aumento nas emissões de CO₂. Contudo, nas emissões totais, através da substituição do diesel pelo biodiesel, foi possível prever um ganho com o crédito de carbono, onde um crédito de carbono é a representação de uma tonelada de carbono que deixou de ser emitida para a atmosfera, contribuindo para a diminuição do efeito estufa. Desta forma, a empresa lucraria em torno de R\$ 12,80 por cada tonelada de carbono que deixou de emitir.

Para cumprir os compromissos estabelecidos na COP 21, o Brasil estabeleceu metas anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, com o intuito de aumentar a participação de bioenergia na matriz energética brasileira para aproximadamente 18% até 2030. E em junho de 2020, iniciou-se a comercialização e o registro do Crédito de Descarbonização (CBIO) na B3, através de sua plataforma na bolsa de valores, no mercado de balcão. O CBIO, proveniente da POLÍTICA NACIONAL DE BIOCOMBUSTÍVEIS (RenovaBio), é um instrumento registrado sob a forma escritural, para fins de comprovação da meta individual do distribuidor de combustíveis. Assim, todo investidor, nacional ou internacional, poderá adquirir o CBIO, que corresponde a uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e), contudo, para os distribuidores,

a aquisição do CBIO é obrigatória e definida por metas de descarbonização anuais (ANP, 2020). A primeira negociação de créditos de carbono precificou os CBIOs a R\$ 50, equivalente a US\$ 9,92, em junho deste ano (RenovaBio, 2020).

Em relação as emissões de CO, foi utilizado o mesmo mapa processual, utilizando alguns valores relacionados as coletas em ambiente laboratorial. Foram utilizados os mesmos veículos para todas as análises de emissões (Figura 36).

Figura 36: Emissões de CO em ambiente relevante

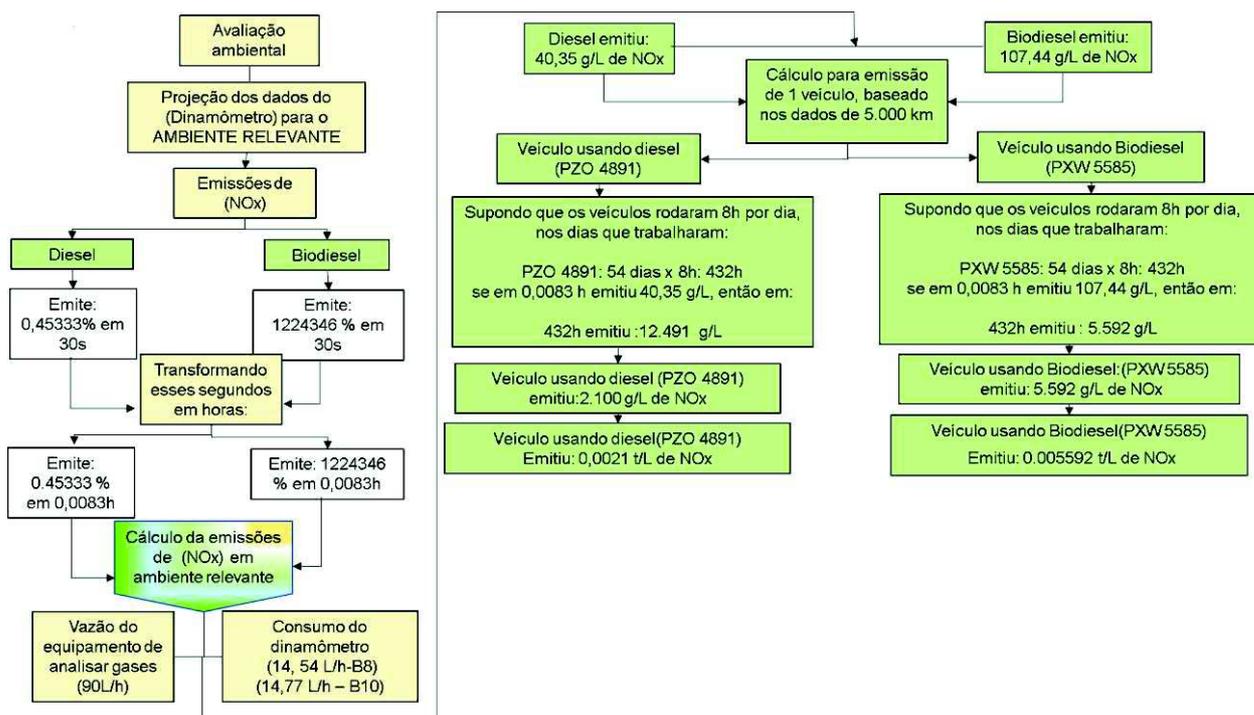


Fonte: Elaborado a partir de dados coletados em ambiente relevante, 2019.

As emissões de CO estão em conformidade com as emissões em ambiente laboratorial. A menor emissão de CO foi obtida com a utilização da mistura B50. Assim, o aumento do teor de biodiesel na mistura combustível refletiu em uma redução nas emissões de CO.

As análises referentes as emissões de NOx (Figura 37), estão em concordância com as análises das emissões anteriores, utilizando a mesma base de informações.

Figura 37: Emissões de NOx em ambiente relevante



Fonte: Elaborado a partir de dados coletados em ambiente relevante, 2019.

Assim como em ambiente laboratorial, os dados obtidos para as emissões de NO_x demonstram que quanto maior teor de biodiesel maior a emissão deste poluente. Como mencionado nas análises de ambiente laboratorial, isso se justifica pelo teor de oxigênio que o biodiesel contém, elevando a temperatura durante a combustão, ocasionado uma maior formação de NO_x (GHAZALI, 2015).

7.4 Avaliação econômica da aplicação da mistura na frota veicular da mineradora

Relativo ao aproveitamento de uma matéria-prima residual, para utilização em uma frota de mineração, inicialmente sendo utilizada em apenas três veículos L200, dos quais foram apresentados resultados econômicos positivos em dois deles, embora novas análises possam ser realizadas a fim de serem identificados os fatores que podem ter influenciado o consumo divergente entre os veículos, como o estilo de dirigir, tipo de percurso, topografia, peso de carga transportada, uso de ar condicionado, entre outros.

As informações mais precisas e relevantes para fazer a análise quanto aos custos e consumo de combustível, foram as informações referentes aos veículos que no período de 2018 utilizaram como combustível o diesel S10 e B50 utilizando a mesma quilometragem como parâmetro para a avaliação. Visto que dois dos veículos que estavam selecionados para utilizar o diesel S10 no período de testes apresentaram

problemas. O veículo PZO 4888 apresentou uma falha no contador de quilometragem, que não está relacionado com o projeto e precisou ser desvinculado antes de fazer as manutenções previstas. Assim como, o veículo PZO 4891 que não atingiu a quilometragem necessária para fazer a manutenção 2, impedindo que eles atingissem a quilometragem desejada para realizar a avaliação (Tabela 10 e Tabela 11).

Tabela 10: Custos com diesel durante o período de testes em ambiente relevante

Mês	mai/18	jun/18	Julho	ago/18
Consumo diesel S10 (L)	457	791	923	433
Custo diesel S10 (R\$/L)	R\$ 3,22	R\$ 3,04	R\$ 3,38	R\$ 3,37
Consumo Teccon (L)	0,457	0,791	0,923	0,433
Custo Teccon (R\$/L)	R\$ 47,25	R\$ 47,25	R\$ 47,25	R\$ 47,25
Gasto com Diesel	R\$ 1.471,54	R\$ 2.404,64	R\$ 3.119,74	R\$ 1.459,21
Gasto com Teccon	R\$ 21,59	R\$ 37,37	R\$ 43,61	R\$ 20,46
Gasto Total	R\$ 1.493,13	R\$ 2.442,01	R\$ 3.163,35	R\$ 1.479,67

*Diesel S10: É importante salientar que quando se menciona o diesel S10, está se falando do diesel com determinada proporção de biodiesel que são estabelecidos por Lei. Na época do projeto o diesel S10, tinha 08% de biodiesel, atualmente o diesel S10 possui 13% de biodiesel.

Fonte: Elaborado a partir de dados do projeto B50, 2018.

Tabela 11: Custos com biodiesel durante o período de testes em ambiente relevante

Mês	mai/18	jun/18	Jul/18	ago/18
Consumo biodiesel B50 (L)	650	1406	1448	887
Custo biodiesel B50 (R\$/L)	R\$ 2,69	R\$ 2,69	R\$ 2,56	R\$ 2,56
Consumo Teccon (L)	0,65	1,406	1,448	0,887
Custo Teccon (R\$/L)	R\$ 47,25	R\$ 47,25	R\$ 47,25	R\$ 47,25
Gasto com biodiesel	R\$ 1.748,50	R\$ 3.782,14	R\$ 3.706,88	R\$ 2.270,72
Gasto com Teccon	R\$ 30,71	R\$ 66,43	R\$ 68,42	R\$ 41,91
Gasto Total	R\$ 1.779,21	R\$ 3.848,57	R\$ 3.775,30	R\$ 2.312,63

Fonte: Elaborado a partir de dados do projeto B50, 2018.

Os custos com biodiesel (B50) foi definida pelo custo de venda do litro do biodiesel (R\$/L), utilizado pela biorrefinaria escolhida para fornecer biodiesel no período de 2018. O fato dos veículos que utilizaram biodiesel apresentarem os custos relacionados com combustível superiores aos veículos que utilizaram diesel, é justificado pela quilometragem inferior que aos veículos que utilizaram biodiesel Diesel S10 não atingiram. Então, a análise foi realizada utilizando os veículos que rodaram com diesel com a mesma quilometragem dos veículos que utilizaram biodiesel (B50) (Tabela 12).

Tabela 12: Custos com diesel rodando a mesma quilometragem que os veículos que utilizaram biodiesel (B50)

Mês	mai/18	jun/18	Julho	ago/18
Consumo diesel S10 (L)	650	1406	1448	887
Custo diesel S10 (R\$/L)	R\$ 3,22	R\$ 3,04	R\$ 3,38	R\$ 3,37
Consumo Teccon (L)	0,65	1,406	1,448	0,887
Custo Teccon (R\$/L)	R\$ 47,25	R\$ 47,25	R\$ 47,25	R\$ 47,25
Gasto com Diesel	R\$ 2.093,00	R\$ 4.274,24	R\$ 4.894,24	R\$ 2.989,19
Gasto com Teccon	R\$ 30,71	R\$ 66,43	R\$ 68,42	R\$ 41,91
Gasto Total	R\$ 2.123,71	R\$ 4.340,67	R\$ 4.962,66	R\$ 3.031,10

Fonte: Elaborado a partir de dados do projeto B50, 2018.

É possível observar que com relação os custos relacionados com combustível, os veículos que utilizaram diesel (S10) apresentaram custos superiores aos veículos que utilizaram biodiesel (B50), quando rodam com a mesma quilometragem, gerando uma economia entre R\$ 500 e R\$ 1.000 reais por mês.

7.5 Avaliação dos cenários utilizando o método PEIR como base para a dinâmica de sistemas

Os indicadores e seus pesos utilizados no PEIR foram desenvolvidos como uma proposta para a análise dos possíveis impactos (negativos ou positivos) do uso do biodiesel de óleo residual para compreender a importância desses impactos na cadeia produtiva do biodiesel. O valor atribuído para cada um desses indicadores foi determinado utilizando como base os dados obtidos durante o projeto, as entrevistas realizadas e dados da literatura (Tabela 13).

Tabela 13: Resultados qualitativos e quantitativos dos cenários analisados

Dimensões	Critérios	DESCRITOR	INDICADOR (+/-)	Unidade	Tipo (PEIR)	Valor	Cenário atual		
							Peso	1	
Legal e gerencial	Amparo legal	Ações governamentais em vigor (Leis, decretos, resoluções e normas)	Número de iniciativas em vigor	número	P	35	8	1	
	Responsabilidade socioambiental	Responsabilidade social na gestão ambiental incluindo ações com mobilização da sociedade e em atendimento aos requisitos legais e gerenciais	Relatório de sustentabilidade	Sim(1)/Não(0)	R	1	5	1	
			Campanhas de coleta de óleo residual	Sim(1)/Não(0)	I	1	8	1	
			Campanhas de Treinamento de funcionário	Sim(1)/Não(0)	I	1	8	1	
			Estabelecimento de padrões internos de sustentabilidade	Sim(1)/Não(0)	E	1	9	1	
Ambiental	Adequação aos requisitos	Atendimento aos requisitos legais e normativo	Licença ambiental válida	Sim(1)/Não(0)	R	1	10	1	
			Atendimento às notificações de órgãos ambientais	Sim(1)/Não(0)	R	1	9	1	
	Campanhas e rede de sustentabilidade	Realização de campanhas para coleta de OGR por iniciativa do governo	Número de campanhas realizadas	Sim(1)/Não(0)			1	8	1
	Energia Renovável	Proveniente de uma matéria-prima residual que passa a ter valor ao fim de sua vida útil	Distância do fornecedor de OGR para a usina	km		R	780 km	8	6
	impacto da geração de resíduos	Mitigação dos impactos em razão da inserção do resíduo como insumo em outras cadeias produtivas	Volume de resíduo gerado na produção do biodiesel	Tonelada	I		¹ Glicerina (643 milhões de litros)-Fonte: ANP, 2021.	7	4.501
				Tonelada	I		² Cinza (1.920)-Fonte: Altos e Voese, 2013.	7	1
				Tonelada	I		³ Borra(480)-Fonte: Altos e Voese, 2013	7	3
				Litros	I		⁴ 120 L (água de efluentes) - Fonte: Chavalparit e Ongwande, 2009	7	1
	Risco de contaminação de cursos hídricos	Mitigação em razão da redução do descarte do óleo residual	Volume de óleo que deixa de ser descartado	Tonelada/ano		R	Ano base (2024): 390.000.000 (Cenário atual)/ 780.000.000(Cenário sustentável)/ 195.000.000(Cenário não sustentável)	10	3.900
	Emissões de gases de efeito estufa (GEE)	Emissões pela estocagem e produção podem ser mitigadas pela adição de antioxidantes à fórmula, mas impacta o custo de produção	Quantidade de CO2 que deixa de ser emitida	Kg/L		R	Ano base (2024): 5 (Cenário atual)/ 14 (cenário sustentável)/ 5 (cenário não sustentável)	10	1
	Economia Circular	Reinserção de resíduos no ciclo produtivo do biodiesel	Escolha por trabalhar com óleo residual	Sim(1)/Não(0)		P	1	8	1
	Consumo de diesel	Identificação do consumo de diesel pela frota da mineradora no período de (Maio/agosto)	Volume estimado de diesel consumido na região	Litros/mês			651 litros	10	6
	Segurança energética	Diminuição da petrodependência, com a garantia do fornecimento de biodiesel	Volume de OGR coletado	L/mês		I	5.200 litros	8	4

Continuação Tabela 13...

Econômica	Oferta do biodiesel	Disponibilidade do produto em função da proximidade com clientes e fornecedores	Percentual da Frota atendida	Número	R	44	9	
	Custo de produção	Obtenção de insumo	Custo com matéria-prima	R\$/L	I	1 real	8	
	Custo de armazenagem	Armazenamento do biodiesel	Custo com armazenagem	R\$/mês	I	R\$ 0,00	1	
	Custo financeiro	Investimento	Custo do projeto	R\$/mês	I	R\$ 1.218.000	10	124
	Custo operacional do tratamento de esgotos	Mitigação do impacto em razão do uso de uma matéria-prima com alto potencial poluidor	Custo com a manutenção da rede de esgotos	R\$/mês	E	1,36 R\$/m ³	10	
	Custo ambiental evitado	Redução no custo total em função dos custos ambientais evitados	Estimativa de redução	R\$/mês	R	R\$ 12,80	8	
	Postos de trabalho	Geração de empregos diretos e indiretos	Quantidade de empregos gerados	Número /ano	E	5 52 empregos diretos e 590 empregos indiretos	8	410
Tecnológica	Infraestrutura	Adequação da infraestrutura para produção do biocombustível	Adequação da empresa	Sim(1)/Não(0)		1	10	
	Equipamentos	Equipamentos para produção	Equipamentos atendem a demanda	Sim(1)/Não(0)		1	8	1 (Porque não foi custo da mineração)
	Manutenção	Manutenção preventiva	Realização de manutenção preventiva	Sim(1)/Não(0)		1	8	
	Padrões de eficiência	Mensuração de critérios de eficiência	Relação de medições	Sim(1)/Não(0)		1	8	
								402

Fonte: Elaboração própria, 2022.

¹ ANP, 2021(10% do biodiesel produzido em 2020).

^{2, 3} ALTOE E VOESE, 2013.

⁴ CHAVALPARIT e ONGWANDEE, 2009.

⁵ UBRABIO, 2012 (projeções para 2020).

O totalizador é o somatório da pontuação quanto ao grau de criticidade de cada impacto. Somando todas as interações entre as linhas e colunas elaboradas na planilha, através do totalizador, podem-se visualizar os impactos com maior pontuação e maiores criticidades. A Tabela 13 permitiu sintetizar os dados referentes às dimensões ambientais, econômicas, legais e tecnológicas, representando as informações mais significativas com relação aos cenários propostos e o que de fato era necessário avaliar.

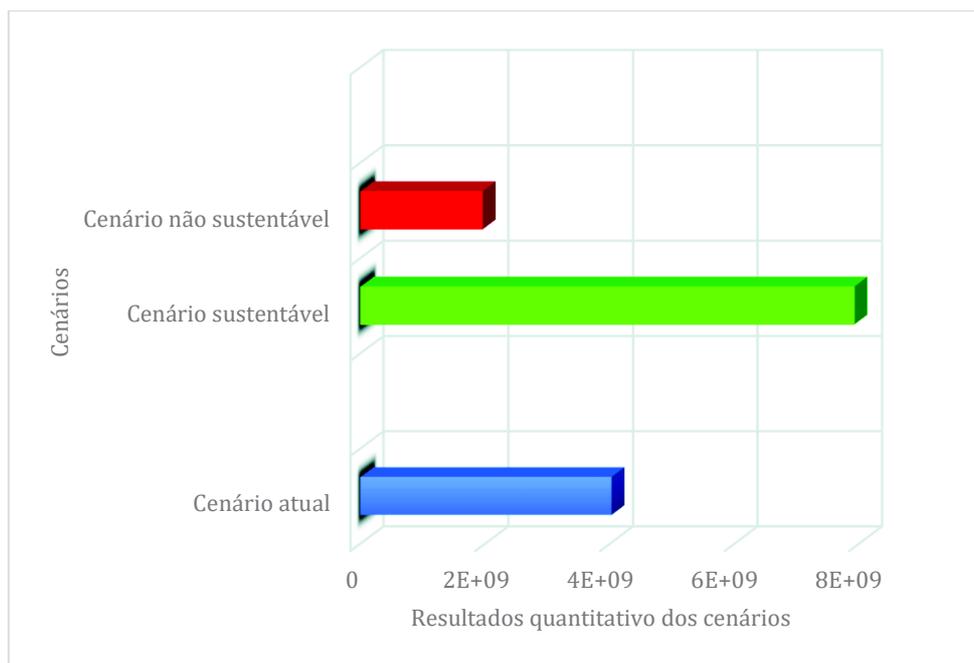
Na dimensão ambiental foi necessário avaliar o uso de uma matéria-prima não convencional (Resíduo), a mitigação dos impactos negativos que o descarte deste resíduo pode representar para a preservação e conservação do meio ambiente, levando em conta a mitigação da contaminação dos cursos hídricos em razão da utilização de um resíduo com grande potencial poluidor.

A dimensão legal/gerencial referiu-se a importância dos aspectos legais e da responsabilidade da empresa associadas com ações socioambientais e com o desenvolvimento sustentável.

A dimensão técnica abordou questões relacionadas ao uso do biodiesel de OGR em uma frota veicular do setor de mineração, considerando os critérios de manutenção, recursos humanos e infraestrutura.

A dimensão econômica buscou ressaltar o potencial de possíveis ganhos econômicos a partir da valorização do uso de uma matéria-prima de baixo custo, incentivando o uso de matérias-primas residuais em potencial.

Na análise dos somatórios a tendência foi que os pesos do cenário sustentável foram maiores para os impactos positivos e menores para os impactos negativos, o que ocorreu de forma contrária para o cenário não sustentável e variando para o cenário atual, mostrando que o cenário atual, apesar de poucas variações, está mais próximo do sustentável (Figura 38).

Figura 38: Análise de viabilidade dos cenários analisados

Fonte: Elaboração própria, 2022.

A proximidade do cenário atual com o cenário sustentável acontece pelo fato de ser um cenário que também está baseado na busca pelo equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e as limitações atreladas ao ecossistema. Desta forma, o cenário atual, mesmo que de forma mais lenta que o cenário sustentável, também pode contribuir para prevenir desequilíbrios ambientais e crises energéticas.

Em Relação ao modelo desenvolvido e as variáveis apresentadas, estas proporcionam diversas interpretações, que foram analisadas de acordo com o objetivo desta tese. Os valores obtidos para as variáveis de taxa de reciclagem, taxa de descarte e a quantidade de óleo disponível para a reciclagem foram estabelecidas de acordo com dados da Ubrabio (2021).

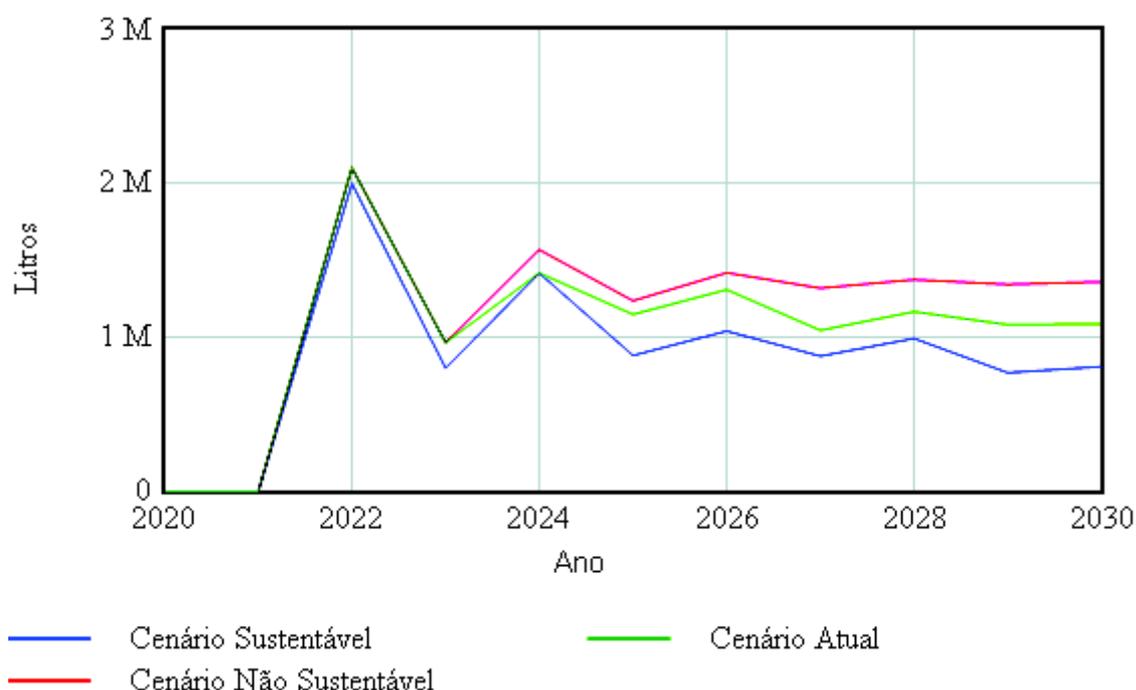
A inserção de matérias-primas residuais, como o óleo residual de fritura, como fonte alternativa para a cadeia produtiva do biodiesel, pode ser parte importante da futura conjuntura da matriz energética nacional e do aumento e participação da adição de biodiesel ao diesel. Baseado nos dados dos cenários estudados foi possível verificar que o aumento da participação do óleo de fritura na cadeia de produção de biodiesel apresenta benefícios ambientais imensuráveis, visto que quanto mais aumenta a taxa de reciclagem

menor será a taxa de descarte deste resíduo, minimizando os impactos ambientais causados pelo descarte incorreto.

Para a realização da simulação, foram projetados dois cenários (Sustentável e não sustentável), que forma definidos a partir de um cenário atual. No Cenário sustentável, mais otimista, a quantidade de biodiesel utilizada foi incrementada gradativamente, de 12% em 2020 até chegar em 50% no último ano da simulação, o horizonte de tempo simulado no experimento foi de 10 anos (2020-2030).

A primeira análise desenvolvida com o modelo refere-se a variável consumo doméstico, a partir do óleo utilizado para o consumo residencial menos o óleo descartado, o óleo reciclado e as perdas no processo de fritura, conforme Figura 39.

Figura 39: Consumo doméstico

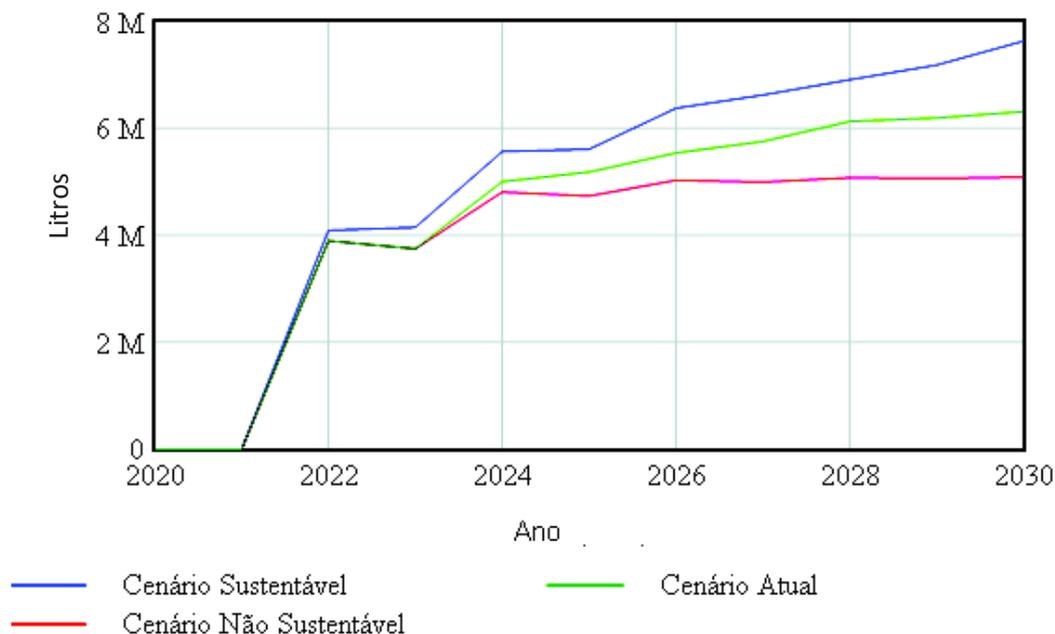


Fonte: Elaborado utilizando o *software* VENSIM PLE, 2022.

De acordo com dados da Abiove (2021), o Brasil produziu cerca de 113 mil (m³) de biodiesel a partir de óleo residual em 2021, cerca de 1,70% da produção nacional. Na Figura acima é possível perceber que a produção de biodiesel, a partir da recuperação de óleos residuais, também foi analisada em um contexto no qual o consumo de óleos refinados em residências vem declinando a cada ano devido à mudança de hábitos alimentares. É possível perceber que em um cenário sustentável o consumo doméstico de

óleos diminui ao longo dos anos. Desta forma, a maior disponibilidade de óleos ficaria a cargo dos grandes geradores de óleo de fritura (indústrias e restaurantes) (Figura 40).

Figura 40: Consumo industrial



Fonte: Elaborado utilizando o *software* VENSIM PLE, 2022.

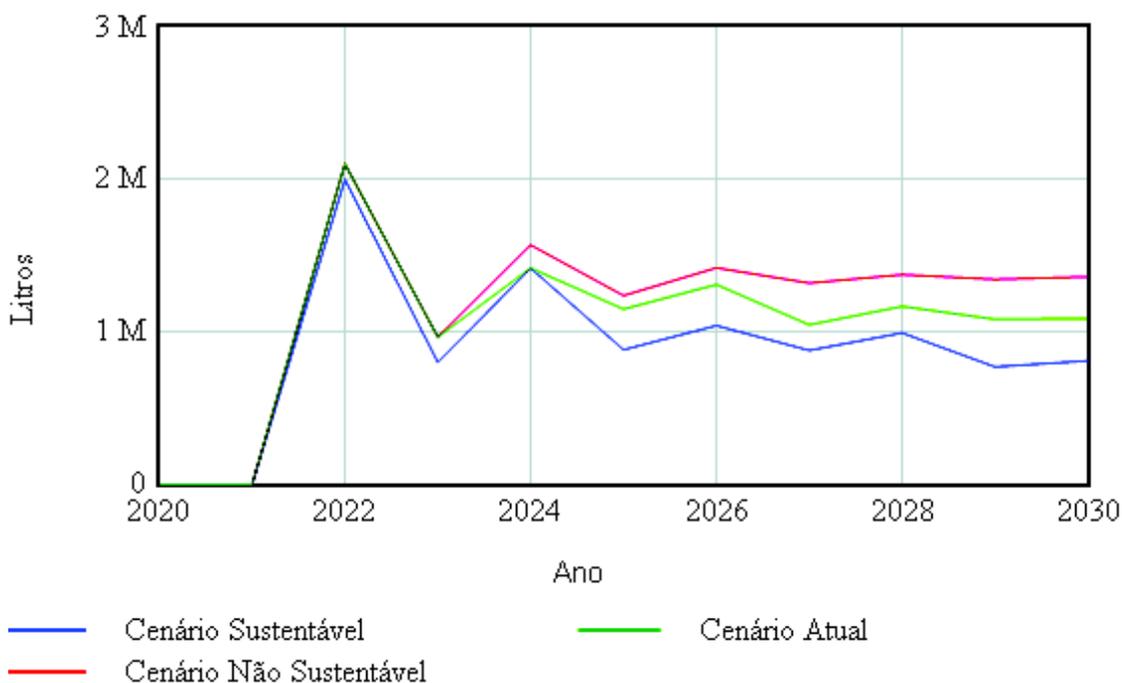
Foi possível verificar a mudança entre os três cenários analisados em relação ao consumo doméstico, devido aos valores de entrada que foram alterados ao longo dos 10 anos, baseado nas características de cada cenário, que aumentam e diminuem gradativamente conforme os cenários, tendo um significativo aumento em 2022, quando o percentual de adição do biodiesel ao diesel aumenta para 15%. Este aumento de biodiesel ao diesel acontece conforme a Resolução nº 16, de 29/10/2018, do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) que determina o cronograma da adição. De acordo com a medida, haverá adição de um ponto percentual até alcançar os 15% em 2023.

Cabe ainda considerar a questão que envolve o custo de uma metodologia sustentável. O impacto de investimento em práticas de desenvolvimento sustentável é a longo prazo. No caso do biodiesel de óleo residual, o maior custo está relacionado com a logística de recolhimento da matéria-prima, uma vez que o óleo filtrado e pronto para ser utilizado como matéria-prima não sai direto de uma biorrefinaria, ele vem fracionado, de diversos fornecedores, o que dificulta, ainda, a disponibilidade desse insumo. A utilização

do óleo residual poderia representar um excelente instrumento para as biorrefinaria de biodiesel passaram por processos de integração vertical com as recicladoras, o que induziria a geração de novos ganhos econômicos, ampliando o uso deste insumo a fim de aumentar a escala produtiva do biodiesel por meio da assistência a pequenas recicladoras.

A segunda análise desenvolvida com o modelo refere-se a variável descarte e é estimada a partir de dados do consumo doméstico, consumo industrial e consumo para a indústria alimentícia e da variável taxa de descarte. Essa taxa foi estabelecida conforme os cenários. No cenário sustentável, essa taxa diminui de forma gradativa, assim como ela aumenta no cenário mais pessimista. Enquanto que no cenário atual, as taxas foram mantidas com toda fidelidade aos dados informados. No horizonte de 10 anos simulados, nota-se que o cenário sustentável possui um potencial de redução maior que os outros dois cenários (Figura 41).

Figura 41: Descarte do óleo residual

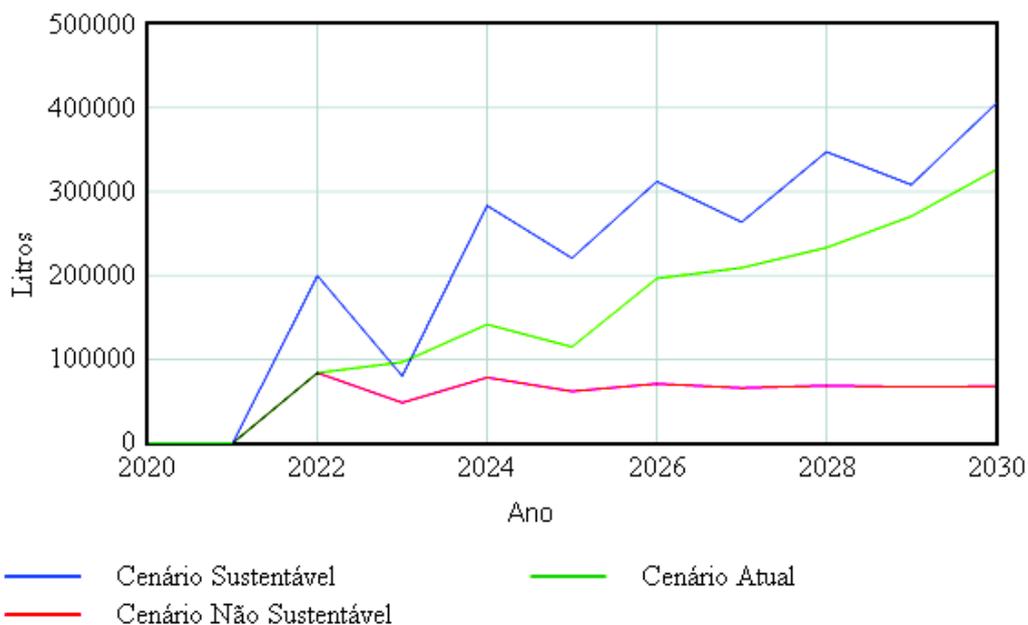


Fonte: Elaborado utilizando o *software* VENSIM PLE, 2022.

Na ordenada, é possível verificar a quantidade (litros) de óleo descartado nos três cenários simulados. Apesar dos cenários atual e sustentável serem mais próximos, o cenário atual apresenta melhorias mais de forma mais lenta que o cenário sustentável, que apresenta diminuição do descarte deste resíduo. O cenário atual ao final do 10º ano, tem uma redução de descarte de 1.1 bilhões de litros, enquanto o cenário sustentável apresenta

uma redução 1.9 bilhões, apresentando uma redução de aproximadamente 780 milhões de litros em relação ao cenário atual. O cenário sustentável também apresenta uma forma mais promissora e otimista, quanto a reciclagem desta matéria-prima (Figura 42).

Figura 42: Reciclagem do óleo residual

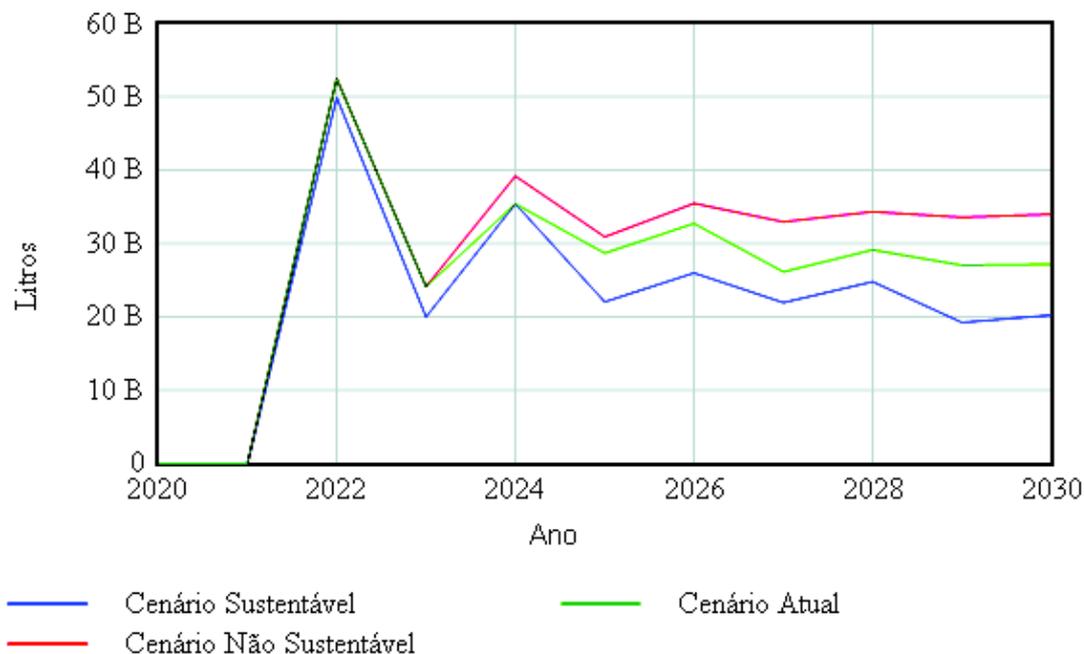


Fonte: Elaborado utilizando o software VENSIM PLE, 2022..

O cenário sustentável recicla (1.950.000.000 L), 66% a mais quando comparado com o cenário atual, que recicla (1.170.000.000 L) e o cenário sustentável recicla 900% a mais, quando comparado com o cenário não sustentável, que recicla apenas (195.000.000 L).

A variável redução da poluição da água, está diretamente ligada à variável descarte, visto que apresenta graficamente a quantidade de água que poderá ser preservada a partir do não descarte do óleo residual de fritura (Figura 43).

Figura 43: Redução da poluição da água



Fonte: Elaborado utilizando o *software* VENSIM PLE, 2022.

Novamente, o Cenário sustentável apresenta um potencial menos poluidor quando comparado aos cenários atual e não sustentável. Mantendo-se o cenário atual, no horizonte de 10 anos, este cenário tem o potencial poluidor de mais de 6 quatrilhões de litros e o cenário não sustentável é capaz de poluir até 8 quatrilhões de litros de água. O resultado mostra que ao fim dos 10 anos o cenário sustentável polui 28% menos, quando comparado com o cenário atual e 47% menos, quando comparado com o cenário não sustentável.

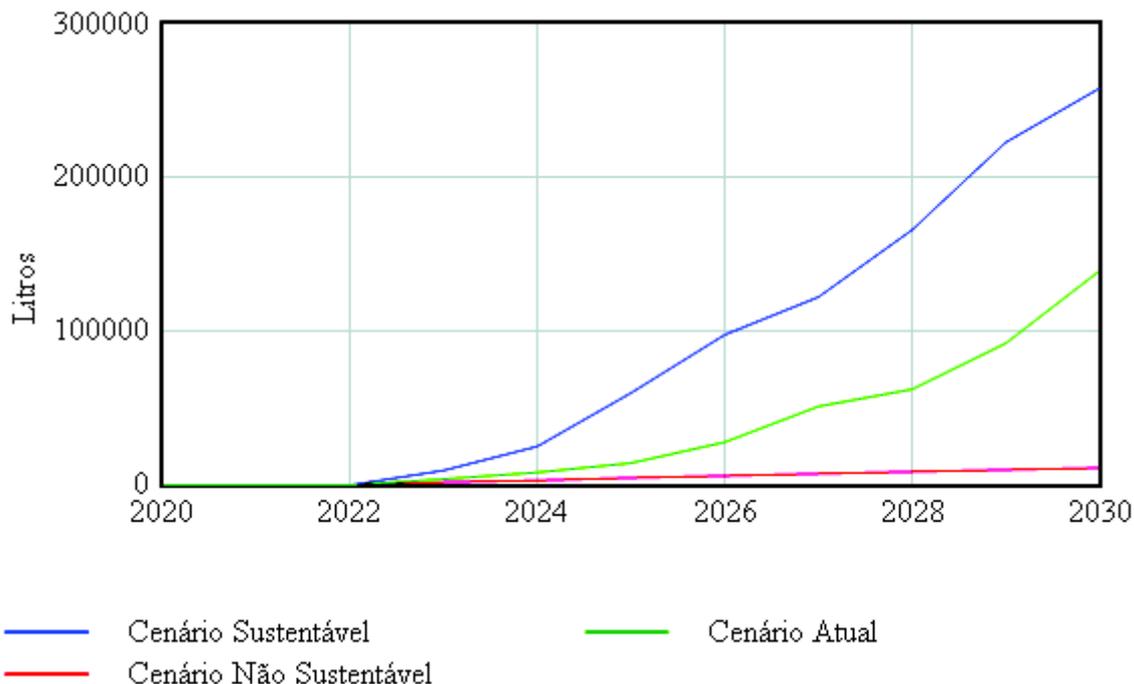
Nos cenários simulados, para a reciclagem do óleo residual foram considerados outros impactos positivos, como a obtenção de um biocombustível, além de reduzir o impacto ambiental em função do descarte inapropriado.

O óleo para biodiesel é proporcional ao óleo destinado para reciclagem e a taxa de conversão do óleo em biodiesel pelo percentual destinado a produção de biodiesel, que é influenciado pela variável *time*, que é modificada para mais ou para menos, conforme o cenário simulado. É possível perceber um aumento do óleo para biodiesel no cenário sustentável, devido ao aumento da quantidade de óleo destino a reciclagem.

O potencial de geração de biodiesel, através da reciclagem, é apresentado na Figura 44, onde sua variação é diretamente proporcional a quantidade de óleo destinado

a produção de biodiesel e a taxa de aproveitamento do processo de reciclagem (óleo/biodiesel).

Figura 44: Produção de biodiesel



Fonte: Elaborado utilizando o *software* VENSIM PLE, 2022.

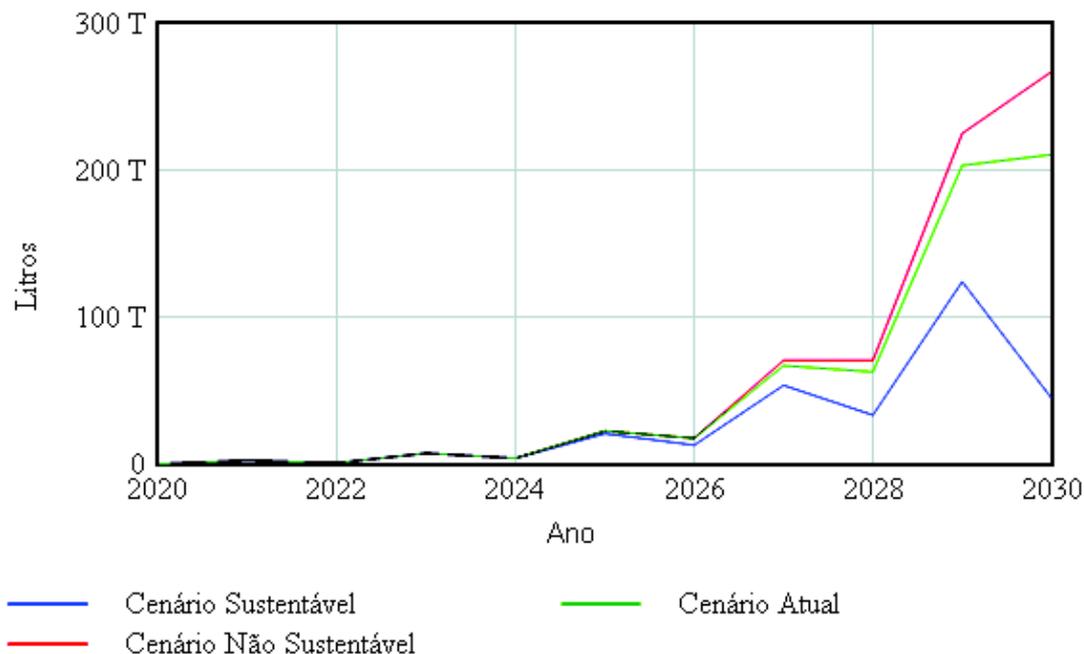
A partir da análise dos cenários simulados, no final do 10º ano, o cenário sustentável tem um aumento de mais de 200 milhões de litros de biodiesel produzido. No cenário sustentável, em função do crescimento da taxa de aproveitamento do óleo residual em biodiesel, apresenta um resultado 75% superior aos outros cenários, podendo desta maneira alavancar a produção de biodiesel no Brasil.

O modelo simulado para a variável BX representa o somatório das variáveis biodiesel para mistura e taxa de diesel para mistura, menos as emissões. A taxa de diesel para mistura é definida pela variável diesel para mistura, que também é influenciada pela variável *time*, de acordo com o cenário simulado, e pela variável diesel, que é definida pela quantidade de diesel disponível.

Outra análise realizada se refere ao impacto ambiental causado pelas emissões utilizando desde o B10 (10% de biodiesel e 90% de diesel) até chegar em misturas com maiores teores de biodiesel. Novamente, o cenário sustentável apresenta um potencial de menor poluidor quando comparado com os outros cenários. Na simulação de 10 anos, o

cenário sustentável apresenta uma redução significativa na geração de CO₂, conforme Figura 45.

Figura 45: Emissões de CO₂

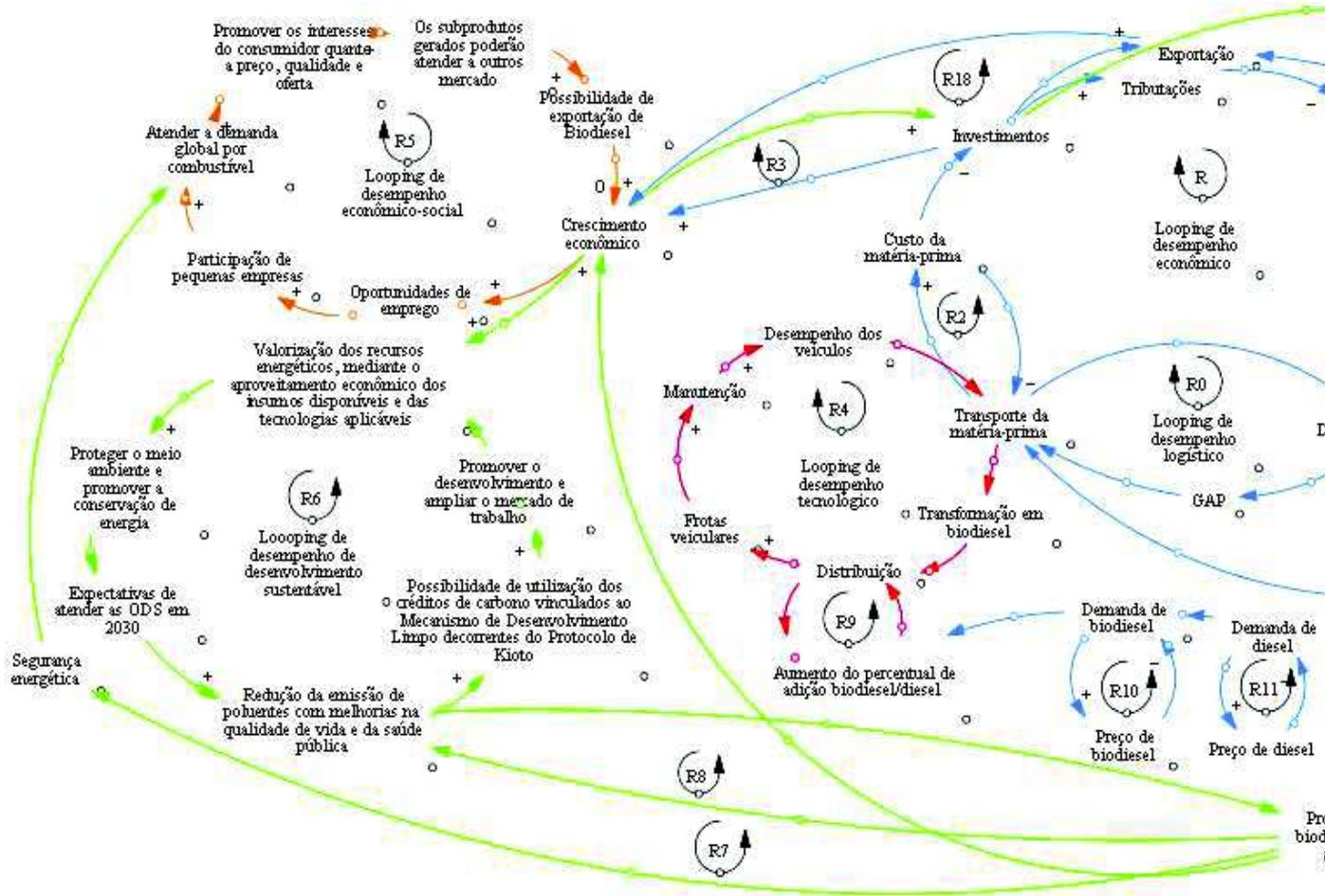


Fonte: Elaborado utilizando o *software* VENSIM PLE, 2022.

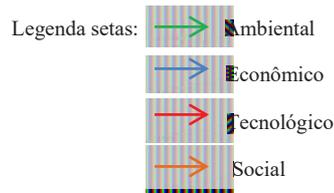
Na simulação dos cenários, ao final do horizonte de 10 anos, o cenário atual que chega até o B25 emite 2,56 kg/L de CO₂, enquanto o cenário sustentável que chega até B50 apresenta uma emissão de aproximadamente 2,517 kg/L de CO₂, podendo ser capaz de reduzir em até 2,52 % a geração de CO₂ no ano 10, reduzindo 1,68% a mais quando comparando a capacidade de redução de CO₂ do Cenário Atual no ano 10. Enquanto que o cenário não sustentável, que chega até B15, emite 2,577 kg/L, com redução das emissões em 0,66%. Assim, é possível perceber que o cenário sustentável apresenta melhorias significativas quanto a poluição dos recursos hídricos, redução do descarte do óleo e redução nas emissões de CO₂, além do aumento na produção de biodiesel.

Após a avaliação dos cenários propostos, analisando os impactos positivos e negativos do uso de diesel com alto teor de biodiesel de óleo residual, por meio das propostas de melhoria no cenário sustentável, foi possível perceber, a longo prazo, melhorias e a inclusão de outras vertentes com a utilização de diesel/biodiesel de óleo residual em percentuais mais altos que os já utilizados (Figura 46). Desta forma, podendo propor soluções para os problemas gerados pela atual conjuntura da matriz energética nacional e os impactos negativos gerados por ela.

Figura 46: Modelo de loop causal pós-análise de cenários



Fonte: Elaboração própria utilizando o software Vensim, 2022.



Os aspectos social, ambiental e econômico mencionados no diagrama pós-análise de cenários, representam um ponto importante no embasamento para a proposta de utilização do diesel com alto teor de biodiesel de óleo residual. A etapa social está ligada a geração de emprego e renda, desenvolvimento regional e melhoria da qualidade de vida dos profissionais envolvidos na indústria do biodiesel. A etapa ambiental está associada à preservação do meio ambiente, na tentativa de evitar o desequilíbrio e degradação ambiental relacionado ao impacto que o descarte deste resíduo traz ao meio ambiente, assim como ao atendimento as ODS até 2030, redução das emissões de gases poluentes e valorização de novos recursos energéticos, que também está vinculado a etapa econômica sobre a utilização de uma matéria-prima barata na matriz energética nacional, diversificando os insumos disponíveis para utilização, sendo cada vez mais capaz de atender a demanda global de energia, incluindo a participação de pequenas empresas, sejam recicladoras/coletoras de óleo ou biorrefinarias, que possam fazer parte da cadeia de produção do biodiesel.

8 CONCLUSÕES

O óleo residual de fritura é gerado diariamente a partir de fontes domésticas e industriais, com impactos ambientais significativos. Portanto, a recuperação de recursos secundários como novas fontes de energia renovável implica em economia e subsídio à segurança energética, além de uma solução sustentável para os desafios de demanda energética e mitigação de resíduos.

Os biocombustíveis de segunda geração estão alinhados com os princípios da economia circular e mitigam o impacto potencial dos resíduos. O baixo custo e disponibilidade do recurso secundário representam a principal vantagem econômica dessa categoria de biocombustíveis. A complexidade dos aspectos econômicos e ambientais relacionados à política e produção de biocombustíveis foi modelada nos cenários específicos propostos. O estudo abordou a indústria e o consumo doméstico como as principais fontes de óleo residual de fritura como recurso secundário. Nesse sentido, é importante notar que enquanto as fontes domiciliares requerem de pontos de coleta geograficamente dispersos, o consumo industrial está concentrado em poucos e também robustos pontos de geração, facilitando os procedimentos logísticos nesta segunda fonte.

Os resultados obtidos pela análise dos cenários confirmaram que o aumento do papel do óleo residual de fritura na produção de biodiesel poderia garantir o atendimento das necessidades de abastecimento, com o aumento da produção desse biocombustível. Essas iniciativas e ações não apenas abordam o reaproveitamento de resíduos, mas também sugerem uma forma de repensar todo o processo produtivo, para minimizar o desperdício e aumentar o uso eficiente de recursos e energia. A vantagem de converter óleo residual em biodiesel é que ele representa uma redução no consumo atual de diesel, além de estimular a economia ao reduzir as importações de combustíveis fósseis e reduzir as penalidades por emissões de GEE.

A falta de dados sobre a demanda por recursos é uma limitação importante na análise atual. Ainda assim, nos cenários estabelecidos para a análise da sustentabilidade, foram utilizados dados de referência internacional, que evidenciaram um abismo entre o cenário sustentável desejado e a evidente dificuldade de gestão de sistemas insustentáveis. Os modelos analisados por meio da dinâmica de sistemas apresentam correlações importantes entre as instâncias e o uso do modelo conceitual permite ver a complexidade das interações. A ferramenta permite identificar áreas estratégicas e áreas mais resistentes

à mudança, por meio de interconexões e entrada de valores de referência. Quanto ao mapeamento dos possíveis fornecedores de biodiesel para a mineradora, foi possível concluir, através da definição de algumas premissas (proximidade da mineradora, volume ofertado e preço final do combustível), que a biorrefinaria ideal para fornecer biodiesel para a mineradora é a biorrefinaria de Olfar, localizada em Porto Real - RJ, visto que a mesma apresentou vantagens econômicas com relação ao preço final do combustível, que não impactou na distância entre a biorrefinaria e a mineradora.

Na análise comparativa entre as misturas diesel/biodiesel, foi possível verificar que as emissões apresentaram algumas variações, principalmente a de CO₂. Os resultados de ambos os testes (ambiente laboratorial e relevante) mostraram uma maior emissão de CO₂ à medida que se aumenta a concentração de biodiesel de óleo residual de fritura ao diesel, gerando preocupação devido aos impactos ao meio ambiente e à saúde humana que essas emissões podem causar. Contudo, ao analisar as emissões totais (desde a produção da matéria-prima até o uso final do produto), as emissões na produção do biodiesel são menores que na produção do diesel. E utilizando a compensação de crédito de carbono, através da substituição do diesel pelo biodiesel, foi possível prever um ganho com o crédito de carbono, onde um crédito de carbono é a representação de uma tonelada de carbono que deixou de ser emitida para a atmosfera, contribuindo para a diminuição do efeito estufa.

Durante os testes em ambiente relevante não foi verificado aspectos relacionados a desgaste de peças, desempenho dos veículos ou qualquer outro aspecto que demonstrasse um prejuízo ou um mal comportamento dos veículos pelo uso da nova mistura (B50) quando comparados com os veículos de controle, que utilizavam o diesel S10.

Por meio dos resultados obtidos pela análise dos cenários, foi possível verificar que o aumento da participação do óleo residual de fritura na produção do biodiesel representa a garantia de atender as necessidades de abastecimento, com o aumento da produção deste biocombustível. Vale ressaltar que essas iniciativas e ações não abordam somente o reuso de resíduos, mas também contempla o modo de repensar todo o processo produtivo, de modo a minimizar os descartes e aumentar a eficiência do uso em recursos e energia. O aumento da produção de biodiesel (aproximadamente 1,5 bilhões de litros) está entre os principais resultados obtidos neste estudo devido a utilização do uso de óleo residual como matéria-prima, resultando também na diminuição do seu descarte A

vantagem do óleo residual de fritura poder ser convertido em biodiesel consiste em uma alternativa quanto ao descarte deste resíduo, bem como servir como insumo para a produção de biocombustível, representando uma diminuição do atual consumo de diesel. Outrossim, é necessário considerar a dinamização da economia decorrente de duas fontes: a redução das importações de combustíveis fósseis e o potencial de receita proveniente da comercialização das emissões evitadas de gases do efeito estufa.

Com relação a análise qualitativa e quantitativa dos cenários, foi possível verificar que o cenário sustentável representa, sob a ótica das dimensões econômica, ambiental e tecnológica, o melhor cenário a ser utilizado. O cenário sustentável está completamente associado as metas da ONU para 2030 (ODS), demonstrando ser contrário a um desenvolvimento econômico desenfreado como se as fontes de recursos naturais fossem inesgotáveis e que prioriza a valorização e conservação do meio ambiente, usando os recursos naturais de forma inteligente.

Por fim, é importante ressaltar a importância desta pesquisa para a tomada de decisão da empresa em modificar a sua matriz energética interna. Embora o estudo de caso utilizado para a presente investigação tenha abrangido uma empresa mineradora, a aplicação da proposta apresentada é promissora, uma vez que a metodologia utilizada pode ser adaptada no contexto em que cada projeto está inserido, independentemente do setor industrial. A presente pesquisa também contribuiu para identificar potenciais sinergias entre recicladoras, biorrefinarias e usinas produtoras de biodiesel, estimulando uma integração entre os elos da cadeia de biodiesel, associado a novas estratégias para a utilização de um resíduo, ainda pouco explorado por este segmento industrial. Os resultados da pesquisa apontaram que, considerando algumas dimensões do desenvolvimento sustentável, o aproveitamento energético de matérias-primas residuais, pode trazer benefícios econômicos e ambientais para a organização, com destaque para o estímulo ao uso de insumos residuais, devido a sua disponibilidade imediata, seu baixo custo e suas vantagens ambientais, em relação ao diesel fóssil.

9 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Embora as medidas mitigadoras com relação à redução nas emissões de metano (CH₄) que é mais nocivo que CO₂ tenham sido consideradas, as mesmas não foram devidamente desenvolvidas e analisadas, se referido apenas para uma solução a curto prazo, mas não se justifica em termos de emissões a longo prazo, uma vez que o estudo voltado para as emissões indicou propostas ambientais de natureza genérica, facilitando o entendimento sobre o assunto e ações voltadas para a minimização de impacto causados por essas emissões.

Com relação à análise de custo, é importante mencionar que foi baseada especificamente devido à escolha da biorrefinaria selecionada (OLFAR), contudo, os preços do biodiesel (B100) podem variar e outra biorrefinaria pode se apresentar com maiores vantagens econômicas, invalidando a análise atual.

10. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como desdobramento deste trabalho, sugere-se o desenvolvimento em trabalhos futuros dos temas que são descritos a seguir.

Considerando a importância das unidades recicladoras que aproveitam resíduos que seriam descartados no meio ambiente e os transformam em matérias-primas passíveis de serem utilizadas como insumos industriais, gerando emprego e renda que favorecem todos os envolvidos, faz-se necessário avaliar o impacto socioeconômico dessas unidades recicladoras e caracterizando-as como parte da cadeia do biodiesel, podendo isto incentivar a construção local de mini usinas, para que cada região possa produzir o seu próprio biodiesel, reduzindo custos inerentes ao transporte de matérias-primas.

Os cenários elaborados apontam para significativos benefícios econômicos, ambientais e tecnológicos. Desta forma, mostra-se pertinente aprofundar a discussão sobre simulações envolvendo o preço dos combustíveis e o aproveitamento energético do óleo residual de fritura com a utilização do biodiesel puro (B100) em frota veicular.

Sugere-se identificar o motivo pelo qual há um consumo maior de óleo residual de fritura como matéria-prima para a produção de biodiesel em determinadas regiões do país (como o Sul e o Sudeste), uma vez que o sebo bovino, segunda principal matéria-prima na produção de biodiesel, também é competitivo como insumo produtivo netas regiões.

Recomenda-se, em consonância com os conceitos da economia circular, um estudo detalhado sobre os coprodutos gerados na produção de biodiesel de origem residual, novas aplicações industriais, incluindo o desenvolvimento de novos produtos, processos e aplicações, tornando o processo de biodiesel mais competitivo e menos nocivo ao meio ambiente quando comparado ao diesel comum.

11. DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA

O trabalho de tese foi divulgado durante todo doutorado, com apresentações de trabalhos em diversos congressos e seminários. Segue abaixo lista dos artigos publicados:

Quadro 4 : Detalhamento da divulgação da pesquisa

<p>Nome do Evento: VII Workshop de Pesquisa, Tecnologia e Inovação (PTI) e III Simpósio Internacional de Inovação e Tecnologia (SIINTEC)</p> <p>Nome do artigo: ÓLEO DE FRITURA RESIDUAL PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA NACIONAL E INTERNACIONAL</p> <p>Data do evento: 19 e 20/10/2017 Apresentação de trabalho: sim [X]</p>
<p>Nome do Evento: CONGRESSOS BRASILEIROS DE GESTÃO AMBIENTAL (CONGEA)</p> <p>Nome do artigo: A PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DE ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA: UMA ANÁLISE DA PRODUÇÃO CINÉTICA</p> <p>Data do evento: 27 a 30/11/2017 Apresentação de trabalho: Sim [X]</p>
<p>Nome do Evento: III Seminário de avaliação de pesquisa científica e tecnológica Senai Cimatec (SAPCT)</p> <p>Nome do artigo: PROSPECÇÃO E MAPEAMENTO INFORMACIONAL DO ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA PARA PRODUÇÃO DO BIODIESEL EM MINAS GERAIS</p> <p>Data do evento: 26 e 27/04/2018 Apresentação de trabalho: Sim [x]</p>
<p>Nome do Evento: x CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA (CONEM)</p> <p>Nome do artigo: MAPEAMENTO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA EM MINAS GERAIS PARA PRODUÇÃO DO BIODIESEL</p> <p>Data do evento: 20 a 24/05/2018 Apresentação de trabalho: Sim[x]</p>
<p>Nome do Evento: IV Seminário de Avaliação de Pesquisa Científica e Tecnológica (SAPCT) e III Workshop de Integração e Capacitação em Processamento de Alto Desempenho (ICPAD)</p> <p>Nome do artigo: AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ NA UTILIZAÇÃO DO DIESEL COM ALTO TEOR DE BIODIESEL DE OGR: ESTUDO DE CASO NA FROTA DE UMA MINERADORA.</p> <p>Data do evento: 03 e 04/06/2019 Apresentação de trabalho: Sim[x]</p>
<p>Nome do Evento: ProBioRefine</p> <p>Nome do artigo: AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO DO ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA PELAS BIORREFINARIAS DO BRASIL PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL</p> <p>Continuação Quadro 4...</p> <p>Data do evento: 10 e 11/11/2019 Apresentação de trabalho: Sim[x]</p>
<p>Nome do Evento: V Simpósio Internacional de Inovação e Tecnologia (SIINTEC)</p> <p>Nome do artigo: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E VIABILIDADE ECONÔMICA DA PARTICIPAÇÃO DE BIORREFINARIAS NA CADEIA DE FORNECIMENTO DE BIODIESEL PARA USO EM UMA FROTA DE UMA MINERADORA.</p> <p>Data do evento: 09 a 11/10/2019 Apresentação de trabalho: Sim[x]</p> <p>Obs.: <u>(Prêmio de melhor trabalho)</u> (pôster) na sessão Sustainable Development do V SIINTEC 2019.</p>
<p>Nome do Evento: Projeto B50</p> <p>Nome: Relatório B50</p> <p>Data do projeto: 01/08/2017 – 01/02/2019</p>

<p>Nome do Evento: V Seminário de Avaliação da Pesquisa Científica e Tecnológica (SAPCT) Nome do artigo: AVALIAÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DO ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA NA PRODUÇÃO E USO DO BIODIESEL UTILIZANDO A DINÂMICA DE SISTEMAS Data o evento: 05/06/2020 Apresentação de trabalho: Sim[x]</p>
<p>Nome do Evento: VI Seminário de Avaliação da Pesquisa Científica e Tecnológica (SAPCT) Nome do artigo: AVALIAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DE BIODIESEL DE ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A ECONOMIA CIRCULAR Data o evento: 27 E 28/05/2021 Apresentação de trabalho (oral): Sim[x]</p>
<p>Nome da Revista: REVISTA BRASILEIRA DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE Nome do artigo: Avaliação da contribuição da produção de biodiesel para a economia circular utilizando a dinâmica de sistemas Data do aceite:17/03/2021 Data da publicação:30/04/2021</p>
<p>Nome da Revista: REVISTA ENERGIES (A2) Nome do artigo: Emission and Performance Evaluation of a Diesel Engine Using Addition of Ethanol to Diesel/Biodiesel Fuel Blend” Doi: 10.3390/en15092988 ISSN: 1996-1073 Data da publicação: 20/04/2022 Trabalho publicado: Sim[x]</p>
<p>Nome da Revista: Revista Sustainable Energy Technologies and Assessments (B1) Nome do artigo: System Dynamics applied to second generation biofuel in Brazil: a circular economy approach. ISSN: 2213-1388 Data da Submissão: 20/08/2021</p>

12 REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10004:2004- NORMA BRASILEIRA- **Resíduos Sólidos: Classificação**. 2a Edição. Disponível em: <http://www.unaerp.br/documentos/2234-abnt-nbr-10004/file>. Acesso em fevereiro de 2021.

ABED, KA; *et al.*, **Efeito do biodiesel de óleo de cozinha residual no desempenho e nas emissões de exaustão de um motor a diesel**. Egito. J. Pet. 2018.

ABIOVE. Associação brasileira das indústrias de óleos vegetais. Disponível em: <https://abiove.org.br/>. Acessado em maio de 2020.

AGENDA 2030. **Plataforma agenda 2030**. Disponível em: www.agenda2030.org.br/os_ods/. Acesso em fevereiro de 2021.

ALI, Y.; *et al.*, **Effect of alternative diesel fuels on heat release curves for Cummins N 14 410 diesel engine**. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, 1996.

ALTOE, S.M.L; VOESE, S.B. **Gestão de resíduos da indústria do biodiesel: um estudo da criação de valor na cadeia de suprimentos**. XXXIII encontro nacional de engenharia de produção, 2013.

AMBIENTE BRASIL. **Doze ônibus movidos a biodiesel de óleo de fritura vão rodar experimentalmente em Curitiba (PR)**. Acesso em fevereiro de 2020.

ANASTAS, P; EGHBALI, N. **Green Chemistry: Principles and Practice**. New Haven. Royal Society of Chemistry; 2009. Disponível em: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2010/cs/b918763c#cit17>. Acesso em fevereiro de 2021.

ANP. **Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível** – Disponível em: <http://www.anp.gov.br/> Acesso em fevereiro de 2021.

APROBIO – **Associação dos produtores de biocombustíveis do Brasil**. Disponível em: <http://www.aprobio.gov.br/>. Acesso em novembro de 2020.

ARIZA, C. G.; ARAUJO NETO, M. D. **Contribuições da geografia para avaliação de impactos ambientais em áreas urbanas, com o emprego da metodologia Pressão - Estado Impacto - Resposta (P.E.I.R.)**. Caminhos de Geografia, Uberlândia, 2010.

ACIF - Associação Comercial e Industrial de Florianópolis. **PROJETO DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL DO REÓLEO**. Acesso em fevereiro de 2020.

ATABANI, A. E *et al.* **A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.

AWUDU, I; ZHANG, J. **Uncertainties and concepts of sustainability in the management of the biofuel supply chain: a review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012.

AYRES, F.M.; AMARAL, C.L.C. **A questão da sustentabilidade ambiental no ensino de química.** Revista de Ensino de Ciências e Matemática (REnCiMa), 2016.

BARBOSA, R.L. *et al.*, **Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel.** Ciência e Agrotecnologia, 2008.

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento. **Química Verde na Ótica dos Agentes de Mercado.** Disponível em: <https://www.bndes.gov.br>. Acesso em dezembro de 2020.

BNDES– Banco Nacional Do Desenvolvimento. **Biorrefinaria integrada à indústria de celulose no Brasil: oportunidade ou necessidade?** Acesso em agosto de 2020.

BP- British Petroleum. **Statistical Review of World Energy 69th edition.** Disponível em: <https://www.bp.com>. Acesso em setembro de 2020.

BRASIL, **Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010.** Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010 b.

BRASIL. **Lei nº 11.097 de 13 de janeiro de 2005.** Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. 2005.

BRASIL. **Resolução CNPE nº 15/2019.** Dispõe sobre as metas nacionais de redução das emissões. Acesso em dezembro de 2020.

BROCKLESBY. Disponível em: <www.brocklesby.org/>. Acesso em fevereiro de 2020.

CAN, Ö, *et al.*, **Combustion and exhaust emissions from the canola biodiesel mixture in a single-cylinder DI diesel engine.** Energia, 2014.

CASTELLANELLI C. *et al.* **Análise Ambiental e Econômica do Biodiesel Obtido Através do Óleo de Fritura Usado em Praças de Pedágio.** Revista Produção Online, 2007.

CASTELLANELLI C. A. **Desenvolvimento Sustentável: Aproveitamento de Resíduos e Oleaginosas Alternativas para a Produção de Biocombustíveis.** Observatório Economía Latino Americana, 2016.

CARVALHO, J.F. **Combustíveis fósseis e insustentabilidade**. ENERGIA, AMBIENTE E SOCIEDADE, 2008.

CENTRO CLIMA/COPPE/UFRJ, 2016. Wills W, Lefevre J. **Implicações Econômicas e Sociais do Cenário de Plano Governamental – Emissão de Gases de Efeito Estufa – 2050: Implicações Econômicas e Sociais do Cenário de Plano Governamental**. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2017. (2016).

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Emissões de metano aceleram aquecimento global mais que CO₂**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/2016/12/13/emissoes-de-metano-aceleram-aquecimento-global-mais-que-co2/>. Acesso em fevereiro de 2021.

CHANG, Y.C., *et al.*, **Effects of biodiesel based on residual cooking oil on emissions of toxic organic pollutants from a diesel engine**. Applied energy, 2014.

CHAVALPARIT, O.; ONGWANDEE, M.; **Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology**. J. Environ. Sci. 2009.

CHUAH L.F., *et al.* **Performance and emission of diesel engines powered by methyl ester of cooking oil derived from palm olein using hydrodynamic cavitation**. Clean Technol. Environ. Política, 2015.

CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 001/86. **Dispõe sobre transporte de produtos perigosos em território nacional**. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/>. Acesso em fevereiro de 2021.

CNTT - Confederação Nacional dos Trabalhadores em Transportes e Logística. Disponível em: <https://cnttl.org.br/modal-rodoviario>. Acesso em maio de 2020.

COSTA NETO, P. R.; ROSSI, L. F. S; **Produção de Biocombustível Alternativo ao Óleo Diesel Através da Transesterificação de Óleo de Soja Usado em Frituras**. In: *Revista química nova*, 2000.

CZERNIK, S.; BRIDGWATER, A. V.; **Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil**. *Energy Fuels*, 2004.

C40 CITIES. **Case study: The circular economy in Venice: Green fuel for the city's boat fleet.** Disponível em: https://www.c40.org/case_studies/the-circular-economy-in-venice-green-fuel-forthe-city-s-boat-fleet. Acesso em fevereiro de 2021.

DATTA A, MANDAL BK. **A comprehensive review of biodiesel as an alternative fuel for compression ignition engine.** *Renew Sustain Energy*, 2016.

DENATRAN - Departamento Nacional de Trânsito. **Frota Nacional de 2020.** Disponível em: www.denatran.gov.br. Acessado em junho de 2020.

ECOOLEO (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA SENSIBILIZAÇÃO, COLETA, REAPROVEITAMENTO E RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE ÓLEO COMESTÍVEL). **Reciclagem do óleo.** Disponível em www.ecoleo.org.br/reciclagem. Acesso em fevereiro de 2020.

EMF - Ellen Macarthur Foundation. **Towards the circular economy: Opportunities for the consumer goods sector.** Ellen MacArthur Foundation, 2013.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz energética brasileira (2019).** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em dezembro de 2020.

ENWEREMADU, C.C; MBARAWA, M.M. **Technical aspects of production and analysis of biodiesel from used cooking oil—a review.** *Renewable and Sustainable Energy*, 2009.

ERBE, M. C. L.; PERES, A. E. **Resíduos perigosos. In: Educação Ambiental para o desenvolvimento sustentável: Ver-percepção do diagnóstico ambiental.** Globo. São Paulo, 2004.

FANUN, M. **Microemulsions as delivery systems.** *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2012.

FERNANDES, R.K.M, *et al.*, **Biodiesel a partir de óleo residual de fritura: alternativa energética e desenvolvimento socioambiental.** XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2008.

GARCÍA-MARTÍN, J. F. *et al.*, **biodiesel production from waste cooking oil in an oscillatory flow reactor. Performance as a fuel on a tdi diesel engine.** *Renewable Energy*, 2018.

GEBREMARIAM, S. N.; MARCHETTI, J. M. **Economics of biodiesel production**. Energy Conversion and Management, 2018.

GHAREHGHANI, A; *et al.*, **Effects of waste fish oil biodiesel on diesel engine combustion characteristics and emission**. Renewable Energy, 2017.

GHAZALI, W. N. M. W. *et al.*, **Effects of biodiesel from different feedstocks on engine performance and emissions: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015.

GOVERNO DA CIDADE DO MÉXICO (Gobierno de La Ciudad de México). **Nueva planta productora de biodiésel en Central de Abasto**. Disponível em: <https://www.cdmx.gob.mx/portal/articulo/inaugura-gobierno-capitalino-eipn-planta-productora-de-biodiesel-en-central-de-abasto>. Acesso em fevereiro de 2021.

GUARIEIRO, L.L.N *et al.*, **Energia Verde**. Revista Ciência Hoje, 2011.

GUARIEIRO, L.L.N *et al.*, **Metodologia analítica para quantificar o teor de biodiesel na mistura biodiesel: diesel utilizando espectroscopia na região do infravermelho**. Revista Química Nova, 2008.

GUARIEIRO, L.L.N *et al.*, **Poluentes Atmosféricos Provenientes da Queima de Combustíveis Fósseis e Biocombustíveis: Uma Breve Revisão**. Revista Virtual de Química, 2011.

GUARIEIRO, L.L.N; GUARIEIRO, A.L.N. **Vehicle Emissions: What Will Change with Use of Biofuel?** INTECH Open Access Publisher, 2012.

HASSAN, H; KALAM, A. **An overview of biofuel as a renewable energy source: development and challenges**. Procedia Engineering, 2013.

IBAMA - Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Instrução Normativa (IN) nº 13 de 2012. **Lista brasileira de resíduos sólidos (anexo I)**. Disponível em: www.ibama.gov.br. Acesso em fevereiro de 2021.

INSTITUTO SÃO FRANCISCO. **Programa Recicla Óleo**. Disponível em www.institutosaofrancisco.org.br/projetos. Acesso em fevereiro de 2020.

IUPAC. International Union of Pure and Applied Chemistry. **Green Chemistry and Sustainable Development**. Green Chemistry Directory. Venice. Disponível

em:<<http://www.incaweb.org/transit/iupacgdir/overview.htm>> Acesso em: fevereiro de 2021.

JIAQIANG, E. *et al.*, **Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fueled with biodiesel: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017.

KALAM, M. A.; MASJUKI, H. H. **An experimental investigation of high performance natural gas engine with direct injection**. Energy, 2011.

KHALIFE E., *et al.* **Investigação experimental de água de baixo nível na mistura de biodiesel-diesel produzido com óleo usado**. Energia, 2017.

KOTRBA, R. **Eni opens its 2nd large-scale renewable diesel facility in Italy**. Biodiesel Magazine. 2019. Disponível em: <http://www.biodieselmagazine.com/articles/2516794/eni-opens-its-2nd-large-scale-renewable-diesel-facility-in-italy>. Acesso em fevereiro de 2021.

LEITÃO, A. **Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI**. Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting, 2015.

LIMA, P.C.R., **O biodiesel e a inclusão social**. Consultoria Legislativa. Brasília: Câmara dos Deputados. 2004.

LIMA, P. L. *et al.* **Biodiesel de óleo residual: densidade em função da temperatura e das proporções de misturas no diesel**. IV semana de tecnologia do curso de biocombustíveis da Faculdade de Tecnologia de Jaboticabal. 2007.

LORA, E. E. S. *et al.* **Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis**. In book: Biocombustíveis (pp.411-498) Capítulo: 6. Publicação: Interciência. Editores: Electo Eduardo Silva Lora, Osvaldo José Venturini. Project: Biomass gasification in a double-stage downdraft reactor.

MARCHETTI J. M, ERRAZU A. F. **Esterification of free fatty acids using sulfuric acid as catalyst in the presence of triglycerides**. Biomass and Bioenergy, 2008.

MARTINEZ, M. A. U.; DAVOLOS, M. R.; JAFELICCI, M. J. **O efeito do ultrassom em reações químicas**. Química Nova, 2000.

MASSI, A. M. **Avaliação da degradação de filtros e óleos lubrificantes com uso de diesel com alto teor de biodiesel**. Dissertação de mestrado do Centro Universitário Senai Cimatec, 2019.

MAZIERO, J.V.G., *et al.*, **Avaliação do desempenho de um motor de ignição por compressão utilizando óleo diesel e éster etílico de óleo de girassol como combustível**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, 2, 2005. Varginha, MG. Anais, 1 CDROM. Varginha: UFFLA, 2005.

MESTRES, Ramon. **Química Sostenible: Naturaleza, fines y ámbito**. Barcelona. Educación Química, 2013.

MMA - **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em www.mma.gov.br. Acesso em outubro de 2020.

MME - **Ministério de Minas e Energia**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em dezembro de 2020.

MITTELBACH, M; TRITTHART, P. **Diesel fuel derived from vegetable oils, III. Emission tests using methyl esters of used frying oil**. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1988.

MOHD, N. *et al.*, **Biodiesel como combustível alternativo para aplicações de motores diesel marítimos: Uma revisão**. Renovar. Sustentar. Energy Rev. 2018.

MONTEIRO, Monica (Ed.). **Economia Circular**. Start & Go, Lisboa, v. 1, n. 20, p.3-3, abr. 2018.

NEGRINI, F. *et al.*, **O uso de Dinâmica de Sistemas para avaliação de cenários sobre terceirização (outsourcing) de impressão em uma instituição pública de ensino**. Sistemas & Gestão, 2019.

NREL - National Renewable Energy Laboratory. 2016. **2015 Renewable Energy Databook**. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy17osti/66591.pdf>. Acesso em fevereiro de 2021.

OLEO PELO FUTURO. **Óleo de cozinha como alternativa combustível**. Disponível em <http://oleopelofuturo.com.br>. Acesso em fevereiro de 2021.

OLIVEIRA, E., *et al.*, **Desempenho comparativo de motor de combustão alimentado com diesel, B2, B5, B20 e B100**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, 2. 2005. Varginha, MG. Anais.

OLIVEIRA, M. M e GONÇALVES, M.F.S. **Perspectivas do óleo residual de fritura: uma abordagem econômica, jurídica e socioambiental**. Revista Espacios, 2016.

OMENA, L. A. *et al.*, **O papel dos biocombustíveis na nova configuração geopolítica**. Revista de Geopolítica, 2013.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS-ONU. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em www.nacoesunidas.org. Acessado em maio de 2020.

OECD - Organization for Economic Co-operation and Development. **Environmental indicators: development, measurement and use: reference paper**. Paris, 2003.

OZSEZEN, A. N; CANAKCI, M. **Determination of performance and combustion characteristics of a diesel engine fueled with canola and waste palm oil methyl esters**. Energy Conversion and Management, 2011.

ÖZTÜRK, E. **Performance, emissions, combustion and injection characteristics of a diesel engine fuelled with canola oil–hazelnut soapstock biodiesel mixture**. Fuel Processing Technology, 2015.

PARENTE, Expedito de Sá. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engaçado**. Tecbio, Fortaleza, CE, 2003.

PASQUALETTO, A.; BARBOSA, G.N. **Aproveitamento do óleo residual de fritura na produção de biodiesel**. In: Congresso Interamericano AIDIS, 31, 2008, Santiago, Anais. Santiago: AIDIS, 2008.

PAULI, R.I.P *et al.*, **A segurança alimentar e nutricional (san) vem sofrendo restrições pela produção de biocombustíveis? Uma análise a partir do modelo de zockun**. Revista de desenvolvimento econômico, 2020.

PETERSON, L.; REECE, D. L. **Emissions tests with on-road vehicle fueled with methyl and esthyl esters of rapeseed oil**. ASAE PAPER, St. Joseph, MI, 1994.

PÖLCZMANN, G., *et al.*, **Investigation of storage stability of diesel fuels containing biodiesel produced from waste cooking oil**. Journal of Cleaner Production, 2016.

PROFISSIONAL BIOTEC. Blog- **Biocombustíveis, Biotecnologia, Biotecnologia Agrícola (verde), Biotecnologia Industrial (branca)**, Ciência, 2020.

QUARTIM, E. **Recycling, upcycling e downcycling (2011)**. Disponível em <http://embalagensustentavel.com.br/recycling-downcycling-upcycling/>. Acesso em junho de 2020.

RAMOS, L. P. *et al.*, **Biodiesel: Matérias-Primas, Tecnologias de Produção e Propriedades Combustíveis**. Rev. Virtual Quim, 2017.

RECOIL PROGRAMME. **Promotion of used cooking oil recycling for sustainable biodiesel production: Deliverable D2.3 Guidelines for UCO collection, transport and promotion campaigns based on previous experiences**. União Europeia, 2013. Cofinanciamento do programa Intelligent Energy Europe (IEE).

REN21. **Renewable Energy Policy Network for the 21st century**. Renewables 2019 global status report. Paris: ren21.

RIBEIRO, C.B; SCHIRMER, W.N. **Panorama dos combustíveis e biocombustíveis no brasil e as emissões gasosas decorrentes do uso da gasolina/etanol**. Biofix Scientific Journal, 2017.

RIZZO, M. R. *et al.*, **Óleos Saturados: Um estudo do descarte em estabelecimentos de Três Lagoas e Andradina**. ANAP Brasil- Revista Científica, 2013.

RODRIGUES, N; LOSEKANN, L.D. **Análise da demanda por óleo diesel no Brasil Demand analysis for diesel oil in Brazil**. V Encuentro Latino-americano de Economía de la Energía, 2015.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

SANTOS, R. S. **Gerenciamento de resíduos: coleta de óleo comestível**. 2009. Faculdade de Tecnologia da Zona Leste.

SANTANA, E., *et al.*, **Padrões de qualidade do ar -Experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia, Padrões São Paulo**. Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2012.

SEA - Secretaria de Estado do Ambiente. **Programa e reaproveitamento de óleos vegetais do Estado do Rio de Janeiro (PROVE)**. Disponível em: www.inea.rj.org.br. Acesso em novembro de 2020.

SHAFIEE, S; TOPAL, E. **When will fossil fuel reserves be diminished?** Energy Policy, 2009.

SHAMSHIRBAND, S; *et al.*, **Support vector machine-based exergetic modelling of a DI diesel engine running on biodiesel– diesel blends containing expanded polystyrene**. ApplTherm Eng, 2016.

SHEINBAUM-PARDO , C. *et al.*, **Biodiesel potential of residual cooking oil in Mexico**. Biomass and Bioenergy, 2013.

SILVA, F.M. *et al.*, **Desempenho do motor de combustão alimentado com diesel, B50 e B100**. In: congresso brasileiro de plantas oleaginosas, óleos, gorduras e biodiesel, 1, 2004. Varginha, MG. Anais.

SILVA, M. E.; CÂNDIDO, G. A. **A análise de indicadores de sustentabilidade na problemática de resíduos sólidos em Campina Grande – PB**. Reuna, 2012.

SILVA FILHO, S. C. **Breve enciclopédia do biodiesel**. Maia: Vida Econômica, 2009.

SILVA, T.A.R. **Os Biocombustíveis de óleo residual: produção através da transesterificação por metanólise e etanólise básica, caracterização físico-química e otimização das condições reacionais**. Universidade Federal de Uberlândia, programa multi-institucional de doutorado em química, 2012.

SRIVASTAVA, A.; PRASAD, R. **Triglycerides-based diesel fuels**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2000.

STERMAN, J. D. *et al.*, **System dynamics perspectives and modeling opportunities for research in operations management**. Journal of Operations Management, 2015.

SUAREZ, P.A.Z. *et al.*, **Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: desafios tecnológicos para viabilizá-los**. Química Nova, 2009.

SUAREZ, P. A. Z., MELLO, V. M. **Gestão sustentável de óleos e gorduras residuais na Universidade de Brasília: rumo à responsabilidade ambiental e social.** In: CATALÃO, V. M. L. *et al.* (Orgs.). *Universidade para o século XXI: educação e gestão ambiental na Universidade de Brasília.* Brasília: Cidade Gráfica e Editora, 2011.

SUNG, K. **A Review on Upcycling: Current Body of Literature, Knowledge Gaps and a Way Forward.** ICECESS 17^a int. conf. Meio Ambiente. Culto. Econ. Soc. Sustentar., Academia Mundial de Ciência, Engenharia e Tecnologia (WASET) Veneza, 2015.

TAN, Y.H. *et al.*, **Waste ostrich and chicken egg shell residues as a heterogeneous catalyst for the production of biodiesel from used cooking oil: catalyst characterization and performance of biodiesel yield.** *Applied energy*, 2015.

TANG, Z.E., *et al.*, **Synthesis of biomass as a heterogeneous catalyst for application in biodiesel production: State of the art and fundamental review.** *Renewable and Sustainable*, 2018.

TESFA, B., *et al.*, **Combustion and performance characteristics of CI (compression ignition) engine running with biodiesel.** *Energy*, v. 51, 2013.

TOKARSKI, D. **Biodiesel, a melhor solução para os combustíveis.** Diretor da Ubrabio em entrevista realizada ao Correio Braziliense. Disponível em : https://www.youtube.com/watch?v=x_XWAr5Ytz4. Acesso em março de 2021.

TSOUTSOS, T. *et al.*, **Quality characteristics of biodiesel produced from used cooking oil in southern Europe.** *Chemical Engineering*, 2019.

UBRABIO-União Brasileira de Biodiesel e Bioquerosene. Disponível em www.ubrablo.com.br. Acessado em dezembro de 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO –UFRJ. **Projeto Fundo Verde.** Disponível em: <http://www.fundoverde.ufrj.br>. Acesso em novembro de 2020.

VALENTE O.S., *et al.*, **Emissões de escape de um gerador a diesel movido a resíduos de biodiesel de óleo de cozinha.** *Revista Science of the total Environment* (2012).

VALENTE C, *et al.*, **Technological Potential of Avocado Oil: Prospective Study Based on Patent Documents.** *Recent Pat Biotechnol* 2019.

VALOR ECONÔMICO. **Óleo de cozinha vira biodiesel**, 2016.

VAN NOTTEN, P. **Scenario development: a typology of approaches**. In. Centre for Educational Research and Innovation (Org.), Think scenarios, rethink education. Paris: OECD, 2006.

VIEIRA, J.S.C *et al.*, **Esterificação e transesterificação homogênea de óleos vegetais contendo alto teor de ácidos graxos livres**. Química nova, 2018.

XAVIER, L. H. *et al.*, **Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining**. Resources Policy, 2019.

XINHUANET. **Foco na China: Biodiesel feito com óleo reciclado de esgoto entra em postos de gasolina na China**. Disponível em : <http://www.xinhuanet.com/>. Acesso em fevereiro 2021.

WU, M.K.H. L.; *et al.*, **A review on biodiesel production using catalyzed transesterification**. Applied Energy, 2010.

WASSELL JR, C.S; DITTMER, T.P. **Are subsidies for biodiesel economically efficient?** Energy Policy, 2006.

WEETMAN, C. **Economia circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa**. São Paulo: 2019.

WRIGHT, J. T. C., *et al.*, **Prospecção de cenários: uma abordagem plural para o futuro do Brasil em 2020**. Revista Ibero-Americana de Estratégia, 2010.

WUST, E. **Estudo da viabilidade técnico-científico da produção de biodiesel a partir de resíduos gordurosos**. Mestrado, Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Regional de Blumenau-FURB, 2004.

YU, D.; *et al.*, **Ultrasonic irradiation with vibration for biodiesel production from soybean oil by Novozym 435**. Process Biochemistry, 2010.

YUSUF, N. N. A. N.; KAMARUDIN, S. K.; YAAKUB, Z. **Overview on the current trends in biodiesel production**. Energy Conversion and Management, London, 2011.

ZHANG Y, DUB MA, MCLEAN DD, KATES M. **Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment**. Bioresour Technol, 2012.

