

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Viviane Gonçalves Leite



ESTUDO SOBRE BIOCOMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA
MOTORES DE CICLO DIESEL NO BRASIL, ARGENTINA E
PARAGUAI

RIO DE JANEIRO

2023

Viviane Gonçalves Leite

ESTUDO SOBRE BIOCOMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA MOTOR DE CICLO
DIESEL NO BRASIL, ARGENTINA E PARAGUAI.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Químico Industrial.

Orientadora: Yordanka Reyes Cruz

Rio de Janeiro

2023

CIP - Catalogação na Publicação

L533e Leite, Viviane Gonçalves
Estudo sobre biocombustíveis alternativos para motor de ciclo diesel no Brasil, Argentina e Paraguai / Viviane Gonçalves Leite. -- Rio de Janeiro, 2023.
147 f.

Orientadora: Yordanka Reyes Cruz.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Química Industrial, 2023.

1. Motor ciclo diesel. 2. Combustíveis alternativos. 3. Diesel verde. 4. H-Bio. 5. Monografia. I. Cruz, Yordanka Reyes , orient. II. Título.

Viviane Gonçalves Leite

ESTUDO SOBRE BIOCOMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA MOTOR DE CICLO
DIESEL NO BRASIL, ARGENTINA E PARAGUAI.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Químico
Industrial.

Aprovado em 18 de julho de 2023.

Yordanka Reyes Cruz, D.Sc, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Adriana dos Anjos Silva, D.Sc, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Carolina Vieira Viêgas, D.Sc, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Donato Alexandre Gomes Aranda, D.Sc, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro
2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ter me dado a oportunidade de cursar uma universidade pública e ter me sustentado durante toda caminhada. Por ter me dado forças e saúde para concluir essa jornada. Expresso minha gratidão a Deus, reconhecendo que Ele é a fonte de toda sabedoria e provisão, sem Ele nada seria possível.

Agradeço a toda minha família pelo seu apoio incondicional, em especial ao meu esposo Marlon Gobbi que sempre esteve comigo, me incentivando, acreditando em meu potencial, me oferecendo seu amor e total compreensão nessa caminhada tão desafiadora. Seu encorajamento constante, seu suporte emocional e suas orações foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço em especial aos meus pais Jane e Vanderlei, e minha irmã Leticia que nunca mediram esforços para me proporcionarem o melhor, sempre me apoiaram, motivaram, sempre estiveram presentes em minha vida, me incentivando a buscar meus objetivos e me proporcionando um ambiente familiar saudável, tornando essa jornada mais leve.

Agradeço a minha melhor amiga Jéssica, que sempre foi minha parceira de vida e não foi diferente na trajetória acadêmica. Sempre ouviu minhas preocupações, me aconselhando e me motivando a persistir mesmo nos momentos mais desafiadores, seu apoio foi fundamental para que eu chegasse até aqui

Expresso minha gratidão a minha orientadora Yordanka, por seu apoio e orientações técnicas essenciais para que eu pudesse concluir este trabalho com sucesso, e pela sua disponibilidade e compreensão durante toda pesquisa.

Finalizo meus agradecimentos citando o versículo bíblico que se encontra em salmos 118 versículos 28 e 29: “Tu és o meu Deus, render-te-ei graças; tu és o meu Deus, quero exaltar-te. Rendei graças ao Senhor, porque ele é bom, porque a sua misericórdia dura para sempre.”

RESUMO

LEITE, Viviane. **Estudo sobre biocombustíveis alternativos para motor de ciclo diesel no Brasil, Argentina e Paraguai**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Os motores do ciclo diesel são um tipo de motor de combustão interna amplamente utilizado em veículos comerciais, como caminhões, ônibus e trens, e dependem de combustíveis fósseis não-renováveis para o seu funcionamento. Inúmeras são as consequências do uso de combustíveis fósseis, como: emissões de gases poluentes e de efeito estufa, com impactos ambientais e à saúde humana além da dependência de fontes não renováveis que são recursos esgotáveis. Por essas razões, há um crescente interesse em alternativas mais sustentáveis para o uso de combustíveis em motores diesel, incluindo o uso de fontes de energia renováveis e tecnologias de motores mais eficientes e limpas. Neste contexto, o biodiesel, o diesel verde, o novo diesel da Petrobrás (RX) e o hidrogênio vem ganhando espaço como alternativas promissoras para minimizar esta problemática, uma vez que empregam fontes de energia renováveis e conseqüentemente menos poluentes. O objetivo estabelecido neste estudo consiste em realizar uma análise abrangente das principais opções de combustíveis disponíveis para motores de ciclo diesel no Brasil, Argentina e Paraguai. Serão considerados fatores como a disponibilidade de recursos e os incentivos governamentais, a fim de mapear as diferentes qualidades de combustíveis existentes nessas regiões. A partir deste estudo identificou-se que o Brasil tem uma posição privilegiada no uso de biocombustíveis para motores de ciclo diesel, com um programa de mistura obrigatória de biodiesel bem estabelecido e discussões em andamento sobre a possibilidade de aumentar essa mistura ou explorar outras fontes de biocombustíveis avançados. A Argentina também apresenta uma indústria bem consolidada de biodiesel, mas assim como o Paraguai, precisa de mais apoio governamental para se expandir no setor de biocombustíveis avançados.

Palavras-chave: 1. Motor ciclo diesel. 2. Combustíveis alternativos. 3. Diesel verde. 4. H-Bio.

ABSTRACT

LEITE, Viviane. **Estudo sobre biocombustíveis alternativos para motor de ciclo diesel no Brasil, Argentina e Paraguai**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial- Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023).

Diesel cycle engines are a type of internal combustion engine widely used in commercial vehicles, such as trucks, buses and trains, and depend on non-renewable fossil fuels for their operation. There are countless consequences of the use of fossil fuels, such as: pollutant and greenhouse gas emissions, with environmental and human health impacts, in addition to dependence on non-renewable sources, which are exhaustible resources. For these reasons, there is growing interest in more sustainable alternatives to diesel fuel use, including the use of renewable energy sources and cleaner, more efficient engine technologies. In this context, biodiesel, green diesel, the new Petrobras diesel (RX) and hydrogen have been gaining ground as promising alternatives to minimize this problem, since they use renewable energy sources and consequently less pollutants. The objective established in this study is to carry out a comprehensive analysis of the main fuel options available for diesel cycle engines in Brazil, Argentina and Paraguay. Factors such as the availability of resources and government incentives will be considered in order to map the different qualities of fuels existing in these regions. From this study, it was identified that Brazil has a privileged position in the use of biofuels for diesel cycle engines, with a well-established program of mandatory biodiesel blending and ongoing discussions about the possibility of increasing this blending or exploring other sources of fuel. advanced biofuels. Argentina also has a well-established biodiesel industry, but like Paraguay, it needs more government support to expand in the advanced biofuels sector.

Keywords: 1. Diesel cycle engine 2. Alternative fuels 3. Green Diesel 4. H-Bio

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Ciclo teórico de motor a diesel de 4 tempos.....	19
Figura 02 - Etapas de um motor a diesel de 4 tempos.....	20
Figura 03 - Motor a diesel de 2 tempos.	22
Figura 04 - Esquema geral de refino com unidades de destilação atmosférica, destilação a vácuo, FCC e coqueamento retardado.	25
Figura 05 - Fluxograma do processo de coqueamento retardado.....	26
Figura 06 - Esquema de uma unidade de craqueamento catalítico.....	27
Figura 07 - Unidade de Hidrotratamento catalítico.....	30
Figura 08 - Preço do combustível diesel ao consumidor (2013-2022) Erro! Indicador não definido.2	
Figura 09 - Variação de preços do diesel por litro em 2023 no Brasil Erro! Indicador não definido.3	
Figura 10 - Produção de diesel no Brasil entre 2012-2021 Erro! Indicador não definido.	
Figura 11 - Demanda nacional de diesel	35
Figura 12 - Distribuição percentual da produção de derivados energéticos de petróleo em 2021	35
Figura 13 - Evolução do consumo de diesel e atividade econômica no Brasil	36
Figura 14 - Oferta interna de Energia na Argentina em 2018 ... Erro! Indicador não definido.	
Figura 15 - Consumo final de energia por fonte em 2018..... Erro! Indicador não definido.	
Figura 16 - Consumo de derivados do petróleo na Argentina..... Erro! Indicador não definido.9	
Figura 17 - Produção de petróleo na Argentina entre 2010-2021	40
Figura 18 - Produção de petróleo na Argentina entre 2011-2021 (m ³).....	40
Figura 19 - Produção de derivados do Petróleo na Argentina	Erro! Indicador não definido.1
Figura 20 - Exportação e importação de petróleo na Argentina	42
Figura 21 - Produção de derivados do petróleo na refinaria de Villa Elisa (ktep).....	44
Figura 22 - Produção de derivados do Petróleo no Paraguai.....	45
Figura 23 - Consumo dos derivados de petróleo no Paraguai.	45

Figura 24 - Importação dos derivados de petróleo no Paraguai entre 1970-2020.....	Erro! Indicador não definido.6
Figura 25 - Importações e exportações de derivados de petróleo no Paraguai entre 1990-2020.....	E
	rro! Indicador não definido.7
Figura 26 - Exemplo de estrutura química do biodiesel.....	Erro! Indicador não definido.8
Figura 27 - Exemplos de ácidos graxos encontrados na natureza	51
Figura 28 – Estrutura química de um triglicerídeo.....	51
Figura 29 - Principais matérias-primas utilizada na produção de biodiesel.....	53
Figura 30 - Participação de matérias-primas para a produção de biodiesel em 2021 no Brasil.....	Er
	ro! Indicador não definido.
Figura 31 – Sementes da planta de soja.....	57
Figura 32 - Reação de transesterificação de um triglicerol	58
Figura 33 - Reações secundárias que podem ocorrer durante a transesterificação de óleos ou gorduras	60
Figura 34 - Reação de esterificação de ácidos graxos	61
Figura 35 - Evolução do marco legal de biodiesel	65
Figura 36 - Capacidade Nominal Autorizada e Consumo de Biodiesel em 2021	67
Figura 37 - Evolução da quantidade de biodiesel fabricado pela indústria brasileira desde o início do PNPB.....	Erro!
	Indicador não definido.
Figura 38 - Distribuição da produção anual de biodiesel por região brasileira.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 39 - Produção de Biodiesel por região em 2021	70
Figura 40 – Distribuição de plantas produtoras de biodiesel no Brasil.....	Erro! Indicador não definido.2
Figura 41 - Demanda de biodiesel com base nos percentuais da mistura BX.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 42 - Consumo de diesel e biodiesel na Argentina	84
Figura 43 - Exportação de biodiesel argentino.....	87
Figura 44 - Produção de Biodiesel entre 2015-2020	91

Figura 45 - Cenário atual da produção de diesel verde no mundo	99
Figura 46 - Processo produtivo HVO	102
Figura 47 - Fluxograma simplificado da produção de diesel verde via síntese de Fischer-Tropsch	104
Figura 48 - Processo Selexol	106
Figura 49 - Processo Rectisol	107
Figura 50 - Estrutura química do Farneaseno	110
Figura 51 – Reação de Desidratação intramolecular do etanol	111
Figura 52 – Reação de oligomerização do etileno.....	112
Figura 53 – Reação de hidrogenação.....	112
Figura 54 - Processo geral de conversão do etanol em combustíveis.	112
Figura 55 - Fluxograma simplificado do processo de hidrotermólise catalítica na síntese de diesel verde.....	114
Figura 56 - Participação, em volume e despesa, dos principais derivados importados - 2020	115
Figura 57 - Projeto da biorrefinaria Ômega Green.....	119
Figura 58 - Processo H-BIO típico de uma refinaria.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Propriedades do diesel e biodiesel.....	49
Tabela 02 - Complexo de soja no Brasil.....	56
Tabela 03 - Consumo mundial de Biodiesel (milhares de BEP/dia)	66
Tabela 04 - Produção de Biodiesel (2012-2021).....	67
Tabela 05 - Produção de Biodiesel por região.....	69
Tabela 06 - Produção de biodiesel pela indústria brasileira desde o início do PNPB.....	71
Tabela 07 - Capacidade de processamento de biodiesel e consumo obrigatório em 2020 e 2030	74
Tabela 08 - Produção de biodiesel na Argentina por planta.....	81
Tabela 09 - Biodiesel: Produção, mercado interno e exportação (toneladas) - Argentina	83
Tabela 10 - Produção de Biodiesel no Paraguai (2015 e 2020).....	91
Tabela 11 - Capacidade instalada de biodiesel de produtores autorizados e em operação	92
Tabela 12 - Propriedades dos combustíveis.....	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases do efeito estufa
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INDEC	<i>Instituto Nacional de Estadística y Censos</i>
MCI	Motor de combustão interna
MIC	Ministério de Indústria e Comércio
PND	Plano Nacional de Desenvolvimento
UDOP	União Nacional da Bioenergia
USDA	<i>United States department of agriculture</i>
FCC	Craqueamento catalítico fluidizado
GLP	Gás Liquefeito do Petróleo
DEA	Dietanolamina
HDT	Hidrotratamento
IAPG	Instituto Argentina de Petróleo e Gás
YPF	<i>Yacimientos Petrolíferos Fiscales</i>
PETROPAR	<i>Petróleos Paraguayos</i>
ABIOVE	Associação brasileira das indústrias de óleos vegetais
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
CBIOS	Crédito de Descarbonização de Biocombustíveis
MME	Ministério de Minas e Energia
CNPE	Conselho Nacional de Política e Energia
BEP	Barris de petróleo equivalente
PDE	Plano Decenal de expansão
FADEEAC	Federação Argentina de Transporte de Entidades Empresariais e de transporte de carga
CARBIO	Câmara Argentina de Biocombustíveis
PROCONVE	Programa de Controle da produção de ar por veículos automotores
IVA	Imposto por Valor Agregado
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente

CD	Desativação de Cilindros
LNER	Laboratório Nacional de Energias Renováveis
LCFS	Padrão de Combustíveis de Baixo carbono da Califórnia
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
HVO	<i>Hidrotreated Vegetal Oil</i>
WGS	<i>Water-Gas Shift</i>
ATJ	<i>Alcohol to jet</i>
ETO	<i>Ehanol to Olefins</i>
HC	Hidrotermólise catalítica
BBF	<i>Brazil BioFuels</i>
s.d	Sem data
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
Ktep	Mil toneladas equivalente de petróleo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA DA PROPOSTA.....	16
1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICO.....	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 MOTORES DE CICLO DIESEL.....	19
2.2 DIESEL	23
2.2.1 Rota tecnológica.....	23
2.2.1.1 Destilação atmosférica.....	23
2.2.2 Cenário do diesel no Brasil	31
2.2.2.1 Produção e consumo de diesel.....	34
2.2.3 Cenário do diesel na Argentina	37
2.2.3.1 Produção e consumo de diesel.....	38
2.2.4 Cenário do diesel no Paraguai.....	43
2.2.4.1 Produção e consumo de diesel	43
2.3 BIODIESEL	47
2.3.1 Matérias-primas.....	50
2.3.2 Principais rotas tecnológicas.....	58
2.3.2.1 Transesterificação ácida e básica.....	58
2.3.2.2 Esterificação.....	61
2.3.3 Cenário do biodiesel no Brasil.....	61
2.3.3.1 Evolução do marco regulatório de biodiesel.....	64
2.3.3.2 Produção e consumo.....	66
2.3.3.3 Comercialização do biodiesel.....	74
2.3.3.4 Projeções futuras.....	76
2.3.4 Cenário do biodiesel na Argentina.....	78
2.3.4.1 Produção e consumo.....	81
2.3.4.2 Projeções futuras.....	88
2.3.5 Cenário do biodiesel no Paraguai	88
2.3.5.1 Produção e consumo	90
2.3.5.2 Projeções futuras	93
3 METODOLOGIA.....	94

4 RESULTADOS	95
4.1 NOVAS QUALIDADES DE BIOCOMBUSTÍVEIS PARA MOTORES DO CICLO DIESEL	95
4.1.1 Diesel verde	97
4.1.1.1 Rotas tecnológicas	99
4.1.1.1.1 Hidrotratamento de óleo vegetal (HVO).....	99
4.1.1.1.2 Gás de síntese proveniente de biomassa, via processo Fischer-Tropsch.....	102
4.1.1.1.3 Fermentação de carboidratos presentes em biomassa.....	108
4.1.1.1.4 Oligomerização de álcool etílico (etanol) ou isobutílico (isobutanol).....	110
4.1.1.1.5 Hidrotermólise catalítica.....	113
4.1.1.2 Cenário do diesel verde no Brasil.....	114
4.1.1.3 Cenário do diesel verde na Argentina	117
4.1.1.4 Cenário do diesel verde no Paraguai.....	117
4.1.2 Diesel RX da Petrobras	119
4.1.2.1 Rota tecnológica: H-BIO	119
4.1.2.2 Cenário do diesel RX no Brasil	121
4.1.2.3 Cenário do diesel RX na Argentina e no Paraguai	122
4.1.3 Hidrogênio misturado ao combustível diesel.....	122
5 CONCLUSÕES.....	128
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	129
7 REFERÊNCIAS	129

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA DA PROPOSTA

O óleo diesel é muito empregado no setor rodoviário e industrial, sendo utilizado principalmente nos transportes de cargas e de passageiros, e em certas embarcações. Porém, a utilização do óleo diesel apresenta alguns malefícios em relação as questões ambientais, por ser proveniente do petróleo, ou seja, uma fonte de energia não renovável. Dessa forma, a preocupação com a preservação do meio ambiente e com as gerações futuras tem crescido, e com isso tem-se aumentado o incentivo para o uso de energia renovável.

Sabe-se que a queima do óleo diesel gera uma alta concentração de substâncias poluentes, como o gás carbônico, monóxido de carbono, fuligem, óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre, os quais são liberados no ambiente desencadeando a poluição do ar, efeito estufa, aquecimento global e o favorecimento da formação de chuva ácida.

Dessa forma, torna-se cada vez mais necessário a busca por fontes alternativas de energia limpa, que possam substituir totalmente ou parcialmente os combustíveis fósseis. Nesse cenário, os biocombustíveis vêm ganhando cada vez mais espaço como é o caso do biodiesel, do diesel verde e do RX da Petrobras, que já são vistos como alternativas promissoras para substituição do diesel de petróleo.

Tendo em vista que a matriz energética mundial ainda é muito dependente do petróleo, o desenvolvimento deste trabalho se dá pelo importante reconhecimento que os biocombustíveis têm ganhado ao longo dos anos, afim de caminhar para um futuro mais sustentável. Com isso, o presente trabalho foi desenvolvido visando realizar um mapeamento nos países como Brasil, Argentina e Paraguai em relação aos diferentes tipos de biocombustíveis que podem ser utilizadas em motores de ciclo diesel e verificar o interesse desses países em introduzir cada vez mais fontes renováveis na sua matriz energética.

Além disso, é visto que o mercado tem buscado caminhar para um futuro mais sustentável, dessa forma, empresas de diversos setores buscam alternativas para seus processos que minimizem os impactos ambientais, como a redução das emissões de carbono, reciclagem, economia energética e de água, utilização de produtos ecológicos, e substituição dos combustíveis fósseis, que é o interesse deste trabalho. Um exemplo recente é a empresa Cargill, uma das maiores empresas do ramo alimentício, demonstrou interesse em realizar uma pesquisa das distintas variedades de biocombustíveis adequadas para motores de ciclo Otto e ciclo Diesel no Brasil, na Argentina e no Paraguai. Então o trabalho visa atender a demanda da empresa

Cargill, que é uma empresa que atua nesses três países, sendo uma grande produtora de matéria-prima para biocombustíveis e também uma forte consumidora de biocombustíveis.

Esses três países foram selecionados para conduzir o estudo devido ao fato de serem os principais produtores de grãos na América do Sul, desempenhando um papel significativo no cenário regional em comparação com outros países do continente. A pesquisa foi conduzida com o objetivo de alcançar a meta da empresa de compreender a realidade sul-americana e explorar o potencial desses países nos próximos anos, visando fortalecer sua influência nesse setor em expansão.

Com isso, o objetivo deste trabalho foi apresentar outros biocombustíveis além do biodiesel que já é uma tecnologia consolidada, para motores do ciclo diesel, a fim de demonstrar as principais matérias primas, principais processos de conversão, os incentivos governamentais, bem como a oferta e a demanda nos três países em questão, a fim de atender possíveis demandas do mercado sobre o assunto, além de apresentar a realidade atual dessas nações.

1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICO

O objetivo geral deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica sobre os principais processos de produção dos biocombustíveis, como o biodiesel, diesel verde e o novo diesel da Petrobras para uso em motores do ciclo diesel.

Como objetivos específicos, foi proposto:

- Efetuar uma revisão da literatura a respeito do biodiesel e do diesel fóssil, sua produção, oferta e demanda nos três países em questão, além de revisar o funcionamento dos motores de combustão interna com ignição por compressão (ciclo diesel).
- Estudar as novas alternativas de biocombustíveis para utilização em motores de ciclo a diesel, como o diesel verde e o RX da Petrobras, por meio da análise da disponibilidade de oferta, demanda, tecnologias utilizadas para sua produção e os incentivos governamentais oferecidos em cada país em questão.
- Realizar um levantamento bibliográfico para examinar as vantagens da utilização desses novos biocombustíveis e como estão o cenário e as perspectivas futuras para cada país em estudo.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é constituído por 7 tópicos.

O tópico 1 introduz-se com a justificativa do trabalho que descreve as principais motivações e os objetivos geral e específicos do mesmo.

No tópico 2 mostra-se o referencial teórico, onde são apresentadas as tecnologias existentes de motores do ciclo diesel no Brasil, na Argentina e no Paraguai. Além disso, a revisão bibliográfica analisa as características dos combustíveis autorizados pela ANP para uso em motores de ciclo diesel, fornecendo informações sobre os métodos de produção de cada combustível e apresentando um levantamento da produção, demanda e consumo em cada um dos países em estudo e as projeções futuras.

O tópico 3 aborda sobre a metodologia empregada para execução deste estudo.

O tópico 4 trata sobre os resultados obtidos ao realizar o mapeamento do cenário das novas qualidades de biocombustíveis para motores de ciclo diesel e rotas tecnológicas de obtenção.

O tópico 5 expõe as conclusões obtidas com o trabalho, seguindo para o tópico 6 que trata de sugestões de trabalhos futuros.

Por fim, no item 7, é possível encontrar uma relação de todas as fontes de pesquisa (referências) utilizadas no estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

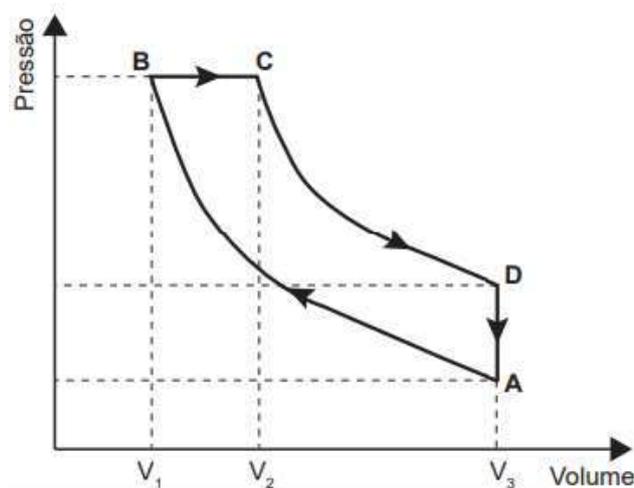
2.1 MOTORES DE CICLO DIESEL

Os motores de combustão interna são máquinas que convertem energia térmica em mecânica através do movimento de suas partes móveis provocado pela queima de um combustível dentro de uma câmara de combustão. Eles podem ser classificados como por ignição por centelha ou ignição por compressão, sendo o motor a diesel, classificado como ignição por compressão.

O motor de ciclo a diesel foi descrito por Rudolf Diesel em 1893, sendo atualmente muito utilizado em veículos pesados, como caminhões, ônibus, locomotivas e navios, bem como em geradores de energia e outras aplicações industriais.

A combustão em um motor de ciclo a diesel acontece quando o combustível entra no cilindro com alta pressão, devido a compressão do ar a temperatura da câmara aumenta desencadeando a reação de combustão. Os principais tipos de motores do ciclo diesel são: o motor de 2 tempos e o motor de 4 tempos (Luz, 2013). Em resumo, o diesel é introduzido na câmara através de um injetor, e ao entrar em contato com o ar aquecido sofre a combustão. Em seguida, o acelerador irá regular a quantidade de combustível fornecida pela bomba e, conseqüentemente, a potência que o motor irá fornecer. A Figura 1 abaixo representa o ciclo de funcionamento de um motor a diesel de 4 tempos:

Figura 01 - Ciclo teórico de motor a diesel de 4 tempos

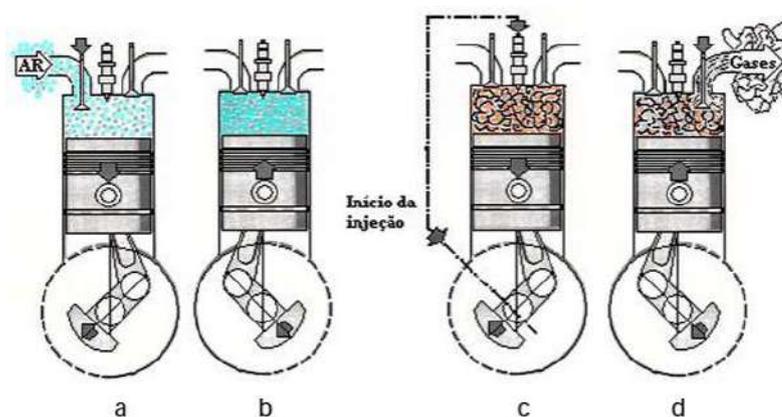


Fonte: Enem, 2017.

- A-B: O pistão sobe comprimindo o ar existente no cilindro a alta pressão e temperatura em uma compressão isentrópica, ou seja, em um processo adiabático reversível sem troca de calor onde a entropia se conserva. A válvula na parte central do topo do cilindro injeta diesel no seu interior e como a temperatura no cilindro é alta o suficiente ocorre a ignição da mistura.
- B-C: O calor gerado na combustão eleva a temperatura impulsionando o pistão para baixo, de modo que a pressão permanece constante. Em outras palavras, ocorre a transferência de calor (da combustão) para o ar em um processo isobárico.
- C-D: Ao fim da combustão, o pistão desce expandindo o ar em um processo isentrópico. Essa é a etapa conhecida como o estágio de potência.
- D-A: Ainda em sua descida, o movimento do próprio pistão provoca a abertura de válvulas de ar fazendo com que o gás preencha novamente o interior do cilindro, além de acelerar a exaustão dos gases de combustão restantes. Ou seja, no retorno do pistão (estágio de compressão), uma nova mistura de ar é comprimida e ao atingir o topo tem-se novamente a injeção de diesel que dá início a um novo ciclo (IF-UFRJ, 2011).

Na Figura 02 abaixo é possível observar o esquema de funcionamento um motor a diesel de 4 tempos.

Figura 02 – Etapas de um motor a diesel de 4 tempos
a- Admissão b- Compressão c- Combustão d- Escape



Fonte: Luz, 2013.

De acordo com a figura 2 é possível descrever os estágios de funcionamento do motor de 4 tempos:

- Admissão: O pistão desce com a válvula de admissão aberta e a de escape fechada. Ao movimentar-se para baixo, o pistão gera uma área de pressão negativa no interior do cilindro. Em decorrência disso, o ar é succionado para o interior do cilindro, passando primeiramente

pelo filtro de ar e posteriormente pela tubulação de admissão. É importante destacar que, independentemente da potência requerida ou da posição do acelerador, a quantidade de ar admitida permanece constante.

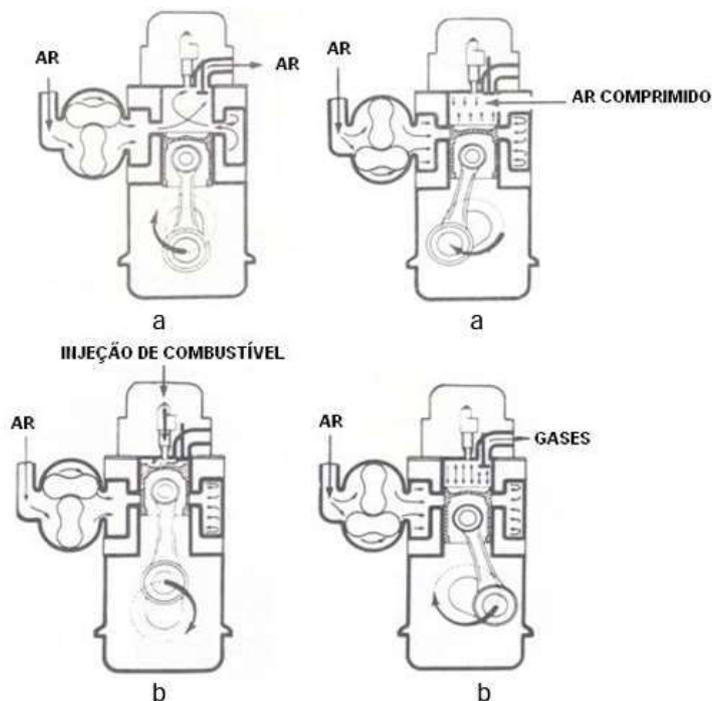
- **Compressão:** Nessa etapa o pistão sobe com as válvulas de admissão e escape fechadas ocorrendo a compressão do ar que foi admitido. O ar é então comprimido até preencher completamente o espaço da câmara de combustão, o que faz com que a temperatura do ar se eleve devido ao processo de compressão. Em seguida, o bico injetor pulveriza finamente o óleo diesel na câmara de combustão. Quando o óleo diesel entra em contato com o ar aquecido, ocorre a ignição e o início do processo de combustão.
- **Combustão:** Quando o pistão é impulsionado pela força gerada pela expansão dos gases queimados, as válvulas de admissão e de escape permanecem fechadas. Essa força é transmitida da biela ao virabrequim, que, por sua vez, provoca o movimento rotativo do motor. É importante destacar que a expansão é o único estágio que produz energia, enquanto os outros três estágios do ciclo consomem parte dessa energia. A energia gerada é acumulada pelas massas do volante e do virabrequim (eixo de manivelas).
- **Escape:** Durante o estágio em que o pistão se move para cima, a válvula de admissão é fechada e a válvula de escape é aberta. Dessa forma, os gases produzidos pela queima do combustível são liberados através da passagem proporcionada pela válvula de escape.

Já no motor diesel de 2 tempos possui cilindros que farão com que o motor funcione a partir de somente dois tipos de tempos: admissão e escape, os quais ocorrerão ao mesmo tempo da compressão e expansão (Angheben, 2013). No primeiro estágio, o pistão se move para baixo permitindo a entrada de ar pelas janelas de admissão, o qual é empurrado por um soprador. Quando o ar que entra no sistema, expulsa os gases residuais da combustão, que saem através da passagem aberta pelas válvulas de escape. Esse fluxo de ar em direção às válvulas de escape tem um efeito de limpeza, deixando o cilindro cheio de ar limpo, razão pela qual esse processo é denominado de "lavagem". No segundo estágio, o pistão se move para cima fechando as válvulas de admissão e de escape. O ar limpo que foi admitido é comprimido durante esse estágio.

No início da etapa de compressão, uma certa quantidade de combustível diesel é pulverizada na câmara de combustão, enquanto o ar limpo é comprimido a altas temperaturas. Isso gera uma reação de combustão que produz pressão e empurra o pistão para baixo durante a expansão. Quando o pistão atinge a metade do seu curso descendente, as válvulas de escape se abrem, permitindo que os gases resultantes sejam expelidos pelo coletor de escapamento. Quando o pistão continua a descer, as janelas de admissão se abrem novamente, permitindo que

o ar limpo entra na câmara de combustão e inicia um novo ciclo (Luz, 2013). A Figura 03 abaixo representa um motor a diesel de 2 tempos.

Figura 03 - Motor a diesel de 2 tempos (1º tempo b- 2º tempo)



Fonte: Luz, 2013.

Contudo, as principais diferenças em relação a um motor de quatro tempos e um de dois tempos, é que nos motores de quatro tempos a nova injeção de ar no cilindro não acontece imediatamente após a explosão da mistura diesel-ar no retorno do pistão e os gases da combustão são totalmente eliminados na subida do pistão e no seu posterior recuo, que é acompanhado da abertura da válvula de injeção de ar. Dessa forma, a taxa com que a combustão de diesel é realizada no interior do cilindro de um motor de dois tempos é o dobro daquela de um motor de quatro tempos (IF-UFRJ, 2011).

Os motores a diesel apresentam eficiência superior em relação aos de gasolina, com sua eficiência dependendo apenas da taxa de compressão. Enquanto os motores a gasolina têm uma mistura de gasolina e ar que limita a taxa de compressão para evitar a ignição espontânea, nos motores a diesel apenas o ar é comprimido e o combustível é adicionado posteriormente, permitindo maiores taxas de compressão.

As taxas de compressão típicas para motores a diesel variam entre 14:1 e 25:1, enquanto motores a gasolina tem taxas de compressão entre 8:1 e 12:1 (IF-UFRJ, 2011).

2.2 DIESEL

O diesel é um combustível fóssil obtido a partir da destilação do petróleo na faixa de temperatura de 150°C a 380°C, cuja composição aproximada é de majoritariamente C₈-C₁₆ podendo conter, em menor proporção outros compostos como nitrogênio, oxigênio, e enxofre, que varia de acordo com cada país a depender das normas regulatórias locais. A sua densidade é cerca de 0,853kg/L, podendo variar entre 0,82-0,85kg/L (Petrobras, 2021).

O diesel é o principal combustível comercializado no mundo devido ao seu amplo uso em veículos comerciais, caminhões, ônibus e máquinas pesadas, principalmente para o transporte de cargas.

O combustível diesel apresenta um aspecto límpido e é líquido à temperatura ambiente, possui baixa volatilidade, apresenta odor característico e é um composto inflamável.

Suas principais aplicações estão no uso como combustível para motores a diesel (óleo diesel), combustível doméstico e industrial, além de poder ser utilizado como matéria-prima para petroquímica (gasóleo petroquímico).

No Brasil, a Agência Nacional de Petróleo (ANP), determinou a partir da resolução nº50, de 2013, para os óleos diesel de uso rodoviário, sua classificação em dois tipos:

I- Óleo diesel A: combustível sem adição de biodiesel, o qual é oriundo de processos de refino de petróleo e processamento de gás natural destinado a veículos dotados de motores do ciclo Diesel, de uso rodoviário.

II- Óleo diesel B: Se refere ao diesel A com adição de biodiesel, no teor estabelecido pela legislação vigente.

Há também o óleo diesel Marítimo que visa atender as embarcações, com isso exige propriedades específicas por questões de segurança, como, seu ponto de fulgor que deve estar acima de 60°C (Petrobrás, 2021).

2.2.1 Rota tecnológica

2.2.1.1 Destilação atmosférica

A partir do refino do petróleo é possível obter óleo diesel, onde o petróleo bruto é submetido a destilação atmosférica, seguido de processos de tratamento e a esta produção são adicionadas correntes produzidas no coqueamento retardado e no craqueamento catalítico e processadas no hidrotreamento catalítico a fim de melhorar suas propriedades.

A destilação consiste em um processo de separação físico, cujo princípio é a diferença de volatilidade dos componentes na mistura líquida. O processo é denominado destilação atmosférica, pois a coluna opera com pressões próximas a 1 atm.

Sabendo que o petróleo é constituído principalmente de hidrocarbonetos, cujo ponto de ebulição aumenta com o aumento da cadeia carbônica, é possível separar o petróleo em frações leves, intermediárias e pesadas a partir da variação de temperatura e pressão em uma coluna de destilação. Ou seja, o petróleo será aquecido em uma coluna de destilação, fazendo com que haja um gradiente de temperatura ao longo da torre, ocorrendo a vaporização dos componentes de acordo com seus pontos de ebulição, onde no topo a temperatura é maior, por onde saem os componentes mais leves, com menor ponto de ebulição e no fundo, com maior temperatura, são retirados os componentes mais pesados, dessa forma o diesel será separado na entre 150-380°C.

Estas torres apresentam várias retiradas laterais referentes a cada fração com determinada faixa de número de carbono.

É possível resumir os produtos da destilação atmosférica do petróleo da seguinte forma:

- Produtos de topo: nafta leve, GLP, gás combustível e água;
- Retiradas laterais (produtos intermediários): nafta pesada, querosene de aviação, óleo diesel e gasóleos (leve e pesado);
- Produto de fundo: resíduo atmosférico;

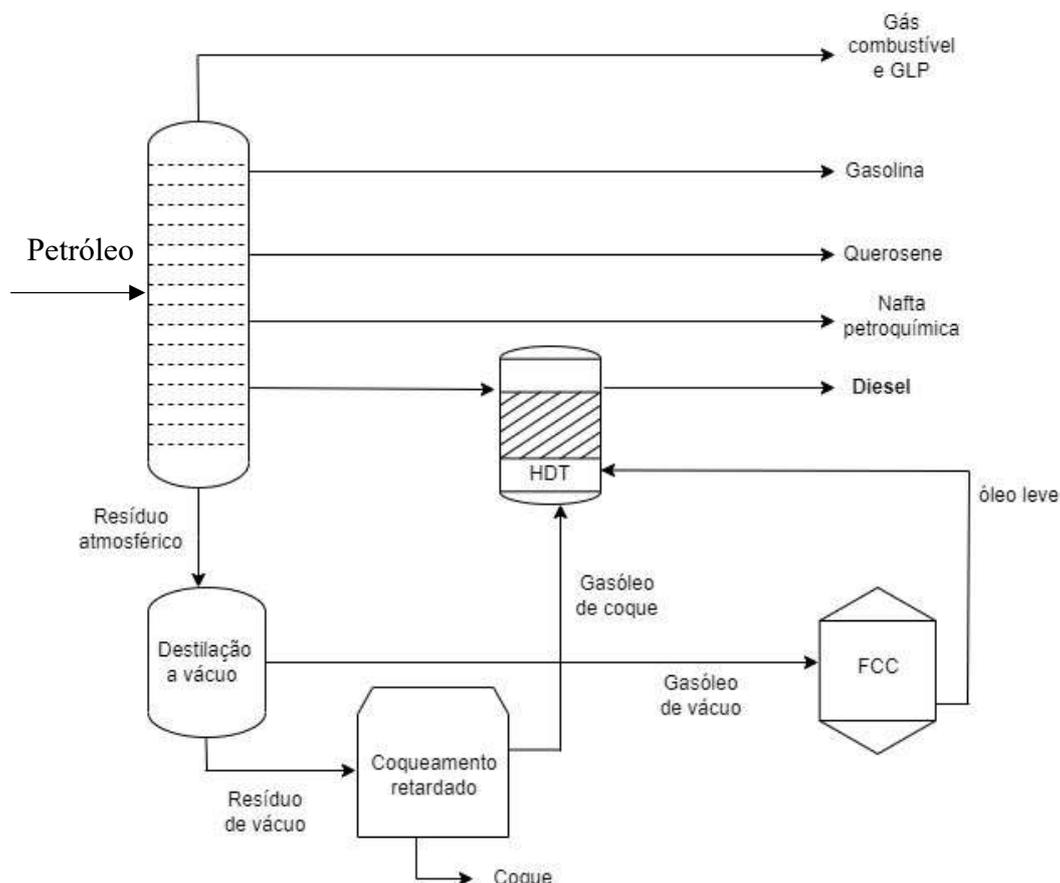
Após a destilação atmosférica, o óleo diesel é submetido a processos de tratamento, como a remoção de impurezas através de processos de decantação e filtragem, e de hidrotratamento, que envolve a reação do óleo diesel com hidrogênio em altas temperaturas e pressão para melhorar suas propriedades, como a estabilidade térmica e a viscosidade.

Além disso, o óleo diesel pode passar por outros processos de refino, como o craqueamento catalítico, que tem como objetivo melhorar o índice de cetano e a capacidade lubrificante do produto.

Após o processamento e refino, o óleo diesel é armazenado em tanques e distribuído para postos de combustíveis, onde é utilizado como fonte de energia para motores a diesel em veículos automotivos, geradores de energia elétrica, embarcações, entre outros.

A Figura 04 representada abaixo mostra um esquema geral de refino do petróleo:

Figura 04 - Esquema geral de refino com unidades de destilação atmosférica, destilação a vácuo, FCC e coqueamento retardado



Fonte: Elaboração própria.

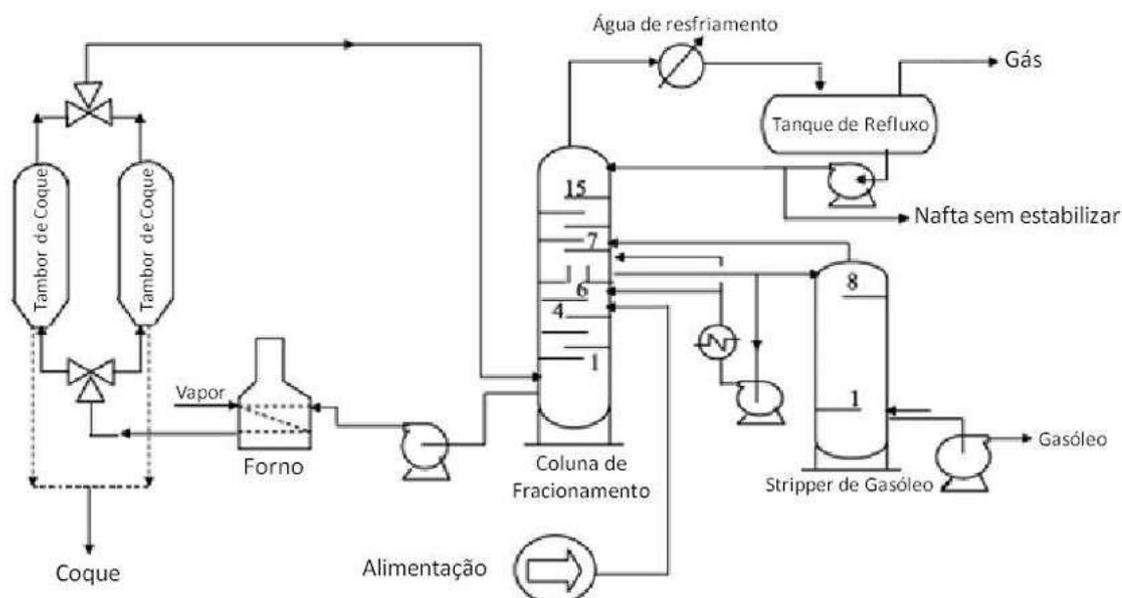
- Coqueamento retardado

O coqueamento retardado é um processo de refino de petróleo, que envolve a conversão térmica de frações pesadas do petróleo em moléculas menores e mais leves como o principal objetivo trazer valor agregado ao resíduo de fundo do petróleo, ou seja, valorizar economicamente os derivados mais pesados, pois possuem baixo interesse de mercado. O coque resultante do processo é um subproduto sólido de alto teor de carbono que pode ser utilizado como combustível ou como matéria-prima na produção de eletrodos.

A carga que sai do fundo da destilação a vácuo passa por condições severas de temperatura, a consequência disso é o craqueamento, ou seja, quebra das cadeias carbônicas maiores em cadeias menores, bem como o coque de petróleo. Dessa forma os compostos aromáticos polinucleados, asfaltenos e resinas, com alto peso molecular, são convertidas em frações leves e intermediárias, como GLP, nafta e diesel, além da produção do coque (material sólido

concentrado em carbono), que possuem valor comercial. A Figura 05 apresenta um fluxograma do processo de coqueamento retardado.

Figura 05 - Fluxograma do processo de coqueamento retardado



Fonte: Franco, 2011.

O processo em questão é formado resumidamente por dois tambores de coque, que funcionam em paralelo, um forno e uma fracionadora. Geralmente a carga fresca, que é o resíduo de vácuo ou atmosférico, passa primeiramente por um pré-aquecimento a partir de uma integração energética com as correntes geradas pela unidade, sendo enviada para coluna fracionadora, onde se mistura com parte dos componentes leves produzidos no tambor de coque (reciclo) formando uma carga combinada. Na torre os compostos mais pesados são condensados e seguem no processo, enquanto os mais leves são retirados. Essa corrente mais leve segue para o hidrotreatamento, antes de poderem se juntar ao diesel originário da destilação atmosférica (Rosal, 2013). Já os compostos com maior peso molecular seguem para os fornos, onde alcançam temperaturas na faixa de $485^{\circ}\text{C} - 505^{\circ}\text{C}$ em pouco tempo (cerca de 2 a 3 minutos), para que não haja deposição de coque nos tubos do forno, e é onde o craqueamento térmico se inicia. Em seguida são alimentados aos reatores de coqueamento, onde as reações de coqueamento serão concluídas a partir a transformação destes compostos em frações mais leves (constituída basicamente de vapores e gases de hidrocarbonetos) é separada do coque de petróleo (precipitado), e seguem de volta para a torre de fracionamento e coque, retirado pelo fundo (2013).

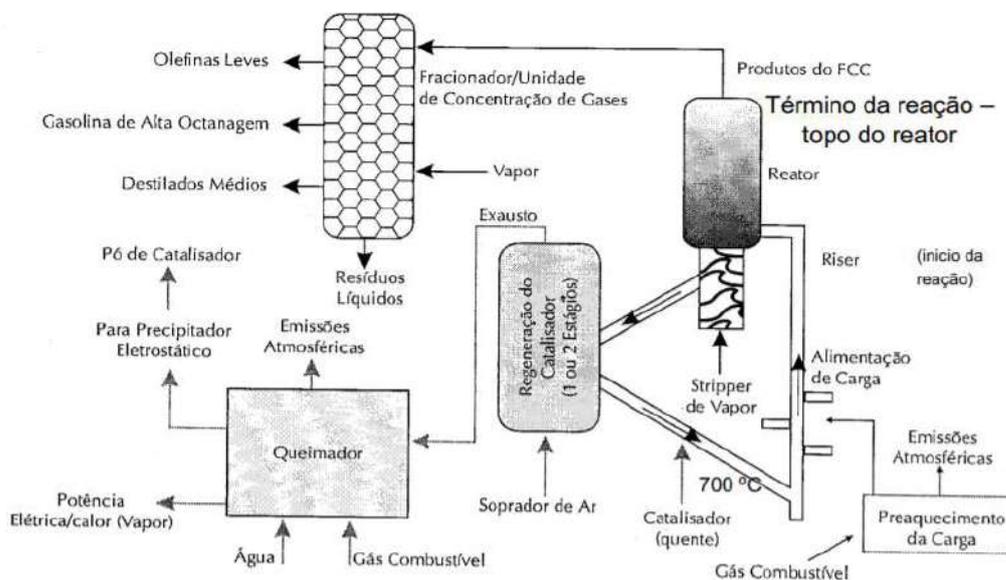
- Craqueamento catalítico

O craqueamento catalítico é um processo de refino de petróleo que envolve a conversão térmica de frações pesadas de petróleo em frações mais leves e valiosas, como gasolina, diesel e gás de cozinha. O processo é realizado em unidades denominadas unidades de craqueamento catalítico fluidizado (FCC, na sigla em inglês), que contêm um catalisador sólido que ajuda a quebrar as moléculas grandes de hidrocarbonetos em moléculas menores. Trata-se de um processo de desintegração molecular, que acontece devido a ação da temperatura, pressão e catalisadores, resultando na quebra das moléculas com maior peso molecular. Os catalisadores mais utilizados são compostos por zeólitas, o que permite um aumento da seletividade na quebra das ligações C-C, além de acelerar a reação, permitir condições mais brandas para o processo, transportar o coque gerado e ser um agente de transferência de calor (Cunha, 2009).

A carga processada nessas unidades, normalmente são gasóleos pesados, oriundos da destilação a vácuo, com mais de 25 átomos de carbono por molécula.

As unidades de FCC são constituídas por quatro sessões: seção de reação ou conversão; seção de fracionamento; seção de recuperação de gases e seção de tratamento. É possível observar na Figura 06 uma unidade típica de craqueamento catalítico:

Figura 06 - Esquema de uma unidade de craqueamento catalítico



Fonte: Almeida, 2006.

a) Seção de reação ou conversão

Na etapa de reação, ocorrem as quebras das ligações C-C, produzindo moléculas menores na faixa de C₃-C₁₂, ou seja, produtos como o gás liquefeito do petróleo (GLP) e a

gasolina. Além disso também são produzidos em menor escala gás combustível (C_1 e C_2), óleos leves e coque.

De acordo com a figura 6, a carga a ser processada é pré-aquecida e entra no conversor pelo Riser (base do reator), onde é misturada com o catalisador quente vindo do regenerador.

A mistura segue pelo Riser onde ocorrem as reações de craqueamento (entre a base e o topo do reator). No topo do Riser há um vaso separador, composto por uma bateria de ciclones, onde os produtos gasosos da reação são separados dos produtos particulados formado de catalisadores desativados. O catalisador, é enviado para o regenerador ainda quente e com coque depositado em sua superfície como consequência do processo, ou seja, o catalisador após a reação é desativado devido à deposição de coque, que bloqueiam seus sítios ativos. Com isso, o catalisador passa por um processo de regeneração, onde o coque será queimado pela ação do ar a elevadas temperaturas para retomar sua atividade e retornar a base do Riser. Nesta etapa, devido à grande energia liberada pela queima do coque os catalisadores adquirem a energia térmica que possibilita a vaporização da carga no Riser (Almeida, 2006).

A quantidade de ar utilizado na queima é estequiométrica para fornecer uma oxidação parcial, ou seja, formando apenas monóxido de carbono que é queimado em uma caldeira produzindo vapor de água. Os catalisadores regenerados retornam ao processo, enquanto os gases e materiais particulados restantes são enviados para um queimador, afim de aproveitar o máximo de energia e recuperação dos particulados, bem como adequação às legislações ambientais. Já os produtos gasosos, seguem para seção de fracionamento.

b) Seção de fracionamento

O objetivo desta etapa é promover a separação do efluente do reator em vários produtos além de recuperar e reciclar parte dos gasóleos não-convertidos.

Os produtos da reação de craqueamento, vindos do vaso separador seguem para fracionadora para separação das frações em vários produtos. No fundo da coluna é retirado um óleo pesado conhecido como resíduo de craqueamento (ou borra). Na fração intermediária é retirado um óleo mais leve com faixa de ebulição similar ao diesel, conhecido como óleo leve de ciclo (LCO) ou diesel de craqueamento. E no topo da fracionadora é retirada uma corrente gasosa formada pela nafta de craqueamento e hidrocarbonetos leves (entre $C_1 - C_4$), que podem ser usados como gás combustível ($C_1 - C_2$) na própria refinaria e como GLP ($C_3 - C_4$), que seguem para etapa de recuperação de gases.

c) Seção de recuperação de gases

O objetivo desta etapa é separar as frações leves convertidas (Gás combustível, GLP e Nafta), através de operações de compressão, absorção, retificação e destilação, em várias etapas, processar a corrente, separando-a em três frações distintas: o gás combustível (C_1 e C_2), o gás liquefeito de petróleo (GLP – C_3 e C_4) e a nafta de craqueamento ($C_5 - C_{12}$).

d) Seção de tratamento

A seção de tratamento visa possibilitar a comercialização da gasolina, GLP e do gás combustível, depois de remover os contaminantes de enxofre indesejados presentes nessas frações. O gás combustível é tratado na unidade dietanolamina (DEA) para remoção de H_2S sendo queimado em fornos e/ou caldeiras na própria refinaria, gerando energia; o GLP também segue unidade de tratamento DEA para remoção do H_2S , e em seguida para a unidade de tratamento cáustico para remoção de mercaptans e por fim é armazenado em esferas. Já a nafta segue para unidade de tratamento cáustico, também para remoção de H_2S e mercaptans e por fim para armazenamento em tanque de nafta ou gasolina. O óleo leve vai para unidade de hidrotreatamento catalítico (HDT) e, depois, para armazenamento, como óleo diesel. Por fim, o óleo decantado, mesmo que contenha enxofre em alto teor, não é tratado, o que acontece normalmente é sua mistura ao resíduo de vácuo, compondo o óleo combustível.

O craqueamento catalítico é um processo importante na produção de combustíveis para transporte, já que permite que frações pesadas de petróleo sejam convertidas em produtos mais leves e valiosos.

- Hidrotreatamento catalítico

As correntes oriundas do refino do petróleo contêm impurezas indesejáveis nos combustíveis, pois causam corrosão, poluição e instabilidade no produto. Dessa forma, o hidrotreatamento catalítico é uma alternativa de processamento que visa adequar os produtos dentro das especificações. O HDT trata as correntes de hidrocarbonetos com hidrogênio e catalisadores visando a remoção de compostos de enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais pesados, assim como estabilizar determinados cortes do petróleo, ou seja, é um processo utilizado para melhorar a qualidade de diversos produtos, como o diesel (Dietz, 2014).

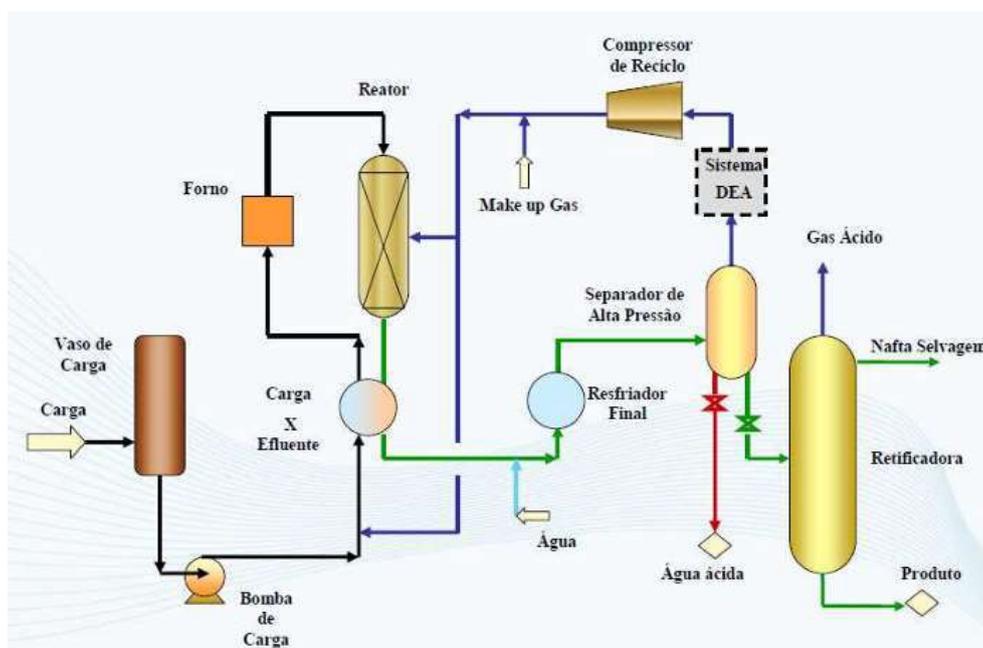
Em relação ao diesel, o uso do HDT é muito necessário, uma vez que o combustível vem caminhando para uma diminuição no teor de enxofre, redução da densidade e volatilidade do combustível, aumento do número de cetano e do ponto de fulgor.

Muitas são as reações que podem acontecer no processo de hidrotratamento, como por exemplo: a hidrodessulfurização, hidrodessoxigenação, hidrodessnitrogenação, hidrogenação de aromáticos, hidrodessmetalização e o próprio hidrocrackeamento. As condições de operação do sistema variam de acordo com a unidade de processamento, depende também das características da carga, do tipo de catalisador utilizado e do produto final desejado.

O hidrotratamento catalítico é considerado um dos processos mais eficazes para remover impurezas do petróleo. A técnica é muito utilizada na produção de diesel e de outros produtos refinados, como querosene, nafta e óleo lubrificante. É uma etapa crucial no processo de refino do petróleo, pois ajuda a garantir a qualidade e a eficiência dos produtos finais, além de atender a regulamentações ambientais mais rigorosas.

De uma forma geral, uma unidade de hidrotratamento possui o esquema resumido abaixo na Figura 07:

Figura 07 - Unidade de Hidrotratamento catalítico



Fonte: Hoff, 2015.

A carga inicial (diesel de destilação e resíduos pesados misturados) é bombeada até a pressão necessária, e é adicionada uma corrente de gás hidrogênio puro e de reciclo do processo. Essa mistura gás-líquido é previamente aquecida em trocadores de calor, através de uma integração energética com correntes mais quentes do processo. Em seguida, a carga pré-aquecida segue para o forno, a fim de receber o restante do calor necessário para atingir a temperatura de reação adequada (aproximadamente 350°C) para então entrar no reator, onde de fato ocorrerão as reações de hidrotratamento através de um leito fixo de catalisadores. Após a

reação, os produtos são resfriados de forma parcial em trocadores de calor, e a mistura resultante de líquido e gás segue para um vaso separador, onde serão separadas três correntes: o gás rico em hidrogênio, a água ácida formada no processo e o combustível hidrotratado. Geralmente os reatores são formados por múltiplos leitos, o que permite um melhor controle de temperatura, bem como monitoramento da atividade do catalisador e detecção de possíveis caminhos preferencias no leito (aumento ou redução localizada da temperatura em determinado leito). Logo após, o gás é enviado para uma seção de tratamento básica, a base de amina (dietanolamina), para remover o ácido sulfídrico (H_2S) e posteriormente passam pela seção de compressão, para ajustar a pressão e retorna ao processo como gás de reciclo (Hoff, 2015).

É importante ressaltar que o hidrotratado ainda contém hidrocarbonetos leves e H_2S produzido nos reatores, sendo assim ele é levado a seção de retificação com vapor, onde estes compostos são eliminados. Logo após, o produto passa por uma unidade de secagem para remoção de água e posteriormente segue para um tanque de armazenamento como produto final. Os gases residuais resultantes como, hidrogênio, metano, etano e propano são empregados como gás combustível das refinarias. Já o H_2S removido é enviado para unidade de tratamento e conversão, podendo ser convertido a enxofre elementar ou a ácido sulfúrico (Hoff, 2015).

2.2.2 Cenário do diesel no Brasil

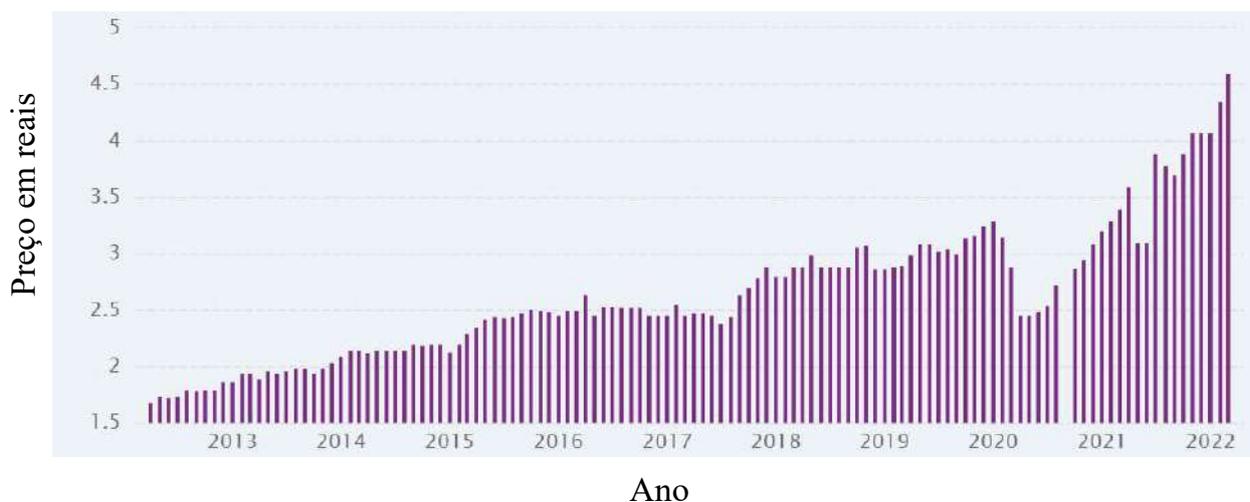
No início do século XX a demanda por combustíveis de alto desempenho aumentou muito devido a popularização dos automóveis. Assim, o petróleo passou a ser uma forma de obter gasolina e, anos depois, o diesel também ganhou espaço, se tornando um combustível de grande uso após a segunda guerra mundial. Com isso, o petróleo tem uma grande importância na matriz energética brasileira, sendo o diesel a fração de maior consumo, uma vez que o transporte rodoviário é o principal meio de transporte no país. Dessa forma, o diesel reflete o principal combustível empregado em território nacional, ultrapassando os 40% de volume de todo combustível utilizado no país, contribuindo para o funcionamento de carros, ônibus, caminhões, máquinas e geradores, além de embarcações que utilizam esse combustível.

No Brasil, o diesel é regulamentado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que estabelece suas especificações técnicas, como teor de enxofre, ponto de fulgor e densidade e também pela Lei Federal 9478/97 (Lei do Petróleo). Desde 2014, O óleo diesel S500 deve ser utilizado apenas em motores fabricados no período anterior ao ano de 2012. A partir dessa data, os novos motores a diesel devem utilizar o S10. (ANP, 2021).

Além disso, desde 2008 o diesel no Brasil também é misturado com biodiesel, um biocombustível produzido a partir de óleos vegetais ou gorduras animais. A mistura é regulamentada pelo Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) que será abordado com mais detalhes no capítulo referente a biodiesel. A mistura é uma estratégia importante para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a produção de biocombustíveis no país.

Em relação aos preços, o diesel é um combustível sujeito a variações frequentes devido a fatores como oscilações no preço do petróleo no mercado internacional, variações cambiais e políticas governamentais de incentivo ou tributação. No entanto, o diesel no Brasil é conhecido por ser um dos combustíveis mais caros do mundo, devido aos altos impostos e à falta de concorrência no mercado de refinarias (Petrobras, 2021). A Figura 08 apresenta as variações referentes ao preço do diesel final destinado ao consumidor entre 2013 e 2022:

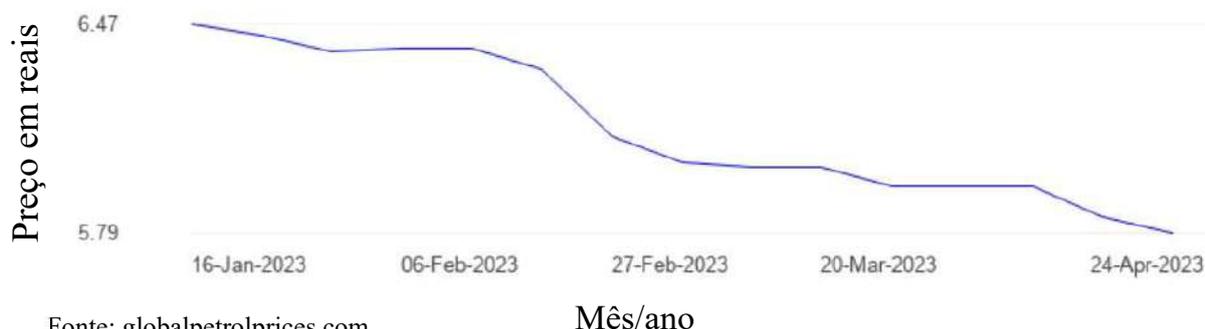
Figura 08 - Preço do combustível diesel ao consumidor (2013-2022)



Fonte: CEIC, 2022.

Já na Figura 9 é possível observar as variações no preço do diesel por litro no ano de 2023 no Brasil:

Figura 09 – Variação de preços do diesel por litro em 2023 no Brasil



Fonte: globalpetrolprices.com

O preço do diesel no Brasil tem variado nos últimos meses. Em janeiro de 2023, o preço médio do diesel foi de 6,13 reais por litro. Em março, a Petrobras anunciou uma redução de 4,5% nos preços do diesel nas refinarias, com o objetivo de manter a competitividade da empresa e otimizar seus ativos de refino. Com essa redução, o preço do diesel caiu para 4,02 reais por litro, abaixo do preço de paridade de importação.

Essa diferença de preços pode ser explicada, em parte, pela política de preços adotada pela Petrobras, que é a principal fornecedora de diesel no país. Desde 2016, a empresa adotou uma política de preços baseada no preço do petróleo no mercado internacional e na taxa de câmbio. O preço do petróleo é definido no mercado internacional e pode variar em função de diversos fatores, como a oferta e a demanda global, as políticas dos países produtores de petróleo, as condições geopolíticas, entre outros. Já a taxa de câmbio é determinada pela oferta e demanda de moedas estrangeiras no mercado brasileiro, bem como pelas políticas monetárias e cambiais adotadas pelo governo brasileiro.

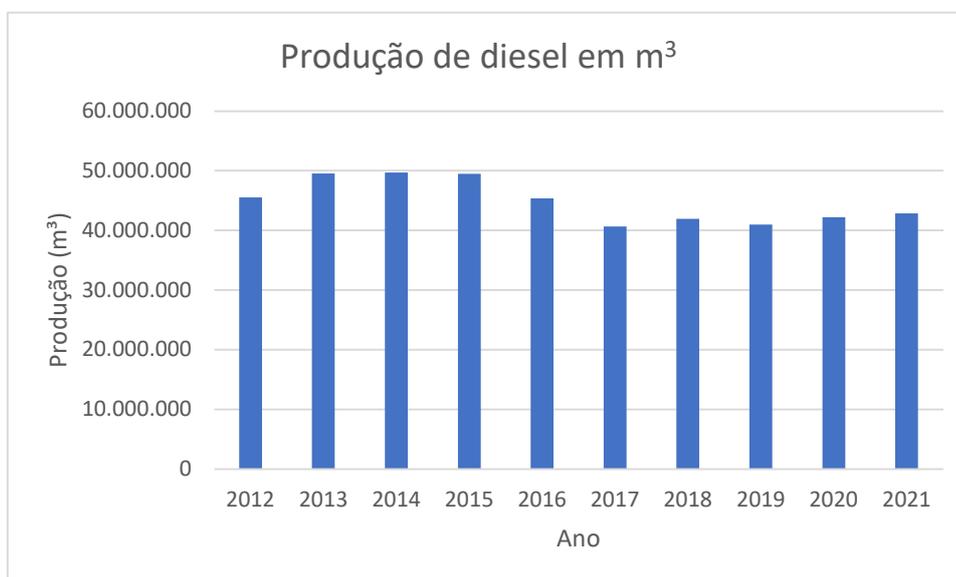
Com base nesses dois componentes, a Petrobras define os preços dos seus combustíveis no mercado interno, que são atualizados com frequência. Essa atualização ocorre de forma a acompanhar as variações dos preços internacionais e da taxa de câmbio, o que significa que os preços podem subir ou cair a qualquer momento.

Essa política tem sido alvo de críticas por parte de diversos setores, especialmente do transporte de carga, que depende do diesel para suas atividades e que enfrenta dificuldades para repassar o aumento de preços para o valor final do frete. Além disso, o alto preço do diesel tem impactos diretos no preço dos alimentos e de outros produtos, uma vez que o transporte é um dos principais componentes do custo final desses produtos.

2.2.2.1 Produção e consumo de diesel

Segundo dados da Agência Nacional do Petróleo o Brasil ocupava a 16º posição no ranking mundial, no final de 2020, em relação a reservas mundiais de petróleo, sendo 11,9 bilhões de barris, cerca de 0,7% do volume mundial (1,7 trilhão de barris). No que tange a produção de diesel, em 2021 o Brasil ocupava o 9º lugar, com uma produção de 3 milhões de barris por dia, que se refere a 3,4% do total mundial (95 milhões globais), e em 8º lugar em 2022 com uma produção de 3.689.000 de barris por dia. (ANP, 2022). A Figura 10 apresenta a produção de diesel no Brasil entre os anos de 2012 e 2021:

Figura 10 - Produção de diesel no Brasil entre 2012-2021



Fonte: elaboração própria com dados da ANP, 2022.

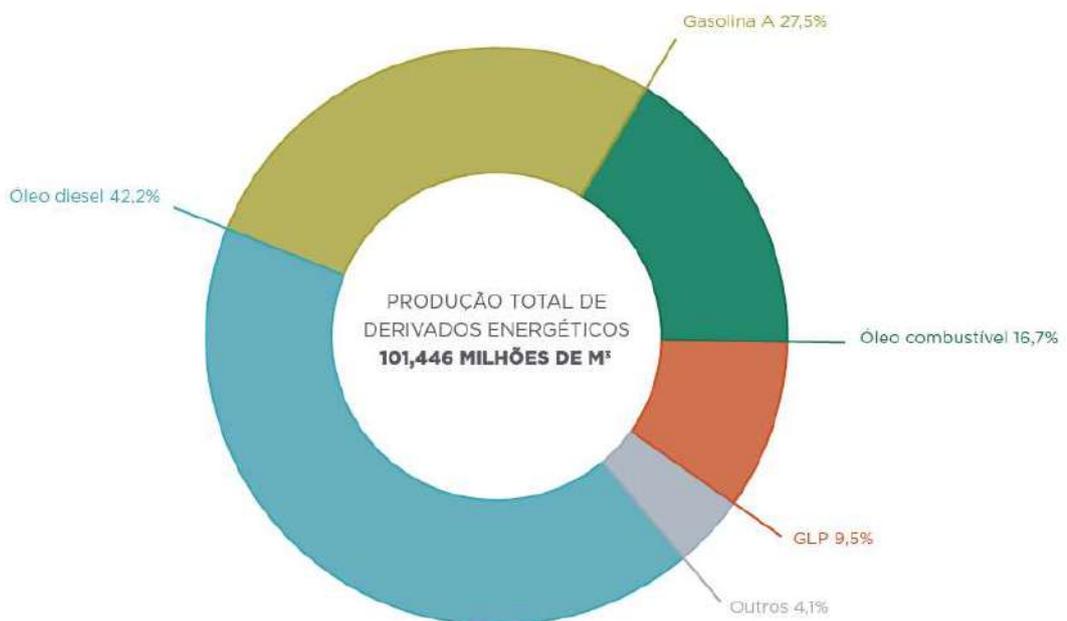
Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) é possível observar na Figura 11 como a demanda do diesel tem aumentado ao longo dos anos e que segue com expectativas de aumento. E na Figura 12 é apresentada a distribuição percentual da produção de derivados do petróleo no ano de 2021.

Figura 11 - Demanda nacional de diesel



Fonte: EPE, 2021.

Figura 12 - Distribuição percentual da produção de derivados energéticos de petróleo em 2021



Fontes: ANP, 2022.

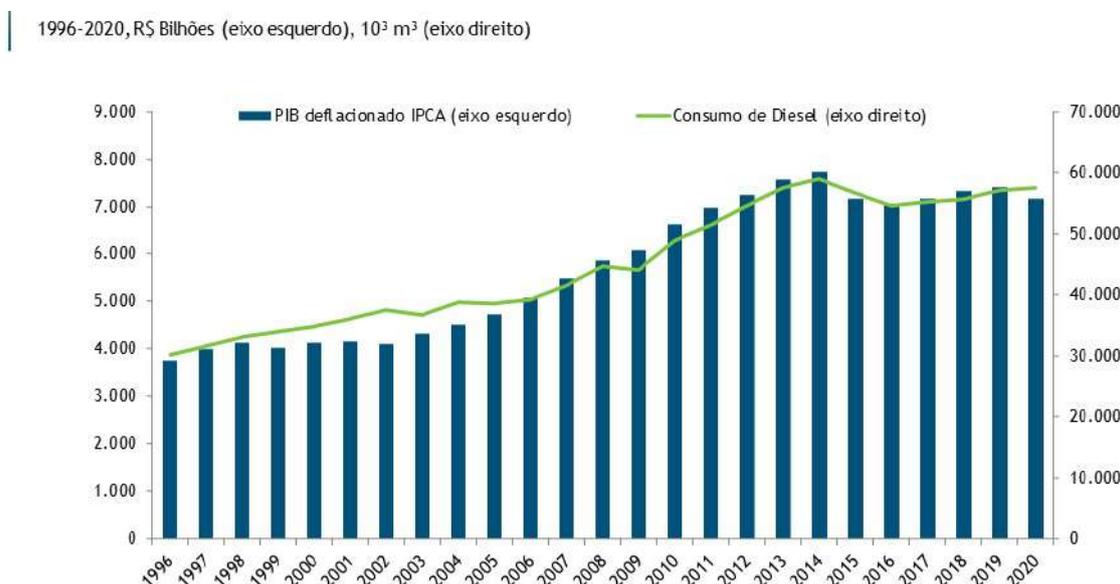
Em relação ao consumo, o Brasil também se apresenta como grande consumidor mundial de petróleo, ocupando a 8^o posição, com cerca de 2,3 milhões de barris por dia, 2,6% em relação ao total mundial.

É a capacidade de refino de um país que dita a capacidade de produção de diesel, isso porque o petróleo extraído deve ser processado em suas diversas faixas, e no Brasil em 2020, a

capacidade de extração foi quase equivalente à capacidade de refino. Mesmo com o contexto de pandemia, que contribuiu com a alta de preços, em 2020 e 2021 foram anos históricos de consumo de diesel no Brasil.

O consumo de óleo diesel no Brasil reflete na atividade econômica do país, uma vez que o modal rodoviário é o principal veículo da matriz de transportes brasileira. Dessa forma, a Figura 13 abaixo mostra a relação entre o consumo de diesel e a atividade econômica do país, e como essas variáveis estão combinadas.

Figura 13 - Evolução do consumo de diesel e atividade econômica no Brasil



Fonte: IBP, 2021.

Em 2021, os derivados energéticos corresponderam a 87,6% do total produzido, com 101,5 milhões de m³, após um aumento de 5,6% em relação a 2020. Em relação a importação, os derivados energéticos representaram 60,7% do volume importado no país, sendo o óleo diesel o combustível importado em maior volume, representando 40,1% do total importado de 21,9 milhões de m³ (ANP, 2022). Ou seja, cerca de 20% do diesel comercializado no Brasil em 2021 foi importado de outros países. Em alguns meses de 2022, houve um aumento nas importações de diesel para atender à alta demanda nacional, o que gerou os temores de escassez do combustível no país. Esse aumento na demanda é impulsionado, em grande parte, pela colheita e transporte da safra agrícola.

2.2.3 Cenário do diesel na Argentina

O mercado de diesel na Argentina tem sido impactado por diversos fatores nos últimos anos, incluindo mudanças regulatórias, flutuações cambiais e condições macroeconômicas instáveis. Em geral, a demanda por diesel no país é alta, principalmente no setor de transporte.

O atual cenário da Argentina é delicado pois o país vem enfrentando uma grande crise econômica desencadeada por diversos fatores como: desvalorização da moeda (peso) e inflação crescente; histórico de dívidas com o fundo monetário Internacional (FMI); finanças públicas desequilibradas; hiperinflação e aumento das taxas de juro (Brasil Paralelo, 2022). Este contexto impacta em um déficit energético fazendo com que em algumas regiões haja falta de diesel para abastecer as frotas, agravando as atividades locais, além das empresas ficarem submissas aos elevados preços do diesel.

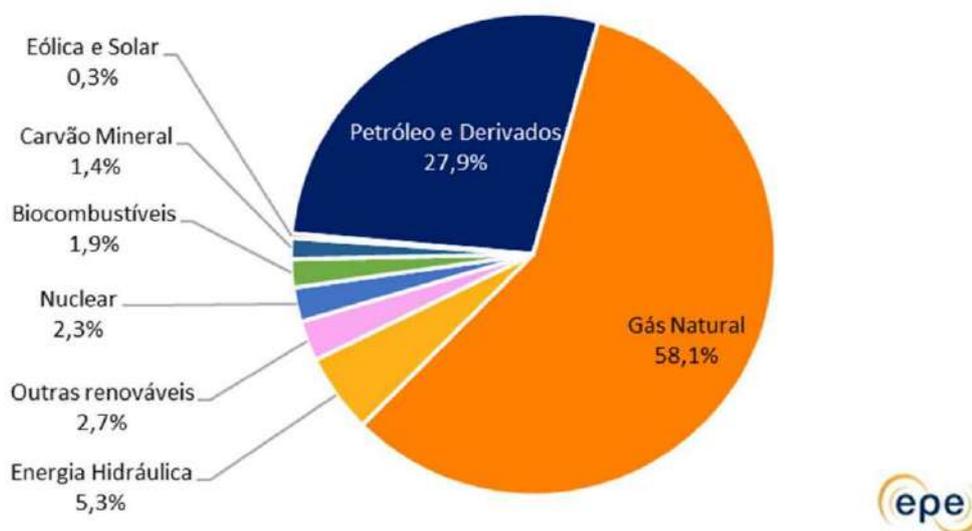
Uma forma de contornar a escassez de diesel, o governo argentino propôs aumentar a mistura obrigatória de biodiesel ao diesel afim de suprir a maior demanda local por diesel, principalmente do setor agroexportador (Udop, 2022).

Contudo, a Argentina ainda é um país que apresenta uma gama de recursos energéticos além de uma indústria de energia consolidada nos segmentos de extração, transformação, transporte, distribuição e consumo. O país possui 24 bacias sedimentares, onde 5 produzem petróleo e gás natural (EPE, 2020).

O preço do diesel na Argentina é regulado pelo governo, o que pode afetar a rentabilidade das empresas do setor. Além disso, a demanda por diesel na Argentina está intimamente ligada à atividade econômica do país, que pode ser afetada por fatores como a pandemia de COVID-19 e a instabilidade política e econômica.

No ano de 2018, a oferta interna total de energia foi de 82 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), sendo 86% referentes ao gás natural, petróleo e derivados. Dentre os energéticos, o gás natural é mais abundante no país, representando em 2018, 58% da oferta interna de energia na Argentina (EPE, 2020), conforme mostra a Figura 14 abaixo:

Figura 14 - Oferta interna de Energia na Argentina em 2018



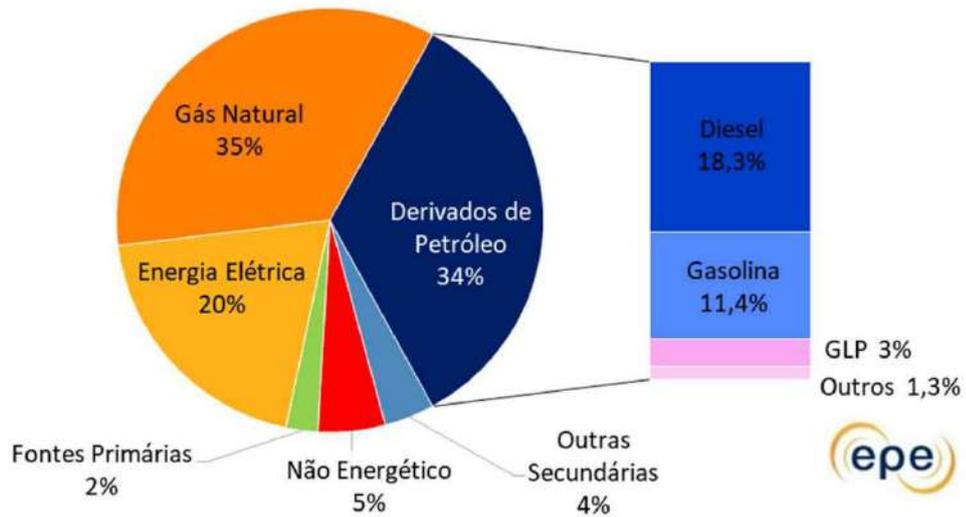
Fonte: EPE, 2019a.

2.2.3.1 Produção e consumo de diesel

A produção de diesel na Argentina é realizada pela *Yacimientos Petrolíferos Fiscales* (YPF), a principal empresa petrolífera do país, que possui refinarias em diferentes regiões.

Na Figura 15 abaixo é possível observar que em 2018, a participação de derivados de petróleo no consumo final de energia, na Argentina, foi 34%, desses, o óleo diesel correspondeu a 18,3%. (EPE, 2019b). Dentre os derivados do petróleo, é visto que o diesel e a gasolina apresentam grandes participações, isto porque o setor de transportes é responsável pela maior demanda de energia, seguido dos setores residencial e industrial, sendo que os três corresponderam respectivamente a 31%, 25% e 23% do consumo final em 2018 (EPE, 2020).

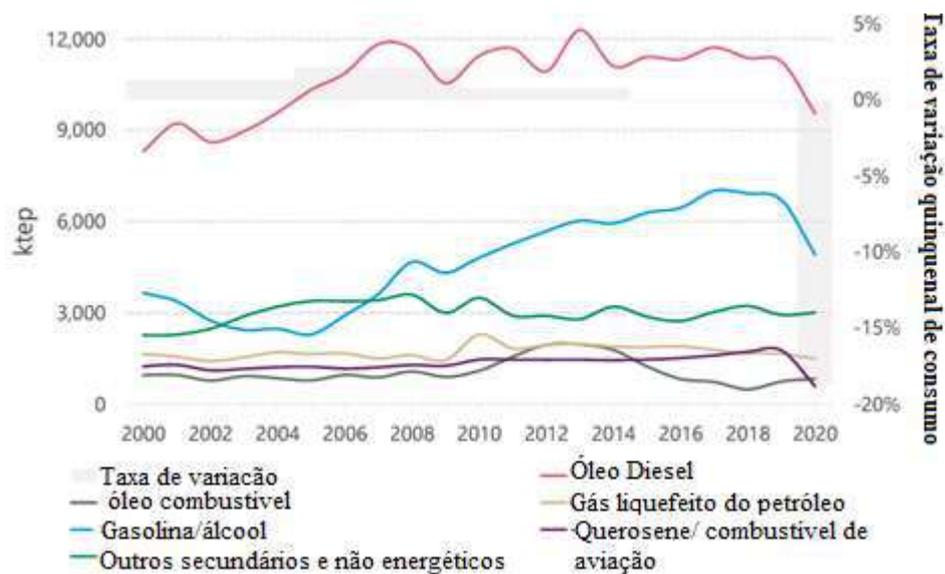
Figura 15 - Consumo final de energia por fonte em 2018



Fonte: EPE (2019a).

A Figura 16 representa as variações no consumo de derivados de petróleo na Argentina entre os anos 2000 e 2020:

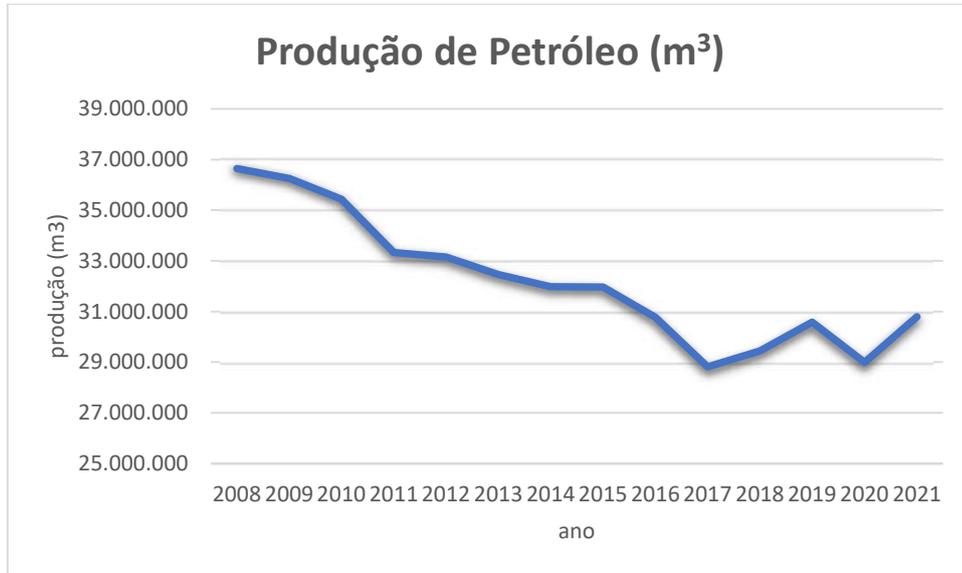
Figura 16 - Consumo de derivados do petróleo na Argentina



Fonte: Panorama Energético de América Latina y el Caribe, 2021.

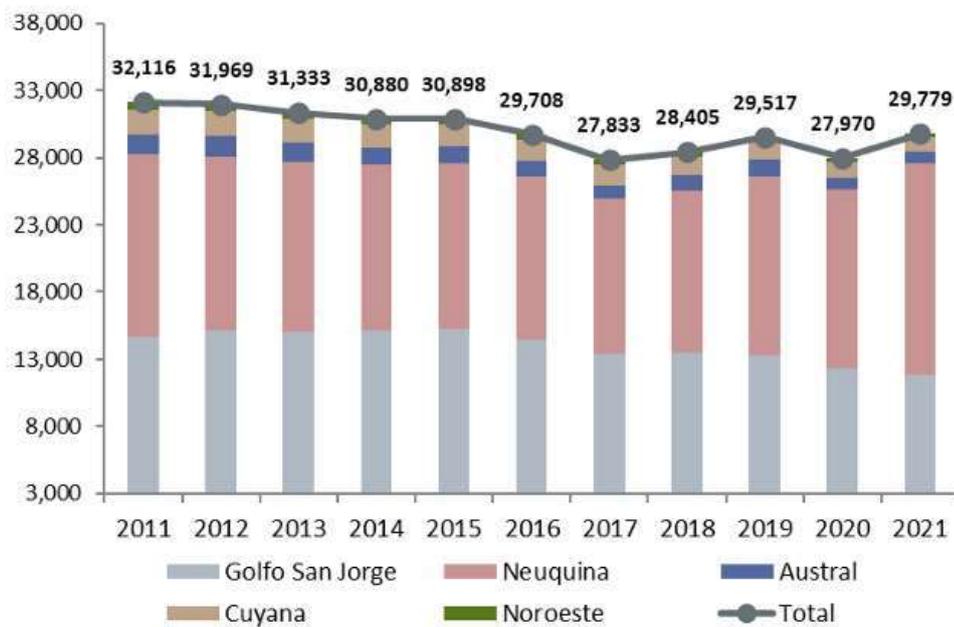
Em relação a produção, considerando que o óleo diesel é um derivado do petróleo é possível analisar os dados de produção do mesmo na Argentina de acordo com a Figura 17 e 18, onde a Figura 18 destaca as maiores regiões produtoras de petróleo:

Figura 17 - Produção de petróleo na Argentina entre 2010-2021



Fonte: elaboração própria com dados do Instituto Argentino de Petróleo e gás (2022).

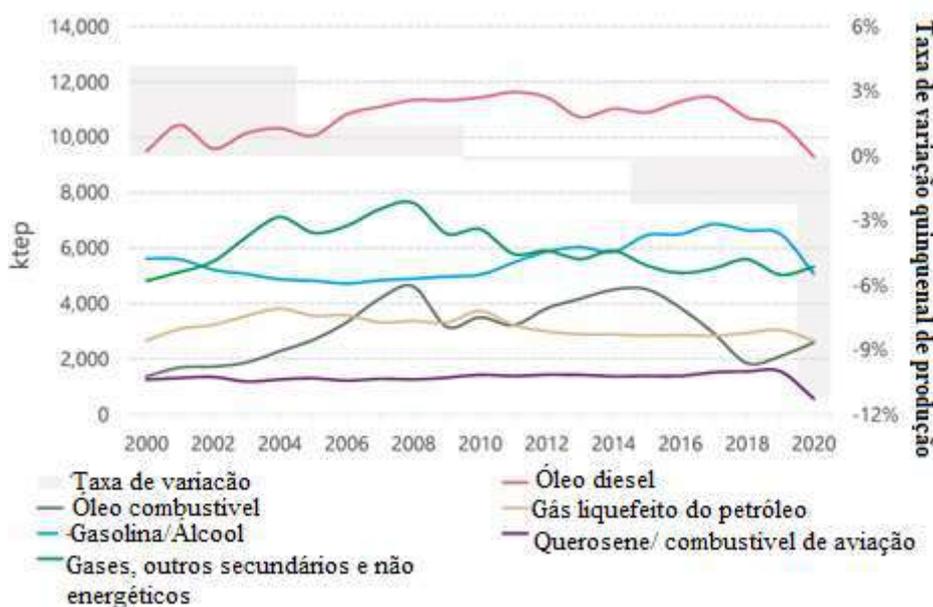
Figura 18 - Produção de petróleo na Argentina entre 2011-2021 (m³)



Fonte: IAE, 2021.

É observado pelas Figuras 17 e 18 que desde 2008, a produção de petróleo sofreu uma queda significativa e constante até meados de 2018, período em que a maioria dos indicadores usados para avaliar o desempenho do setor apresentou declínio. Embora tenha havido uma recuperação moderada desde então, a pandemia de Covid-19 impactou a indústria globalmente em 2020, interrompendo essa tendência positiva. No entanto, em 2021, a produção de petróleo conseguiu se recuperar aos níveis pré-pandêmicos. Nesse mesmo ano, a estatal argentina *Yacimientos Petrolíferos Fiscales* (YPF) aumentou a oferta de diesel buscando atender à crescente demanda, registrando um aumento de 0,9% em relação a 2019. Ainda em 2021 a Argentina alcançou a posição de quinto maior produtor de petróleo na América Latina, ficando atrás apenas do Brasil, México, Colômbia e Venezuela. A produção total de petróleo no país atingiu a marca de 627.000 barris por dia (IAE, 2021) e na Figura 19 abaixo é possível verificar a produção de derivados do petróleo no país incluindo o óleo diesel:

Figura 19 - Produção de derivados do Petróleo na Argentina



Fonte: Panorama Energético de América Latina y el Caribe, 2021.

Em 2022 a demanda de diesel teve picos de aumento que não pode ser atendido apenas pelo fornecimento nacional. Este pico se deu principalmente devido aos baixos níveis de água que diminuíram a produção de energia hidrelétrica e também devido ao inverno local entre os meses de junho a agosto, fazendo com que grande parte do gás natural fosse destinado prioritariamente para o aquecimento residencial, limitando o uso de gás natural para usinas de

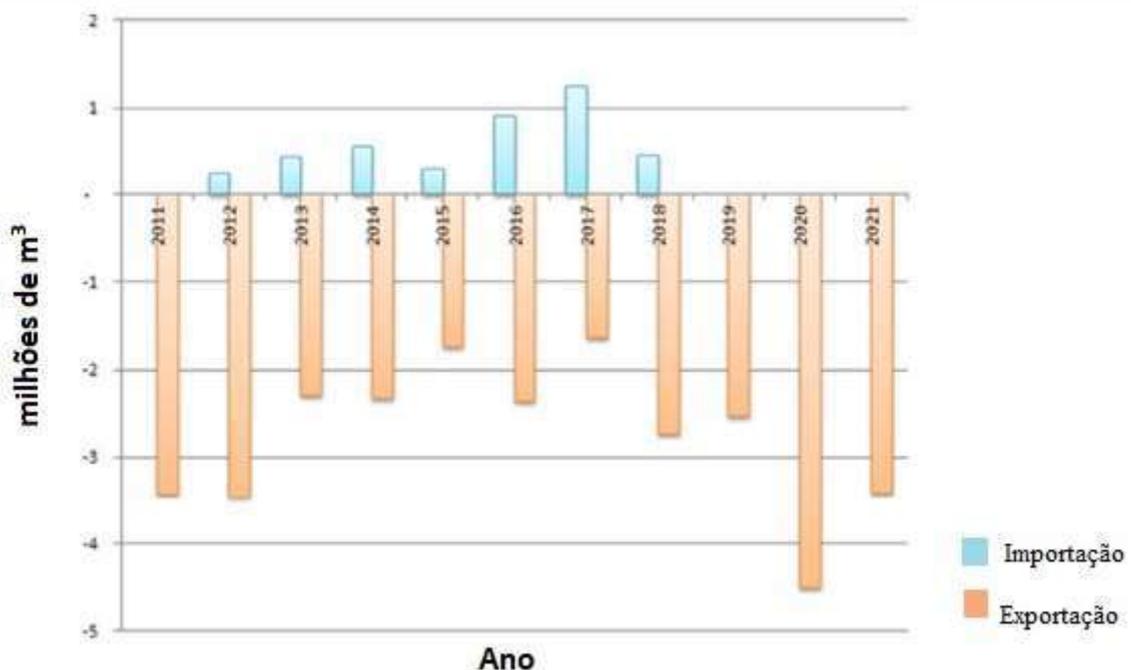
energia (S&P Global Commodity Insights, 2022). Para então suprir essa demanda, a Argentina buscou expandir as importações de diesel com isenção de impostos para o setor de energia.

As refinarias da Argentina têm uma capacidade de produção anual de aproximadamente 11,5 milhões de metros cúbicos de diesel e considerando que a demanda total de diesel no país, excluindo o setor de geração de energia, está em torno de 14,0 milhões de metros cúbicos por ano, existe um déficit de oferta de cerca de 2 milhões de metros cúbicos por ano.

Ou seja, a produção de diesel na Argentina é insuficiente para atender a essa demanda, o que levou o país a importar grandes quantidades de diesel para suprir a necessidade do mercado interno, onde o país depende das importações para cerca de 1/4 de seu consumo de diesel. O país produziu 30,8 milhões de barris de diesel nos primeiros cinco meses de 2022, uma produção estável, mas que não foi suficiente para suprir a demanda de energia (S&P Global Commodity Insights, 2022).

Uma das principais razões para a dependência da Argentina das importações de diesel é a falta de investimentos na indústria de refino de petróleo no país. Segundo um relatório da Agência Internacional de Energia, a capacidade de refino da Argentina não aumentou significativamente nas últimas décadas, enquanto a demanda por diesel continuou crescendo (Poder360.com). Na Figura 20 abaixo é possível observar o perfil de importação e exportação de petróleo no país.

Figura 20 - Exportação e importação de petróleo na Argentina



Fonte: IAPG, 2022 (Adaptado).

2.2.4 Cenário do diesel no Paraguai

O Paraguai é um país que consome cerca de 28 mil barris por dia (bpd) de produtos refinados de petróleo, onde todo seu petróleo é importado, uma vez que o país ainda não possui exploração de petróleo para fins comerciais.

A companhia President Energy encontrou a primeira grande reserva de petróleo no Paraguai e já foram identificados aproximadamente 50 poços petrolíferos no país, principalmente na região do Chaco, segundo o Departamento de Hidrocarbonetos do Ministério de Obras Públicas, mas que não é suficiente para abastecer o país (Veja, 2014).

O Paraguai possui uma única refinaria, que é a refinaria “Villa Elisa”, e ela encerrou suas atividades em 2005 e atualmente faz parte da infraestrutura industrial da estatal Petróleos Paraguayos (PETROPAR). A PETROPAR é responsável pela comercialização de combustíveis e outros derivados de petróleo no país, importando todos os produtos que comercializa, incluindo gasolina, diesel, querosene, GLP, entre outros, provenientes de refinarias de outros países, principalmente do Brasil e da Argentina. A empresa atua na distribuição e venda desses produtos em postos de combustíveis em todo o país (site da Petropar, 2022).

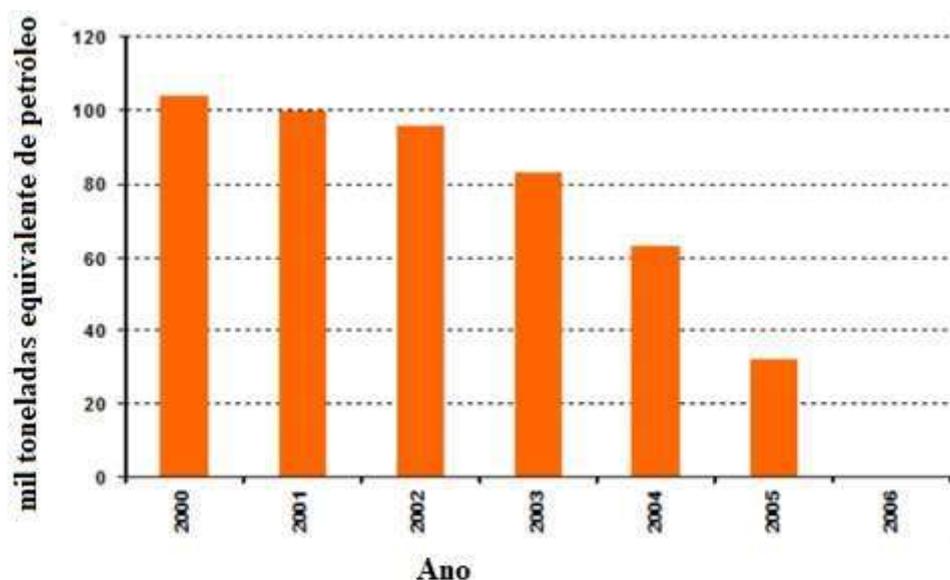
A companhia comercializa dois tipos de diesel, o diesel *porã* e o diesel *mbareté*. O primeiro possui um teor máximo de enxofre de 50 ppm e um teor de biodiesel de 2%, e favorecem o desempenho do motor a partir de uma limpeza cuidadosa, fornecendo maior vida útil. Já o diesel *mbareté*, possui baixo teor de enxofre com no máximo 10 ppm e maior número de cetano (56), também prolonga a vida útil dos motores permitindo uma melhor partida a frio e uma combustão mais suave e eficiente, evitando problemas de corrosão e formação de depósitos no sistema de injeção além de reduzir as emissões poluentes (site da Petropar, 2022).

2.2.4.1 Produção e consumo de diesel

Uma vez que o diesel é um derivado do petróleo, neste tópico será abordado sobre o consumo e produção de petróleo no Paraguai.

Na Figura 21 abaixo é representada a produção de derivados do petróleo durante os anos de operação da refinaria Villa Elisa:

Figura 21 - Produção de derivados do petróleo na refinaria de Villa Elisa (ktep)

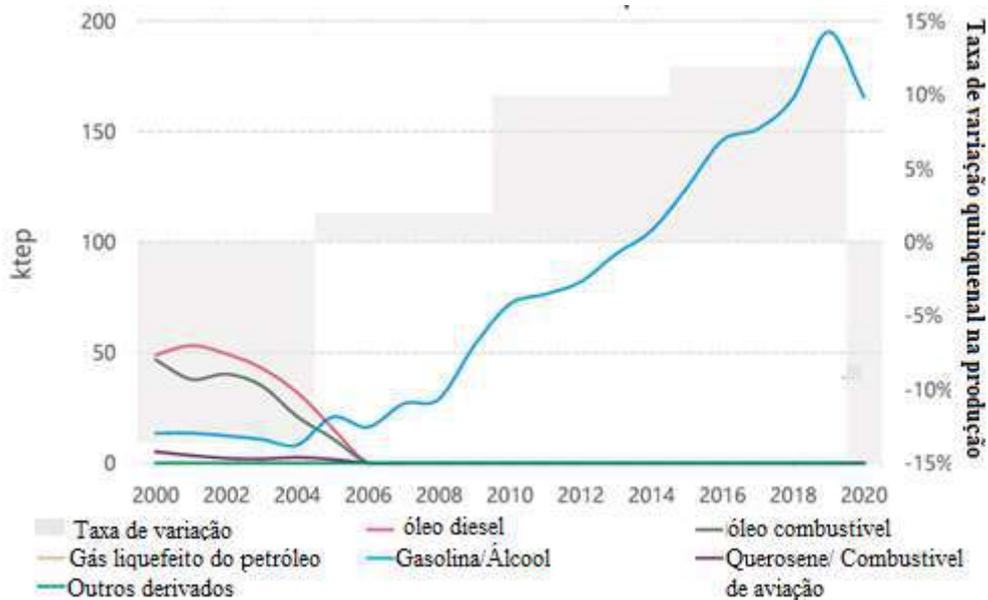


Fonte: Vice Ministério de Minas e Energia, 2021.

Observa-se que a produção foi caindo ao longo dos anos até a inativação da refinaria durante o governo de Nicanor Duarte Frutos devido a uma série de fatores, incluindo sua ineficiência operacional e os altos custos de produção. A refinaria foi construída na década de 1970, com o objetivo de reduzir a dependência do país nas importações de petróleo e aumentar a produção local de combustíveis. Contudo, a refinaria enfrentou diversos problemas ao longo dos anos, como a falta de investimentos em sua modernização e a baixa qualidade do petróleo produzido no Paraguai, que dificultava a produção de combustíveis de alta qualidade. Além disso, a refinaria operava com uma capacidade abaixo de sua capacidade total, o que resultava em custos operacionais elevados. Ela foi desativada em 2005 e desde então, o país tem dependido principalmente das importações de diesel e gasolina para atender sua demanda interna por combustíveis.

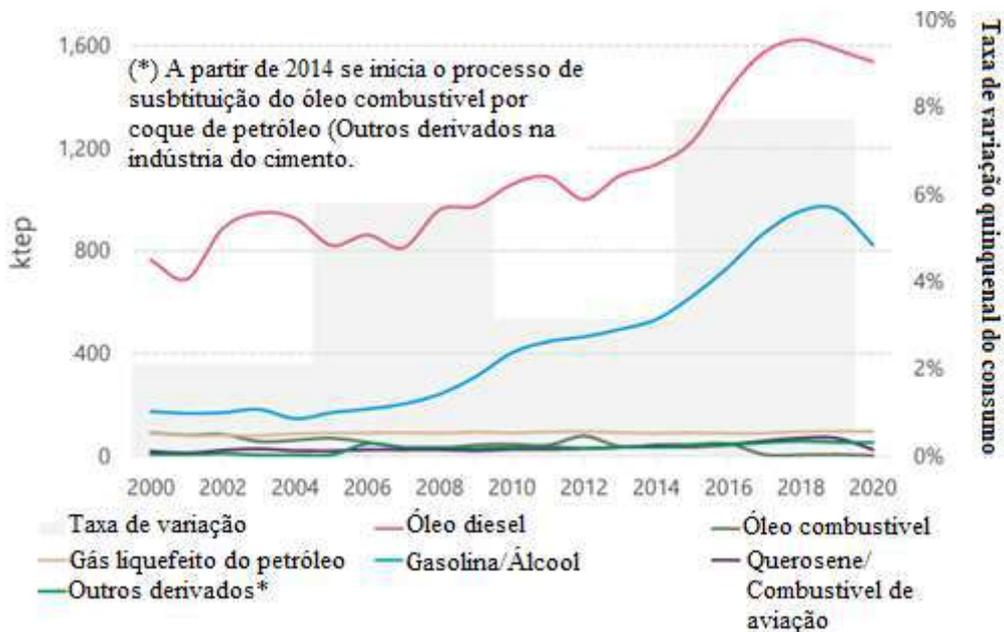
A Figura 22 a seguir representa a produção dos derivados de petróleo no Paraguai enquanto que a Figura 23 mostra como se deu o consumo destes no país até 2020:

Figura 22 - Produção de derivados do Petróleo no Paraguai



Fonte: Panorama Energético de América Latina y el Caribe, 2021.

Figura 23 - Consumo dos derivados de petróleo no Paraguai



Fonte: Panorama Energético de América Latina y el Caribe, 2021.

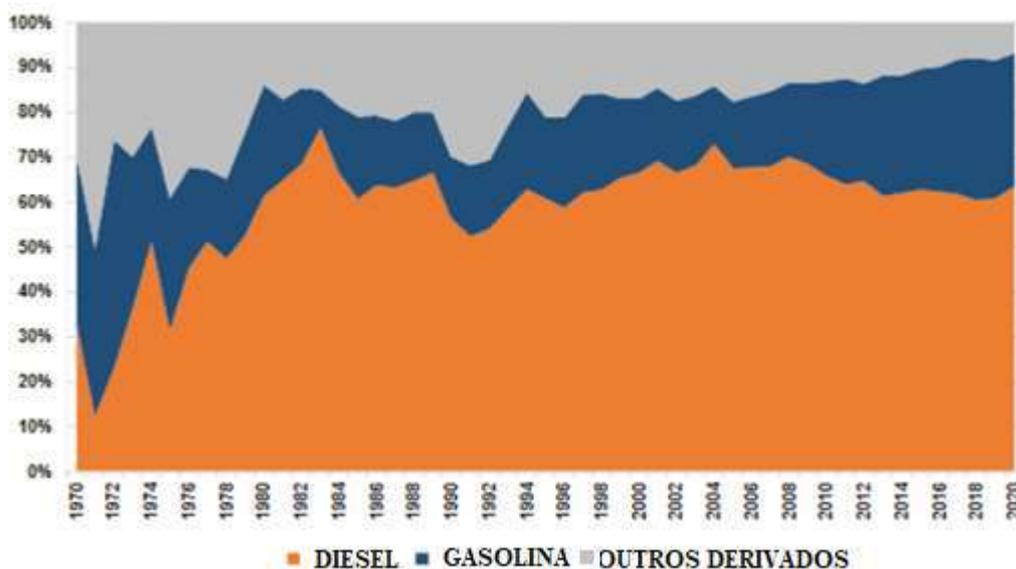
O peso do diesel na estrutura das importações de derivados do petróleo corresponde a 60% do total devido a seu grande uso no setor de transporte de carga e passageiros, assim como em atividades agrícolas.

Até hoje, o Paraguai importa todos os combustíveis fósseis que consome, tanto bruto quanto seus derivados. Dessa forma, a necessidade do Paraguai de diminuir suas importações de petróleo motivou a criação da primeira política setorial do país, a política energética nacional 2040, que visa o aproveitamento dos recursos energéticos do país (International Hydropower Association, 2021). O Governo nacional tem buscado facilitar os trabalhos de prospecção e exploração de hidrocarbonetos, além de conceder tratamento altamente favorável às concessões de exploração.

No que tange a importação e exportação do Petróleo refinado no Paraguai, em 2021, o Paraguai importou US\$ 1,4 bilhão em petróleo refinado, tornando-se o 85º maior importador do combustível fóssil do mundo. Ainda em 2021, o Petróleo Refinado foi o 2º produto mais importado no Paraguai, sendo importado principalmente dos países: Estados Unidos, Argentina, Cingapura, Índia e Emirados Árabes Unidos. E no caso de Petróleo bruto, também em 2021, o país importou \$707 em petróleo bruto, tornando-se o 145º maior importador deste combustível fóssil do mundo. (OEC, 2021).

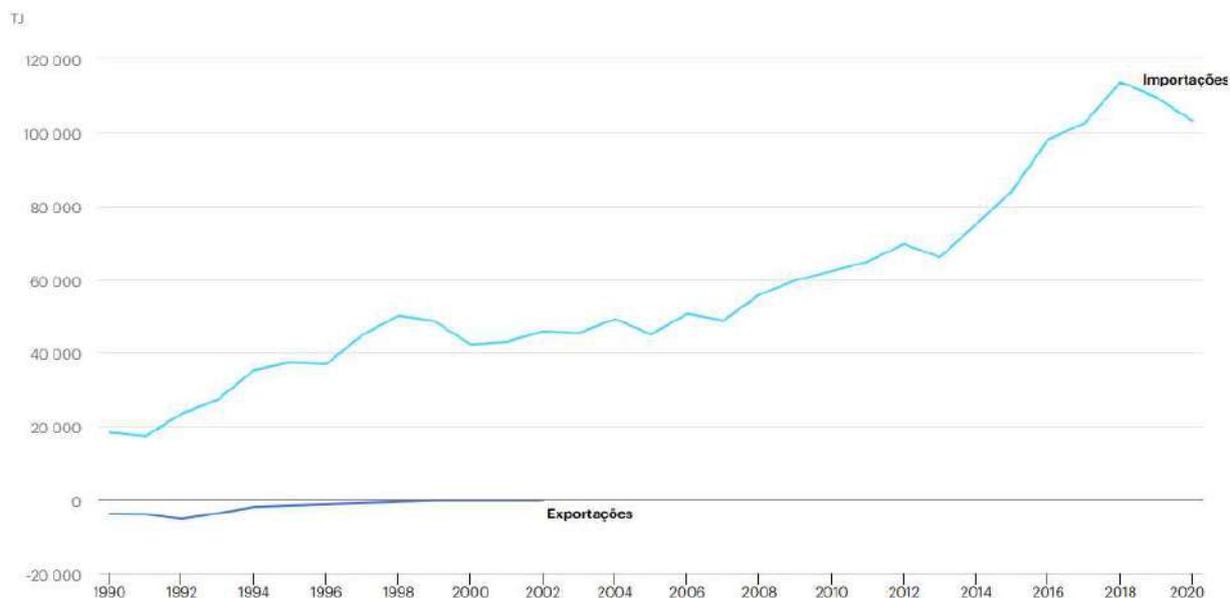
A Figura 24 apresenta as importações de petróleo da década de 70 até 2020, e a Figura 25 mostra como se deu a variação das importações e exportações de derivados de petróleo ao longo dos anos de 1990 até 2020:

Figura 24 - Importação dos derivados de petróleo no Paraguai entre 1970-2020



Fonte: Vice Ministério de Minas e Energia, 2021.

Figura 25 – Importações e exportações de derivados de petróleo no Paraguai entre 1990-2020 (TeraJoule)



Fonte: IEA, 2022.

2.3 BIODIESEL

A temática sobre os biocombustíveis foi fomentada após o acordo de Paris, em 2015, onde cerca de 195 países concordaram com a assinatura de um tratado que possui um único objetivo: a redução dos níveis de carbono na atmosfera e consequente redução do aquecimento global. O acordo internacional foi aprovado em 12 de dezembro de 2015 e entrou em vigor oficialmente no dia 4 de novembro de 2016. Ou seja, o uso intenso de combustíveis fósseis como matriz energética no mundo aumenta a liberação de dióxido de carbono e outros gases prejudiciais ao meio ambiente. Essa emissão contribui significativamente para o aumento da temperatura do planeta, então a meta do Acordo de Paris é manter o aumento da temperatura do planeta abaixo dos 2 °C.

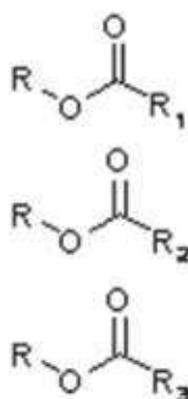
O Brasil faz parte do Acordo de Paris, o qual se comprometeu a reduzir em até 37% suas emissões de gases estufas até 2025 (comparados aos níveis emitidos em 2005), estendendo essa meta para 43% até 2030. A Argentina e o Paraguai também assinaram o compromisso mundial do Acordo de Paris em 22 de abril de 2016 (Mapfre Global Risks, 2023), dessa forma, os países vão precisar aumentar o uso de fontes alternativas de energia que substituam os combustíveis fósseis, participando de bioenergias sustentáveis e aderindo tecnologias mais limpas nas indústrias.

O biodiesel se trata de um biocombustível alternativo, biodegradável, isento de compostos sulfurados e aromáticos, constituído por ésteres alquílicos de ácidos carboxílicos de cadeia longa e derivado de fontes renováveis. Ele pode ser obtido a partir de óleos ou gorduras de origem vegetal ou animal, óleos residuais ou óleo de microalgas. Sua maior importância é sua característica renovável, por ser um combustível vindo de uma fonte de energia limpa, o que está associado a benefícios ambientais e a saúde humana. O biodiesel contribui para redução do nível de poluentes e agentes cancerígenos, pois a emissão de CO₂ é compensada no processo de fotossíntese das matérias-primas, que absorve o CO₂, além de emitir menos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e materiais particulados contendo enxofre, além de apresentar melhor biodegradabilidade.

O biodiesel pode ser utilizado como uma mistura com o diesel de petróleo em motores de ignição por compressão, como os motores de ciclo diesel. Dependendo da proporção da mistura, pode ser dispensada a necessidade de realizar modificações ou adaptações nos motores (Grossi, 2021).

Na Figura 26 abaixo é possível observar um exemplo da estrutura química do biodiesel:

Figura 26 - Exemplo de estrutura química do biodiesel



Fonte: Pinto, 2008.

Na Tabela 01 abaixo é possível observar as diferenças das propriedades físicas e químicas entre o diesel e o biodiesel.

Tabela 01 - Propriedades do diesel e biodiesel

PARÂMETRO	UNIDADE	DIESEL	BIODIESEL
Densidade	g/ml	0,820 – 0,860	0,860 – 0,894
Ponto de fulgor	°C	55	131
Viscosidade a 40°C	cSt	2,0 – 4,5	3,3 – 5,2
Poder calorífico	MJ/kg	44,75	41,28
Número de cetano	-	48	48 - 67
Acidez	mg KOH/g	-	0,16
Ponto de fluidez	°C	-36 a -30	-28 a 18
índice de iodo	g I ₂ /100g	0 - 38	60 – 128,7

Fonte: BiodieselBR.

Muitas propriedades físicas e químicas afetam o desempenho e a eficiência de um combustível para motores de compressão interna, e dentre elas, o número de cetano está entre as mais relevantes, uma vez que está relacionado a qualidade de queima do combustível. Nesse ponto o biodiesel, supera o diesel. Isso ocorre porque a composição química dos diferentes tipos de combustíveis afeta suas propriedades físico-químicas, incluindo seu número de cetano. O diesel fóssil contém hidrocarbonetos que tendem a ter um número de cetano mais baixo, enquanto que os ésteres de metila e etila presentes no biodiesel tendem a ter um número de cetano mais alto.

No Brasil, a Resolução ANP nº 45/2014 que está em vigor, diz que um biocombustível é composto por uma mistura de ésteres de ácidos graxos. Contudo, com o avanço tecnológico, foi visto a necessidade de adicionar outros combustíveis renováveis provenientes de biomassa, em motores de ciclo a diesel, que podem ser adicionados ao diesel fóssil para compor a mistura do diesel B. Há também a resolução ANP nº 798/2019 que altera a resolução ANP nº 45/2014, estabelecendo as especificações de qualidade de biodiesel, para determinar a obrigatoriedade da aditivação do biodiesel com antioxidante e estabelecer um novo limite de especificação da característica estabilidade à oxidação, alterando o parâmetro de 8 horas para 12 horas, a fim de atingir, no mínimo, 20 horas de estabilidade na mistura final com o óleo diesel (ANP, 2022).

2.3.1 Matérias-primas

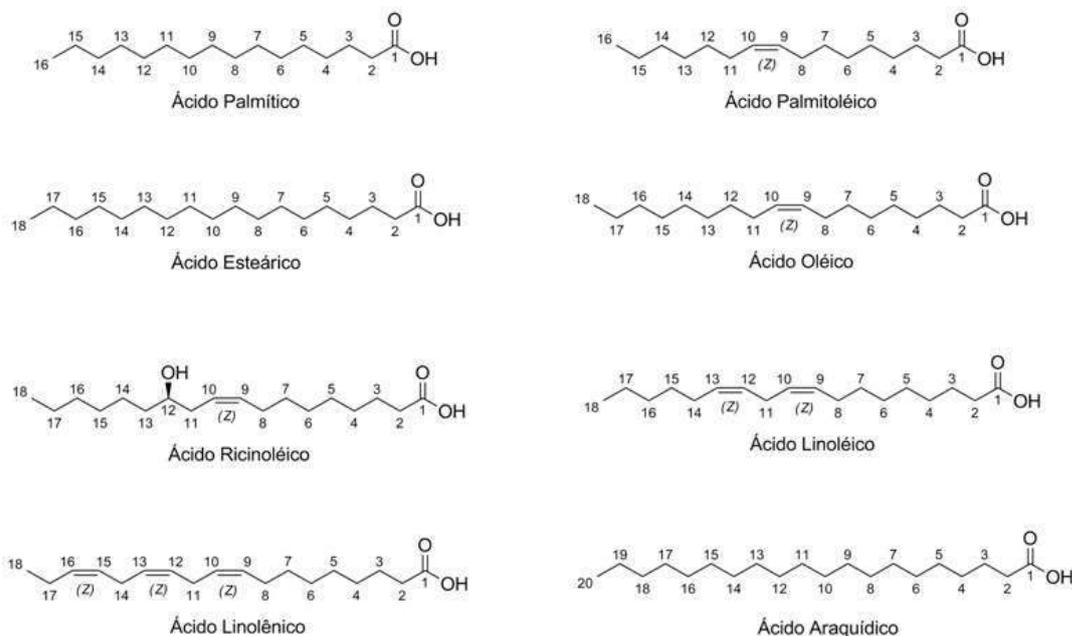
O biodiesel pode ser obtido a partir de uma variedade enorme de insumos, como óleos e gorduras de origem vegetal e animal, óleos residuais e óleo de microalgas. Óleos e gorduras apresentam em sua composição triglicerídeos, ésteres de glicerol e ácidos graxos.

Os óleos vegetais podem ser extraídos de matérias-primas oleaginosas como mamona, dendê, semente de girassol, caroço de algodão, grão de amendoim, pequi, macaúba e soja. Já entre as gorduras se destacam o sebo bovino, a banha de porco, a gordura de frango e outros.

Sabendo que os óleos e gorduras são os precursores de todo processo de obtenção de biodiesel, é importante entender sua composição e propriedades para compreender como ocorre a produção do biocombustível em questão. Os óleos e gorduras são substâncias hidrofóbicas, ou seja, insolúveis em água, pertencentes à classe química dos lipídeos, podendo ser de origem vegetal, animal ou microbiana. O Conselho Nacional de Normas e Padrões para Alimentos difere gorduras e óleos pela definição do ponto de fusão, onde as gorduras apresentam a temperatura de 20°C como limite inferior para o ponto de fusão e os óleos, apresentam esta mesma temperatura como limite superior. Os lipídeos constituem uma classe muito abundante na natureza, constituída por uma série de compostos químicos, sendo os mais importantes os ácidos graxos livres e seus derivados como os triacilgliceróis.

Ácidos graxos são compostos orgânicos, que se diferem pelo número de carbonos em suas cadeias, que são primariamente lineares, bem como pela presença ou não de ligações duplas entre carbonos. Os ácidos graxos que não apresentam ligações duplas, são conhecidos como saturados, e os que apresentam essas ligações são chamados de insaturados. Na Figura 27 abaixo estão exemplificados alguns dos mais importantes ácidos graxos ocorridos na natureza.

Figura 27 - Exemplos de ácidos graxos encontrados na natureza

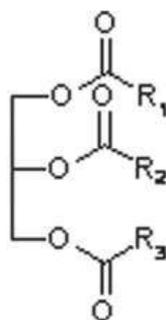


Fonte: Machado, 2015.

Na natureza, ácidos graxos podem ser encontrados na sua forma associada com grupos ou funções e na sua forma não associada. Na sua forma não associada, são os chamados ácidos graxos livres.

Os triacilgliceróis são uma forma associada de ácidos graxos, iguais ou diferentes entre si, uma das principais encontrada na natureza. Eles nada mais são do que ésteres de ácidos graxos formados pela condensação desses ácidos com o glicerol, podendo ser moni-, di- ou triacilgliceróis a depender número de moléculas que se associou covalentemente ao glicerol. Os triacilgliceróis estão representados na Figura 28 a seguir, e podem ser utilizados para síntese do biodiesel, uma vez que podem facilmente ser esterificados ou transesterificados.

Figura 28 – Estrutura química de um triglicerídeo



Fonte: Pinto, 2008

É importante ressaltar que qualquer espécie de planta e animal produz certa quantidade de óleos e gorduras (triacilgliceróis) ao longo de sua vida, mas poucas espécies conseguem produzir uma quantidade significativa de serem exploradas comercialmente. Além disso, para selecionar uma boa matéria-prima, não basta apenas ter uma quantidade relevante de óleos e gorduras, mas suas propriedades físico-química precisam estar adequadas à produção de biodiesel em larga escala.

O número e posições das insaturações na cadeia graxa, o tamanho da cadeia, e a sua estrutura tridimensional na molécula final, são algumas das características que alteram as propriedades dos óleos e gorduras e devem ser levadas em consideração na escolha da matéria-prima para produção de biodiesel. Um exemplo de como a estrutura da cadeia graxa altera as propriedades físico-químicas do composto é o ponto de fusão, pois quanto maior o número de ligações duplas, isto é, insaturações na molécula, maior é o ponto de fusão do triacilglicerol. Dessa forma, a maior parte dos triacilgliceróis saturados, como os que fazem parte do sebo bovino e o óleo de dendê, sejam sólidos à temperatura ambiente, enquanto dos insaturados e poli-insaturados, como os constituintes dos óleos de soja, milho e girassol, sejam líquidos a temperatura ambiente. Com isso, escolher uma matéria prima viável de ser transformada em biodiesel em larga escala, passa por uma série de fatores e variáveis.

De forma geral, é possível obter ésteres alquílicos de ácidos graxos a partir de qualquer matéria prima oleaginosa, porém, nem todas as matérias primas são capazes de garantir a qualidade final do biodiesel que atenda às especificações internacionais exigidas. Produzir um biodiesel que atenda as especificações é fundamental para sua aplicação em motores do ciclo diesel, pois o biodiesel precisa apresentar propriedades similares às do diesel fóssil, uma vez que é mais difícil adequar o motor ao biocombustível, sendo assim, o biocombustível deve se adequar às exigências estabelecidas pela especificação do motor. Por exemplo, um biodiesel que tenha baixa estabilidade à oxidação é indesejado, uma vez que torna o armazenamento do líquido mais complexo, além de comprometer seu uso direto em motores (B100). A partir do óleo de mamona por exemplo, é obtido ésteres com viscosidade superior àquelas estabelecidos pela grande maioria dos motores do ciclo diesel, necessitando do uso de aditivos para adequá-lo à venda.

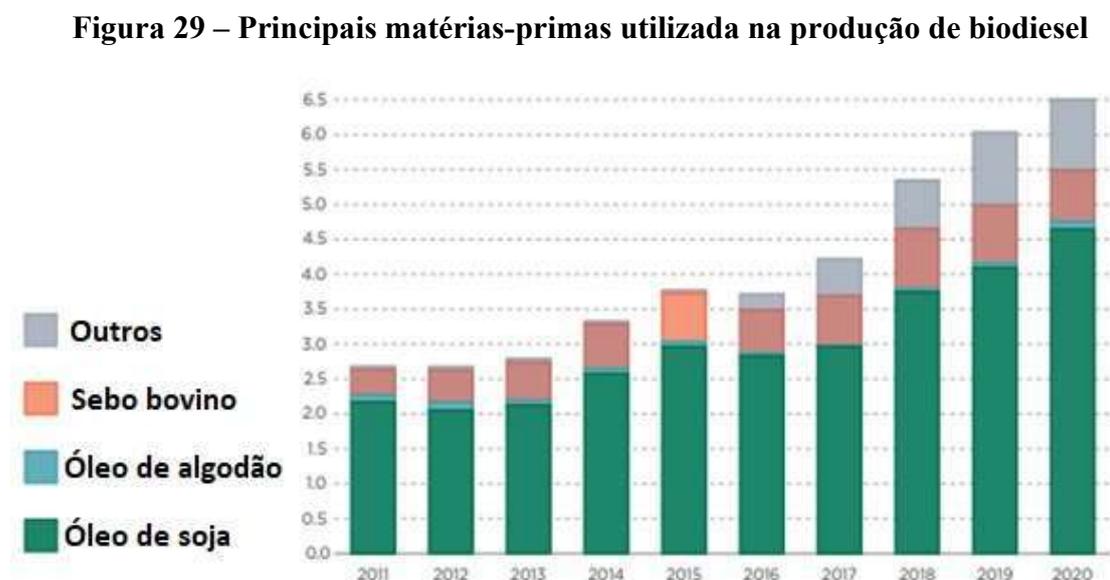
Portanto, a escolha de uma matéria-prima para produção do biocombustível em larga escala, depende de sua competitividade técnica, econômica e socioambiental, ou seja, deve-se considerar por exemplo, a produtividade por unidade de área cultivada; o teor de óleo extraído, a complexidade exigida no processo de extração; o equilíbrio agrônômico de um cultivo a longo prazo de determinada espécie; a sazonalidade e o ciclo de vida da planta ou animal; adaptação

territorial do cultivo; o impacto socioambiental e econômico do desenvolvimento da determinada cultura (Ramos, *et al.*, 2011).

É fundamental levar em consideração o aspecto econômico na escolha da matéria prima, pois seu custo de produção em escala industrial pode atingir valores economicamente inviáveis. Por exemplo, plantas que produzem o biodiesel em larga escala, os custos de conversão, envolvendo álcool, catalisadores e energia, podem chegar a 10% do custo total, já em unidades de pequeno e médio porte, esse custo varia entre 25 – 40% do valor do produto final. Atualmente o custo do processo de produção de biodiesel devido à matéria prima pode atingir 85% do custo final (Ramos., *et al.* 2011).

Em resumo, um dos principais quesitos na escolha de uma matéria-prima viável envolve a quantidade de óleo que pode ser extraída. Oleaginosas por exemplo conseguem armazenar maiores quantidades de óleo em suas estruturas, dessa forma, sua utilização minimiza os custos de produção, fornecendo maior produção do biocombustível por área plantada. Além de todos os fatores citados, outro ponto relevante a se considerar é a sazonalidade do cultivo, ou seja, se é possível cultivar certo plantio ao longo de todo o ano e o tempo entre as colheitas, bem como o uso de terras para uma produção viável de biodiesel.

Visto isso, dentre todas as possibilidades de matérias-primas utilizadas na produção do biodiesel, devem-se destacar: óleos de soja, algodão, milho, o sebo bovino, além dos óleos residuais. Embora novos insumos venham progressivamente ganhando espaço, o óleo de soja deve manter sua liderança até 2030 (ANP, 2021). A Figura 29 abaixo representa as principais matérias-primas empregadas na síntese de biodiesel:



Fonte: ANP, 2021.

O Brasil é o maior produtor mundial de soja e o maior *player* no mercado externo do grão (CNN, 2023). Em 1996 foi instituída a Lei Kandir que beneficia as exportações de produtos primários e produtos industrializados semielaborados, isentando a exportação desta matéria-prima “*in natura*” de pagamento de impostos (ICMS), favorecendo a exportação do grão, em detrimento da soja beneficiada na forma de farelo proteico e óleo.

- **Soja**

A soja consiste em uma planta originária da China, cujo nome científico é *Glycine max* L.; a qual faz parte da família Fabaceae (leguminosas), sendo um grão rico em proteínas.

O óleo de soja surgiu como um subproduto do processamento do farelo, cujo o grão de soja contém de 18% a 20% de conteúdo de óleo em relação ao seu peso. Ou seja, a cada 100 quilos de grãos de soja, é possível obter em torno de 18 a 20 quilos de óleo. Aproximadamente 99% dos triacilglicerídeos que compõe o óleo de soja são compostos pelos ácidos palmítico (10,2 %), esteárico (3,7 %), oléico (22,8 %), linoléico (53,7 %) e linolênico (8,6 %). Além dos triacilglicerídeos presentes no óleo vegetal bruto, ainda há pequenas quantidades de componentes não-glicerídicos, como os fitoesteróis, ceras, carotenoides, tocoferóis e fosfatídeos (Ramos, L. P. *et al*, 2011).

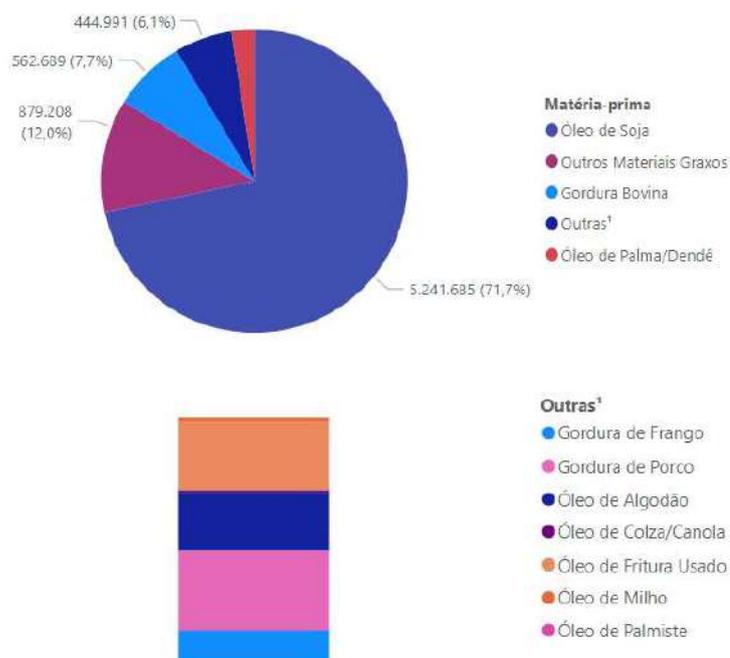
A soja tem uma gama de aplicações no setor industrial, principalmente no ramo alimentício, sendo usado como matéria-prima para a produção de leite de soja, carne de soja, tofu (queijo de soja), doces, óleo de soja, farinhas, rações para animais etc. Também está presente nos processos químicos de cosméticos, sabão e na produção de biodiesel.

De acordo com a Embrapa, o óleo de soja pode ser obtido por três métodos de extração: prensagem mecânica, solvente e enzimática. Na prensagem mecânica, o óleo é extraído por prensas contínuas que espremam o grão, separando-o da torta. Já na extração com solvente, os grãos são triturados para facilitar a penetração do solvente, e na extração enzimática, a matéria-prima é fermentada por enzimas para posteriormente ser extraído o óleo. O biodiesel é produzido a partir do óleo de soja pelas reações de transesterificação e de esterificação a depender da matéria-prima.

De acordo com os dados da ANP, cerca de 6,76 bilhões de litros de biodiesel foram produzidos no Brasil em 2021, e de todo esse biodiesel mais de 70% foi produzido a partir do óleo de soja, configurando-se a matéria-prima mais importante para síntese de biodiesel no Brasil (ANP, 2021), conforme pode ser visto pela Figura 30 abaixo. No ano de 2021, o óleo de soja foi a matéria-prima mais empregada para a produção de biodiesel (71,7%), seguido diretamente pelo sebo bovino, como segunda matéria-prima isolada, com 7,7% do total, e

insumos variados, destacando-se os materiais graxos (12,0%). Assim, dada a grandeza deste agronegócio no Brasil, a soja contribuiu para o desenvolvimento do PNPB.

Figura 30 - Participação de matérias-primas na produção de biodiesel em 2021 no Brasil



Fonte: ANP, 2021.

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE) a safra brasileira de soja em 2021 atingiu 138,9 milhões de toneladas, sendo este um recorde de produção, este valor representou um aumento de 8,6% em relação ao ano anterior (2020). Da mesma forma, as exportações também alcançaram um valor recorde de 86,1 milhões de toneladas.

De acordo com informações divulgadas pela ABIOVE, a capacidade de processamento de soja atingiu 64 milhões de toneladas por ano em 2020 e 2021, enquanto a produção de óleo de soja foi cerca 9,6 milhões de toneladas em 2020 e 2021. No entanto, a atual legislação favorece a exportação da soja em grão, resultando em ociosidade na indústria de processamento (EPE, 2022). A situação do complexo da soja nos anos de 2020 e 2021 é resumida na Tabela 02 apresentada abaixo:

Tabela 02 - Complexo de soja no Brasil

			$\Delta\%$
Milhões de toneladas	2020	2021	(2020- 2021)
Produção de Soja	1228,0	138,9	8,5%
Capacidade instalada de processamento de soja	64,0	64,0	0,0%
Exportação de soja em grão	83,0	86,1	3,8%
Soja processada	46,8	47,8	2,0%
Farelo de soja produzido	36,0	36,8	2,1%
Óleo de soja produzido	9,6	9,6	0,9%
Exportação de óleo de soja	1,1	1,7	48,8%
Consumo de óleo alimentício e outros	8,5	7,9	-4,1%
Consumo de óleo de soja para biodiesel	4,2	4,5	7,1%

Fonte: (Abiove, 2022) (ANP, 2022).

A soja não possui uma boa capacidade de armazenamento de óleo fazendo com que a produção de biodiesel por hectare plantado seja baixa quando comparada a outras culturas. Porém em território brasileiro, a oleaginosa é cultivada em larga escala fazendo com que o óleo de soja permaneça por um longo período como principal insumo para produção do biodiesel, pela sua abundância produzida no país, com destino à indústria alimentícia e exportações.

Na Argentina, a principal e quase exclusiva matéria-prima utilizada pelas usinas locais é o óleo de soja, onde a maior parte é adquirida pelas grandes empresas exportadoras que possuem esmagadoras próprias para exportar farelo e óleo quando não utilizado para biodiesel e as plantas de médio e pequeno porte compram óleo vegetal dos grandes trituradores e algumas utilizam óleo residual. A curto prazo não há expectativas de outra matéria-prima que possa ser utilizada para produção do biodiesel no país em quantidades significativas. A introdução da soja transgênica nesse país aconteceu em 1996, onde a associação entre a soja transgênica e a plantação direta, facilitaram o deslocamento da fronteira agrícola, avançando para zonas historicamente marginais desde o ponto de vista agropecuário.

A Argentina é o terceiro país com maior produção mundial de soja e o primeiro exportador mundial de farelo e óleo de soja, fazendo com que a disponibilidade de matéria-prima seja farta (Forbes, 2023). E a maior parte do consumo local de óleo de soja é destinado a síntese de biodiesel.

Em 2007 iniciou-se a capacidade de produção de biodiesel na Argentina, quando grandes esmagadores de grãos perceberam a possibilidade de agregar valor ao óleo vegetal e de exportar biodiesel para a União Europeia.

A maior parte do biodiesel produzido no Paraguai também é feito a partir de óleo vegetal, principalmente óleo de soja. Mas também são empregadas outras matérias-primas, como em 2013, onde foi utilizado óleo de coco devido à grande disponibilidade no mercado. Às vezes, pequenos volumes de óleo de canola, óleo de girassol e óleo de cozinha também são usados. A Figura 31 representa os grãos de soja:

Figura 31 – Sementes da planta de soja



Fonte: Depositphotos.com

Além das oleaginosas convencionais, outras matérias-primas não convencionais com grande potencial vem ganhando espaço nos estudos científicos dos últimos anos, com destaque para as microalgas.

- **Microalgas**

As microalgas são microrganismos unicelulares fotossintéticos, componentes do fitoplâncton (Li *et al.*, 2008) e tem surgido como fonte alternativa de lipídeos para produção de biodiesel. Elas estão presente em diversos ambientes aquáticos salino ou doce, ocorrendo cerca de 350.000 a 1.000.000 diferentes espécies de microalgas, das quais aproximadamente 30.000 foram identificadas e descritas segundo o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). São mais de 15.000 diferentes compostos originários desses microrganismos, como carotenoides, antioxidantes, ácidos graxos, enzimas, polímeros, peptídeos, toxinas e esteróis. Os organismos podem ser procariontes como as cianobactérias, ou eucariontes, como as algas

verdes, algas vermelhas e diatomáceas. As microalgas podem ser encontradas na natureza como células isoladas ou formando colônias.

Esses seres unicelulares apresentam várias vantagens nos quesitos fisiológicos e bioquímicos, sobre as culturas terrestres (Chisti, 2007), tornando-as uma fonte promissora de biomassa para a produção de biodiesel na atualidade (Borugadda e Goud, 2012). Uma vantagem a destacar é que as microalgas não exigem terras aráveis para seu cultivo, podendo ser cultivadas em quase todas as regiões do planeta exigindo menores extensões de terra. Além disso, elas podem ser produzidas durante todo ano, sem seguir o regime de safras e seu crescimento é acelerado pois seu processo de fotossíntese é eficiente em relação as culturas tradicionais, aumentando assim a produtividade.

Além disto, as microalgas possuem um tempo de vida curto, fazendo com que suas colheitas possam ser contínuas, diminuindo a logística de armazenagem, necessária para o caso de culturas anuais. Sua habilidade em consumir o CO₂ como insumo para a fotossíntese também pode contribuir para possível redução do aquecimento global (Ramos., *et al.*, 2011).

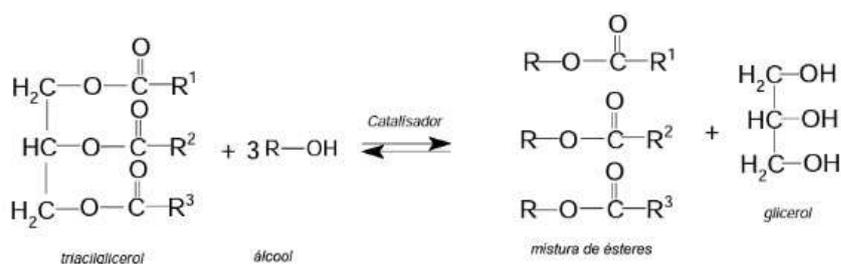
Contudo, as microalgas surgem como organismos favoráveis frente as culturas tradicionais, tornando-as uma matéria prima que surge como alternativa para o médio e longo prazo.

2.3.2 Principais rotas tecnológicas

2.3.2.1 Transesterificação ácida e básica

A reação de transesterificação consiste em três reações orgânicas reversíveis nas quais um éster é transformado em outro, através da troca dos grupos alcóxidos. Os triacilgliceróis, presentes em óleos e gorduras, reagem com um álcool de cadeia curta (metanol ou etanol) na presença de um catalisador produzindo uma mistura de ésteres monoalquílicos de ácidos graxos (biodiesel) e glicerol, conforme mostra a Figura 32 abaixo:

Figura 32 - Reação de transesterificação do triacilglicerol



Fonte: Santos, 2016.

Os catalisadores empregados na rota podem ser ácidos, básicos, enzimático ou heterogêneo. Além disso, é importante ser adicionado excesso de álcool para aumentar a conversão de produto, a partir do deslocamento de equilíbrio.

Na transesterificação por catálise básica, os alcóxidos metálicos são os catalisadores mais empregados, podendo ser adicionados diretamente ao meio de reação ou produzidos “*in-situ*”, mediante a dissolução de hidróxido de sódio ou de potássio no álcool utilizado como agente de transesterificação.

Conforme a figura 32, é visto que o glicerol ou glicerina é um subproduto da reação de transesterificação, a qual ainda apresenta uma certa quantidade de água, álcool e impurezas inerentes à matéria-prima. Ela pode ser purificada a fim de obter um valor de mercado mais favorável. Caso a reação tenha sido de caráter básico é possível recuperar a glicerina adicionando ácido, uma vez que o ácido é capaz de neutralizar o sabão transformando-o em ácidos graxos.

Ao final da reação de purificação da glicerina, é obtida duas fases, uma mais densa composta da glicerina com sais (oriundos da neutralização do catalisador) e outra mais leve que é a oleína (ácidos graxos recuperados), que são separadas por um decantador ou uma centrífuga. Após essa etapa a glicerina obtém um grau de pureza de aproximadamente 84%, chamada de glicerina loira, ainda com pouco valor comercial (Encarnação, 2008).

A glicerina também pode ser purificada por destilação à vácuo, que gera um produto mais puro, límpido e transparente, gerando uma glicerina de grau farmacêutico de concentração superior a 99%. Porém, poucas plantas de biodiesel no mundo realizam essa etapa (Encarnação, 2008).

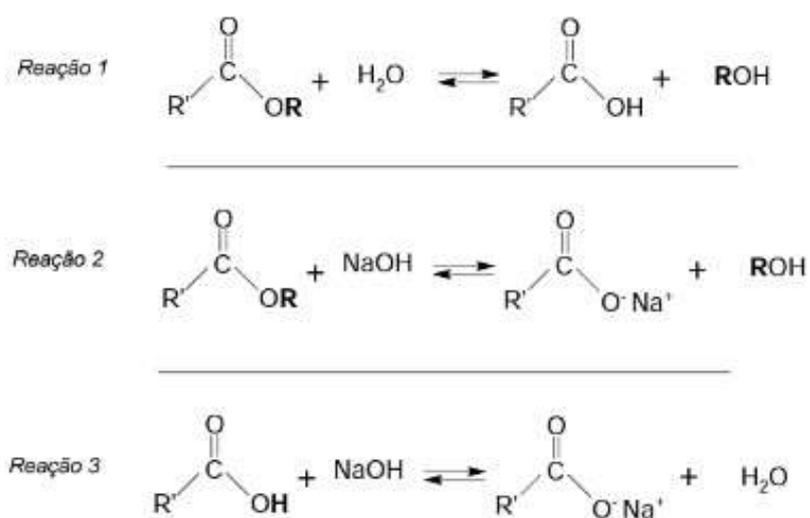
A glicerina possui diversas aplicações em vários tipos de indústrias devido as suas propriedades físico-químicas. Sua maior aplicação é em indústrias de medicamentos, produtos de higiene bucal e indústrias de cosméticos. Em indústrias de cosméticos a glicerina é aplicada como emoliente e umectante em cremes hidratantes, pastas de dente, desodorantes e maquiagens. Nas industriais farmacêuticas sua principal aplicação é em xaropes, pomadas, composições de cápsulas, antibióticos entre outros. No setor de alimentos também é utilizada como umectante na fabricação de balas, refrigerantes e doces (Dill, 2012).

Após o processo de decantação para separação da glicerina, o biodiesel ainda passa etapas de lavagem e secagem, com intuito de eliminar resíduos de catalisador, glicerol e álcool que ainda podem estar presentes no produto.

A transesterificação alcalina exige matérias-primas de alta qualidade, com baixo teor de acidez e baixo teor de umidade, porque quanto maior a acidez e o teor de umidade do óleo e do

catalisador menor é sua eficiência de conversão, devido a ocorrência de reações secundárias, como mostra a Figura 33 abaixo:

Figura 33 - Reações secundárias que podem ocorrer durante a transesterificação de óleos ou gorduras: (1) hidrólise, (2) saponificação e (3) neutralização de ácidos graxos livres



Fonte: Santos, 2016.

Os alcóxidos vendidos comercialmente, já livres de água, têm uma maior eficiência e reduzem a possibilidade de formações de sabões, ao contrário dos preparados *in situ*.

Industrialmente a transesterificação alcalina com metanol é mais utilizada, onde mais de 250 usinas de biodiesel no mundo aplicam essa rota, por ser um processo simples e econômico para sua produção. A desvantagem é que esse processo exige que seja removido o catalisador e a glicerina durante a etapa de purificação do biodiesel, demandando etapas adicionais de neutralização, lavagem e secagem na planta, aumentando o custo final dos produtos e gerando um passivo ambiental por causa dos efluentes produzidos (Lage *et al.*, 2019).

A respeito dos processos catalisados por ácido, estes requerem maior gasto energético, com emprego de maiores temperaturas, maior consumo de reagentes para que se alcancem rendimentos próximos ao processo utilizando catalisadores básicos. Além disto, com este processo estamos operando com produtos corrosivos, o que requer maiores cuidados com os

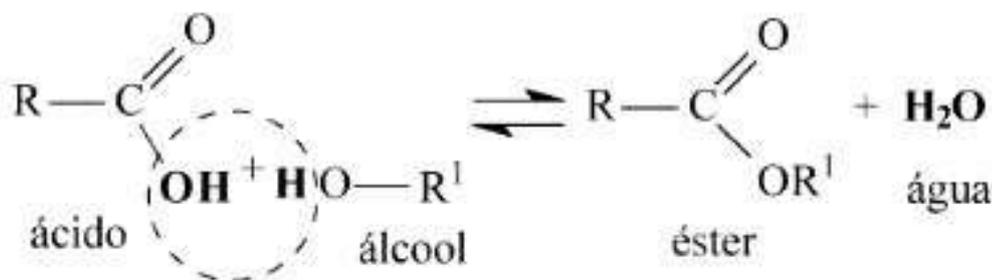
equipamentos e manuseio em fábrica. Os catalisadores mais comuns utilizados nesse processo são os ácidos de Bronsted-Lowry, como os ácidos sulfúrico e sulfônico.

2.3.2.2 Esterificação

É a reação entre ácido graxos livres e um álcool de cadeia curta, na presença de um catalisador ácido para formar ésteres. É uma reação amplamente utilizada no caso de a matéria-prima apresentar altos teores de ácidos graxos livres e baixa umidade. Também é uma alternativa de pré-tratamento da transesterificação por catálise alcalina, convertendo os ácidos graxos em ésteres monoalquílicos a fim de, evitar a saponificação.

A esterificação consiste na obtenção de ésteres a partir da reação entre um ácido graxo e um álcool (metanol ou etanol), com formação de água como subproduto. Difere da transesterificação, pois as matérias-primas utilizadas são ácidos graxos ao invés de triglicerídeos, o que a torna mais vantajosa devido à possibilidade do uso de matérias-primas de baixo valor agregado (tais como resíduos e borras ácidas) e a não formação de glicerol. A reação ocorre conforme mostrado na Figura 34. A grande desvantagem desse processo é a pouca disponibilidade destes resíduos ácidos para produção em larga escala (Encarnação, 2008).

Figura 34 - Reação de esterificação de ácidos graxos.



Fonte: todamateria.com

2.3.3 Cenário do biodiesel no Brasil

O Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) foi instituído em 2004, por meio da Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, que alterou a Lei do Petróleo (Lei 9.478/1997) introduzindo o biodiesel na matriz energética brasileira a partir de uma mistura voluntária de 2% (B2) de biodiesel no diesel comercial (diesel B) e em 2008, essa mistura tornou-se obrigatória.

A Lei 11.097 define o biodiesel como:

“biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil.”

No Brasil, houve um empenho para alcançar os objetivos definidos no tratado de Paris, e neste contexto destaca-se o desenvolvimento e a produção de biodiesel, fomentado por dois principais programas governamentais, o RenovaBio e o PNPB.

O PNPB é um programa do governo brasileiro cujo objetivo é promover a produção e o uso do biodiesel no país incentivando o desenvolvimento sustentável e à redução da dependência do petróleo.

O PNPB é gerenciado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), em parceria com outros ministérios e órgãos governamentais, além de contar com a participação da iniciativa privada e da sociedade civil. Entre as principais ações do programa, destacam-se a concessão de incentivos fiscais e financeiros para a produção de biodiesel, a criação de linhas de crédito para agricultores familiares e cooperativas, a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias para a produção de biocombustíveis e a fiscalização da qualidade do biodiesel produzido e comercializado no país

Um dos principais objetivos do PNPB é a produção de biodiesel de forma sustentável e econômica, com foco na inclusão produtiva e no desenvolvimento rural sustentável, gerando emprego e renda. Neste programa as empresas são incentivadas a realizar a aquisição de matéria prima de famílias sem muitos recursos e dessa forma são beneficiadas com isenções fiscais e adquirem o selo verde de combustível social. Dessa forma, um dos principais desafios do PNPB foi o de conseguir integrar a produção de biodiesel com a diminuição de desigualdades regionais e desenvolvimento socioeconômico dos agricultores familiares, assim, a solução para este impasse foi criado o Selo Combustível Social, que consiste em uma certificação emitida pelo governo para os produtores de biodiesel que atendem a critérios sociais de inclusão produtiva e desenvolvimento regional. A certificação é gerida pelo Ministério do Desenvolvimento Agrário, e atualmente o selo é de responsabilidade da Secretaria de Agricultura Familiar e Cooperativismo. Essa foi uma maneira que o governo encontrou para estimular que as empresas buscassem esta certificação, de modo a alcançar o objetivo da diminuição das desigualdades previsto pelo PNPB.

O produtor portador do selo se beneficiaria com acesso a incentivos fiscais, como isenção de alguns impostos e contribuições federais e benefícios financeiros, como acesso a

linhas de crédito especiais, com juros mais baixos e prazos mais longos, além de outras facilidades de financiamento.

As principais diretrizes do programa são: implantar um programa sustentável, promovendo a inclusão produtiva da agricultura familiar, garantir preços mínimos, qualidade e suprimento; e produzir o biodiesel a partir de diferentes matérias-primas, fortalecendo as potencialidades regionais (PNPB - Ministério da Agricultura e Pecuária, 2019).

Já o RenovaBio é uma política pública nacional de biocombustíveis, representada juridicamente pela Lei 13.576 de 2017 que favorece a transição energética, tendo como objetivo incentivar a produção e o uso de biocombustíveis no país, com base em critérios ambientais, econômicos e sociais. Os principais objetivos do RenovaBio são: contribuir para o atendimento aos compromissos do país no âmbito do Acordo de Paris, tendo como principal meta a redução em cerca de 10% no índice de carbono até 2028, promover adequada expansão da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética nacional e assegurar a previsibilidade para o mercado de combustíveis (MME, 2023). Para isso, as empresas que cumprem as metas são beneficiadas com crédito de descarbonização de biocombustíveis (CBIOS), que nada mais são do que créditos que podem ser negociados na bolsa de valores e estão relacionados com as emissões de carbono e as práticas de antipoluição (MME, 2023.)

Ou seja, os CBIOS são títulos negociáveis no mercado financeiro que representam a redução de uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂) ou de gases equivalentes, obtida pela produção e uso de biocombustíveis mais eficientes e sustentáveis, em comparação com os combustíveis fósseis. Cada produtor de biocombustíveis certificado pelo RenovaBio tem direito a emitir uma quantidade de CBIOS proporcional à redução de emissões obtida.

Os CBIOS podem ser negociados livremente no mercado, entre produtores de biocombustíveis e distribuidores de combustíveis fósseis, permitindo que os distribuidores cumpram suas metas de redução de emissões de gases de efeito estufa, estabelecidas pelo RenovaBio. Além disso, os CBIOS podem ser usados para compensar as emissões de outras atividades econômicas sujeitas a limites de emissões, como as indústrias poluidoras.

O mecanismo de CBIOS é importante para incentivar a produção e o uso de biocombustíveis mais sustentáveis e para reduzir as emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes, contribuindo para o cumprimento dos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris.

Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) de 2017, a qual:

“Busca incrementar a produção e a participação dos biocombustíveis na matriz de combustíveis do Brasil, colaborar com previsibilidade para a participação competitiva dos diferentes biocombustíveis no mercado nacional de combustíveis e cooperar para o atendimento aos compromissos do Brasil no âmbito do Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (ANP, 2021).”

Ou seja, o RenovaBio, além de buscar cumprir o Tratado de Paris, impulsiona a produção interna de biocombustíveis fazendo com que o Brasil diminua sua dependência com o exterior em busca da sustentabilidade.

2.3.3.1 Evolução do marco regulatório de biodiesel

Desde que o biodiesel passou a integrar a matriz energética brasileira como uso obrigatório através da Lei nº 11.097/2005, tem-se buscado gradativamente aumentar seu consumo junto ao diesel. A trajetória do marco regulatório do biodiesel teve início em 2004, com a criação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). O início da comercialização de biodiesel no diesel foi 2% de forma não obrigatória, passando a ser obrigatório em todo território nacional 3 anos após a publicação da lei nº 11.097. A lei também estipulava que deveria haver aumento no teor de biodiesel de forma gradativa, alcançando B5 em janeiro de 2013. Contudo, devido à grande capacidade de produção instalada no país, a data para alcance do B5 foi antecipada para janeiro de 2010.

Com o rápido crescimento no mercado nacional a adição de biodiesel ao diesel chegou a 7% (B7) em 2016, representando todo o consumo de combustíveis líquidos para os motores do ciclo diesel. Em 2019 o percentual mínimo de adição obrigatória de biodiesel era 11%, e em 2020, 12%, em 2021, 13%, em 2022, 14%, e a perspectiva é atingir 15% (B15) até o final de 2023, conforme prevê a Resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) nº 16, de 2018. Ou seja, a Lei nº 13.263 de 23 de março 2016 autorizou o CNPE a aumentar o percentual de biodiesel na mistura até o patamar de 15%, desde que obedecidas as condicionantes de aprovação de testes nos motores para esse teor. Nesse contexto, a Resolução CNPE nº 16/2018 propôs um cronograma de aumento do percentual de biodiesel na mistura com o diesel de 1% ao ano, atingindo 15%, em 2023 (CNPE, 2018b).

Contudo, esses dados citados não contavam com o surgimento da pandemia de COVID-19, o que fez com que a ANP tomasse medidas de reduções pontuais nos teores do mandato vigente devido aos preços associados às matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel. Então em 2020 o cronograma não foi seguido, o teor obrigatório foi reduzido de 12% para 10% de 01 de setembro e 31 de outubro e posteriormente elevado para 11% a partir de novembro.

Em janeiro de 2021, o teor de biodiesel na mistura era de 12%, e foi elevado para 13% em março, conforme Resolução CNPE nº16/2018 vigorando até o mês de abril. De maio a agosto o percentual de biodiesel foi estabelecido em 10%, através das Resoluções CNPE nº 4 e nº 10 de 2021 voltando a ser 12% nos meses de setembro e outubro, quando então em novembro e dezembro foi estabelecido em 10%, valor estabelecido para vigorar em 2022 segundo a Resolução CNPE nº 25, de 22 de novembro de 2021 (EPE, 2022).

Em 2022 o presidente Jair Bolsonaro a fim de proteger os interesses do consumidor quanto a qualidade, preço e oferta aprovou o teor de mistura obrigatória do biodiesel no óleo diesel em 10%. Ou seja, pelo cronograma da Resolução 16/2018 (CNPE), o mandato atual deveria estar em 14%, e atingir 15% em 2023.

A evolução do marco legal de adição obrigatória de biodiesel ao diesel fóssil está representada na Figura 35 abaixo:

Figura 35 – Evolução do marco legal do biodiesel



Fonte: EPE, 2020.

Dessa forma, a estimativa é de que o percentual de biodiesel adicionado ao diesel no Brasil chegue a 15% até 2026. Atualmente o teor está em 12%.

Com a qualidade de biodiesel que se tem hoje e com a tecnologia dos motores diesel atuais, o avanço gradual do teor de biodiesel no diesel só permitirá atingir o B20. Esse limite é definido levando em consideração a compatibilidade do biodiesel com a qualidade dos motores e os requisitos de desempenho do combustível.

2.3.3.2 Produção e consumo

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (Abiove), o Brasil é o segundo maior produtor e consumidor de biodiesel do mundo, estando atrás apenas dos Estados Unidos. No ano de 2020, mesmo com um cenário pandêmico, foram consumidos 6.400 milhões de litros de biodiesel no Brasil, 10% a mais que no ano de 2019, da mesma forma, sua produção teve um aumento de 9% comparado a 2019.

De acordo com informações da *Statistical Review of World Energy (BP, 2021)*, o consumo de biodiesel teve um aumento de 132 % entre 2010 e 2020, alcançando 682 mil barris de petróleo equivalente/dia (BEP/dia). Nesse mesmo tempo, o biodiesel teve um aumento no consumo mundial de biocombustíveis, passando de 26% para 41%. Na Tabela 03 abaixo é possível verificar o consumo mundial de biodiesel:

Tabela 03 - Consumo mundial de Biodiesel (milhares de BEP/dia)

Países	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Estados Unidos	15	49	50	80	79	83	116	111	106	101	104
Brasil	35	38	40	43	50	58	56	63	79	87	95
Europa	187	200	221	201	217	219	224	267	274	281	
Ásia-Pacífico	34	40	54	75	97	66	97	93	126	169	170
Outros	23	31	37	37	39	38	37	45	44	47	32
Total	294	358	402	436	482	464	530	556	622	678	682

Fonte: BNDES, 2021.

De acordo com os dados da ANP até dezembro de 2020, o Brasil possuía capacidade instalada para produção de biodiesel de 10,4 bilhões de litros por ano, dividida entre as 49 usinas produtoras autorizadas. Neste mesmo ano a produção brasileira alcançou aproximadamente 6,45 bilhões de litros, isto é, 62% da capacidade instalada, demonstrando o grande potencial de crescimento no segmento. A Figura 36 abaixo mostra a capacidade nominal no Brasil, bem como o consumo do biodiesel no país, distinguindo a produção entre as empresas que possuem e as que não possuem o Selo Biocombustível Social.

Figura 36 - Capacidade Nominal Autorizada e Consumo de Biodiesel em 2021



Fonte: EPE, 2022.

De acordo com dados do Balanço energético Nacional em 2021, o Brasil teve a maior produção de biodiesel desde 2005, ou seja, foram produzidos cerca de 7 milhões de metros cúbicos, representando um aumento de dez mil vezes em relação a 2005, ano em que iniciou o PNPB (EPE, 2022). A Tabela 04 abaixo mostra a produção de biodiesel entre os anos 2012 e 2021.

Tabela 04 - Produção de Biodiesel entre 2012-2021 (10^3m^3)

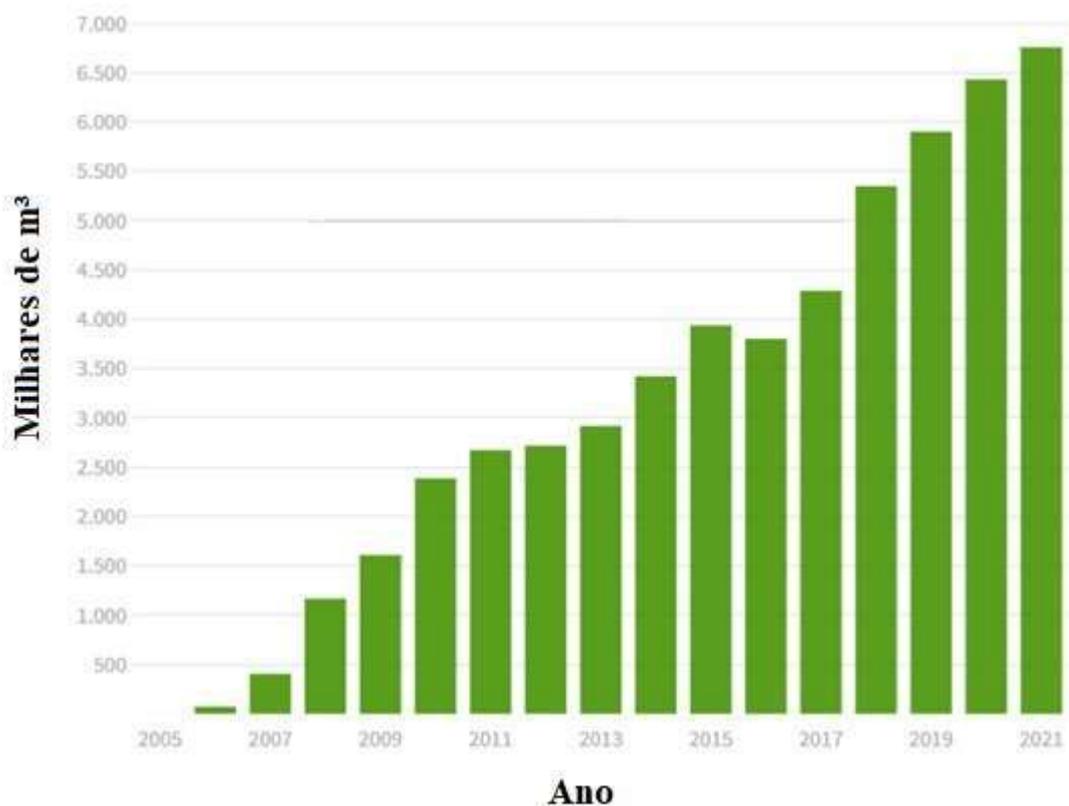
Ano	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Produção	2.717	2.917	3.420	3.937	3.801	4.291	5.350	5.924	6.432	6.766

Fonte: EPE (2021b).

É importante ressaltar, que as informações contidas na tabela 3 já considera os cortes ocorridos na segunda metade de 2021 de B13 para B10, ou seja, caso o B13 tivesse sido mantido de março em diante como esperado, o mercado teria movimentado 1,04 milhão de m^3 a mais fazendo com que a demanda chegasse a 7,85 milhões de m^3 no ano.

Na Figura 37 abaixo é possível verificar a evolução da quantidade de biodiesel produzido no Brasil desde o início do PNPB:

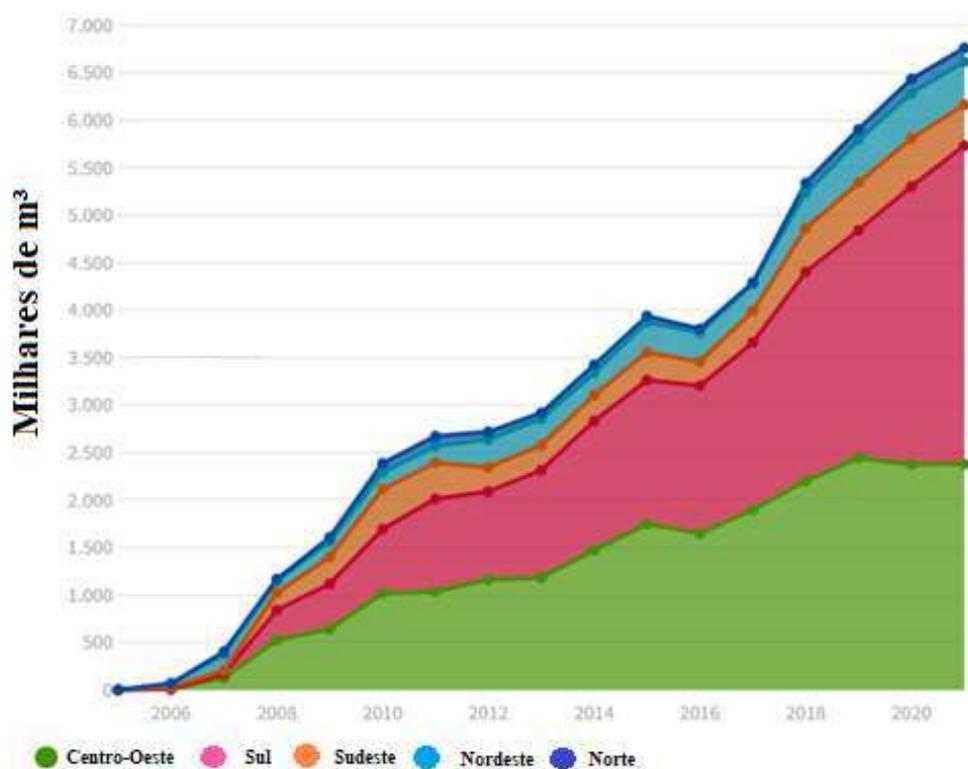
Figura 37 - Evolução da quantidade de biodiesel fabricado pela indústria brasileira desde o início do PNPB



Fonte: BiodieselBR, 2022.

De acordo com a ANP, a região sul é responsável por 42,6% da produção total, enquanto a região centro-oeste contribui com 39,8% da produção total de biodiesel (Aprix, 2021). No ano de 2021, o crescimento total na produção foi impulsionado pelo aumento da atividade dos fabricantes da Região Sul. No entanto, dois anos antes, o Centro-Oeste era a região com a maior produção. Pode-se observar na Figura 38 a seguir a distribuição da produção anual de biodiesel por região do país e na Tabela 05 a produção em volume por região:

Figura 38 - Distribuição da produção anual de biodiesel por região brasileira



Fonte: BiodieselBR, 2022.

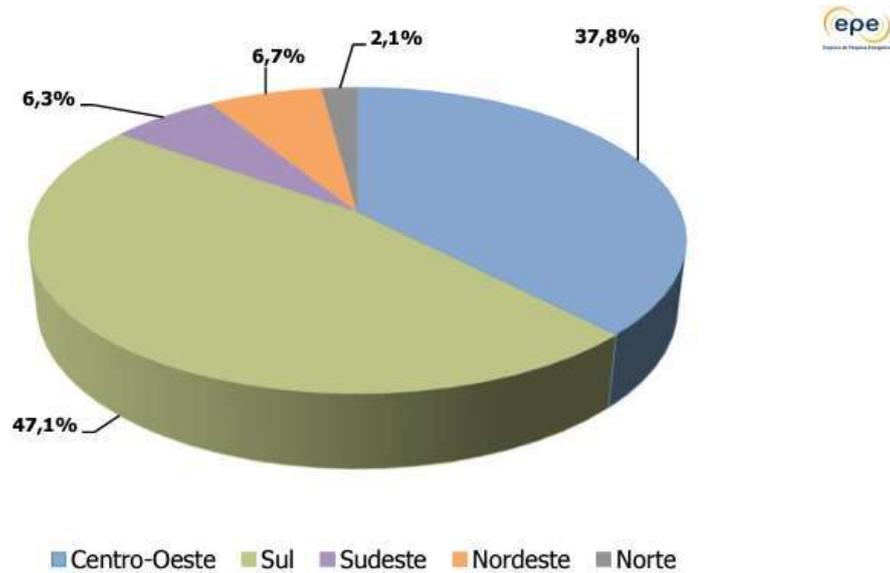
Tabela 05 - Produção de Biodiesel por região

Região	2019	2020	2021
Centro-Oeste	2,4 milhões m ³	2,4 milhões m ³	2,4 milhões m ³
Nordeste	454,3 mil m ³	478,2 mil m ³	452,8 mil m ³
Norte	108,3 mil m ³	148,6 mil m ³	144,4 mil m ³
Sudeste	499,9 mil m ³	506,1 mil m ³	429,9 mil m ³
Sul	2,4 milhões m ³	2,9 milhões m ³	3,4 milhões m ³

Fonte: BiodieselBR, 2022.

A Figura 39 abaixo representa a produção percentual na produção de biodiesel por região do Brasil no ano de 2021:

Figura 39 - Produção de Biodiesel por região em 2021



Fonte: EPE, 2022.

A região com menor volume produzido em 2021 foi a Norte, tendo sido processados somente 144 mil m³, enquanto que as regiões Nordeste e Sudeste produziram 453 mil e 430 mil m³ de biodiesel, respectivamente.

É importante ressaltar que o Brasil é um país com vasta extensão territorial, com boa incidência de luz solar durante todo o ano e possui cultivo de diversas matérias-primas. Essas características destacam mundialmente o país no que se refere à produção de biodiesel. Entretanto, mesmo com todas essas vantagens, é importante que o Brasil continue avançando e desenvolvendo mais os seus recursos tecnológicos para o cultivo e a produção do combustível em questão, para que mantenha sua indústria sempre em constante crescimento.

A Tabela 06 a seguir apresenta a produção anual de biodiesel pela indústria brasileira desde o início do PNPB em 2005 até 2021:

Tabela 06 - Produção de biodiesel fabricado pela indústria brasileira desde o início do PNPB.

Ano	Produção de Biodiesel (m³)
2005	736
2006	69.002
2007	404.329
2008	1.167.128
2009	1.608.448
2010	2.386.399
2011	2.672.760
2012	2.717.483
2013	2.917.488
2014	3.422.210
2015	3.937.269
2016	3.801.339
2017	4.289.840
2018	5.336.529
2019	5.902.461
2020	6.432.008
2021	6.758.382

Fonte: BiodieselBr, 2022.

As regiões Sul e Centro-Oeste sempre obtiveram maior abundância devido à grande disponibilidade das matérias primas, soja e sebo, em seus estados. Os estados do Rio Grande do Sul, com 27,4% do total nacional e Mato Grosso, com 19,5% segundos dados da ANP de 2021, lideram o país. Embora o maior volume de vendas e de consumo seja na região Sudeste, a região Sul representa quase 50% da produção total de biodiesel no país, seguida pela Centro-Oeste com cerca de 37%.

Esses valores refletem o crescimento contínuo da produção de biodiesel no Brasil ao longo dos anos, demonstrando a importância e o sucesso do PNPB na promoção do uso de fontes renováveis de energia.

Figura 41 - Demanda de biodiesel com base nos percentuais da mistura BX



Fonte: Plano decenal de expansão de energia – PDE 2030. Ministério de Minas e Energia.

Já em relação a capacidade de processamento de biodiesel, com base na capacidade nominal instalada em julho de 2020, projeção do consumo obrigatório e os balanços regionais e nacional para 2030 estão representados na Tabela 07. De acordo com a capacidade nominal instalada registrada em 2020, é possível atender a demanda projetada até o ano de 2025 (figura 41). Levando em conta as atuais solicitações de ampliação e construção das unidades produtoras registradas na ANP (ANP, 2020), cujos investimentos estimados são da ordem de 1 bilhão de reais, haverá uma sobre capacidade de 1,1 bilhão de litros, o que representará uma ociosidade de 9% em 2030. Considerando um fator de utilização de 92%, devido a paradas programadas e possível eventos adversos, a capacidade efetiva de produção de biodiesel seria de 11,5 bilhões de litros, equivalente à demanda estimada para o ano (EPE, 2021).

Entretanto, o setor, desde o início do PNPB, vem respondendo de forma satisfatória a previsibilidade dada, dessa forma, espera-se que naturalmente novos investimentos sejam realizados nos próximos anos para atendimento da mistura esperada.

Tabela 07 - Capacidade de processamento de biodiesel e consumo obrigatório em 2020 e 2030

Região	2020			2030		
	Capacidade Nominal instalada	Consumo Obrigatório	Balanço	Capacidade Nominal instalada	Consumo obrigatório	Balanço
Milhões de litros						
Norte	350	777	- 427	566	1.543	- 977
Nordeste	700	922	- 222	1.168	1.769	- 601
Sul	3.895	1.308	2.587	4.458	2.363	2.095
Sudeste	865	2.397	- 1.532	1.045	3.912	- 2.867
Centro Oeste	3.983	1.039	2.944	5.300	1.891	3.409
Brasil	9.793	6.443	3.350	12.537	11.478	1.059

Fonte: Plano decenal de expansão de energia – PDE 2030. Ministério de Minas e Energia.

Analisando a relação entre produção e consumo de biodiesel regional e as previsões de novas instalações indicadas pela ANP, é visto que as regiões Norte, Nordeste e Sudeste não foram autossuficientes em 2020, condição esta que perpetuará até 2030.

Com isso, estima-se que as regiões Sul e Centro-Oeste devam manter sua liderança na produção de biodiesel, mesmo que a demanda esteja concentrada na Região Sudeste. Com estímulo à produção de novas culturas, adaptadas às condições edafoclimáticas das Regiões Norte e Nordeste, estas também podem apresentar potencial de crescimento na produção de do biocombustível em questão.

Não há impactos sobre a segurança do abastecimento nacional, uma vez que o balanço nacional é satisfatório e os excedentes regionais podem ser deslocados para suprir as regiões com escassez.

2.3.3.3 Comercialização do biodiesel

No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo (ANP) que regulamenta as atividades de produção de biodiesel pelas usinas, auxiliada pela Resolução ANP n° 30/2013, que constitui três etapas para o processo de autorização, associadas com o processo de produção: autorização para construção, modificação ou ampliação de capacidade; autorização para operação; e autorização para comercialização.

De outubro de 2007 até janeiro de 2022, a principal plataforma de comercialização do biodiesel era o leilão público promovido pela ANP, onde a Resolução CNPE nº 5 determinava que todo o biodiesel necessário para atendimento ao percentual mínimo obrigatório deverá ser contratado mediante aos leilões. Os Leilões também buscavam dar suporte econômico a cadeia produtiva do biodiesel favorecendo o atendimento do conjunto de orientações do PNPB principalmente no que tange a inclusão social e redução das desigualdades sociais.

Os leilões de biodiesel foram mecanismos utilizados pelo governo para promover o uso desse biocombustível, estimular a produção nacional e garantir o abastecimento do mercado. No Brasil, por exemplo, o leilão de biodiesel foi uma das principais formas de comercialização do biocombustível, coordenado pela ANP e pela EPE.

O funcionamento dos leilões de biodiesel no Brasil seguiu um processo estruturado, onde primeiramente, era realizado o cadastramento das usinas produtoras de biodiesel, que devem atender aos requisitos técnicos e legais estabelecidos pelo governo e as usinas habilitadas participavam dos leilões realizados periodicamente.

Durante o leilão, as usinas produtoras ofereciam lotes de biodiesel contendo determinada quantidade do biocombustível que eram ofertados a um preço de referência estabelecido pelo governo. As usinas competiam entre si, fazendo lances para fornecer o biodiesel ao mercado.

O critério de seleção era baseado na combinação do menor preço ofertado e da capacidade de entrega do biodiesel. Ou seja, as usinas que oferecessem o menor preço e podiam fornecer a quantidade demandada com maior chance de serem selecionadas.

Após o término do leilão, as usinas vencedoras eram responsáveis por produzir e entregar o biodiesel de acordo com as condições estabelecidas no edital do leilão. O volume de biodiesel adquirido é destinado às distribuidoras de combustíveis, que são obrigadas a adquirir uma quantidade mínima de biodiesel para atender às metas de adição estipuladas pelo governo.

É de responsabilidade da ANP regular e fiscalizar a contratação do biodiesel entre os fornecedores e os adquirentes, bem como sua comercialização de acordo com as diretrizes estabelecidas pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e pelo Ministério de Minas e Energia (MME).

A ANP apenas em 2020 realizou 6 leilões para compra de biodiesel pelas distribuidoras de combustível, totalizando 76 desde o início do programa, e os produtores que possuísem o Selo Biocombustível Social, participavam do primeiro pregão dos leilões, o qual a ANP comprava o litro de biodiesel mais caro comparado aos outros pregões, assim, as detentoras do

selo eram beneficiadas com acesso a melhores condições de financiamento junto às instituições financeiras.

Os leilões foram organizados pela ANP de 2005 até 2021 para comercialização do biodiesel, e em 28 de outubro, a ANP aprovou a Resolução ANP N° 857, de 28 de outubro de 2021 que altera o modelo de comercialização do biodiesel no Brasil substituindo o sistema de leilões que existiu há 15 anos, com a intermediação da Petrobras, cuja proposta é que o biodiesel seja contratado diretamente pelas distribuidoras com meta compulsória individual, permitindo que produtores e distribuidoras negociem livremente as condições comerciais, preços, serviços, penalidades, prazos e créditos.

A resolução dispõe que os produtores de biodiesel estão aptos a comercializar o biocombustível com os distribuidores de combustíveis líquidos pelo regime de contrato de fornecimento de biodiesel ou por meio de transações por mercado à vista (*spot market*). Adicionalmente, os distribuidores de combustíveis deverão comprovar mensalmente, através do Sistema de Movimentação de Produtos, aquisição de biodiesel oriunda de produtor detentor do Selo Biocombustível Social em parcela mínima de oitenta por cento, ou outro percentual definido em Portaria Conjunta dos Ministérios de Minas e Energia e da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, conforme o disposto no art. 2º da Resolução CNPE n° 14, de 9 de dezembro de 2020.

A meta do novo modelo de comercialização estabelece como obrigação que os agentes econômicos apresentem à ANP que tem contratado, a cada bimestre, pelo menos 80% do volume necessário para mistura obrigatória. Dessa forma, o CNPE determinou que até 80% do volume de biodiesel comercializado seja oriundo de estabelecimentos com o Selo Biocombustível Social, concedido a produtores que promovem inclusão produtiva da agricultura familiar, adquirindo matéria-prima e fornecendo assistência técnica, entre outros pontos (Epbr, 2022). Ou seja, de acordo com a ANP só seriam válidos, para comprovação de atendimento à meta pelos distribuidores, os contratos acordados com estabelecimentos que tenham o selo biocombustível. O CNPE espera que o modelo propicie maior liberdade para os agentes e menor intervenção estatal ao mercado de combustíveis.

2.3.3.4 Projeções futuras

A partir dos dados de produção por região observados na Figura 39, a produção de biodiesel se concentrou nas regiões Sul e Centro-Oeste, devido à grande quantidade de agricultores familiares capacitados no Sul do país, organizados em cooperativas, o que facilita a expansão da cultura de soja. O desenvolvimento da cultura de soja aumentou muito a oferta

dessa matéria-prima, fazendo com que a produção de biodiesel seja muito dependente dela, sendo um grande desafio para o setor, uma vez que a falta da matéria prima gera um grande risco de abastecimento de biodiesel. Dessa forma, a expectativa futura é buscar alternativas econômicas para diversificar a matéria prima na produção de biodiesel para minimizar o grau de incerteza na produção, além de contribuir para descentralização nas regiões Sul e Centro-Oeste.

De uma forma geral, as projeções futuras para o biodiesel no Brasil apontam para um aumento gradual na produção e consumo do biocombustível, impulsionado por fatores como políticas governamentais, demanda crescente por fontes de energia mais sustentáveis e busca por redução das emissões de gases de efeito estufa. Algumas das projeções e tendências estão associadas ao aumento das metas de adição de biodiesel a partir do PNPB que têm sido gradualmente aumentadas ao longo dos anos. Como mencionado anteriormente, para 2023 a projeção era que a porcentagem de biodiesel chegasse a 15% (B15), porém a Resolução aprovada pelo CNPE estabeleceu que a partir de abril de 2023 o teor de mistura obrigatória de biodiesel será de 12% prevendo um aumento progressivo desse percentual, alcançando 15% até o ano de 2026 (Agência Brasil, 2023).

Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (PDE 2031), o mercado nacional deve crescer perto de 73% ao longo da década entre 2021 e 2031. A expectativa é que, no final do período, o mercado nacional absorva aproximadamente 11,6 milhões de m³ de biodiesel. Devido às necessidades de biocombustíveis indicadas no PDE 2030 evidencia-se um aumento da demanda de biodiesel para o período decenal, dessa forma, o diesel verde também chega como uma alternativa de combustível renovável para motores de ciclo diesel (CNPE, 2021).

Além disso, o Brasil possui uma sólida indústria de produção de biodiesel, com uma ampla base de matérias-primas disponíveis, como soja, girassol, algodão, entre outras. Espera-se que a produção de biodiesel continue a crescer, com a expansão da capacidade instalada das usinas produtoras e investimentos em novas plantas.

Espera-se também que haja avanços tecnológicos no processo de produção de biodiesel, incluindo o desenvolvimento de novas rotas de produção, aprimoramento de catalisadores, otimização de processos e uso de tecnologias mais eficientes. Essas inovações podem contribuir para aumentar a eficiência energética, reduzir custos e ampliar as possibilidades de aproveitamento de diferentes matérias-primas.

Por fim, sabe-se que a tendência mundial é a busca por biocombustíveis produzidos de forma sustentável, levando em consideração aspectos ambientais, sociais e econômicos. Com

isso, certificações, como o Selo Combustível Social, podem se tornar cada vez mais relevantes, garantindo a rastreabilidade e a sustentabilidade da cadeia produtiva do biodiesel.

Contudo, vale destacar que as expectativas futuras podem ser influenciadas por fatores como políticas governamentais, avanços tecnológicos, volatilidade dos preços das matérias-primas, demanda de mercado e mudanças nas regulamentações ambientais. Portanto, essas projeções estão sujeitas a alterações ao longo do tempo, conforme novas informações e tendências sejam observadas.

2.3.4 Cenário do biodiesel na Argentina

Segundo o site da Mapfre Global Risks, 87% da matriz energética da Argentina vem de combustíveis fósseis e o restante está distribuído entre energia nuclear, hidrelétrica, eólica, solar e de biomassa.

A lei Argentina que regula a produção, comercialização e o uso sustentável de biocombustíveis em seu mercado interno é a Lei 26.093 de 2006, que define biocombustíveis como:

“bioetanol, biodiesel e biogás, produzidos a partir de matérias-primas de origem agrícola, agroindustrial ou de resíduos orgânicos, que cumpram os requisitos de qualidade estabelecidos pelo órgão de fiscalização”.

Esta mesma lei introduziu o biodiesel na matriz energética argentina aplicando a obrigatoriedade do uso de 5% de biodiesel ao diesel de petróleo a partir de janeiro de 2010. A lei surgiu como uma medida para incentivar a produção de biocombustíveis exigindo um consumo interno mínimo, além dos incentivos fiscais. Ainda em 2010 o percentual mandatório foi elevado para 7%, chegando a 9% em janeiro 2013 com expectativa de atingir 10% em fevereiro de 2014, mas de acordo com a USDA (2016a), essas metas não chegaram a ser cumpridas, sendo 8,4% o teor médio efetivo de adição de biodiesel em 2015. Em abril de 2016, a Resolução nº 37 elevou a mistura mínima 10% de biodiesel.

A lei anterior de Biocombustíveis 26.093/2006, que expirou a pouco tempo requeria um teor de mistura de 10% de biodiesel em janeiro de 2021, contudo, a Secretaria de Energia, estabeleceu que as taxas de mistura para biodiesel para os próximos meses deveriam ser: 5% em janeiro, 6,7% em fevereiro, 8,4% em março, voltando a 10% em abril com a justificativa de minimizar na bomba o maior preço do diesel.

A economia na Argentina tem enfrentado muitos desafios devido à alta inflação, déficit fiscal crescente e um lento crescimento que tem afetado o valor de sua moeda, dificultando melhoras no padrão de vida da sociedade. Além disso as diferentes visões políticas dos governantes dificultam ainda mais a resolução dos problemas que a nação vem enfrentando. A inflação argentina alcançou 108,8 % na comparação anual em abril de 2023, permanecendo no nível mais alto desde 1991 e depois de subir 104,3 % em março (tradingeconomics, 2023).

Além da crise que o país vem enfrentando, muitas mudanças ocorreram nos mercados mundiais de combustíveis de transporte como consequência do desequilíbrio global de oferta e demanda no cenário “pós-pandemia” e atual guerra da Ucrânia. Para contornar isso, o país aprovou leis e regulamentos de biocombustíveis buscando flexibilizar mais a mistura de biodiesel ao diesel.

A nova lei de Biocombustíveis 27.640, foi aprovada em meados de 2021, reduzindo a mistura do biodiesel ao diesel de 10% para 5% devido aos altos custos da safra, e esse percentual pode ser reduzido para 3% a depender dos preços da matéria-prima. Esse novo marco regulatório não intensifica a produção de biodiesel para atender o mercado nacional, conforme vinha acontecendo desde o início do desenvolvimento da indústria de biodiesel no país. Mas, continuarão as exportações para alguns países da União Europeia, assegurados pelo acordo assinado em 2019.

O conflito entre Rússia e Ucrânia, resultou em um aumento no preço das matérias-primas fósseis e seus derivados no mercado internacional, com isso, espera-se que Argentina gaste 13.500 milhões de dólares por conceito de importação de gás natural, gasolina e diesel para atender o setor industrial e dos transportes. Porém a agroindústria da Argentina está em condições de responder ao desafio de diminuir os gastos associados a importação, diante de um aumento rápido na produção de biocombustíveis. Segundo o Ministério de Economia de Argentina, o país pode produzir 3,9 milhões de toneladas de biodiesel, concentradas principalmente na província de Santa Fé, onde as usinas de biodiesel estão integradas a esmagadoras de soja (Indec, 2022).

Atualmente, este setor industrial tem quase 60% de sua capacidade produtiva ociosa. Por esta razão, a Bolsa de Cereais e de Comércio sugeriu às autoridades do país um aumento da mistura de biodiesel no diesel. Dessa forma, todas as usinas registradas no país poderiam trabalhar em prol de assegurar o abastecimento do mercado nacional nas melhores condições de qualidade e preço para o consumidor (Indec, 2022). Em contrapartida, um artigo publicado no portal Biodieselbr, sugere que a participação do biodiesel na mistura deve subir de 5% para 12,5% porque as províncias argentinas enfrentam problemas de abastecimento de diesel há

alguns meses. Uma pesquisa realizada pela FADEEAC (Federação Argentina de Entidades Empresariais de Transporte de Carga) em 2022 registra que 19 províncias têm problemas de abastecimento, das quais 14 têm muito pouca ou nenhuma oferta nos postos de combustíveis.

Segundo a Câmara Argentina de Biocombustíveis (Carbio), o aumento da parcela de biocombustível no diesel irá aumentar a oferta de combustível nas bombas. De acordo com a organização: “o histórico de utilização de corte nacional de 10%, bem como as experiências de outros países com cortes de até 20%, e o uso de biodiesel puro nas frotas argentinas de transporte público de passageiros e carga, mostram a capacidade técnica do biodiesel para substituir o diesel no transporte, além de sua contribuição para a melhoria da saúde pública e do meio ambiente” (Poder360.com).

Sem a oferta do combustível, os produtores argentinos temem perder a colheita, pois com a carência do combustível e os impactos do conflito da Ucrânia, o custo do frete aumentou gerando como consequências em dificuldades para o andamento da produção.

No primeiro semestre em 2022 a mistura variou entre 4-5% devido aos preços abaixo da inflação e os altos preços mundiais do óleo vegetal junto a falta de um preço oficial atualizado do biodiesel, aumentados pela guerra da Ucrânia, resultou em queda nas vendas de biodiesel por parte dos fornecedores, uma vez que não estavam gerando lucro. Junto a isso, as importações de diesel estavam abaixo do necessário, a mistura de biodiesel estava diminuída pela metade e a demanda só aumentava, desencadeando em uma escassez de diesel que foi aumentando com o passar do tempo.

Com isso o governo procedeu aumentando o preço do biodiesel sob o mandato aprovando em julho de 2022 a Resolução 438/2022 que aumenta de forma permanente o teor de biodiesel no diesel de 5% para 7,5%, fornecido exclusivamente por pequenas e médias usinas, aprovando também ao mesmo tempo o Decreto 330/2022, chamado Mandato Adicional Transitório do Biodiesel, que aumenta temporariamente de forma excepcional o teor de biodiesel de 5 pontos percentuais em um período de 60 dias, podendo chegar a 12,5% de mistura obrigatória (fornecido por qualquer usina de biodiesel local), afim de compensar a escassez de diesel. A taxa média de mistura de biodiesel ao diesel em 2022 é estimada em 7,5%, ou seja, a taxa mais alta desde o início da pandemia (4%-5%), contudo, é menor do que o cenário dos anos que antecedem a pandemia.

É importante destacar que quem detém os poderes de regular e controlar os preços oficiais, qualidade, taxas de misturas e sanções por não conformidade dos biocombustíveis é a Secretaria de Energia.

Apesar desses desafios, a Argentina mantém uma indústria de biodiesel bem estabelecida e competitiva. O país é um dos maiores produtores e exportadores mundiais de biodiesel, com uma capacidade de produção considerável. O governo argentino tem implementado políticas de incentivo ao uso de biocombustíveis, buscando diversificar a matriz energética e promover a sustentabilidade ambiental.

2.3.4.1 Produção e consumo

No que tange à oferta de biodiesel no país, a Argentina possui 33 usinas de biodiesel, com capacidade total instalada de 4,43 bilhões de litros. Essas usinas utilizam quase exclusivamente óleo de soja como matéria-prima (Udop, 2021).

Em 2021 haviam 32 indústrias produzindo biodiesel com produção apresentada na Tabela 7 abaixo. Com exceção da Usina Patagonia Bioenergia, as outras empresas registraram em 2021 uma produção menor em relação à média alcançada entre os anos de 2017 e 2019. Entretanto é possível observar que as usinas de menor capacidade (produção menos que 50 mil toneladas/ano) apresentaram grande redução na produção (superior a 40%). Esse resultado está relacionado com os câmbios regulatórios realizados em 2021, que serão descritos posteriormente, e com a fixação dos preços internos dos combustíveis, aspecto que prejudicou as margens de rentabilidade das usinas. Na Tabela 08 abaixo é possível verificar os dados da produção de biodiesel por planta na Argentina.

Tabela 08 - Produção de biodiesel na Argentina por planta

Plantas	Produção média 2017 – 2019 (t)	Produção (t)	2021 VS média 2017 – 2019 (%)
Patagonia Bioenergia S.A	221.949	311.998	40,6
T 6 Industrial S.A	325.638	311.646	- 4,3
L.D.C. S.A	361.499	307.881	- 14,8
Renova S.A	325.378	153.930	- 52,7
Cargill S.A	126.013	124.374	- 1,3
Cofco Argentina S.A	109.417	105.105	- 3,9
Explora S.A	57.022	43.669	- 23,4
Energia Renovable S.A	43.598	32.345	- 25,8
Advanced Organic Materials S.A	43.365	27.152	- 37,4

Unitec Bio S.A	59.889	26.164	- 56,3
Diaser S.A	49.374	25.292	- 48,8
Bio Ramallo S.A	42.055	22.914	- 45,5
Pampa Bio S.A	47.747	22.558	- 52,8
Aripar S.A	45.646	22.108	- 51,6
Biocorba S.A	41.083	21.942	- 46,6
Refinar Bio S.A	41.397	21.688	- 47,6
Biobal Energy S.A	41.396	21.579	- 47,9
Rosario Bioenergy S.A	49.732	17.054	- 65,7
Bio Nogoya S.A	42.578	16.725	- 60,7
Biobahia S.A	45.567	16.616	- 63,5
Biobin S.A	45.959	16.339	- 64,4
Cremer y Asociados S.A	46.329	8.843	- 80,9
Establecimiento Albardon S.A	49.766	8.245	- 83,4
Energías Renovables Argentina S.A	18.957	7.768	- 59,0
Doble L Bioenergias S.A	6.710	7.285	8,6
Colalao del Valle S.A	15.121	5.427	- 64,1
Latinbio S.A	44.580	4.322	- 90,3
Diferoil S.A	42.636	4.241	- 90,1
Soyenergy S.A	15.019	3.280	- 78,2
Agro M Y G S.A	6.440	2.436	- 62,2
Héctor A. Bolzan y Cía. S.R.L	10.115	1.630	- 83,9
New Fuel S.A	3.678	1.112	- 69,8
BH Biocombustibles S.R.L	8.735	0	- 100,0
Energías Renovables Argentina S.R.L	8.265	0	- 100,0
Viluco S.A	46.231	0	- 100,0

Fonte: Secretaria de Energía, 2021.

A indústria de biodiesel no país em questão tem uma estrutura dual, ou seja, um grupo de empresas com alta escala e integradas verticalmente, altamente competitivas e com perfil exportador; e um segundo grupo, formado por empresas menores, com custos de produção maiores que abastecem o mercado local. É importante salientar que as empresas responsáveis pela demanda nacional, são proibidas por lei de exportar biodiesel, enquanto que as empresas do primeiro grupo, vinculadas à exportação, não podem vender biodiesel no mercado interno.

Nos últimos anos, o mercado nacional consumiu em média 46% da produção e o restante foi exportado.

A Tabela 09 a seguir mostra a produção, consumo do mercado interno e exportação de biodiesel na Argentina:

Tabela 09 - Biodiesel: Produção, mercado interno e exportação (toneladas) – Argentina

Ano	produção	Mercado interno (t)	Exportação (t)
2008	711.864	265	680.219
2009	1.179.103	426	1.142.283
2010	1.820.385	508.566	1.342.318
2011	2.429.964	748.742	1.649.352
2012	2.456.578	874.794	1.543.094
2013	1.997.809	884.976	1.149.259
2014	2.584.290	970.141	1.602.695
2015	1.810.659	1.014.361	788.226
2016	2.659.275	1.036.400	1.626.264
2017	2.871.435	1.173.533	1.650.119
2018	2.428.997	1.099.892	1.401.317
2019	2.147.270	1.136.729	1.015.007
2020	1.534.945	817.855	663.780
2021	1.710.658	425.096	1.285.562
Total	28.342.232	10.691.776	17.539.495

Fonte: Secretaria de Energia, 2021.

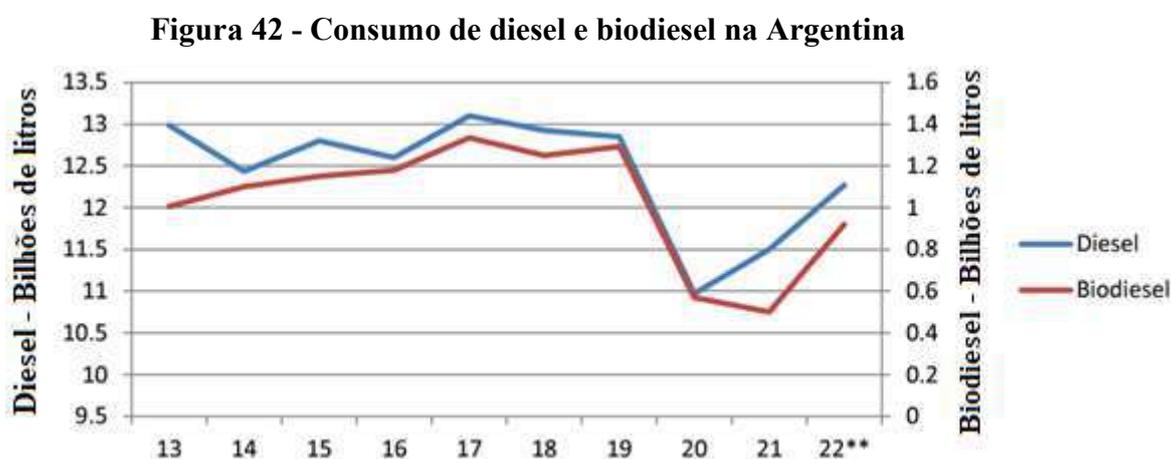
De acordo com a USDA foi previsto um consumo de biodiesel para o ano de 2022 de 920 milhões de litros, uma recuperação de 84% em relação a 2021 levando em conta o cenário pandêmico. Essa boa recuperação é resultado da medida adotada pelo governo de aumentar as taxas de mistura de forma permanente e transitória, e da política adotada pelo governo de manter preços de energia subsidiados para a população que favoreceu o consumo de combustível nas cidades fronteiras uma vez que os preços são significativamente mais elevados nos países vizinhos.

A carência de diesel na Argentina pode ainda contribuir para um aumento no consumo de biodiesel, mas ainda assim, o consumo referente a 2022 será menor em relação aos anos anteriores a pandemia, e o consumo de diesel dentro e fora de estrada e a proporção da mistura ainda assim devem permanecer menores do que nos anos de 2013 a 2019.

Em abril de 2022, o governo examinou o preço oficial do biodiesel refletindo preços e custos mundiais mais altos após a situação da guerra Ucrânia-Rússia. Essa revisão contribuiu em um caminho de preço crescente até agosto 2022, o que resulta em alta inflação. Dessa forma, com a nova política em vigência, é provável que a mistura com teor de 7,5% de biodiesel permaneça como piso (USDA, 2022), e atualmente o teor obrigatório está em 5%.

A Argentina não é um país autossuficiente em combustível, ou seja, ela precisa importar combustível para atender suas necessidades e em relação ao diesel, o país importa cerca de 20% a 30% de diesel. No início do ano vigente as importações foram muito lentas para atender suas necessidades, isso por conta dos preços internacionais do petróleo mais altos e por conta de os distribuidores/importadores locais de combustível terem tido prejuízos financeiros vendendo a preços inferiores aos seu custo de importação.

A Figura 42 a seguir mostra a variação no consumo de biodiesel e diesel no país em questão de 2013 a 2022.



Fonte: USDA, 2022.

De acordo com o relatório anual da USDA de 2022, foi estimado uma produção de 2,1 bilhões de litros de biodiesel, 7% a mais que no ano de 2021, devido ao maior consumo interno.

O setor de biocombustíveis tem sido afetado por falta de investimentos tendo mais de 50% das 33 usinas produtoras inoperantes. As produtoras de pequeno e médio porte estão cumprindo o mandato oficial, já 9 usinas de grande porte (multinacionais de grãos) atendem o

mantado adicional e temporário de 5%. A vantagem é que a Lei de biocombustíveis incentiva as plantas locais, minimizando a concorrência, uma vez que exige que o biodiesel utilizado de acordo com o mandato oficial deve ser gerado em indústrias argentinas, com matérias-primas produzidas no país, seja de origem agrícola ou resíduos orgânicos, e praticamente todas essas usinas utilizam como matéria-prima o óleo de soja.

Durante o cenário de COVID-19, as plantas produtoras de biodiesel operaram com sua capacidade reduzida, e atualmente a maioria das pequenas e médias usinas estão operando em alta capacidade e com resultados positivos.

No que diz respeito a importação de biodiesel, a Lei recente de Biocombustíveis, proíbe a importação para cumprimento da mistura de mantado exigindo que apenas biocombustíveis produzidos em plantas locais possam ser aplicados, e a única exceção seria se a Secretaria de Energia autorizasse.

Em relação aos impostos, atualmente há um imposto de exportação diferencial nominal de 3% incidido sobre o biodiesel em relação ao óleo de soja, mas o diferencial efetivo está agora próximo de 10%. Segundo a USDA a alíquota efetiva para o biodiesel é menor por conta da redução de impostos de exportação que a maioria dos produtos manufaturados possuem, e que não se aplica ao óleo de soja e commodities agrícolas in natura.

O governo alterou os impostos de exportação de subprodutos de soja com efeito imediato, válido até o final de 2022, a partir do Decreto 131/2022. O imposto nominal de exportação de biodiesel aumentou em 1 ponto percentual para um total de 30% (23,07% do imposto efetivo), já os impostos de exportação de óleo de soja e farelo foram aumentados de 31% para 33% (USDA, 2022).

- Apoios Financeiros à produção de biodiesel

Como visto anteriormente, a Lei de Biocombustíveis 26.093/2006 trouxe alguns incentivos fiscais para encorajar a produção de biodiesel no país, estimulando o consumo local. No entanto, de uma forma geral, a Argentina não fornece incentivos diretos aos produtores e consumidores, os incentivos vêm de forma indireta no abatimento e reduções fiscais por exemplo.

Em outubro de 2020 foi aprovada a Lei 14.010 que impulsiona o consumo de biodiesel e outros biocombustíveis no ramo agrícola, transporte, logística, frotas governamentais, aquecimento e energia, etc. Contudo, a Lei ainda carece de alguns regulamentos para sua implementação. Desde 2018, a cidade de Rosário, que é a maior cidade da província de Santa Fé, realizou um programa de três anos para avaliar cerca de 1.000 ônibus urbanos em B25 e

B100 com resultados promissores. No entanto ainda não foram vistos progressos na adição de mais veículos para funcionar com biodiesel ou alguma mudança na política.

A Província de Córdoba, produz a maior parte do bioetanol de milho, por ser, uma das principais províncias produtoras de soja e milho. Ela aprovou uma Lei 10.721 em novembro de 2020 que estimula a produção e o consumo de biocombustíveis e bioenergia. Esta província financia aproximadamente 20 pequenas indústrias de biodiesel em construção e estima-se que até o final de 2023, essas usinas devem produzir entorno de 20 milhões de litros de biodiesel para abastecer o transporte público e privado da província.

Mediante o cenário de pandemia, houve uma queda na produção e consumo de biodiesel nos anos 2020 e 2021 em consequência da redução da demanda por combustíveis, uma vez que foi incentivado o lockdown, reduzindo assim a mobilidade da população, além da queda econômica em 2020. Frente a este cenário o governo não alterou as políticas e programas sobre biocombustíveis.

- Exportação

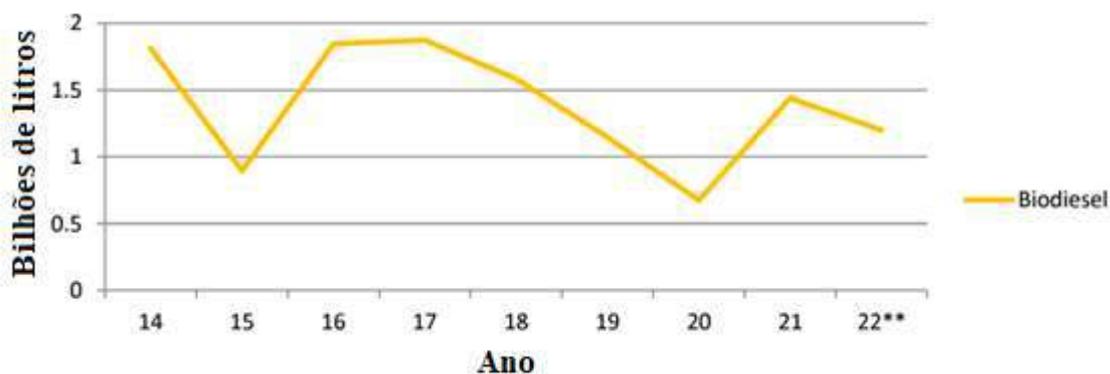
A lei 27.640 de biocombustíveis não trata diretamente sobre as exportações do biodiesel, entretanto a USDA estimou exportações de 1,2 bilhões de litros em 2022, que corresponde a 17% a menos que no ano anterior tendo a União Europeia como principal destino.

No primeiro semestre de 2022 foram embarcados cerca de 1 bilhão de litros, isto é quase 50% a mais em relação ao ano de 2021 no mesmo período, tendo a Holanda como principal destino, uma vez que a União Europeia é o único mercado em que o biodiesel argentino está sendo embarcado com vendas para os Estados Unidos e Peru descontinuadas (USDA, 2022). EUA e Peru eram importantes importadores do biodiesel argentino, porém, devido as altas tarifas de retaliação, esses consumidores mantêm-se fechados ao biodiesel argentino. Ou seja, após tarifas de importação e retaliação impostos estabelecidos pela União Europeia desde 2018, para proteger seu mercado, foi aplicado altos direitos *antidumping* e compensatórios, dificultando que o biodiesel chegue ao mercado americano. Já o Peru é um importador de biodiesel argentino desde 2012, ajudando a cumprir seu mandato de mistura e apoiar suas exportações para a Europa, mas em 2016 o Peru estabeleceu direitos *antidumping* e antissubsídios sobre as importações argentinas de biodiesel que reduziram as exportações, que expiraram no início de 2021, mas foram renovados por mais cinco anos.

As exportações para mercados de demanda discricionária não são esperadas em um curto período de tempo devido ao alto preço mundial do óleo de soja, que está aproximadamente

35% mais alto do que o ICE Gasoil. As variações na exportação do biodiesel na Argentina estão representadas na Figura 43 a seguir:

Figura 43 - Exportação de biodiesel argentino



Fonte: USDA, 2022.

A cidade de Rosário é onde se localiza a maior parte das indústrias de biodiesel, dessa forma, todas as exportações de biodiesel são feitas em portos próximos a essa cidade, onde a maioria das empresas de exportação são industriais multinacionais.

A Argentina juntamente com a comissão Europeia entrou em acordo em relação a uma cota anual isenta de impostos para biodiesel de 1,36 bilhões de litros a um preço baixo de importação baseado no preço oficial do óleo de soja da Argentina somados aos custos de produção e frete, onde oito produtores de biodiesel no país estão autorizados a exportar.

De acordo com a USDA a CARBIO, distribui a cota anual entre seus membros com base na capacidade e no desempenho anterior das exportações.

Levando em consideração questões ambientais, surgiu uma preocupação em relação ao uso do óleo de soja para produção de biodiesel local, fazendo com que o comitê da indústria do Parlamento da União Europeia votasse para restrição do óleo de soja como matéria-prima, uma vez que a expansão agrícola da soja com o óleo de palma tem levado ao desmatamento em países fora da União Europeia. Ainda não é lei a eliminação do biodiesel de óleo soja, mas é uma possibilidade esperada pelo Parlamento Europeu.

Segundo a União Nacional de Bioenergia (Unop) a Argentina é o quarto maior produtor e o terceiro maior exportador mundial de biodiesel à base de grãos de soja, à frente dos Estados Unidos e da Indonésia, detendo de 60% do comércio mundial do produto.

2.3.4.2 Projeções futuras

O biodiesel argentino possui grande vantagem competitiva, devido sua grande escala de produção, novas tecnologias, uso de plantio direto e biotecnologia de sementes, e logística favorável, já que a área de produção de soja é muito próxima da indústria e dos portos. Com uma indústria bem consolidada, a Argentina é um dos principais produtores e exportadores de biodiesel do mundo, impulsionado principalmente pela produção de óleo de soja, já que é um dos principais produtores de soja do mundo. Mas é importante que o governo tome medidas adicionais para aumentar a demanda por biocombustíveis, visto que a elevação para misturas mais altas de biodiesel ainda permanece muito limitada. Além disso, o setor de biodiesel no país também enfrentou muitos desafios nos últimos anos, incluindo disputas comerciais, mudanças nas políticas de exportação, crise econômica... Esses fatores impactam na produção, na demanda e na competitividade do biodiesel argentino.

A expectativa é que a demanda por diesel aumente quando a economia da Argentina se estabilizar, pois há meios alternativos limitados de transporte para caminhões no setor comercial. As ferrovias estão aumentando sua capacidade de forma lenta, onde mais de 80% das exportações agrícolas são embarcadas. Ao final de 2020, a Argentina tinha 14,6 milhões de veículos com idade média de quase 12 anos, onde aproximadamente, 82% eram carros e o restante, caminhões e ônibus, dos quais quase 74% eram movidos a gasolina, 25% eram a diesel e os restantes funcionavam a gás natural comprimido (USDA, 2021).

2.3.5 Cenário do biodiesel no Paraguai

Em um país em desenvolvimento como o Paraguai torna-se difícil enfrentar os desafios associados ao avanço do sistema energético, onde a demanda energética do setor de transportes ainda é abastecida pelos combustíveis de origem fóssil.

A introdução legal para os biocombustíveis no Paraguai se deu no ano de 2005 com a aprovação da Lei 2.748 de Promoção de Biocombustíveis, regulamentada pelo Decreto 10.703 de 2013. Esta Lei foi implementada com o intuito de diversificar o fornecimento de energia renovável, diminuir a dependência de combustíveis fósseis importados, substituir combustíveis fósseis por combustíveis renováveis, melhorar a qualidade ambiental, além de desenvolver o setor agrícola (focado principalmente em pequenos produtores) e exportar biodiesel., declarando a produção de matéria-prima, processamento e consumo de biocombustíveis uma questão de interesse nacional.

Foram definidos alguns critérios mínimos que devem ser obedecidos como: a obrigatoriedade do biodiesel foi fixada em 1% no máximo por volume para biocombustíveis; o mandato deve ser cumprido com biodiesel local, a menos que haja uma escassez declarada oficial de biocombustível. Os produtores de biocombustíveis obtêm os benefícios fiscais previstos nas leis 60/90 e 2421/04. Os benefícios são: imposto por valor agregado (IVA) reduzido e isenção de direitos de importação de equipamentos e o governo está proibido de cobrar quaisquer taxas aos produtores de biocombustíveis para medições, produção, distribuição, venda ou outro conceito.

O Paraguai comercializa três tipos de diesel com diferentes qualidades (Diesel tipo I, II e III). Desses, apenas ao Diesel tipo III existe a obrigatoriedade de misturar 1% de segundo a Lei 2748/05 de 2005 de fomento aos biocombustíveis, o que representa uma demanda potencial de biodiesel de 11 milhões de litros por ano (Biocap, 2022).

No ano de 2007, o Ministério da Indústria e Comércio (MIC) determinou uma porcentagem mínima de 1% de biodiesel ao diesel, e em 2008, a mistura percentual deveria ser 3% e, a partir de 2009, de 5 %, até 20 % no máximo. Porém o aumento percentual não foi como esperado devido às limitações de capacidade de produção, altos custos de produção, dependência de importações e falta de incentivos governamentais. Dessa forma, atualmente o Paraguai possui uma mistura 1% de biodiesel ao diesel, com a expectativa de que o percentual chegue a 5% (BiodieselBr, 2023).

Segundo informações obtidas pela estatal de Petróleo do Paraguai (Petropar), aproximadamente 1 trilhão de litros de diesel são consumidos ao ano no país, ou seja, para cumprir a exigência do MIC de 1% são necessários 10 milhões de litros de biodiesel, e para a mistura de 3% - 30 milhões de litros e para a mistura de 5% - 50 milhões de litros e assim sucessivamente.

De acordo com USDA, no mês de fevereiro de 2013 o governo definiu que o diesel de menor qualidade (tipo III) deveria ser misturado na porção de 1% ao biodiesel por meio do decreto 10.703, e a mistura com diesel de qualidade superior era opcional. As misturas percentuais eram para ser maiores, porém a falta de incentivos fiscais atrelado com problemas de qualidade forçaram a redução do percentual de biodiesel na mistura. Este mesmo decreto também autoriza que o biodiesel utilizado na mistura possa ter diferentes origens em relação a matéria-prima utilizada, desde que as especificações sejam respeitadas quanto aos padrões de qualidade. Além disso, torna-se obrigatório o uso de biocombustíveis desde que haja abastecimento local suficiente (USDA, 2015).

O decreto 10.703 criou uma Unidade Interinstitucional composta pela união do Ministério da Indústria e Comércio, Ministério da Agricultura e Ministério da Economia com o intuito de monitorar e regular a indústria de biodiesel promovendo maior competitividade, produção sustentável estabelecendo os preços base regulando a distribuição no mercado nacional. Ainda em fevereiro de 2013 foi definido o decreto 10.724 que estabeleceu a metodologia de fixação do preço do biodiesel tipo III (USDA, 2015).

A empresa Cremer Óleo inaugurou uma usina de biodiesel no Paraguai instalada na cidade de Villetta, com capacidade para fabricar até 120 mil m³ de biocombustível por ano, que será destinado ao consumo local e a exportação (BiodieselBr, 2023).

É importante destacar que o Paraguai não possui mandato ambiental obrigatório em relação a produção de matérias-primas ou processo industrial de biocombustíveis. Entretanto, o país possui uma legislação ambiental voltada em minimizar o desmatamento, a poluição e a contaminação da água. E às emissões de gases estufas da indústria de biocombustíveis, são baixas pois a maioria da soja do Paraguai é produzida com tecnologia de plantio direto.

2.3.5.1 Produção e consumo

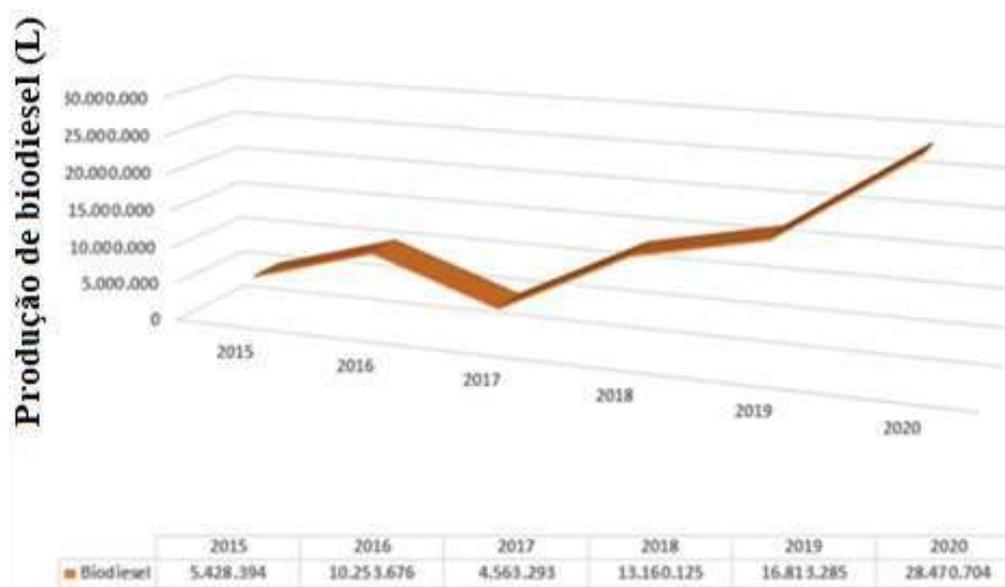
O Paraguai possui dificuldades de manter um fornecimento constante de biodiesel durante todo ano, pois quando o preço oficial não é lucrativo para os produtores de biodiesel, a oferta é prejudicada, além dos problemas de qualidade recorrentes que força a suspensão da sua produção. Dessa forma, a produção e venda de biodiesel no Paraguai oscilou bastante nos últimos 10 anos. Mas em 2020, de acordo com dados da tabela abaixo, a quantidade de biodiesel ultrapassou os 28 milhões de litros. Esse volume compreende todo o biodiesel produzido no país, sabendo que o Paraguai não efetua exportações.

Embora a produção de biodiesel no Paraguai ainda seja relativamente menor em comparação com outros países, o setor tem registrado crescimento constante, impulsionado por investimentos em novas usinas e tecnologias de produção. A ampliação da capacidade de produção de biodiesel no país visa tanto atender à demanda doméstica quanto explorar oportunidades de exportação. A Tabela 10 abaixo mostra dados do volume de biodiesel produzido no Paraguai entre os anos de 2015 e 2020 enquanto que a Figura 44 representa esses mesmos dados graficamente:

Tabela 10 - Produção de Biodiesel no Paraguai (2015 – 2020)

Ano	Produção (litros)
2015	5.428.394
2016	10.253.676
2017	4.563.293
2018	13.160.125
2019	16.813.285
2020	28.470.704

Fonte: Gimenez, 2020.

Figura 44 - Produção de Biodiesel entre 2015-2020

Fonte: MIC, 2021.

A oferta nacional não satisfaz a exigência mínima para 2020 de adição de 3% de biodiesel ao diesel tipo III, que se refere a única qualidade de combustível sujeita à obrigatoriedade com biodiesel. Nos primeiros meses de 2021, os percentuais oscilaram entre 0,97% e 1,86%. No entanto, durante o período entre 2018 e 2020 a produção de biodiesel mostrou um aumento significativo como mostram os dados abaixo. Nos anos entre 2015 e 2020 o incremento foi de mais de 500% (MIC, 2021).

Há atualmente no Paraguai 7 plantas produtoras de biodiesel, com capacidade total instalada de 139.439.600 litros/ano. Dessa capacidade instalada, a usina INPASA é capaz de produzir 52%. Contudo, atualmente, a produção total de biodiesel é bem menor do que o país pode produzir (MIC, 2021).

A Tabela 11 a seguir representa a capacidade de produção de biodiesel instalada no Paraguai bem como sua localização e matéria-prima utilizada:

Tabela 11 - Capacidade instalada de biodiesel de produtores autorizados e em operação

Nº	Planta	Localização	Matéria-prima	Capacidade instalada (L/ano)	%
1	INPASA	Distrito de Guayalbí – Departamento San Pedro	Óleo de milho e Óleo de soja	72.000.000	52
2	FRIGORIFICO GUARANI	Ruta 2 Mcal. Estigarríbia km 30,5 - Itaugua	Óleo de soja	20.109.600	14
3	MULTIAGRO	Ruta 2 Mcal. Estigarríbia km 28 - Itaugua	Óleo de soja	14.400.000	10
4	INDUPALMA	Roque Gonzalez – Paraguari	Óleo de soja	14.400.000	10
5	BIOENERGY	Parque Avay Villeta	Óleo de soja	9.360.000	7
6	BIOSINERGY DEL PARAGUAY S.A	Ruta 10 La Paloma del Espiritu Santo	Óleo de soja	6.000.000	4
7	ENERCO	Compañía Isla Valle - Aregua	Óleo de soja	3.200.000	2
Capacidade total instalada				139.469.600	100

Fonte: MIC (2021).

Em relação ao consumo, o país ainda é muito dependente do diesel fóssil, consumindo cerca de 1.155 milhões de litros de diesel por ano, sendo 80% dos veículos nacionais movidos a diesel. Sendo também reconhecida a importância do consumo e alta incidência deste combustível no custo de produção dos diferentes cultivos agrícolas mecanizados.

Como o Paraguai ainda tem uma dependência crescente das importações de derivados de petróleo na sua matriz energética, isso gera um custo ao país de mais de US\$ 700 milhões por ano. Além disso, este elevado consumo de combustíveis fósseis principalmente no setor de transportes, que utiliza cerca de 70% do consumo total, junto a sua relação com os ramos agrícolas e industriais faz com que o país sofra grandes impactos com o aumento no preço do petróleo e seus derivados, principalmente o diesel, afetando no custo dos produtos alimentícios, manufatureiros, da construção civil, transporte e fretes, e outros.

Em novembro de 2019 a Lei 6389 “Regime de promoção para a elaboração e utilização obrigatória do biocombustível apto para uso em motores diesel”, determinou um aumento gradual de biodiesel na mistura de 1% anual até o máximo de 5%. Mas, mesmo após a aprovação desta Lei, o país não consegue atingir os 5% esperados para 2023, onde ao final de

2020 de a mistura foi 2,04% e até julho de 2021 de 1,45%. De acordo com o MIC, não foi possível empregar maiores teores de biodiesel por causa do alto custo de produção do biodiesel, em relação ao preço dos combustíveis fósseis, já que existe capacidade produtora instalada suficiente para atender essa demanda. Porém com o atual aumento do petróleo e seus derivados esse contexto pode mudar (Biocap, 2022).

Atualmente o Paraguai não tem condições de ser um exportador de biodiesel, pois exigiria altos investimentos, além de ser necessário que sua produção nacional tenha grande crescimento para abastecer o próprio país.

O Paraguai é um país sem litoral cercado pela Argentina, Bolívia e Brasil, mas apresenta boas relações com o Oceano Atlântico por meio de um sistema de barcaças pelos rios Paraguai e Paraná, e por um sistema de transporte rodoviário conectado ao porto de Paranaguá no Brasil (USDA, 2015). As exportações e importações de biodiesel são isentas de impostos, mas devem ser aprovadas pelo Ministério da Indústria e Comércio.

2.3.5.2 Projeções futuras

O Paraguai é um país com grande potencial para se tornar um produtor e exportador de biocombustíveis devido a disponibilidade de seus recursos agrícolas e florestais, além de apresentar condições climáticas favoráveis, mão-de-obra, solos ricos e terras disponíveis, esses recursos favorecem o cultivo de uma ampla gama de culturas de alto rendimento que podem ser utilizadas como matéria-prima na produção de biocombustíveis.

Como o país ainda é muito dependente do petróleo importado e sua economia ser predominantemente agrária, são fatores que incentivam o Paraguai a desenvolver uma indústria de biocombustíveis voltada principalmente para suprir suas demandas locais. Até o momento o investimento no setor tem sido limitado a pequenas plantas, mas há algumas plantas de médio porte que devem ser desenvolvidas nos próximos anos. Em outras palavras, se a indústria local de biodiesel quiser se desenvolver em um negócio de maior escala, serão necessários alguns ajustes como: estabelecer um esquema de preços viável, melhorar a qualidade do produto, aumentar escala de produção, incorporação de novas tecnologias, adequação da rede de distribuição de combustíveis para biodiesel, ampliação do número de laboratórios, implantação e adoção de sistema de controle (USDA, 2015).

O país precisa de usinas de maior escala para reduzir custos e de diversificar as matérias-primas. Uma alternativa que poderia ajudar no aumento de escala seria produzir tanto para o mercado local como para exportação.

Segundo a Agência internacional de energia (IEA, 2014) o Paraguai estabeleceu uma meta de energia renovável em seu Plano de Desenvolvimento Nacional 2014–2030 de atingir 60 % do consumo de energia renovável no consumo total de energia até 2030, mostrando a necessidade de investir em usinas para produzir biodiesel.

No que tange aos biocombustíveis, o Paraguai terá um forte investimento no projeto Ômega Green, que consiste na instalação de uma usina com capacidade estimada de produzir 3 milhões de litros por dia de biodiesel e bioquerosene. Este é o primeiro projeto de biocombustíveis avançados no Paraguai, bem como o maior investimento privado da história do país (BiodieselMagazine.com).

3 METODOLOGIA

O trabalho desenvolvido consiste em uma pesquisa descritiva, utilizando uma abordagem qualitativa, com o objetivo de produzir novas informações para a comunidade acadêmica e para empresas acerca da situação dos biocombustíveis no Brasil, Argentina e Paraguai, além de apresentar as novas qualidades de biocombustíveis a serem usadas nos motores do ciclo diesel.

Dessa forma, para alcançar os objetivos estabelecidos foi adotada a metodologia de pesquisa descritiva, uma vez que o tema proposto já é bastante difundido e conhecido, cabendo ao trabalho revisá-lo e proporcionar um melhor entendimento do atual cenário de combustíveis para motores a diesel e as novas qualidades de biocombustíveis para estes motores. Para isso, foi usada a técnica de revisão bibliográfica, utilizando gráficos e tabelas com dados resumidos. As principais fontes foram: plataformas governamentais, sites de notícias, relatórios estatísticos, documentos legais, como leis, regulamentos, decretos, artigos científicos e normas técnicas

A metodologia empregada para cada tópico foi:

No segundo tópico do estudo, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para avaliar as tecnologias utilizadas atualmente nos motores de ciclo diesel com combustíveis tradicionais, diesel e biodiesel, nos três países de estudo, além de analisar os processos produtivos desses combustíveis. As informações sobre a oferta, demanda e projeções futuras foram obtidas nas plataformas governamentais dos países estudados, bem como em artigos e fontes de notícias.

No quarto tópico, foram apresentados os resultados e discussões sobre as novas qualidades de biocombustíveis para motores de ciclo diesel. As informações sobre diesel verde foram obtidas a partir de artigos científicos e dissertações, com foco nas plataformas de pesquisa, como a revista científica *Elsevier* e Google Acadêmico, foram buscados dados em

dissertações e artigos sobre o processo produtivo, bem como nas plataformas governamentais e regulatórias, como ANP, EPE e o BIODIESELBR, obtendo informações sobre oferta, demanda e projeções nacionais. No caso da Argentina, além da busca no site do governo (Argentina.gob), IEA, INDEC, Carbio além de plataformas de notícias online e informações do site da USDA.

Para obter informações sobre o Paraguai foram consultadas fontes de notícias online do país, plataformas governamentais, MIC, IEA, PETROPAR e USDA.

Em relação ao hidrogênio no diesel, foi feito o levantamento de alguns artigos científicos (revista científica *Elsevier*) que trazem resultados dessa nova tecnologia em desenvolvimento e sites de notícias.

Sobre o novo diesel da Petrobras (RX) a principal fonte de pesquisa foi o próprio site da estatal, bem como fontes de notícias.

4 RESULTADOS

4.1 NOVAS QUALIDADES DE BIOCOMBUSTÍVEIS PARA MOTORES CICLO DIESEL

É bastante conhecido que a queima de combustíveis fósseis resulta em diversos danos ambientais, e tendo em vista que os motores de combustão interna utilizam derivados do petróleo para sua combustão, e considerando o crescente aumento de veículos no mundo, os motores de combustão interna contribuem significativamente para emissão de poluentes ambientais. Dessa forma, visando um futuro mais sustentável, é viável estudar alternativas que minimizem ou eliminem o uso desses combustíveis nos motores de ciclo a diesel ou busca-se o aperfeiçoamento dos motores a diesel para serem mais eficiente energeticamente e menos poluentes.

Diversos países como Estados Unidos, Alemanha e França, têm se preocupado com as questões ambientais associadas ao setor de transportes, com isso tem adotado políticas específicas que visam mitigar os impactos na mudança do clima e para a melhoria da qualidade de vida da população (EIA, 2019). No Brasil, tem-se o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), que possui suas normas reguladas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o qual estabelece as metas de redução das emissões para veículos leves e pesados (EPE, 2020).

O PROCONVE foi criado pelo CONAMA em 1986 com o intuito de minimizar e controlar a contaminação atmosférica e a emissão de ruído dos veículos automotores. Ainda no ano de 1996, o programa já começou a criar e exigir restrições a respeito das emissões

específicas e material particulado. A partir do programa o Brasil tem exigido padrões cada vez mais restritivos de emissões.

Uma proposta para minimizar os impactos ambientais é utilizar biocombustíveis nos motores de ciclo diesel, reduzindo a liberação de gases poluentes.

No cenário nacional e internacional, encontra-se o aumento de estudos voltados a novas propostas de motores ciclo diesel, utilizando biocombustíveis alternativos e cada vez mais sustentáveis, como o biodiesel, diesel verde, diesel RX da Petrobras e o hidrogênio. É importante destacar que para cada nova modalidade de combustível é necessário conduzir pesquisas para identificar as possíveis modificações requeridas nos motores, avaliar a viabilidade de implementação e analisar as vantagens obtidas. Outro ponto a ser debatido é o uso de hidrogênio em motores de ignição por compressão, que pode ser tanto como combustível primário ou complementar.

O Brasil é um dos maiores produtores e consumidores de biocombustíveis do mundo, com destaque para o etanol e o biodiesel.

A transição energética para fontes renováveis no país tem sido uma das principais pautas do governo e da sociedade civil nos últimos anos. O país possui um enorme potencial de geração de energia renovável, seja por meio da energia hidrelétrica, eólica, solar, biomassa ou outras tecnologias. Onde, a matriz energética brasileira é caracterizada pela predominância da energia hidrelétrica, que corresponde a cerca de 60% da capacidade instalada, seguida pela energia térmica, eólica e solar. A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis já representa mais de 80% do total produzido no país.

Contudo, ainda há um longo caminho a ser percorrido para a consolidação da transição energética no Brasil. Algumas das principais barreiras incluem a dependência do petróleo e do gás natural na matriz energética, a necessidade de investimentos em infraestrutura e tecnologia, além dos desafios socioeconômicos e políticos.

A Argentina, assim como o Brasil, tem caminhado para o uso de fontes renováveis, porém ainda é muito dependente do petróleo e do gás natural. Para minimizar esta dependência, o governo argentino tem desenvolvido políticas públicas para incentivar a transição energética, como a criação do programa RenovAr, que tem como objetivo incentivar a instalação de novos projetos de energia renovável no país. Além disso, o governo tem trabalhado na elaboração de um plano nacional de energia renovável para orientar o desenvolvimento do setor nos próximos anos (REN21, 2021).

O país tem se destacado em projetos de energias renováveis, como a instalação de parques eólicos e solares em diversas regiões do país, além da produção de biocombustíveis a partir de matérias-primas como o milho e a soja.

Em relação ao Paraguai, o governo do país também tem desenvolvido algumas iniciativas para incentivar a transição energética, como a criação do Programa Nacional de Energias Renováveis e Eficiência Energética, que tem como objetivo fomentar o desenvolvimento de projetos de energia renovável no país. Além disso, em 2019, foi aprovada uma lei de incentivo à geração distribuída de energia solar.

O Plano Nacional de Desenvolvimento (PND) de 2030 estipulou planos para o progresso econômico e sustentável, incluindo a promoção de fontes de energia renováveis e outras metas ambientais. Estas estratégias têm como objetivo aumentar em 60% a utilização de energia renovável e diminuir em 20% o uso de combustíveis fósseis na energia veicular consumida anualmente no país.

4.1.1 Diesel verde

Novas tecnológicas têm surgido a partir de fontes renováveis, a fim de sintetizar moléculas similares ao diesel de petróleo. O diesel verde faz parte dessa nova geração de biocombustíveis, e internacionalmente é conhecido como *renewable diesel*. Ou seja, o diesel verde (C₁₆ – C₂₂) é um biocombustível renovável e sustentável que pode substituir parcialmente ou totalmente o diesel fóssil. Ele é produzido a partir de fontes renováveis, como óleos e gorduras (Instituto Brasileiro de Petróleo e gás – IBP 2021).

Uma das principais vantagens do diesel verde é a sua capacidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em comparação com o diesel fóssil. Isso ocorre porque o diesel verde é produzido a partir de fontes renováveis que absorvem dióxido de carbono (CO₂) durante o seu crescimento, enquanto o diesel fóssil é extraído do subsolo e libera o CO₂ armazenado há milhões de anos na atmosfera.

Além disso, o diesel verde também tem outras vantagens em relação ao diesel fóssil, como uma menor emissão de poluentes, um melhor desempenho em baixas temperaturas e uma maior lubrificação e maior estabilidade, o que garante menos problemas no armazenamento; possui elevado número de cetano, o que melhora a qualidade da combustão no motor, prolongando sua vida útil (IBP, 2021).

O diesel verde é um biocombustível de segunda geração que já é utilizado em países da Europa e nos Estados Unidos. Esse produto é resultado de avanços tecnológicos que acompanham as inovações veiculares, que requerem um combustível de alta qualidade, com

estabilidade elevada e níveis mínimos de contaminantes. É atualmente o terceiro biocombustível mais utilizado no mundo e seu crescimento em produção é o mais acelerado. Estudos apontam que a principal vantagem do diesel verde é sua eficiência em resolver o problema da redução de emissões de gases poluentes, pois é capaz de reduzir em até 90% as emissões de gases de efeito estufa em comparação com o diesel fóssil. Além disso, não é necessária nenhuma adaptação nos motores diesel para seu uso, podendo ser utilizado puro ou misturado com o diesel de petróleo (Arun, 2015; Chang, *et al.*, 2017).

A tecnologia mais amplamente utilizada em todo o mundo para produzir diesel renovável é conhecida como *Hydrotreated Vegetal Oil* (HVO). Ao contrário do biodiesel tradicional, que é uma mistura de ésteres, o diesel verde é uma mistura de n-parafina, ou seja, um combustível quimicamente semelhante ao diesel fóssil.

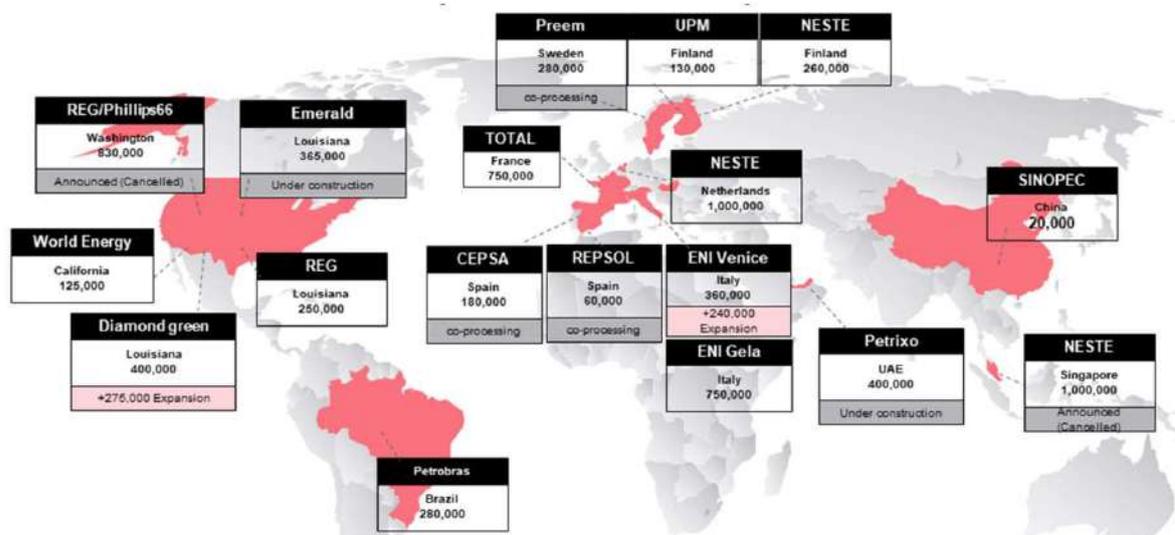
Como o diesel verde possui composição química análoga à do combustível fóssil, ele pode ser adicionado em qualquer quantidade, diferente do biodiesel, ou até mesmo utilizado puro, sem nenhum prejuízo, nem necessidade de adaptação tecnológica aos motores de ciclo diesel.

É importante notar que as limitações existentes na adição de biodiesel são necessárias para proteger o motor contra a formação de borra, resina ou umidade, o que não é mais um problema quando se utiliza o diesel verde. Uma outra vantagem do diesel verde é a sua estabilidade, o que permite que ele seja armazenado por longos períodos sem a necessidade de monitoramento constante, como é o caso do biodiesel tradicional. Embora haja várias vantagens no uso do diesel verde, é importante notar que este combustível é produzido utilizando hidrogênio, que é majoritariamente obtido a partir do gás natural.

Algumas empresas e instituições já estão investindo na produção de diesel verde, e o combustível está começando a ser utilizado em diversos setores, como transporte público, frota de veículos comerciais e até mesmo em carros de passeio.

Atualmente, há diversas usinas comerciais ao redor do mundo dedicadas à produção de diesel renovável. De acordo com estimativas, a produção global atual é de mais de 5,5 bilhões de litros, e a expectativa é que essa quantidade cresça para 13 bilhões de litros até 2024. Embora a empresa NESTE seja a líder na produção de diesel renovável, outras empresas de petróleo e gás, como ENI e TOTAL, também estão produzindo quantidades significativas desse biocombustível. (Estevez., *et al.*, 2022). A Figura 45 abaixo apresenta um panorama atual da produção de diesel verde no mundo.

Figura 45 - Cenário atual da produção de diesel verde no mundo



Fonte: Estevez., *et al.*, 2022.

No entanto, a produção de diesel verde ainda é limitada em comparação com a produção de diesel fóssil. Ainda é necessário um investimento significativo em pesquisa e desenvolvimento para tornar a produção em larga escala de diesel verde economicamente viável e eficiente.

4.1.1.1 Rotas tecnológicas

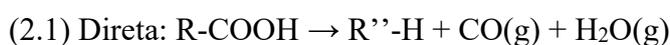
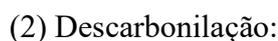
4.1.1.1.1 Hidrotratamento de óleo vegetal (HVO)

Como mencionado anteriormente, o diesel verde pode ser sintetizado a partir do hidrotratamento de óleos e gorduras de origem vegetal ou animal. O processo envolve a passagem da matéria-prima por catalisadores de hidrotratamento, geralmente à base de níquel e molibdênio, sob alta pressão e temperatura, para produzir um combustível de baixo teor de enxofre e elevada estabilidade térmica e oxidativa. Durante o processo, o oxigênio e outras impurezas são removidos do óleo vegetal, formando um combustível com propriedades semelhantes ao diesel fóssil.

O processo envolve a utilização de hidroprocessamento para transformar os triacilgliceróis e ácidos graxos livres presentes em óleos e gorduras de origem vegetal ou animal em hidrocarbonetos lineares de cadeia longa. Durante o processo, o oxigênio presente nas moléculas de éster, ácidos graxos ou triacilgliceróis é eliminado por meio da hidredesoxigenação (HDO), enquanto as ligações duplas são saturadas por meio da adição de hidrogênio.

Durante o processo de HDO de óleos e gorduras, acontece a hidrogenólises dos triacilgliceróis formando os ácidos graxos correspondentes. Em seguida, esses ácidos graxos podem ser transformados em hidrocarbonetos parafínicos e olefínicos de cadeia linear, por meio da eliminação do grupo carboxila. Esse processo pode ocorrer por três rotas diferentes e simultâneas, conforme exemplificado pelas reações a seguir. (Snare., *et al.*, 2006).

Principais reações envolvidas na hidroxigenação dos triglicerídeos:

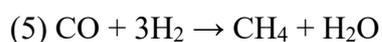
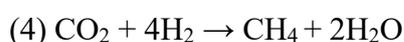


Na reação (1) de descarboxilação, ocorre a eliminação do grupo carboxila (-COOH) dos ácidos graxos que compõem os triacilgliceróis, resultando na formação de dióxido de carbono e um hidrocarboneto parafínico com um átomo de carbono a menos em relação ao ácido graxo original. Já na descarboxilação direta (2.1) a reação resulta em um hidrocarboneto olefínico com menos um átomo de carbono em relação ao ácido graxo de origem, por meio da remoção do grupo carboxila, formando ainda monóxido de carbono e água. Na descarboxilação indireta, representada pela Reação (2.2), a eliminação do grupo carboxila ocorre pela adição de hidrogênio que leva à formação de um hidrocarboneto parafínico com um átomo de carbono a menos em relação ao ácido graxo original, além de monóxido de carbono e água. Na rota de hidrogenação (ou desidratação), a remoção do grupo carboxila é realizada por meio da reação com hidrogênio, resultando na produção de água e parafinas lineares com o mesmo número de átomos de carbono presentes no ácido graxo correspondente. Esse processo pode ser observado na reação (3). (Snare., *et al.*, 2006).

No mecanismo de descarboxilação dos ácidos graxos, há a remoção simultânea de dois átomos de oxigênio do grupo funcional carboxila, que resulta na liberação de dióxido de carbono (CO₂) e na produção de alcanos com número ímpar de átomos de carbono. Por outro lado, tanto na descarboxilação quanto na hidrogenação, a desoxigenação acontece através de reações sequenciais que levam à produção de intermediários parcialmente desoxigenados, como álcoois e aldeídos. Na descarboxilação, há a hidrogenação do grupo hidroxila, formando água, seguida pela remoção da carbonila, formando monóxido de carbono (CO) e alcanos com

número ímpar de carbonos. Já na hidrogenação, dois átomos de oxigênio são removidos por meio de hidrogenações sequenciais, formando duas moléculas de água e formando alcanos com um número par de carbonos.

Os mecanismos de descarboxilação e descarbonilação apresentam outro problema, que é a possibilidade de reações paralelas de metanação com os óxidos de carbono presentes no meio, resultando no consumo excessivo de hidrogênio, conforme demonstrado nas equações 4 e 5. Isso aumenta o custo do processo e diminui o rendimento. Portanto, é essencial controlar cuidadosamente as condições do sistema para minimizar a ocorrência desses mecanismos indesejáveis e aumentar a eficiência e a viabilidade da produção de diesel verde por meio do hidrocessamento de óleo vegetal (Eder., *et al.*, 2016).



Dessa forma, dentre as rotas analisadas, observa-se que a reação (3) de hidrogenação, libera apenas água e preserva o número de carbono do ácido graxo original, diferentemente dos outros mecanismos que formam dióxido ou monóxido de carbono. Assim, a reação 3 se torna a rota preferível, pois facilita a purificação dos componentes, mantém o número de carbonos, e reduz a formação de substâncias tóxicas com impacto ambiental.

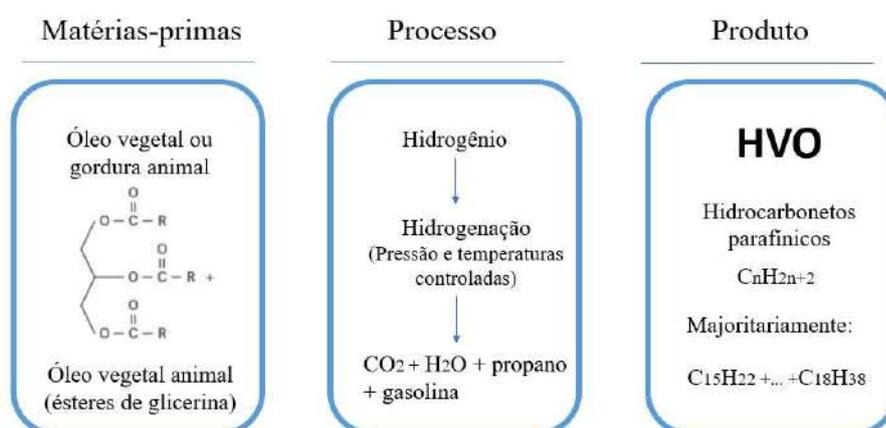
A seleção do catalisador é uma etapa crucial na busca pela otimização do processo de HDO, pois pode influenciar significativamente nas taxas de conversão e seletividade das reações químicas envolvidas (Arun., *et al.*, 2015). O tipo de catalisador utilizado pode afetar as rotas possíveis para cada composto, favorecendo ou prejudicando a conversão para os produtos desejados. É importante que o catalisador seja quimicamente, termicamente e mecanicamente estável, apresentando um baixo nível de desativação e não contaminando os produtos finais.

Para que a reação de HDO aconteça, é fundamental que duas condições sejam atendidas: uma boa adsorção da molécula reagente na superfície do catalisador e a existência de hidrogênio ativo em quantidade suficiente próximo à molécula adsorvida (Furimsky, 1983). É válido ressaltar que a porosidade do suporte é um fator crucial a ser considerado na seleção do catalisador, principalmente quando se trata de óleos compostos por moléculas volumosas. Essa característica é fundamental para garantir a eficiência do processo de HDO desses materiais (Arun, *et al.*, 2015).

Dentre os catalisadores amplamente utilizados na HDO, destacam-se os metais nobres, tais como Pb e Pt; os sulfetos metálicos suportados, como NiMo, CoMo e NiW; e materiais

porosos ativos, como zeólitas. Os metais nobres apresentam alta seletividade nas reações de descarboxilação e descarbonilação, consumindo moderada quantidade de hidrogênio. Contudo, seu uso pode gerar baixos rendimentos na presença de enxofre e água, além de serem bastante dispendiosos. Já os catalisadores de sulfeto metálicos suportados possuem seletividade para a hidredesoxigenação de triacilgliceróis, a depender das condições de pressão e temperatura. A porosidade do suporte é um fator importante a ser considerado na seleção do catalisador, sobretudo quando se trabalha com óleos constituídos de moléculas volumosas (Eder, *et al.*, 2016). A Figura 46 a seguir representa o processo produtivo simplificado de hidrogenação de óleos vegetais:

Figura 46 - Processo produtivo HVO



Fonte: ibp, 2023. (Adaptado)

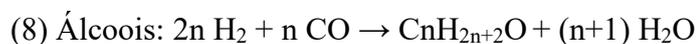
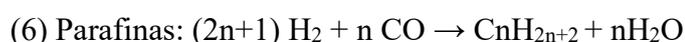
4.1.1.1.2 Gás de síntese proveniente de biomassa, via processo Fischer-Tropsch;

De acordo com a definição do IEA (2007), biomassa é todo material orgânico de origem animal ou vegetal que está disponível de forma renovável, incluindo florestas plantadas, culturas energéticas, resíduos florestais e agrícolas, resíduos sólidos de origem animal, resíduos sólidos urbanos, e outras fontes. A biomassa pode ser convertida em calor diretamente ou em intermediários de energia (sólidos, líquidos e gasosos) para posterior geração de calor, eletricidade e biocombustíveis.

A síntese de Fischer-Tropsch é um método amplamente utilizado desde os anos 1920 para a produção de hidrocarbonetos através de uma reação catalítica exotérmica que converte gás de síntese em hidrocarbonetos. Dependendo da matéria-prima utilizada para produzir o gás de síntese, que pode ser biomassa, carvão ou gás natural, o processo pode ser renovável ou não.

Segundo a ANP a matéria-prima regulamentada para produção de diesel verde via processo Fischer-Tropsch está restrita à biomassa.

A síntese de Fischer-Tropsch é baseada na polimerização do monóxido de carbono, na qual o gás de síntese reage na presença de um catalisador, normalmente de ferro ou cobalto para produção de hidrocarbonetos ou produtos oxigenados. O processo ocorre em duas etapas: formação de radicais monômeros e a polimerização para produzir hidrocarbonetos (Bezerra, 2015). Durante o processo, diversas reações ocorrem, mas as principais envolvem a formação de parafinas, olefinas e álcoois, como mostrado nas equações abaixo:



O monóxido de carbono e o hidrogênio são colocados em um reator de síntese na presença de um catalisador, sob condições de alta pressão e temperatura. O catalisador ajuda na quebra da ligação entre o monóxido de carbono e o hidrogênio, permitindo que eles se reorganizem em hidrocarbonetos mais complexos, como o diesel verde.

De acordo com Bezerra (2015), além das reações apresentadas, há também a formação de metano devido às mesmas condições descritas na equação (4) do tópico anterior. Por esse motivo, a utilização dessa rota não é considerada ideal, uma vez que seriam necessários métodos para reduzir a formação de metano, além da dificuldade em remover impurezas retidas no catalisador, o que pode resultar em um envenenamento rápido.

Para abranger todo o processo produtivo, é necessário, primeiramente, gerar o gás de síntese e, posteriormente, convertê-lo em hidrocarbonetos adequados às características do diesel. No entanto, o processo enfrenta uma dificuldade considerável na etapa de geração do gás de síntese, que é complexa e de difícil controle. É preciso manter uma proporção específica entre H_2/CO para que os hidrocarbonetos resultantes sejam adequados às especificações do diesel. Além disso, a geração de gás de síntese representa cerca de 70% do custo total do processo, conforme afirmado por Farias (2007).

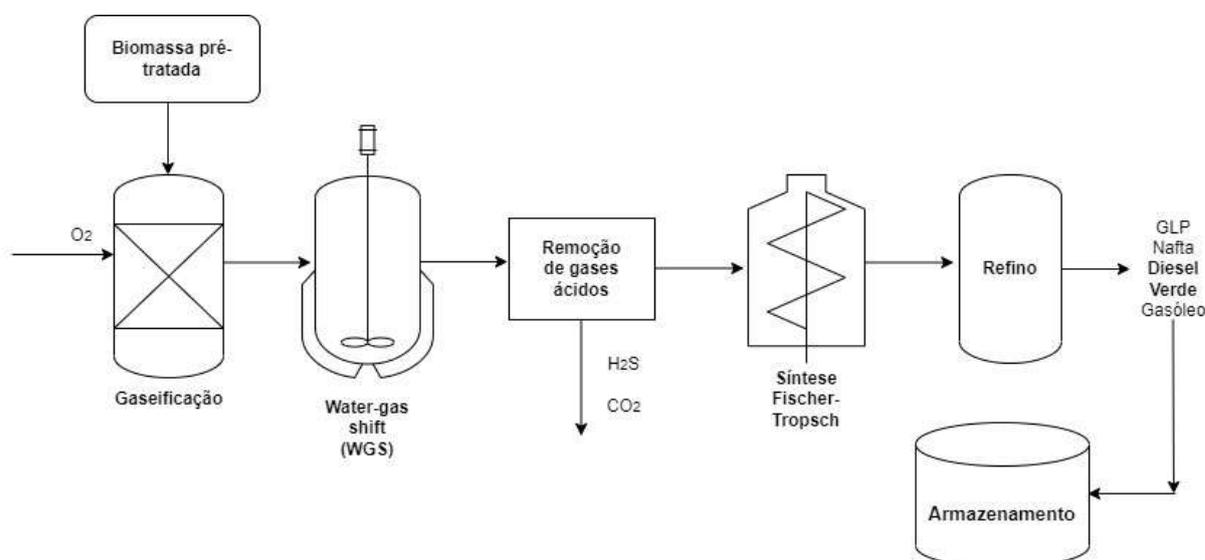
Para incorporar a biomassa no processo, é necessário gaseificá-la, e esse processo envolve reações com ar, oxigênio ou vapor em uma faixa de temperatura de 500 a 1500 °C e requer uma quantidade considerável de energia para atingir essas condições. Além disso, a eficiência da gaseificação geralmente fica em torno de 50% a 70% (Eder, *et al.*, 2021).

Para síntese de diesel verde é necessário que a biomassa passe pela etapa de gaseificação, pois ela é composta principalmente de celulose, lignina e hemicelulose, que são macromoléculas complexas. Essas macromoléculas precisam ser quebradas em moléculas menores, como monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), que como visto, são os precursores necessários para a produção de hidrocarbonetos por meio da síntese de Fischer-Tropsch.

A gaseificação é um processo que permite a quebra dessas moléculas complexas da biomassa, produzindo um gás de síntese rico em CO e H₂, que pode ser posteriormente convertido em hidrocarbonetos por meio da síntese de Fischer-Tropsch. Portanto, a gaseificação da biomassa é um passo crucial para a produção de diesel verde a partir de fontes renováveis. (Tagomori, 2017).

O processo de produção de diesel verde em escala industrial por meio da síntese de Fischer-Tropsch usando biomassa como matéria-prima é composto por várias etapas. Na Figura 47 segue O fluxograma resumido das principais etapas para produção:

Figura 47 - Fluxograma simplificado da produção de diesel verde via síntese de Fischer-Tropsch



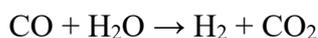
Fonte: Elaboração própria.

A preparação da biomassa envolve sua coleta, seleção e processamento para que seja adequada ao processo de gaseificação. Essa preparação pode incluir secagem, trituração e outras operações.

1- Gaseificação: a biomassa é alimentada em um reator de gaseificação, onde é convertida em um gás de síntese rico em monóxido de carbono e hidrogênio. Esse gás é então limpo e purificado para remover impurezas, como alcatrão e enxofre.

2- *Water-Gas Shift (WGS)*: é necessário realizar um ajuste de composição antes da reação de Fischer-Tropsch, e esse ajuste é realizado na etapa conhecida como Water-Gas Shift. O ajuste da composição do gás de síntese é feito por meio do ajuste da razão H₂:CO

Em escala industrial essa etapa é realizada em dois reatores, onde na primeira etapa, o CO é convertido em CO₂ e hidrogênio, e na segunda etapa, o CO₂ é reduzido a mais hidrogênio. Na primeira etapa, o gás de síntese é misturado com vapor d'água e passa por um reator com catalisador de óxido de ferro a uma temperatura entre 350-450°C e pressão entre 15-30 bar. O vapor d'água reage com o CO do gás de síntese, produzindo hidrogênio e CO₂ de acordo com a equação química:



Na segunda etapa, o CO₂ formado na primeira etapa reage com o hidrogênio remanescente do gás de síntese em um segundo reator com catalisador à base de cobalto a uma temperatura de cerca de 250-350°C e pressão de 15-30 bar. Nessa etapa, a reação química produz mais hidrogênio e CO₂, de acordo com a equação:



Ao final do processo de WGS, a relação H₂/CO do gás de síntese é aumentada, o que favorece a produção de hidrocarbonetos desejados durante a síntese de Fischer-Tropsch.

E como diferentes processos de conversão do gás de síntese demandam diferentes ajustes de composição, para a reação em questão, a relação ótima de gás de síntese é 2:1 (H₂:CO) (Tagomori, 2017).

3- Remoção de gases ácidos: Entre as várias etapas de transformação da biomassa para a produção de biocombustíveis líquidos, um procedimento crucial é a remoção de enxofre e compostos sulfurados contidos no gás de síntese originado da gaseificação da biomassa (como H₂S, COS, CS₂, mercaptanas e sulfitos orgânicos), pois estes causam a desativação dos catalisadores utilizados nas reações de Fisher-Tropsch.

As unidades de remoção de gases ácidos desempenham não apenas o papel de remover compostos sulfurados, mas também servem para separar o CO₂ do gás de síntese. Isso se deve

ao fato de que o CO_2 atua como um diluente para o gás de síntese, reduzindo sua reatividade durante a etapa de síntese.

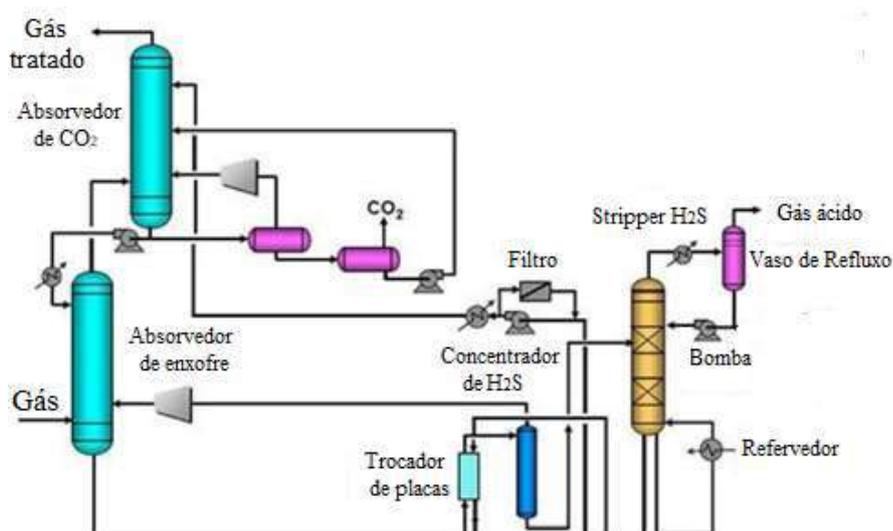
Os processos mais comuns empregados na fase de remoção de enxofre e captura de carbono em unidades de conversão avançada de biomassa através da gaseificação são os métodos de absorção física, incluindo o Processo Selexol e o Processo Rectisol.

- Processo Selexol:

O Selexol é um solvente físico que consiste em uma mistura de éteres de polietileno glicol, conhecido por sua alta capacidade de solubilização de gases ácidos, como H_2S , CO_2 e COS . Além disso, ele é caracterizado por sua estabilidade termoquímica e baixa pressão de vapor, o que evita perdas indesejáveis durante o processo de remoção de gases ácidos.

O processo Selexol é uma tecnologia de absorção física que consiste na remoção seletiva de gases ácidos, como o CO_2 , do gás de síntese por meio de solventes. Nesse processo, o gás de síntese é enviado para uma torre de absorção, onde é lavado com um solvente líquido seletivo, geralmente o dimetil éter de polietilenoglicol (PEG), que tem afinidade com gases ácidos. Em seguida, o gás purificado é liberado na parte superior da torre, enquanto o solvente com os gases ácidos dissolvidos é retirado na parte inferior. O solvente é regenerado em uma unidade separada, onde o CO_2 é removido por destilação e o solvente recuperado é enviado de volta para a torre de absorção (Tagomori, 2017). A Figura 48 representa o fluxograma do processo Selexol:

Figura 48 - Processo Selexol

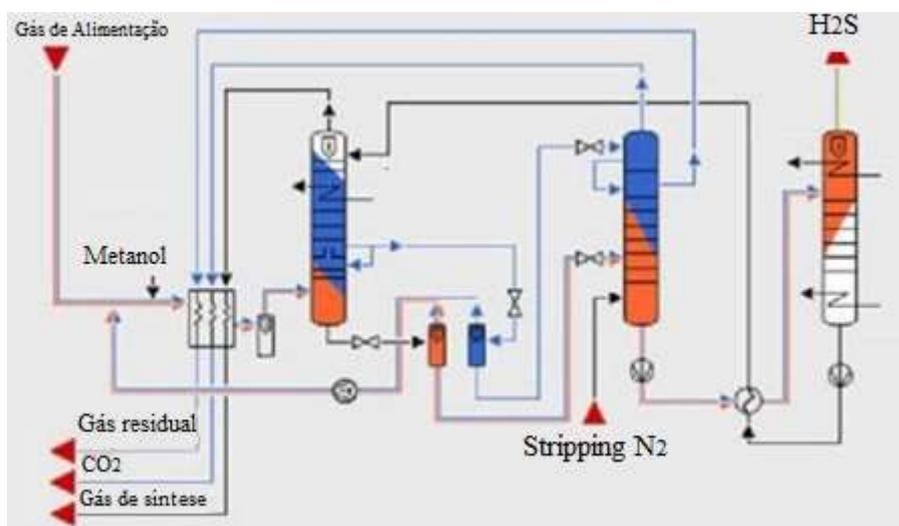


Fonte: Tagomori, 2017.

- Processo Rectisol:

Já o processo Rectisol é outra tecnologia de absorção física que também utiliza solventes para remover gases ácidos do gás de síntese, incluindo CO_2 , H_2S e COS . Nesse processo, o gás de síntese é lavado com um solvente líquido, geralmente metanol, em uma torre de absorção. O solvente com os gases ácidos dissolvidos é então retirado na parte inferior da torre e enviado para uma unidade de regeneração. Na regeneração, o solvente é aquecido em uma coluna de destilação, onde os gases ácidos são removidos por evaporação e o solvente recuperado é enviado de volta para a torre de absorção. O processo descrito está representado na Figura 49 abaixo:

Figura 49 - Processo Rectisol



Fonte: Tagomori, 2017.

4- Síntese de Fischer-Tropsch: o gás de síntese purificado é alimentado em um reator de síntese de Fischer-Tropsch, onde é convertido em hidrocarbonetos, que podem ser refinados para produzir diesel verde. A síntese de Fischer-Tropsch é um processo químico que envolve uma série de reações para converter o gás de síntese em uma mistura de hidrocarbonetos, incluindo alcanos e alcenos de diferentes comprimentos de cadeia. Essas reações incluem a adsorção e dissociação dos reagentes (CO e H_2) na superfície do catalisador, que reagem para formar iniciadores de cadeia. Em seguida, esses iniciadores de cadeia continuarão a reação de propagação e terminação das cadeias, resultando na formação de hidrocarbonetos mais complexos.

Por fim, os produtos são liberados através da dessorção do catalisador. Os catalisadores utilizados na Síntese de Fischer-Tropsch devem apresentar alta atividade de hidrogenação para converter o monóxido de carbono em hidrocarbonetos. Existem quatro tipos de catalisadores que possuem essa característica: ferro (Fe), cobalto (Co), níquel (Ni) e rutênio (Ru). O níquel

(Ni) tende a promover a formação de metano, como em um processo de metanação; portanto, geralmente não é desejável. O ferro (Fe) tem um custo menor e uma maior atividade de deslocamento de água-gás e, portanto, é mais desejável para um gás de síntese de razão hidrogênio/monóxido de carbono (H_2 /CO) mais baixo. O cobalto (Co) é mais ativo e geralmente preferido sobre o rutênio (Ru) por causa do custo alto do Ru. Em comparação com o ferro, o Co tem muito menos atividade de troca de gás por água e é muito mais caro.

Devido à sua alta liberação de energia (reação exotérmica), o processo de síntese de Fischer-Tropsch requer a remoção eficiente do calor produzido durante a reação, a fim de evitar a desativação do catalisador e a formação indesejada de metano. As condições operacionais, como temperatura, pressão, composição do gás de síntese e catalisador, podem ser ajustadas para controlar o tamanho das cadeias carbônicas produzidas, permitindo a produção de biocombustíveis líquidos "*drop-in*" com hidrocarbonetos idênticos aos produzidos a partir do petróleo.

5- Refino: os hidrocarbonetos produzidos na etapa anterior são refinados para produzir diesel verde de alta qualidade. O processo de refino envolve várias etapas, como hidrogenação, desidrogenação, isomerização e craqueamento, para ajustar a qualidade do produto final.

6- Armazenamento e distribuição: o diesel verde é armazenado em tanques e distribuído para postos de combustíveis e outros clientes.

O processo de produção de diesel verde via Fischer-Tropsch usando biomassa como matéria-prima é complexo e exige investimentos significativos em infraestrutura e equipamentos. No entanto, é uma tecnologia promissora que pode ajudar a reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar as emissões de gases de efeito estufa.

4.1.1.1.3 Fermentação de carboidratos presentes em biomassa

A fermentação é um processo bioquímico em que microrganismos, como bactérias e leveduras, convertem açúcares e outros compostos orgânicos em produtos finais, como álcool e dióxido de carbono. Durante o processo de fermentação, os microrganismos usam os açúcares como fonte de energia, quebrando as ligações químicas entre os átomos de carbono e produzindo energia para suas próprias necessidades metabólicas. Como resultado, os açúcares são convertidos em produtos finais diferentes, dependendo do tipo de microrganismo e das condições ambientais em que ocorre a fermentação.

Existem muitos tipos diferentes de fermentação, incluindo a fermentação alcoólica, que produz etanol a partir de açúcares, e a fermentação láctica, que produz ácido láctico. Na produção de biocombustíveis, como o diesel verde, a fermentação é usada para converter

açúcares em hidrocarbonetos, que são quimicamente semelhantes aos hidrocarbonetos encontrados no petróleo. Esse processo pode ser feito por meio de microrganismos geneticamente modificados que são projetados para produzir hidrocarbonetos específicos, como o farneseno, que pode ser usado como um combustível renovável.

Em outras palavras, o método de produção de hidrocarbonetos na faixa do diesel pode ser alcançado através do uso de microrganismos geneticamente modificados capazes de converter material orgânico em diesel. Entre os microrganismos utilizados, destaca-se a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, comumente usada na indústria sucroalcooleira para transformar açúcar de cana em etanol. Essa levedura pode ser modificada geneticamente para manipular seu metabolismo, permitindo que ela produza farneseno, um hidrocarboneto ramificado e insaturado com propriedades semelhantes ao diesel (Eder, *et al.*, 2021).

A fermentação do caldo de cana para a síntese de diesel verde é um processo complexo que envolve diversas etapas. Em geral, o processo começa com a extração do caldo de cana, que é uma mistura de água e açúcares provenientes da cana-de-açúcar. Esse caldo é então purificado e filtrado para remover impurezas e microrganismos indesejáveis.

Em seguida, o caldo de cana é submetido a um processo de fermentação por leveduras geneticamente modificadas, como a *Saccharomyces cerevisiae*, projetadas para produzir ácidos graxos de cadeia longa ao invés de etanol. Durante a fermentação, as leveduras consomem o açúcar presente no caldo de cana e produzem ácidos graxos como resultado. A modificação genética é feita por meio da inserção de genes específicos na levedura, que codificam enzimas responsáveis pela síntese de ácidos graxos. Com essa modificação genética, a levedura passa a produzir ácidos graxos de cadeia longa durante a fermentação do caldo de cana.

Os ácidos graxos produzidos pelas leveduras são então submetidos a um processo de hidrogenação catalítica, que transforma esses ácidos graxos em hidrocarbonetos de cadeia longa. Esses hidrocarbonetos são então purificados e refinados para obter o diesel verde final.

As etapas do processo de fermentação do caldo de cana para a síntese de diesel verde podem variar de acordo com a técnica utilizada e os tipos de organismos modificados geneticamente envolvidos no processo. No entanto, de forma geral, o processo pode envolver as seguintes etapas:

- 1- Preparação do caldo de cana: o caldo de cana é extraído das plantas e pode ser submetido a tratamentos físicos e químicos para remover impurezas e reduzir a concentração de compostos inibidores de fermentação.
- 2- Fermentação do caldo de cana: o caldo de cana é fermentado por leveduras geneticamente modificadas capazes de produzir ácidos graxos em vez de etanol. As leveduras consomem

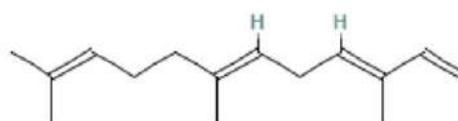
os açúcares presentes no caldo de cana e produzem ácidos graxos como o ácido oleico e o ácido palmítico.

- 3- Extração dos ácidos graxos: os ácidos graxos produzidos pelas leveduras são extraídos do meio de fermentação por meio de técnicas de extração química, como a extração com solventes orgânicos.
- 4- Hidrogenação dos ácidos graxos: os ácidos graxos extraídos são hidrogenados para produzir hidrocarbonetos de cadeia longa, que são semelhantes ao diesel. A hidrogenação é realizada em alta pressão e temperatura.
- 5- Purificação do diesel verde: o diesel verde produzido é purificado por meio de técnicas de separação, como a destilação fracionada e a cromatografia, para remover impurezas e garantir a qualidade do produto final.

Uma das vantagens desse método é que, no cenário brasileiro de processamento de cana-de-açúcar, poucas alterações seriam necessárias no processo convencional. No entanto, o processo ainda não é viável industrialmente devido à sua baixa conversão e às complexidades das condições biológicas da levedura (Eder, *et al.*, 2021). Por isso, rotas fermentativas têm sido extensivamente estudadas nos últimos anos para aumentar o conhecimento dos fenômenos envolvidos e garantir a viabilidade industrial desse processo.

Atualmente, a regulamentação do diesel verde, a ANP considera para processos fermentativos exclusivamente o caldo de cana como matéria-prima. A Figura 50 abaixo representa estrutura do farneaseno.

Figura 50 – Estrutura química do farneaseno



Fonte: National Library of Medicine.

4.1.1.1.4 Oligomerização de álcool etílico (etanol) ou isobutílico (isobutanol)

Esta rota é conhecida comercialmente como ATJ (*alcohol to jet*), empregada na produção de diesel e querosene de aviação renováveis. No caso de biocombustíveis, o exemplo de oligomerização é a formação de combustíveis renováveis, de estrutura similar aos fósseis, a partir de álcool de cadeia curta. Diferentemente da polimerização, essa reação possui um número máximo de monômeros que podem ser adicionados.

De acordo com a Resolução ANP nº 856 de 6 de dezembro de 2021, o biocombustível produzido pela rota ATJ é definido como:

“Querosene parafínico sintetizado a partir de álcool etílico ou isobutílico, processado através de desidratação, oligomerização, hidrogenação e fracionamento”.

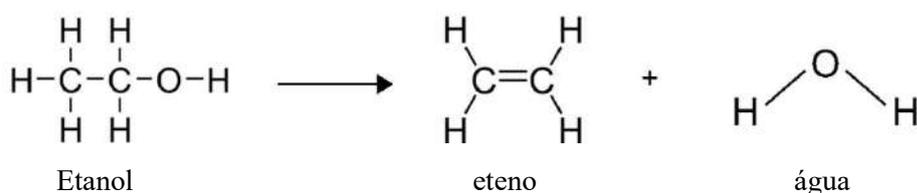
Portanto, é permitido o uso de apenas dois tipos de álcoois como precursores, o álcool etílico e o álcool isobutílico.

A Resolução ANP Nº 842 de 14 de maio de 2021 também aprovou essa tecnologia para a produção de diesel verde, com a possibilidade de ajustes nas condições de oligomerização para obter hidrocarbonetos na faixa do diesel verde (C₁₆-C₂₂).

O método de obtenção de hidrocarbonetos para a produção de querosene de aviação ou diesel verde, através da tecnologia ATJ, começa com a desidratação intramolecular do álcool. Essa conversão envolve a utilização de um catalisador ácido para transformar, por exemplo, o etanol em etileno (Reação 1). Em seguida, o etileno é transformado em hidrocarbonetos renováveis por meio da oligomerização (Reação 2). Nessa reação o etileno é transformado em moléculas mais longas de hidrocarbonetos, através da ligação de duas ou mais unidades de eteno.

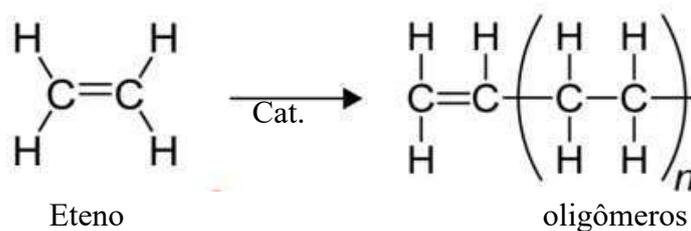
Essa reação pode ser catalisada por diversos tipos de catalisadores, incluindo catalisadores ácidos ou de metal, e ocorre geralmente em temperaturas elevadas e pressões moderadas. Depois de serem formados, os hidrocarbonetos são separados por destilação e submetidos à hidrogenação (Reação 3) para produzir os biocombustíveis parafínicos sintéticos de álcool. (Albuquerque, *et al.*, 2019; Vinhado, *et al.*, 2019). A Figura 51 apresenta a reação de desidratação do etanol, a Figura 52 mostra a reação de oligomerização do etileno e a Figura 53 apresenta a reação de hidrogenação:

Figura 51 – Reação de desidratação intramolecular do etanol



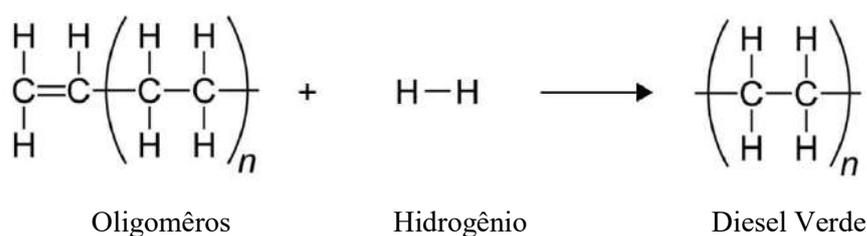
Fonte: Resende., *et. al.*, 2011.

Figura 52 – Reação de oligomerização do etileno



Fonte: Resende., *et. al.*, 2011.

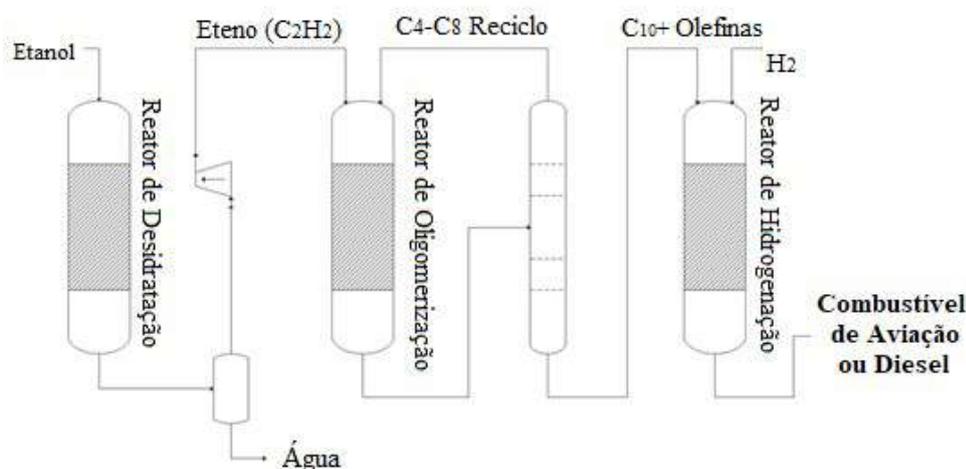
Figura 53 – Reação de Hidrogenação



Fonte: Resende., *et. al.*, 2011.

As olefinas são o principal produto da reação de oligomerização, e devido a sua baixa estabilidade não podem ser usadas diretamente como combustível para jatos, sendo necessárias etapas adicionais no processo de produção do oligômero. Uma opção é realizar uma hidrogenação para converter as olefinas em parafinas ou em isoparafinas. Já quando se deseja produzir diesel verde, que é predominantemente composto por parafinas, apenas a etapa de hidrogenação é necessária para saturar as ligações duplas. Na Figura 54 a seguir é possível verificar como se dá o processo de conversão do etanol em combustível:

Figura 54 - Processo geral de conversão do etanol em combustíveis



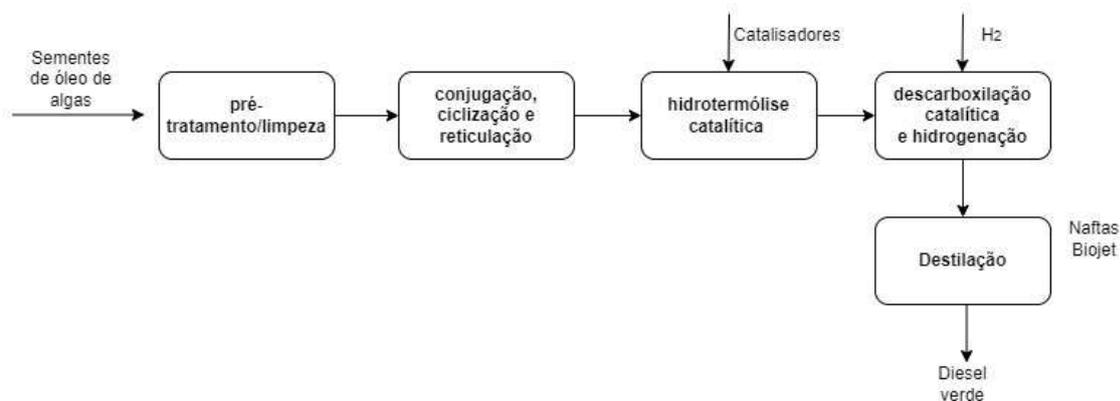
Fonte: Resende., *et. al.*, 2011.

4.1.1.1.5 Hidrotermólise catalítica de óleo vegetal, óleo de algas, óleo de microalgas, gordura animal e ácidos graxos de biomassa.

A hidrotermólise catalítica (HC) é um processo químico que envolve a conversão de compostos orgânicos em outros compostos por meio da adição de água e calor em presença de um catalisador em condições de temperatura e pressão elevadas, geralmente 210 bar e 400-475°C. Nesta rota ocorre a produção de um sólido, gases, uma fase líquida e um bio-óleo (óleo de hidrocarboneto bruto), o qual passa por um processo hidrocessamento, transformando-se em uma combinação de hidrocarbonetos que é submetida posteriormente a etapa de fracionamento. Especificamente, a hidrotermólise catalítica de óleos e gorduras pode ser usada na produção de biocombustíveis, como diesel verde.

Em geral, a rota de conversão de combustível via HC consiste nas etapas de pré-tratamento, conversão via HC e pós-refino. A etapa de pré-tratamento consiste na limpeza da matéria prima, seguida de conjugação, ciclização e reticulação, que visa melhorar as estruturas moleculares da matéria-prima. Após o pré-tratamento, ocorre a hidrotermólise catalítica que compreende as reações de craqueamento e hidrólise. A princípio, a biomassa úmida é alimentada ao processo na forma de polpa na presença de água e catalisadores. Em geral, a HC pode usar materiais orgânicos como lipídios, proteínas e carboidratos. Assumindo como exemplo que a biomassa de algas é usada como matéria-prima, então os açúcares livres, aminoácidos e polissacarídeos residuais serão hidrolisados. Os ácidos graxos livres, derivados de esteróides e pigmentos misturados com asfaltenos, formarão o bio-óleo hidrofóbico. As duas reações são seguidas por descarboxilação catalítica e reações de hidrogenação. Finalmente, as reações de hidrotreatamento e fracionamento pós-refinação produzirão alcanos por meio da conversão de cadeia linear, ramificada e ciclo-olefinas (Chong, *et. al.*, 2021). A Figura 55 abaixo apresenta o fluxograma resumido da hidrotermólise catalítica para produção de diesel verde:

Figura 55 - Fluxograma simplificado do processo de hidrotérólise catalítica na síntese de diesel verde



Fonte: Chong *et. al.*, 2021.

4.1.1.2 Cenário do diesel verde no Brasil

Pela Resolução ANP nº 842/2021 (ANP, 2021c) o diesel verde é definido como:

Biocombustível que atende às especificações técnicas contidas no Anexo desta Resolução, composto por hidrocarbonetos parafínicos, destinado aos motores do ciclo diesel, produzido pelas rotas indicadas no art. 2º, ou autorizado nos termos do § 1º do art. 2º, a partir de matérias-primas exclusivamente derivadas de biomassa renovável;

Esta mesma resolução estabelece a regulamentação da qualidade do diesel verde no Brasil e os requisitos para sua comercialização, que deve atender a especificações técnicas e requisitos de qualidade semelhantes aos do diesel fóssil.

Entre os requisitos estabelecidos pela resolução, estão a limitação dos teores de enxofre e compostos aromáticos, a exigência de um índice de cetano mínimo, além de especificações para o ponto de entupimento de filtros, estabilidade à oxidação, densidade, entre outros.

A Resolução ANP nº842/2021 é uma importante medida regulatória para garantir a qualidade e a segurança do diesel verde no mercado brasileiro, além de incentivar a produção e o uso de biocombustíveis no país.

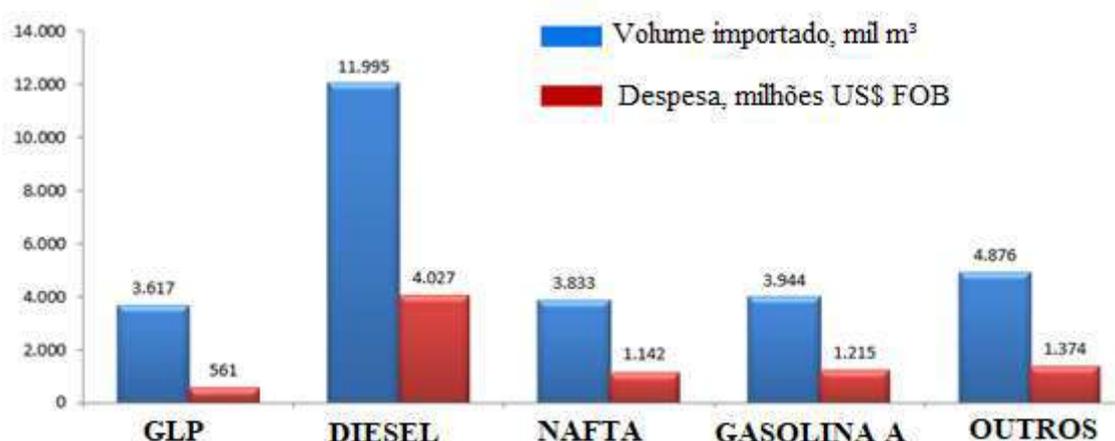
Além disso, a resolução mencionada estabelece as rotas e matérias-primas para a produção de diesel verde no Brasil, as quais foram previamente descritas no tópico anterior.

1. hidrotreatamento de óleo vegetal (in natura ou residual), óleo de algas, óleo de microalgas, gordura animal e ácidos graxos de biomassa, bem como de hidrocarbonetos bioderivados pelas microalgas *Botryococcus braunii*;
2. gás de síntese proveniente de biomassa, via processo Fischer-Tropsch;
3. fermentação de carboidratos presentes em biomassa;
4. oligomerização de álcool etílico (etanol) ou isobutílico (isobutanol);
5. hidrotérmólise catalítica de óleo vegetal (in natura ou residual), óleo de algas, óleo de microalgas, gordura animal e ácidos graxos de biomassa.

É fundamental ressaltar que a grande maioria dessas rotas emprega hidrogênio, seja durante o processo de conversão ou na hidrogenação do produto final. Infelizmente, os custos envolvidos na implantação e operação de processos de hidrogenação são significativos, exigindo investimentos volumosos no início da instalação. No entanto, há uma possibilidade de adaptação de usinas de biocombustíveis e refinarias de petróleo, que poderiam ser convertidas em biorrefinarias para produzir diesel verde.

Por outro lado, o aumento dos preços das matérias-primas fósseis e seus derivados têm despertado o interesse de algumas empresas em estabelecer unidades de produção de biocombustível no país. O foco principal é atender à demanda nacional por diesel, que tem se tornado cada vez mais custosa devido à importação desse derivado nos últimos anos conforme ilustrado na Figura 56 abaixo:

Figura 56 - Participação, em volume e despesa, dos principais derivados importados – 2020



Fonte: ANP, 2021a.

No mês de novembro de 2021, o portal premium Visão Agro noticiou que as empresas Brasil BioFuels (BBF) e Vibra planejam realizar um investimento de aproximadamente R\$ 1,8 bilhão em um projeto inovador de produção de diesel verde (Udop, 2021).

Essas empresas firmaram um contrato de compra e venda de diesel verde, originado da primeira refinaria desse tipo a ser instalada no país. As empresas se unirão para construir a planta na Zona Franca de Manaus, sendo que a primeira fase do projeto tem previsão de iniciar operações em janeiro de 2025 (Udop, 2021).

Além do objetivo de diminuir a necessidade de importação, as empresas destacam que o investimento visa potencializar a descarbonização da economia e estimular o desenvolvimento da Região Amazônica. Com capacidade de produzir 500 milhões de litros de diesel verde anualmente, a usina se encontra em uma localização estratégica para distribuição em toda a região Norte do país, podendo inclusive fornecer para outras localidades do Brasil ou até mesmo para exportação (Udop, 2021).

A implantação da refinaria verde pela BBF faz parte do plano de verticalização agrícola da empresa, que se inicia no plantio da palma em áreas degradadas, passando pela produção do óleo vegetal e chegando até a manufatura do biocombustível. Até 2026, mais de 120 mil hectares de palma serão plantados em regiões definidas pelo Zoneamento Agroecológico da palma, garantindo matéria-prima para o projeto.

De maneira geral, estima-se que uma unidade de produção de hidrocarbonetos parafínicos, a partir de matérias-primas renováveis, possa produzir o HVO, o bioquerosene de aviação, uma mistura desses, além da bionafta e do bio-GLP. Com uma capacidade de produção de 500 milhões de litros por ano e um fator de utilização de 70%, a refinaria será capaz de suprir 0,67% do total de diesel A importado pelo Brasil (0,33% da demanda total do combustível fóssil) em um período de dez anos. Com base nas necessidades de importação de diesel indicadas em relatórios anteriores, o diesel verde pode ser uma alternativa viável para o mercado de combustíveis do ciclo Diesel (CNPE, 2020).

Além disso, o país tem potencial para ser um grande produtor de biomassa, o que pode contribuir para a expansão do diesel verde. Com a disponibilidade de matéria-prima adequada e investimentos em infraestrutura e pesquisa, o Brasil pode desempenhar um papel importante no desenvolvimento e na produção de diesel verde de segunda geração.

Em suma, o cenário atual no Brasil mostra um aumento significativo no interesse e investimento em diesel verde como uma alternativa mais sustentável e econômica ao diesel fóssil. Espera-se que essa tendência continue a crescer nos próximos anos, impulsionada tanto pelas políticas governamentais quanto pelas iniciativas privadas.

4.1.1.3 Cenário do diesel verde na Argentina

Atualmente, não há produção de diesel verde na Argentina. Embora algumas empresas petrolíferas locais estejam conduzindo projetos de viabilidade, a política e as condições econômicas do país não são favoráveis para esse tipo de investimento. Segundo especialistas, o setor de esmagamento de soja na Argentina está negociando com o governo nacional para obter uma cota reduzida nos Estados Unidos, com o objetivo de exportar diesel verde e/ou óleo vegetal para ser utilizado na produção do biocombustível nos Estados Unidos (USDA, 2022).

Uma usina de biodiesel em Rosário criou uma tecnologia para produzir biocombustível de alta qualidade de esgoto, tornando-se o único desenvolvimento comercial pré-piloto de biocombustíveis avançados conhecido na Argentina. No país, poucas organizações se dedicam à pesquisa de biocombustíveis e energias renováveis, dentre elas o INTA (Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária), YTec, uma joint venture entre a empresa nacional de petróleo YPF e a agência nacional de ciência e tecnologia Conicet, além de universidades estatais e privadas. Entretanto, a pesquisa é limitada em escopo, com foco em resíduos para a produção de biocombustíveis, restos de milho e sorgo para bioetanol de segunda geração, hidrogênio verde, e desenvolvimento de biocombustíveis a partir de algas e plantas como as palmeiras *Jatropha* e *Acrocomia*. Recentemente, uma grande usina de biodiesel em Rosario desenvolveu um biodiesel de segunda geração usando o processo RAUPE (Renewable Advanced Unique Premium Energy), com apoio do Ministério da Ciência e uma universidade pública (USDA, 2022). Biodiesel de segunda geração se refere ao biodiesel produzido a partir de outras fontes de matérias-primas que não competem com as utilizadas na alimentação humana, como por exemplo as algas unicelulares.

4.1.1.4 Cenário do diesel verde no Paraguai

A expectativa é que o Paraguai se torne um dos principais produtores de diesel verde da América Latina com seu novo empreendimento em desenvolvimento: projeto Ômega Green. A Ômega Green será a primeira planta de biocombustíveis avançados do hemisfério sul, será construída no Paraguai pela ECB (Erasmio Carlos Battistella) Paraguay, integrante do ECB Group, sendo o maior investimento privado da história do Paraguai, com previsão de conclusão em 2025. De acordo com o site BiodieselBR, o governo paraguaio concedeu um decreto de Zona Franca em janeiro de 2020, garantindo a segurança jurídica e as condições legais do projeto por 30 anos. Essa decisão governamental deve contribuir para a competitividade econômica do projeto e reduzir os custos de construção (Biodieselbr, 2020b).

O presidente do Paraguai emitiu um decreto que concede regime de Zona Franca para a primeira planta de biocombustíveis avançados do hemisfério sul, o projeto Ômega Green. A concessão foi justificada pelo governo por várias razões, como: impulsionar o comércio exterior do país, agregar valor às matérias-primas produzidas no Paraguai, gerar empregos e trazer tecnologia avançada para o país. O projeto foi considerado de interesse nacional, trazendo ganhos significativos para a economia.

O governo também autorizou a compra de um terreno em Villeta para a instalação da planta de biocombustíveis, pois o terreno está em uma Zona de Segurança, às margens do rio Paraguai, na região de fronteira com a Argentina, com isso a planta contará com porto e terminal fluvial para a exportação dos biocombustíveis para os países signatários do Acordo de Paris, incluindo a Europa e a América do Norte. O objetivo é ajudar esses países a cumprir seus compromissos de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 28% em relação aos níveis de 2005. Além disso, a produção desses biocombustíveis irá contribuir para a transição da economia de descarbonização.

O complexo industrial terá capacidade de produção de aproximadamente 20 mil barris por dia de diesel verde, além de produzir uma combinação de biocombustíveis, como o querosene parafínico Sintético e o Green Naphtha, que será utilizado na fabricação de plástico verde e outros produtos químicos. O empreendimento deverá movimentar cerca de US\$ 1 bilhão em investimentos. (BiodieselBr, 2021).

Inicialmente, a planta ocuparia um terreno de 70 hectares, mas acabou transferida para uma área de 484 hectares a poucos quilômetros de distância do original. Ambos os terrenos ficam no município de Villeta. A mudança de terreno teve o objetivo de facilitar o recibo de insumos e a movimentação dos produtos finais, pois o novo local tem fácil acesso à Rodovia Villeta-Alberdi e ao Rio Paraguai de acordo com dados do BiodieselBr.

De acordo com Pedro Mancuello, vice-ministro do Comércio e Serviços do Ministério da Indústria e Comércio do Paraguai, a expectativa é que até 2024 o óleo diesel importado para uso em veículos seja substituído por diesel verde, feito localmente com óleo vegetal e hidrogênio. A Figura 57 a seguir representa o projeto da biorrefinaria em questão:

Figura 57 - Projeto da biorrefinaria Ômega Green.



Fonte: ECB Group, 2020.

4.1.2 Diesel RX da Petrobras

O RX é uma qualidade de combustível patentado pela Petrobras (patente PI0500591-4), que consiste no óleo diesel produzido com uma fração de matéria-prima renovável, representada pela letra “X”.

O novo diesel da Petrobras é produzido a partir de uma tecnologia conhecida como rota H-BIO, que combina hidrotratamento (HDT) e craqueamento térmico de óleos vegetais. Essa rota de produção tem como principal objetivo reduzir as emissões de poluentes dos combustíveis derivados do petróleo, além de aumentar a eficiência energética.

A tecnologia H-BIO foi desenvolvida pela própria Petrobras e é considerada uma evolução do processo de hidrotratamento tradicional, uma vez que utiliza óleos vegetais como matéria-prima. Esses óleos são obtidos a partir de culturas renováveis, o que significa que o novo diesel é mais sustentável do que o diesel convencional.

De acordo com a Petrobras, o novo diesel apresenta uma redução significativa nas emissões de material particulado e óxidos de nitrogênio (NOx), que são poluentes altamente prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Além disso, o novo diesel também apresenta um aumento no índice de cetano, o que significa uma melhoria na qualidade de combustão e no desempenho do motor.

4.1.2.1 Rota tecnológica: H-BIO

O H-BIO é uma tecnologia de coprocessamento desenvolvida pela Petrobras para produção de óleo diesel com uma parcela de matéria-prima renovável.

A rota H-Bio consiste em um coprocessamento de óleo vegetal com petróleo, onde, cerca de 5 a 18% de óleo vegetal ou gordura animal é adicionada ao óleo diesel antes de sua

passagem pelas unidades de hidrotratamento nas refinarias já existentes. O objetivo principal é reduzir o teor de enxofre e melhorar a qualidade do óleo diesel, como: aumento no número de cetano, que garante maior qualidade de ignição e a redução da densidade e no teor de enxofre, ajustando as características do combustível às especificações da ANP. O ganho na qualidade final do produto é proporcional ao volume de óleo vegetal empregado.

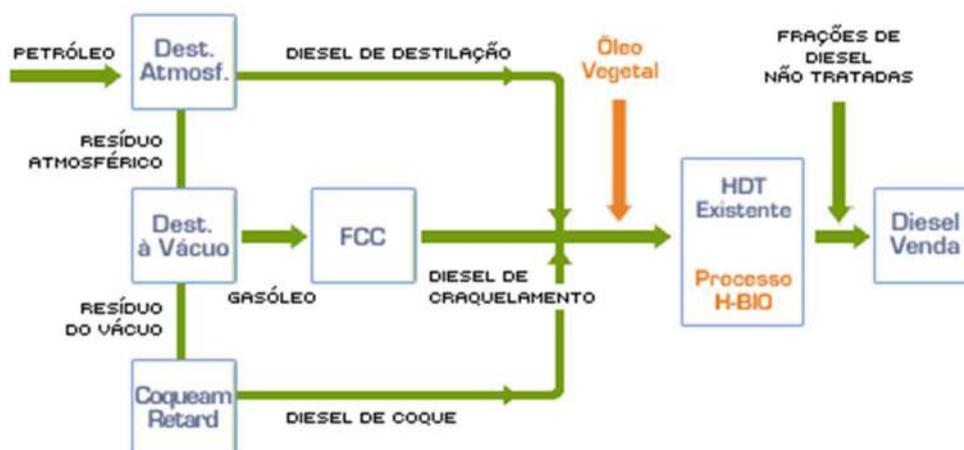
Nesse processo, ocorre uma hidroconversão catalítica, onde os triglicerídeos constituintes dos óleos vegetais e gorduras animais, sofrem uma decomposição por hidrogênio, processo esse conhecido como hidrogenólise. A reação ocorre em altas temperaturas e pressão na presença de um catalisador metálico formando uma mistura de n-parafinas idênticas aos do diesel de petróleo, além de propano.

O CENPES em escala piloto realizou testes da rota H-BIO com uma mistura de até 30% de óleo vegetal. Mas em escala industrial, a mistura caiu para 18%, isto porque foram encontradas algumas limitações operacionais na capacidade de hidrogenação em relação ao maior consumo de hidrogênio, visto que os equipamentos não foram originalmente projetados para tal consumo.

Os testes iniciais alcançaram bons rendimentos, com diferentes óleos vegetais e diferentes condições de operação, com pelo menos 95% v/v em diesel e 5% de diesel renovável (diesel R5), sem a geração de resíduos e com apenas uma pequena produção de propano. Para cada 100 litros de óleo de soja processados, são produzidos 96 litros de óleo diesel e 2,2 Nm³ de propano (Unop, 2007).

A Figura 58 abaixo apresenta um esquema simplificado do processo H-BIO em uma refinaria:

Figura 58 - Processo H-BIO típico de uma refinaria



Uma das grandes vantagens desse processo é em questões econômicas, uma vez que o óleo vegetal puro é utilizado como insumo na própria refinaria, não dependendo dos serviços das usinas de esterificação/transesterificação para a produção de biodiesel. Além disso, segundo a Petrobrás, a adição de 10% do diesel via H-BIO (R10) ao diesel mineral levaria o país a reduzir as importações de diesel. Incluindo também os benefícios ambientais, pois usando uma fonte renovável de energia diminui-se o percentual de enxofre no diesel.

Contudo, a rota só é viável em grandes refinarias de petróleo, que já possuem unidades de hidrotratamento capaz de processar óleo vegetais. Já para produtores de óleos vegetais é economicamente inviável a instalação de plantas de HDT para produção de diesel RX.

Em 2006, a Petrobrás anunciou, o início de testes do H-BIO, com o objetivo de começar a comercialização já no ano de 2007, porém com o aumento do preço do óleo de soja a estatal suspendeu a produção.

O processo H-BIO tem algumas vantagens em relação a outras tecnologias de produção de biodiesel, como a utilização de matérias-primas mais variadas e a produção de um diesel com propriedades mais próximas ao diesel fóssil.

Contudo, o H-BIO nada mais é do que um complemento à produção de diesel nas refinarias, mantendo as mesmas características do diesel de petróleo, mas tendo como benefício um menor teor de enxofre. É diferente do biodiesel, a produção do H-BIO é feita refinarias já existentes, e o biodiesel exige a construção de unidades próprias. Entretanto o biodiesel é de origem totalmente vegetal, e o H-BIO é uma mistura de diesel de petróleo com óleos vegetais.

4.1.2.2 Cenário do diesel RX no Brasil

A estatal iniciou em janeiro de 2022 testes com o novo RX , produzido na Refinaria Getúlio Vargas em três linhas de ônibus operadas pela Auto Viação Redentor, em Curitiba (epbr, 2022). Já em setembro de 2022 foi concluída a primeira venda do diesel R5, produzida na Refinaria Presidente Getúlio Vargas Repar em um total de 1.500m³. A unidade tem capacidade de coprocessamento de 114 mil toneladas ao ano de matéria-prima renovável (Petrobras, 2022).

A Petrobras tem planos de disponibilizar novos lotes do seu combustível diesel R5, que contém 5% de matéria-prima renovável de origem vegetal, no ano de 2023. Além disso, a companhia pretende ampliar a produção desse diesel com fonte renovável em outras refinarias localizadas na região Sudeste do país, e posteriormente, criar uma unidade exclusiva para o processamento da matéria-prima vegetal. Para atingir esse objetivo, a empresa pretende investir US\$ 600 milhões até 2026, por meio do Programa BioRefino (site NovaCana, 2022).

Um ponto muito positivo após a comercialização do diesel R5, foram as declarações feitas pelas distribuidoras que adquiriram o produto, sinalizando que houve uma redução da emissão de gases de efeito estufa, calculada de acordo com o volume adquirido pelas distribuidoras. Onde, o uso do diesel R5 evitou-se a emissão de 1 tonelada de CO₂ a cada 9,5 mil litros, comparando-se com o diesel 100% fóssil. Este cálculo foi realizado levando em consideração as emissões do combustível fóssil durante as etapas de extração, produção e uso. Para as emissões do conteúdo renovável, estão presentes os cálculos de produção da matéria-prima, extração do óleo vegetal, coprocessamento na refinaria e uso final e também os transportes intermediários entre todas essas etapas (site da Petrobrás, 2022).

Atualmente, o CNPE estuda a possibilidade do diesel renovável, produzido em unidades dedicadas ou por coprocessamento com óleos vegetais, ser considerado no mandato de biocombustível presente no óleo diesel comercializado. Dessa forma, se a proposta for aceita, o uso do novo combustível viabilizará a utilização de teores mais elevados de renováveis nos novos motores a diesel; possibilitando, também, o aumento da competitividade na oferta de biocombustíveis no Brasil (Petrobrás, 2022).

4.1.2.3 Cenário do diesel RX na Argentina e no Paraguai

Atualmente, a Petrobras não comercializa o diesel RX no mercado internacional. A produção e comercialização do combustível estão concentradas no mercado brasileiro e não há registros de exportações para outros países.

A Petrobrás tem interesse em aumentar a produção de biocombustíveis com intuito de reduzir as emissões de poluentes em seus processos de refino, mas ainda não há indicações de que o novo diesel patenteado pela estatal seja exportado para outros países, incluindo a Argentina e o Paraguai.

4.1.3 Hidrogênio misturado ao combustível diesel

O uso de hidrogênio como combustível vem sendo cada vez mais explorado em todo o mundo, como uma alternativa promissora para redução na emissão de gases poluentes.

A aplicação do hidrogênio em motores de combustão interna é uma alternativa interessante por uma série de motivos: a vantagem mais significativa reside na presença de uma indústria consolidada e uma infraestrutura de produção já existente e em funcionamento, o que torna a transição para essa tecnologia mais fácil. Além disso, a flexibilidade de combustível é uma vantagem significativa, já que esses motores podem ser adaptados para funcionar com

diferentes fontes de energia, desde que haja compatibilidade com o sistema de controle do motor.

O hidrogênio apresenta propriedades físico-químicas e de combustão bastante relevantes que podem ser utilizadas para aprimorar o desempenho e reduzir as emissões de poluentes em veículos automotores, porém as limitações em relação ao armazenamento podem restringir sua aplicação em motores de combustão interna. As características únicas de combustão do hidrogênio podem contribuir para melhorar a eficiência térmica e os níveis de emissão nos motores de combustão interna, proporcionando benefícios para a economia de combustível. A Tabela 12 abaixo apresenta algumas dessas propriedades, as quais podem ser comparadas com as características do diesel, gasolina e etanol.

Tabela 12 - Propriedades dos combustíveis

Propriedades	Diesel	Gasolina	Etanol	Hidrogênio
Difusividade no ar (cm ² /s)	-	0,08	0,02	0,63
Velocidade de chama (cm/s)	30	37-43	41	265-325
Limite de inflamabilidade (% em volume no ar)	0,7-5	1,4-7,6	4,3-19	4-75
Energia mínima de ignição (mJ)	-	0,24	0,7	0,02
Temperatura de autoignição (K)	530	533-733	831	858
Distância de extinção da chama (cm)	-	0,200	0,09	0,064
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	42,5	43,9	26,9	119,9
Densidade Energética (MJ/m ³)	36340	31240	15840	10,8

Densidade a 16 °C e 1,01 bar (kg/m ³)	833-881	721-785	785	0,0838
Relação ar-combustível estequiométrica	14,5	14,6	8,93	34,3
Número de octano	30	92-98	100-114	130

Fonte: Da Cunha, 2017.

Pela tabela 10 é possível observar que o hidrogênio possui um coeficiente de difusão maior do que outros combustíveis, o que pode aumentar a homogeneidade da mistura de ar e combustível. Com isso, a combustão torna-se mais eficiente e rápida, o que resulta em menor produção de poluentes, como hidrocarbonetos não queimados e fuligem. Além disso, a velocidade de frente de chama do hidrogênio é significativamente maior do que a dos combustíveis convencionais, o que diminui o tempo de combustão e possibilita um aumento da pressão média efetiva do motor, resultando em maior eficiência térmica e menor consumo de combustível.

O hidrogênio também apresenta um intervalo de inflamabilidade mais amplo, permitindo uma ampla gama de proporções de ar e combustível e a possibilidade de operar com pressões de cilindro superiores. Já os motores a gasolina têm limites de inflamabilidade mais estreitos, o que pode resultar em combustão incompleta ou lenta em proporções elevadas de ar. A adição de hidrogênio pode estender o limite de mistura pobre de combustíveis de hidrocarbonetos, de acordo com estudo realizado por Wang *et al.* (2012).

O coeficiente de ignição mínimo do hidrogênio é menor do que outros combustíveis, o que resulta em uma combustão mais estável e favorece o funcionamento do motor durante partidas a frio. Além disso, a temperatura de autoignição do hidrogênio é mais alta do que outros combustíveis, conferindo-lhe uma propriedade antidetonante maior. A detonação é a ignição súbita de uma grande quantidade de mistura não queimada na câmara de combustão. Esse fenômeno gera aumento de tensão e um ruído conhecido como batida de pino (Da Cunha, 2017)

A distância de extinção da chama para o hidrogênio (0,064 cm) é menor do que a apresentada pela gasolina (0,20 cm) e pelo etanol (0,09 cm), dessa forma, a adição de hidrogênio permite que a mistura de ar e combustível se estenda mais próximo da parede do cilindro antes de se apagar, favorecendo a combustão mais completa e reduzindo as emissões

de hidrocarbonetos. Entre todas as características favoráveis do hidrogênio para o uso em motores de combustão interna, a mais relevante é a ausência de átomos de carbono. Com isso, em relação aos combustíveis fósseis tradicionais, a combustão do hidrogênio não gera emissões de hidrocarbonetos, CO e CO₂ (Da Cunha, 2017).

O hidrogênio pode ser empregado como combustível exclusivo ou adicional em motores de combustão interna. Todavia, seu uso direto como único combustível pode ocasionar uma diminuição de até 30% na potência do motor, em razão de sua menor densidade energética por unidade de volume.

Os motores do ciclo diesel utilizando hidrogênio ainda estão em fase experimental, mas já existem alguns protótipos sendo testados. Esses motores são capazes de operar com uma mistura de hidrogênio e diesel, o que permite que a transição para essa nova tecnologia seja gradual.

De acordo com um estudo recente a injeção direta do hidrogênio como combustível principal misturado ao diesel como combustível piloto, foi investigada em motores de ignição por compressão. Os pesquisadores sustentaram que sua tecnologia é capaz de reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) em mais de 85% (Liu *et al.*, 2022).

Motores do ciclo diesel com hidrogênio são uma nova tecnologia que está sendo desenvolvida como uma alternativa mais sustentável aos motores a diesel convencionais. O fato de o hidrogênio ser um combustível que pode ser produzido a partir de fontes renováveis, como a energia solar ou eólica, torna essa tecnologia ainda mais atraente.

Atualmente, várias empresas e instituições de pesquisa estão investindo no desenvolvimento de motores do ciclo diesel capazes de operar com misturas de hidrogênio e diesel, esses estudos visam explorar os efeitos e benefícios potenciais dessa combinação de combustíveis renováveis como propõe os pesquisadores Winangun *et. al* (2023). Esses motores são conhecidos como motores de combustão interna de hidrogênio-diesel (H₂-diesel). Estudos de motores com *blends* de combustível diesel com hidrogênio apresentaram aproximadamente a mesma potência, rendimento térmico e eficiência dos motores testados com diesel (Silva, N.S. 2018). No entanto, existem desafios técnicos a serem superados, como a necessidade de uma infraestrutura de abastecimento de combustível e dificuldade de abastecimento de combustível de forma segura e eficiente. Além disso, a maioria dos estudos sobre motores H₂-diesel ainda é experimental e requer mais investigação para determinar sua viabilidade comercial.

Segundo Saravanan (2008), é possível utilizar o hidrogênio em motores ciclo diesel apenas misturado ao diesel, pois o hidrogênio apresenta alta temperatura e sua auto-ignição ocorrer em torno 585 °C, para que se tenha início a combustão. No que tange ao rendimento da

mistura hidrogênio-diesel, é necessário avaliar diferentes parâmetros, como: eficiência energética; quantidade de emissões geradas na combustão; quantidade de fumaça gerada; pressão no sistema (Angheben, 2013).

De acordo com alguns estudos, como o artigo científico de Carnieletto em 2011, o hidrogênio misturado ao óleo diesel provoca a diminuição da taxa de emissão de gases poluentes e maior eficiência térmica dos motores, resultando em um menor consumo de combustível ou consumo igual, perante outros pesquisadores (Carnieletto, 2011).

Saravanan (2008) e Lata (2011) conduziram experimentos em motores estacionários de ciclo diesel com diferentes combinações de hidrogênio. Os resultados mostraram que a pressão nos motores aumentou quando o hidrogênio foi injetado no sistema. A melhor eficiência térmica foi alcançada quando a mistura continha cerca de 30% do volume da injeção. Além disso, a utilização dessa mistura resultou em benefícios como a redução de fumaça e partículas produzidas pela combustão, bem como a diminuição das emissões de gases tóxicos

De acordo com Wu (2012), que realizou diversos testes de injeção de hidrogênio em motores do ciclo diesel utilizando o método de Taguchi - uma técnica de análise de parâmetros para determinar a melhor combinação de combustíveis sem a necessidade de realizar vários testes - foi possível obter uma economia de tempo de cerca de 67% nos experimentos. Wu concluiu que a mistura ideal para obter o melhor rendimento na combustão foi utilizar 30% de hidrogênio em volume juntamente com o diesel, resultando em uma redução de poluição de cerca de 14,52% e uma redução de fumaça de cerca de 42,28%. Além disso, a pressão do sistema aumentou em torno de 13 a 17% quando o hidrogênio foi injetado.

De acordo com Saravanan (2010), que conduziu experimentos em um motor do ciclo diesel, a adição de hidrogênio ao diesel resultou em um aumento de cerca de 15% na eficiência do motor. Além disso, houve uma redução significativa nos níveis de emissão de gases poluentes, enquanto os níveis de emissão de fumaça foram reduzidos em cerca de 100 %.

Um estudo realizado por Karagöz Y *et. al.* introduziu hidrogênio no coletor de admissão, como combustível aditivo na forma gasosa, através de injetores de gás. Além disso, o óleo diesel foi injetado no cilindro através do injetor de diesel e utilizado como ignitor. O teor de energia do hidrogênio injetado foi estabelecido em três níveis: 0%, 25% e 50% da energia total do combustível, onde 0% representa a operação com diesel puro (sem hidrogênio). Os testes foram feitos afim de avaliar a variação no desempenho do motor, emissões e características de combustão com adição de hidrogênio. Após os ensaios foi concluído que ao adicionar hidrogênio ao motor, em 25% e 50% da carga total de energia, há uma diminuição significativa nas emissões de fuligem, porém um aumento significativo nas emissões de óxidos de nitrogênio

é observado. À medida que a proporção de hidrogênio aumenta, há um leve aumento no número total de hidrocarbonetos não queimados, embora as emissões de CO₂ e gases de escape de CO diminuam consideravelmente. Além disso, tanto a pressão máxima de gás no cilindro quanto a taxa de liberação de calor de pico aumentam com a quantidade de hidrogênio adicionada.

Um dos principais benefícios dos motores a diesel com hidrogênio é a sua aplicabilidade em veículos de grande porte, como caminhões e ônibus, os quais são responsáveis por uma significativa parcela das emissões de gases de efeito estufa no setor de transporte. Além disso, a adoção do hidrogênio como combustível pode diminuir a dependência do petróleo e do diesel fóssil. Baltacioglu et al. (2016), relataram que a utilização de biodiesel enriquecido com gás hidrogênio em motores de combustão interna resultaram em um torque eficaz, pequeno aumento de potência, diminuição do consumo de combustível, diminuição nas emissões de CO e dióxido de carbono (CO₂) e aumento na emissão de NO_x quando comparados com o desempenho provocado ao se utilizar somente do combustível diesel.

No entanto, ainda há desafios a serem superados para que o uso de hidrogênio misturado ao diesel seja uma opção em larga escala. Um dos principais desafios é a disponibilidade de hidrogênio em larga escala e a preços competitivos, uma vez que sua produção ainda é custosa e depende de avanços tecnológicos para se tornar economicamente viável. Além disso, é necessário desenvolver motores mais eficientes e adaptar a infraestrutura existente para permitir a produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio uma vez que é devido à elevada temperatura de autoignição do hidrogênio, é extremamente desafiador operar um motor a diesel com esse combustível, apenas aumentando a taxa de compressão.

Apesar desses desafios, o uso de hidrogênio misturado ao diesel em motores do ciclo diesel tem potencial para revolucionar o setor de transporte de carga e passageiros, oferecendo uma alternativa mais limpa e eficiente em termos de consumo de combustível.

5 CONCLUSÕES

Através do presente estudo foi possível trazer uma revisão sobre o biodiesel, e sobre os motores de combustão interna com ignição por compressão e do diesel fóssil, além de analisar as novas qualidades de biocombustíveis para os motores de ciclo diesel nos países em estudo. Foi visto como o Brasil, a Argentina, e o Paraguai tem investido e avançado na busca por reduzir as emissões de poluentes visando a substituição de combustíveis fósseis frente a um cenário de transição energética e os desafios para tal.

Pôde-se concluir que o Brasil tem um papel importante no desenvolvimento de biocombustíveis, com uma longa tradição na produção de biodiesel, e o país possui incentivos governamentais que o coloca em uma posição privilegiada em relação a Argentina e o Paraguai. Além disso, o Brasil pretende iniciar a comercialização do diesel verde, além de já comercializar o novo diesel da Petrobras. Ou seja, o país continua buscando aprimorar suas tecnologias e expandir suas alternativas de biocombustíveis.

Já em relação a Argentina, o país também possui um mercado consolidado de biodiesel, mas tem enfrentado muitos desafios no desenvolvimento dos biocombustíveis avançados, por conta da crise econômica e política que afeta o país, faltando recursos financeiros para investir em infraestrutura e pesquisa. No entanto, apesar dos desafios, a Argentina possui um potencial significativo no desenvolvimento de biocombustíveis devido aos seus recursos naturais. O país continua a buscar soluções para superar a crise atual e impulsionar o setor.

Em relação ao Paraguai, o país está atualmente em uma fase inicial de desenvolvimento no setor de biocombustíveis avançados, e a expectativa é que o projeto Ômega Green mude este atual cenário, levando o país a ser um grande exportador de diesel verde. Embora o Paraguai tenha recursos naturais e potencial agrícola para a produção de biocombustíveis, o progresso ainda é muito limitado em comparação ao Brasil e a Argentina por causa da falta de investimentos em infraestrutura e tecnologias avançadas.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para estudos futuros, é válido considerar:

- Avaliação do cenário de biocombustíveis para motores de ciclo diesel no ramo marítimos, considerando sua viabilidade técnica e econômica. Podendo incluir estudos de desempenho, emissões, custos de produção e a infraestrutura necessária para soluções verdes em embarcações.

- Acompanhamento das políticas e regulamentações relacionadas aos biocombustíveis no Brasil, Argentina e Paraguai, com foco no incentivo ao uso de biocombustíveis alternativos em motores de ciclo diesel, incluindo o setor marítimo.
- Investigação e acompanhamento do desenvolvimento de novas qualidades de biocombustíveis e novas tecnologias de motores do ciclo diesel.

7 REFERÊNCIAS

A corrida para fazer os motores a diesel funcionarem com hidrogênio. **BBC News**. 2023. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/business-64248564>. Acesso em: 10 abr. 2023.

A Crise argentina – Entenda como a Argentina deixou de ser um país rico e hoje vive na pobreza. **Brasil Paralelo**. 2022. Disponível em: https://www.brasilparalelo.com.br/artigos/crise-argentina?utm_source=search&utm_medium=ads&utm_campaign=trafego_portal&utm_term=00+-+%5BKW%5D+Din%C3%A2mico&utm_content=dinamico&gclid=CjwKCAiA3KefBhByEiwAi2LDHAIiNSy69700hL5WJ6DrcOvMZ5rOT2M1bHK0X77oYmDpz70Vg06OKiRoC0WcQAvD_BwE. Acesso em: 08 out. 2022.

A diferença entre o H-Bio e o Biodiesel. **Biodieselbr**. 2011. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/biodiesel/diferenca-hbio-biodiesel-04-07-06>. Acesso em: 20 ago. 2022.

ABIOVE. Biodiesel. **Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais**. 2022. Disponível em: <https://biodiesel.abiove.org.br/>. Acesso em: 26 set. 2022.

Adição do hidrogênio em motores de combustão interna diminuiu emissões de poluentes. Sobratema, 2022. Disponível em: <https://www.sobratema.org.br/Blog/Exibir/330409>. Acesso em: 12 jan. 2023.

ALBIERO, J. K. **Modelagem Matemática do Sistema de Produção de Biodiesel a Partir de Óleos e Gorduras Residuais**. 2015. 124 p. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

ALBUQUERQUE, N. **Rotas Tecnológicas para produção de combustíveis para aviação**. Apresentação. Curso 2. 1º Congresso Brasileiro da Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Renováveis para aviação. Universidade Federal da Paraíba. 2019. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/https://ubrablo.com.br/wp-content/uploads/2019/08/CURSO-2-NATALY-ABURQUERQUE-UFPB-1.pdf> Acesso em: 12 abr. 2023.

ALMEIDA, J. **Introdução à Indústria do Petróleo**. 2006. Apostila da Petrobras, Rio de Janeiro, 2006.

ANGHEBEN, A. A. **Estudo sobre a combustão de blendas de hidrogênio e diesel em motores ciclo diesel**. 2013. 50 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Biocombustíveis) - Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, Palotina, PR, 2013.

ANP. 81º Leilão de Biodiesel da ANP negocia 1,29 bilhão de litros. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 2021. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/81o-leilao-de-biodiesel-da-anp-negocia-1-29-bilhao-de-litros#:~:text=Os%20Leil%C3%B5es%20de%20Biodiesel%20destinam,diesel%20vendido%20ao%20consumidor%20final. Acesso em: 26 ago. 2022

ANP. Análise de impacto regulatório - Especificações Nacionais do Biodiesel (B100). **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/analise-de-impacto-regulatorio-air/arquivos/1607120-especificacoes-nacionais-do-biodiesel-b100.pdf> Acesso em: 26 de junho de 2022.

ANP. Anuário estatístico 2021. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2021/textos/secao1-novo.pdf>. Acesso em: 26 de ago. 2022.

ANP. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2021. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2021/anuario-2021.pdf>. Acesso em: 26 junho 2022.

ANP. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2022. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 2022. Disponível em <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2022/anuario-2022.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2023.

ANP. Boletim de Biocombustíveis e Qualidade de Produtos. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/arquivos-boletim-de-biocombustiveis-e-qualidade-de-produtos/boletimsbq2022.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2022.

ANP. Especificação do biodiesel. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/especificacao-do-biodiesel>. Acesso em: 26 jun. 2022.

ANP. Proposta de Regulamentação do Diesel Verde. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/analise-de-impacto-regulatorio-air/arquivos/653252-proposta-de-regulamentacao-do-diesel-verde.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2022

ANP. Resolução ANP nº 791/2019. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 2019. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-791-2019-dispoe-sobre-a-individualizacao-das-metas-compulsorias-anuais-de-reducao-de>

emissoes-de-gases-causadores-do-efeito-estufa-para-a-comercializacao-de-combustiveis-no-ambito-da-politica-nacional-de-biocombustiveis-renovabio. Acesso em: 21 fev. 2023.

ANP. Resolução ANP nº 842, de 14 de maio de 2021. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-842-de-14-de-maio-de-2021-320059616>. Acesso em: 26 abr. 2023.

ANP. Resolução ANP nº 860, de 6 de dezembro de 2021 - DOU DE 07.12.2021. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 2021. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-860-2021-institui-o-programa-de-monitoramento-da-qualidade-do-biodiesel-pmqbio-e-estabelece-os-requisitos-para-o-credenciamento-de-laboratorios-ao-programa?origin=instituicao&q=diesel>. Acesso em: 26 abr. 2023.

Argentina deve aumentar percentual de biocombustível no diesel. **Poder360**. 2022. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/internacional/argentina-deve-aumentar-percentual-de-biocombustivel-no-diesel/>. Acesso em: 20 ago. 2022.

Argentina diz que diesel importado deve chegar nos próximos dias. **Poder360**. 2022. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/internacional/argentina-deve-aumentar-percentual-de-biocombustivel-no-diesel/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

Argentina se torna o 2º destino da soja do Brasil em 2023. **Forbes**. 2023. Disponível em: <https://forbes.com.br/forbesagro/2023/06/argentina-se-torna-o-2o-destino-da-soja-do-brasil-em-2023/>. Acesso em: 25 jun. 2023.

ARGENTINA. Barreiras comerciais. **International Trade Administration**. 2022. Disponível em: <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/argentina-trade-barriers>. Acesso em: 20 jan. 2023.

ARGENTINA. Biocombustibles. Disponível em: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/biocombustibles>. Acesso em: 08 out. 2022.

ARGENTINA. Gasóleo/Óleo diesel. **UnData**. 2021. Disponível em: <http://data.un.org/Data.aspx?d=EDATA&f=cmID%3ADL>. Acesso em: 26 jul. 2022.

ARGENTINA. Perfil Energético. **Global Energy Monitor**. 2022. Disponível em: https://www.gem.wiki/Perfil_energ%C3%A9tico_%E2%80%93_Argentina. Acesso em: 20 jan. 2023.

ARGENTINA. Refinación y Comercialización de Petróleo, Gas y Derivados (Tablas Dinámicas). 2020. Disponível em: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/refinacion-y-comercializacion-de-petroleo-gas-y-derivados-tablas-dinamicas>. Acesso em: 22 out. 2022.

ARGENTINA. RenovAr. **Ministerio de Energía y Minería de la República Argentina**. Disponível em: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/energia-electrica/renovables/renovar>. Acesso em: 28 fev. 2023.

ARUN, N.; SHARMA, R. V.; DALAI, A. K. Green diesel synthesis by hydrodeoxygenation of bio-based feedstocks: Strategies for catalyst design and development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 240–255, 2015.

BACCHI, C. **Reações Orgânicas**. Apresentação. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/10745931/>. Acesso em: 20 nov. 2022.

BAGGIO, M. S. A influência do acordo de Paris na matriz energética brasileira: **objetivos da política nacional de biocombustíveis - RenovaBio**. 2018. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Direito) - Universidade do Sul de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Balanço: cenário do óleo diesel no Brasil em 2021. **Combuluz**. 2022. Disponível em: <https://www.combuluz.com.br/balanco-cenario-do-oleo-diesel-no-brasil-em-2021/>. Acesso em: 26 ago. 2022

BALTACIOGLU, M. K.; ARAT, H. T.; ÖZCANLI, M.; AYDIN, K. Experimental comparison of pure hydrogen and HHO (hydroxy) enriched biodiesel (B10) fuel in a commercial diesel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 19, p. 8347-8353, 2016.

BARQUETTE, A. V. **Avaliação da melhor localização do sistema de mistura em linha de diesel da REDUC**. 2008, 112p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

BEZERRA, V. V. L. **Síntese de Fischer-Tropsch sobre Catalisadores Convencionais e Estruturado Para Obtenção De Combustíveis Líquidos**. 2015. 95 p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

BIOCAP – **Camara Paraguaya de biodiesel**. 2022. Disponível em: https://biocapparaguay.org/?page_id=1003. Acesso em: 20 ago. 2022.

Biocombustibles. **Secretaria de Energia Argentina**. 2021. Disponível em: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/biocombustibles>. Acesso em: 10 ago. 2022.

BIOCOMBUSTÍVEIS: afinal, quais são as suas vantagens. **Raízen**, 2021. Disponível em: https://www.raizen.com.br/blog/biocombustiveis?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=g81z_mcltf8pg_N2_raizen_blog_google_awareness_&utm_content=mcltf8pg_blog_google_search_awareness_interesses_cpc_search_bioenergia_&gclid=Cj0KCQjwlvSZBhDuARIsAKZlijTI7Zt_CA713n5w0rcatxU4MR4CS5DcRuCJIEL_I_0EEsG80CeLgvAaAtrmEALw_wcB. Acesso em: 05 out. 2022.

Biodiesel no Diesel: tudo o que você precisa saber. **POC FILTROS**. 20 dez. 2020. Disponível em: <https://www.pocfiltros.com.br/blog/biodiesel-diesel/>. Acesso em: 12 set. 2022.

Biodiesel. **Grossi Derivados do petróleo**. 2021. Disponível em: <https://www.grossiderivadosdepetroleo.com.br/portal/?mn=noticias&id=14>. Acesso em: 22 nov. 2022.

BORUGADDA, V. B; GOUD, V.V. Biodiesel production from renewable feedstocks: Status and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 4763-4784, 2012.

Brasil BR: Preço do Combustível ao Consumidor: Diesel: Mínimo. **Ceic**. 2022. Disponível em: <https://www.ceicdata.com/en/brazil/consumer-fuel-price-brazil-monthly/br-consumer-fuel-price-diesel-minimum>. Acesso em: 10 abr. 2023.

BSBios começa a construção de biorrefinaria no Paraguai. **Biodieselbr**. 2021. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/biocombustivel/cana/bsbios-comeca-a-construcao-de-biorrefinaria-no-paraguai-161121>. Acesso em: 08 jan. 2023.

BSBIOS PARAGUAY – Omega Green. **ECB Group**. 2021. Disponível em: <https://www.ecbgroup.com.br/pt/grupo/bsbios-paraguay/omega-green>. Acesso em: 10 ago. 2022.

CAETANO, L.P. **Mapeamento e Projeção do Consumo de Óleo Diesel no Brasil**. 2013. 77 p. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CARBIO. Cámara Argentina de Biocombustibles. Disponível em: <http://carbio.com.ar/>. Acesso em: 20 ago. 2022.

CASTELLANELLI, C. A. Biodiesel na América Latina: aproximações e tendências no contexto da governança. **Revista Observatório de la Economía Latinoamericana**. 2016. Disponível em: <http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/br/16/biodiesel.html>. Acesso em: 26 ago. 2022.

CAVALCANTI, C. J.S.; RAVAGNANI, M. A.S.S.; STRAGEVITCH, L.; *et al.* Simulation of the soybean oil hydrotreating process for green diesel production. **Cleaner Chemical Engineering**, v. 1, p. 100004, 2022.

CÉSAR, P. H-bio. **Portal de estudos em química**. 2013. Disponível em: https://www.profpc.com.br/H_Bio.htm. Acesso em: 20 ago. 2022.

CHANG, W.; HWANG, J.; WU, W. Environmental impact and sustainability study on biofuels for transportation applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 277-288, 2017.

CHIAPPINI, G. HVO desponta como tendência para produção de diesel renovável. **Epbr**. 2020. Disponível em: <https://epbr.com.br/hvo-desponta-como-tendencia-para-producao-de-diesel-renovavel/>. Acesso em: 26 ago. 2022.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, v. 25, n. 3, p. 294-306, 2007.

CHONG, C. T.; NG, J. Sustainability of aviation biofuels. *In: Biojet Fuel in Aviation Applications*. [s.l.]: Elsevier, 2021, p. 287–335. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydrothermolysis>. Acesso em: 30 ago. 2022.

CNPE (2021). Relatório final sobre a inserção de Biocombustíveis no Ciclo Diesel. 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-adota-periodo-de-transicao-para-alterar-o-percentual-da-mistura-de-biodiesel-no-oleo-diesel/RELATORIO_GT_CNPE_13_2020_VERSAO_FINAL_PUBLICACAO.pdf. Acesso em: 08 out. 2022.

CNPE confirma fim dos leilões de biodiesel em 1º de janeiro de 2022. **Epbr**. 2021. Disponível em: <https://epbr.com.br/cnpe-confirma-fim-dos-leiloes-de-biodiesel-em-1o-de-janeiro-de-2022/>. Acesso em 10 set. 2022.

Combustível do campo: óleo de soja e seus usos energéticos. **CME Group**. 2021. Disponível em: <https://www.cmegroup.com/articles/2021/fuel-from-the-field-soybean-oil-and-its-energy-uses.html>. Acesso em: 05 out. 2022.

Cremer inaugura usina de biodiesel no Paraguai. **BiodieselBr**. 2023. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/usinas/info/cremer-inaugura-usina-de-biodiesel-no-paraguai-030523>. Acesso em: 18 set. 2022.

CUNHA, T.S.L. **Estudo de uma reação catalítica heterogênea em reator trifásico**. 2009. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2009.

DA COSTA, A. O. **A Inserção do Biodiesel na Matriz Energética Nacional: Aspectos Socioeconômicos, Ambientais e Institucionais**. 2017. 248 p. Tese de Doutorado (Doutor em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

DA COSTA, R. C; MENDES, A. P. A. Mercado brasileiro de biodiesel e perspectivas futuras. BNDES - Biblioteca Digital, n. 31, p. 253-280, mar. 2010. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2483/1/BS%2031%20Mercado%20brasileiro%20de%20biodiesel_P.pdf. Acesso em: 19 ago. 2022.

DA CUNHA, P.C.R. **Efeito da adição de hidrogênio produzido a partir de eletrólise alcalina no desempenho de um motor de combustão interna**. 2017. 127 p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2017.

DE SOUZA, T.A.Z.; PINTO, G.M.; JULIO, A.A.V.; *et al.* Biodiesel in South American countries: A review on policies, stages of development and imminent competition with hydrotreated vegetable oil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 153, p. 111755, 2022.

Derivados do petróleo Importação. **Vice Ministério de Minas e Energia**. 2021. Disponível em: https://www.ssme.gov.py/vmme/index.php?option=com_content&view=article&id=1220&Itemid=607. Acesso em: 20 ago. 2022.

DIAS, D. L. **Óleo diesel**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/oleo-diesel.htm>. Acesso em: 10 jun. 2022.

DIETZ, A. C. **Modelagem e simulação de reatores de hidrotreatamento (HDT) de correntes de Diesel**. 2014. 119 p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

DILL, L.P. **Obtenção de éteres etílicos a partir de misturas etanólicas de óleo vegetal utilizando catalisadores heterogêneos químicos**. 2012. 77 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Biocombustíveis) – Universidade Federal do Paraná. Palotina, 2012.

DIMITRIADIS, Athanasios; NATSIOS, Ioannis; DIMARATOS, Athanasios; *et al.* Evaluation of a Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) and Effects on Emissions of a Passenger Car Diesel Engine. **Frontiers in Mechanical Engineering**, v. 4, p. 7, 2018.

DOUVARTZIDES, Savvas L.; CHARISIOU, Nikolaos D.; PAPAGERIDIS, Kyriakos N.; *et al.* Green Diesel: Biomass Feedstocks, Production Technologies, Catalytic Research, Fuel Properties and Performance in Compression Ignition Internal Combustion Engines. **Energies**, v. 12, n. 5, p. 809, 2019.

ECB Group e governo do Paraguai assinam contrato de Zona Franca para instalação de usina de biocombustível verde. **ECB Group**. 2022. Disponível em: <https://www.ecbgroup.com.br/pt/noticia/ecb-group-e-governo-do-paraguai-assinam-contrato-de-zona-franca-para-instalacao-de-usina-de-biocombustivel-verde>. Acesso em: 20 ago. 2022.

EDER, L. B.; SANTOS, L. S.; *et al.* **Produção de HVO a partir do hidrotreatamento catalítico do óleo de farelo de arroz**. 2021. 286 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS 2021.

EICHLER, P.; SANTOS, F.; TOLEDO, M.; *et al.* BIOMETHANOL PRODUCTION VIA GASIFICATION OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASS. **Química Nova**, 2015. Disponível em: <http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/0100-4042.20150088>. Acesso em: 27 ago. 2022.

Empresa encontra primeira grande reserva de petróleo no Paraguai. **Veja**. 2014. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/economia/empresa-encontra-primeira-grande-reserva-de-petroleo-no-paraguai/>. Acesso em: 22 out. 2022.

ENCARNAÇÃO, A. P. G. **Geração de biodiesel pelos processos de transesterificação e hidroesterificação, uma avaliação econômica**. 2008. 164 p. Dissertação de Mestrado (Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Acesso em: 22 jul. 2022.

EPE (2007). Matriz energética Nacional 2030. **Empresa de Pesquisa Energética**. 2007. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/matriz-energetica-nacional-2030/matriz-energetica-nacional-2030.pdf>. Acesso em: 10 set. 2022.

EPE (2020). Combustíveis renováveis para uso em motores do ciclo Diesel. **Empresa de Pesquisa Energética**. 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-467/NT_Combustiveis_renovaveis_em_%20motores_ciclo_Diesel.pdf. Acesso em: 26 ago. 2022.

EPE (2020). Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. **Empresa de Pesquisa Energética**. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>. Acesso em: 21 ago. 2022.

EPE (2021). Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031. **Empresa de Pesquisa Energética**. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-591/PDE%202031_Caderno%20de%20Oferta%20de%20Derivados_2021.12.28.pdf. Acesso em: 21 ago. 2022.

EPE (2021). Investimentos e custos operacionais e de manutenção no setor de biocombustíveis: 2022-2031. **Empresa de Pesquisa Energética**. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-343/topico-606/Investimentos_Custos_O_e_M_Bios_2022-2031.pdf. Acesso em: 26 set. 2022.

EPE (2021b). Balanço Energético Nacional 2022: Ano-base 2021. **Empresa de Pesquisa Energética**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 14 ago. 2022.

EPE (2022). Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis Ano 2020. **Empresa de Pesquisa Energética**. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-615/NT-EPE-DPG-SDB-2021-03_Analise_de_Conjuntura_dos_Biocombustiveis_ano_2020.pdf. Acesso em: 10 Set. 2022.

EPE (2022). Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis Ano 2021. **Empresa de Pesquisa Energética**. 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-688/NT-EPE-DPG-SDB-2022-02_Analise_de_Conjuntura_dos_Biocombustiveis_2021.pdf. Acesso em: 10 Set. 2022.

Erasmus Battistella vai investir US\$ 800 mi em usina de HVO no Paraguai. **Biodieselbr**. 2019. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/usinas/info/grupo-controlador-da-bsbios-vai-investir-em-usina-de-hvo-no-paraguai-250219>. Acesso em: 18 set. 2022.

ESTEVEZ, R.; AGUADO-DEBLAS, L.; LÓPEZ-TENLLADO, F. J.; *et al.* Biodiesel Is Dead: Long Life to Advanced Biofuels—A Comprehensive Critical Review. **Energies**, v. 15, n. 9, p. 3173, 2022.

FARIAS, F. E. M. **Produção de hidrocarbonetos através da síntese de Fischer-Tropsch utilizando catalisadores de Fe/K**. 2007. 119 p. Dissertação de Mestrado (Pós- Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

FRANCO, A. J. **Estudo e caracterização de composições de coque e fibras vegetais (bagaço de cana e madeira) para aplicação na produção de briquetes**. 2011. 68 p. Dissertação de Mestrado (Mestre em Ciência dos materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2011.

FURIMSKY, E. The mechanism of catalytic hydrodeoxygenation of furan. **Applied Catalysis**, v. 6, n. 2, p. 159–164, 1983.

GAUTO, M. Que diesel é esse? Entenda as diferenças entre Diesel A, B, R, biodiesel, diesel verde e HVO. **Epbr**. 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/que-diesel-e-esse-entenda-as-diferencas-entre-diesel-a-b-r-biodiesel-diesel-verde-e-hvo/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

GIMENEZ, P. E. Consumo de combustibles fósiles y renovables para uso vehicular en paraguay, periodo 2019, en el marco del plan nacional de desarrollo 2030. **Ciencias Económicas**, San Lorenzo, 2020, p. 93-108, fev. 2020.

GODOY, K. Paraguai quer construir a maior usina de biocombustíveis da América do Sul. **Dialogo Chino**. 2022. <https://dialogochino.net/en/climate-energy/55157-paraguay-biofuels-build-south-america-largest-plant/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

Governo oficializa ampliação da mistura de biodiesel no diesel vendido no país. **Portal Gov.br**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2023/03/governo-oficializa-ampliacao-da-mistura-de-biodiesel-no-diesel-vendido-no-pais#:~:text=O%20Di%3%A1rio%20Oficial%20da%20Uni%3%A3o,de%2010%25%20para%2012%25>. Acesso em: 10 mai. 2023.

Sementes da planta de soja. **Depositphotos**. Disponível em: Acesso em: <https://br.depositphotos.com/stock-photos/soja.html>. Acesso em: 30 ago. 2022.

Grupo ECB fará diesel “verde” no Paraguai. **Canal Online**. 2020. Disponível em: <http://www.canaonline.com.br/conteudo/grupo-ecb-fara-diesel-verde-no-paraguai.html>. Acesso em: 20 ago. 2022.

H-BIO: O novo diesel da Petrobras. **Biodieselbr**. 2011. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/destaques/2006/h-bio-novo-diesel-petrobras>. Acesso em: 20 ago. 2022.

Hidrogênio. **Diesel Technology Forum**. Disponível em: <https://dieselforum.org/hydrogen>. Acesso em: 22 mai. 2023.

HOFF, S. **Desenvolvimento de modificações em reatores de leito catalítico de planta industrial de hidrotratamento de diesel**. 2015. 41 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Química Industrial) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

HOPKINS, Matt. Paraguai: situação dos biocombustíveis. **AgriBusiness Global**. 2008. Disponível em: <https://www.agribusinessglobal.com/markets/americas/paraguay-biofuels-situation/>. Acesso em: 08 jan. 2023.

IAE. La producción de hidrocarburos en Argentina. **Instituto Argentino de la Energía – Informe anual**. 2021. Disponível em: <https://www.iae.org.ar/wp-content/uploads/2022/03/Informe-anual-de-hidrocarburos-2021-2.pdf>. Acesso em: 22 out. 2022.

IAPG – Importación y Exportación de Petróleo y Gas. **Instituto Argentino del Petróleo y del Gas**. 202. Disponível em: <https://www.iapg.org.ar/estadisticasnew/importacion-y-exportacion.html>. Acesso em: 22 out. 2022.

IAPG. Produção anual de Petróleo. **Instituto Argentino de Petróleo e Gás**. 2021. Disponível em: <https://www.iapg.org.ar/estadisticasnew/anual.html>. Acesso em: 26 ago. 2022.

IBP. O que é diesel verde ou diesel renovável? **Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás**. 2021. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/noticias/o-que-e-diesel-verde-ou-diesel-renovavel/>. Acesso em: 25 out. 2022.

IBP. Percentual de biodiesel no diesel e impacto no motor dos veículos. **Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás**. 2023. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cvt/apresentacoes-em-eventos/eventos-2023/arquivos-de-eventos-2023/ap-2023-04-18-roberto-ardenghy-ibp>. Acesso em: 18 de Jul. 2023.

IEA. 2005 Lei de Promoção de Biocombustíveis. **International Energy Agency**. 2016. Disponível em: <https://www.iea.org/policies/6019-2005-biofuels-promotion-law>. Acesso em: 22 out. 2022.

IEA. Argentina. **International Energy Agency**. 2017. Disponível em: <https://www.eia.gov/international/overview/country/ARG>. Acesso em: 22 out. 2022.

IEA. Bioenergy Project Development & Biomass Supply. **International Energy Agency**. 2007. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/f98877d4-b1a9-47cb-b46e-289a475218e1/biomass.pdf>. Acesso em: 22 out. 2022.

IEA. Paraguay. **International Energy Agency**. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/countries/paraguay>. Acesso em: 22 out. 2022.

IEA. Plano Nacional de Desenvolvimento do Paraguai 2014-2030. **International Energy Agency**. 2016. Disponível em: <https://www.iea.org/policies/6110-paraguays-national-development-plan-2014-2030>. Acesso em: 22 out. 2022.

IEA. Relatório do mercado de petróleo - novembro de 2022. **International Energy Agency**. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/oil-market-report-november-2022>. Acesso em: 22 out. 2022.

IF-UFRJ. O Ciclo diesel. **Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro**. 2011. Disponível em: https://www.if.ufrj.br/~ginette/cursos/fit122/2011_02/programa/termodinamica/ciclos.html. Acesso em: 10 jun. 2022.

IHA. Paraguai. **International Hydropower Association**. 2021. Disponível em: <https://www.hydropower.org/country-profiles/paraguay>. Acesso em: 20 ago. 2022.

INDEC – Instituto Nacional de Estadística y Censo/ Ministério de Economia, República Argentina. **Utilización de la capacidad instalada en la industria**. Industria manufacturera Vol. 6, n° 12, 2022.

Intensidades de carbono certificadas LCFS Pathway. **Califórnia Air Resources board**. Disponível em: <https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/lcfs-pathway-certified-carbon-intensities>. Acesso em: 10 dez. 2022.

J. PRAUCHNER, Marcos; D. BRANDÃO, Ruana; M. DE FREITAS JÚNIOR, Antônio; *et al.* Alternative Hydrocarbon Fuels, with Emphasis on Sustainable Jet Fuels. **Revista Virtual de Química**, 2022. Disponível em: http://rvq.s bq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=1548&nomeArquivo=RVq220822-a1.pdf. Acesso em: 27 ago. 2022.

JÚNIOR, S. T. O plano da BSBios para ser uma líder global em biocombustíveis. **Capital Reset**. 2022. Disponível em: <https://www.capitalreset.com/o-plano-da-bsbios-para-ser-uma-lider-global-em-biocombustiveis/>. Acesso em: 08 jan. 2023.

KARAGÖZ, Yasin; SANDALCI, Tarkan; YÜKSEK, Levent; *et al.* Effect of hydrogen–diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 8, n. 8, p. 168781401666445, 2016.

LAGE, L. H. A; GONÇALVES, R. T; *et al.* Análises dos processos de transesterificação e hidroesterificação na produção de biodiesel. **Journal of Exact Sciences**, v. 21, n. 3, p. 9-14, 2019.

LATA, D, B; MISRA, A; MEDHEKAR, S. Investigations on the combustion parameters of a dual fuel diesel engine with hydrogen and LPG as secondary fuels. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.36. p. 3808 - 3819. 2011.

LUZ, M. L. G. S. **Apostila de Motores a Combustão Interna**. Pelotas, 2013. 19 p. Universidade Federal de Pelotas, 2013. Disponível em <https://wp.ufpel.edu.br/mlaura/files/2013/01/Apostila-de-Motores-a-Combust%C3%A3o-Interna.pdf> Acesso em: 26 abr. 2023.

LI, Y.; HORSMAN, M.; WU, N.; *et al.* Biofuels from Microalgae. **Biotechnology Progress**, v. 24, n. 4, p. 815-820, 2008.

LIU, Xinyu; SEBERRY, Gabrielle; KOOK, Sanghoon; *et al.* Direct injection of hydrogen main fuel and diesel pilot fuel in a retrofitted single-cylinder compression ignition engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 84, p. 35864–35876, 2022.

LOPES, A; ANDREA, M; *et al.* **Biodiesel no Brasil: Aspectos gerais e síntese da legislação**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228545294_BIODIESEL_NO_BRASIL_APECTOS_GERAIS_E_SINTESE_DA_LEGISLACAO. Acesso em: 22 ago.2022.

MACHADO, N. Biodiesel: entenda o novo modelo de comercialização aprovado pela ANP. **Epbr**. 2021. Disponível em: <https://epbr.com.br/cnpe-reduz-mistura-de-biodiesel-para-10-no-periodo-2022/#:~:text=O%20Conselho%20Nacional%20de%20Pol%C3%ADtica,e%20o%20fim%20dos%20leil%C3%B5es> Acesso em: 10 out. 2022.

MACHADO, N. CNPE reduz mistura de biodiesel para 10% em 2022. **Epbr**, 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/cnpe-reduz-mistura-de-biodiesel-para-10-no-periodo-2022/#:~:text=O%20Conselho%20Nacional%20de%20Pol%C3%ADtica,e%20o%20fim%20dos%20leil%C3%B5es> Acesso em: 10 out. 2022.

MACHADO, N. Diesel deve aumentar participação na matriz de transportes até 2031, mostra PDE. **Epbr**, 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/diesel-deve-aumentar-participacao-na-matriz-de-transportes-ate-2031-mostra-pde/>. Acesso em: 08 out. 2022.

MACHADO, R. **Avaliação da Predição de Algoritmos de Treinamento Supervisionado de Redes Neurais Artificiais Aplicado a Qualidade de Biodiesel (Mestrado)**. 2015. Disponível em: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.28766.43848>. Acesso em: 30 ago. 2022.

MAGALHÃES, L. Esterificação. **Toda matéria**. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/esterificacao/>. Acesso em: 22 out. 2022.

MASSALI, Fábio. **Governo reduz temporariamente porcentagem de biodiesel no óleo diesel**. Agência Brasil, 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-09/governo-reduz-temporariamente-porcentagem-de-biodiesel-no-oleo-diesel>. Acesso em: 26 de jun. 2022.

Mato Grosso desbanca Argentina e se torna 3º maior produtor global de soja. **CNN**, 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/mato-grosso-desbanca-argentina-e-se-torna-3o-maior-produtor-global-de-soja/#:~:text=toneladas%2C%20diz%20Conab,Atualmente%2C%20os%20tr%C3%AAAs%20maiores%20produtores%20globais%20de%20soja,Brasil%2C%20Estados%20Unidos%20e%20Argentina>. Acesso em: 10 abr. 2023.

Mercado mundial de diesel e perspectivas que impactam a produção agropecuária brasileira. **Mercado em foco**. 2022. Disponível em: https://cnabrasil.org.br/storage/arquivos/files/dtec.mercado-em-foco10.combustivel.vf.30set2022_compressed.pdf. Acesso em: 08 out. 2022.

MIC - **Ministerio de Industria y Comercio**. 2021. Resumen mensual de ventas de biodiesel (en litros) por productor. Dirección de Combustibles Alternativos y Renovables, MIC.

MILANEZ, A. Y; MAIA, G. B. S; GUIMARÃES, C.L; FERREIRA, C.L.A. Biodiesel e diesel verde no Brasil: panorama recente e perspectivas. **BNDES**, 2022. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22585/1/PRArt215696_Biodiesel%20e%20diesel%20verde%20no%20Brasil.pdf. Acesso em: 26 ago. 2022.

Mistura de biodiesel ao diesel passa a ser de 12% a partir de abril. **Agência Brasil**, 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2023-03/mistura-de-biodiesel-ao-diesel-passa-ser-de-12-partir-de-abril>. Acesso em: 20 abr. 2023.

MME. RenovaBio. **Ministério de Minas e Energia**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1#:~:text=O%20RenovaBio&text=Dita%20pol%C3%ADtica%20de%20Estado%20leva,e%20a%20previsibilidade%20do%20mercado>. Acesso em: 10 mai. 2023.

MUPONDWA, Edmund; LI, Xue; TABIL, Lope, Production of biojet fuel: Conversion technologies, technoeconomics, and commercial implementation, *in: Biofuels and Biorefining*, [s.l.]: Elsevier, p. 157–213, 2022.

MUPONDWA, Edmund; LI, Xue; TABIL, Lope. Chapter 6 - Production of biojet fuel: Conversion technologies, technoeconomics, and commercial implementation. *In: GÓMEZ CASTRO, Fernando Israel; GUTIÉRREZ-ANTONIO, Claudia (Orgs.). Biofuels and Biorefining*. [s.l.]: Elsevier, p. 157–213, 2022.

NEWBERRY, C. Argentina expandirá importações de diesel isento de impostos para o setor de energia à medida que a demanda aumenta. **S&P Global Commodity Insights**. 2022. Disponível em: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/oil/080822-argentina-to-expand-tax-free-diesel-imports-for-power-sector-as-demand-rises>. Acesso em: 08 out. 2022.

NIKAS, A.; KOASIDIS, K.; KÖBERLE, A.C.; *et al.* A comparative study of biodiesel in Brazil and Argentina: An integrated systems of innovation perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 156, p. 112022, 2022.

Noções básicas de biodiesel. **Biodiesel**. Disponível em: <https://www.biodiesel.org/what-is-biodiesel/biodiesel-basics>. Acesso em: 21 fev. 2023.

O peso das energias renováveis na matriz energética dos países latino-americanos. **MAPFRE Global Risks**. 2023. Disponível em: <https://www.mapfreglobalrisks.com/pt-br/gerencia-ricos-seguros/estudos/o-peso-das-energias-renovaveis-na-matriz-energetica-dos-paises-latino-americanos/#:~:text=87%25%20da%20matriz%20energ%C3%A9tica%20da,e%C3%B3lica%2C%20solar%20e%20de%20biomassa>. <https://www.biodieselbr.com/revista/007/externo-3-segundo-norma>. Acesso em: 27 jan. 2023.

O plano da BSBios para ser uma líder global em biocombustíveis. **Capital Reset**. 2022. Disponível em: <https://www.capitalreset.com/o-plano-da-bsbios-para-ser-uma-lider-global-em-biocombustiveis/>. Acesso em: 26 ago. 2022.

OLADE. Panorama Energético de América Latina y el Caribe. **Organización Latinoamericana de Energía**. 2021. Disponível em: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0442a.pdf>. Acesso em: 22 out. 2022.

OLIVEIRA, Andréia. Tudo o que você precisa saber sobre o diesel verde HVO. **Produção de biodiesel**. 2021. Disponível em: <https://www.producaodebiodiesel.com.br/combustiveis-e-o-mundo/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-diesel-verde-hvo>. Acesso em: 20 ago. 2022.

OLIVEIRA, F. C. C; SUAREZ, P. A. Z; DOS SANTOS, W. L. P. Biodiesel: Possibilidades e desafios. **Química e Sociedade**. 2007. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4457536/mod_book/chapter/19475/textos/texto12_S7_EC05.pdf. Acesso em: 20 set. 2022.

P. RAMOS, Luiz; KOTHE, Vinícius; F. CÉSAR-OLIVEIRA, Maria Aparecida; *et al.* Biodiesel: Raw Materials, Production Technologies and Fuel Properties. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 317–369, 2017.

PARAGUAI. Decreto nº 7412, de 27 de abril de 2006. Presidencia de la República del Paraguay, Ministerio de Industria y Comercio. Disponível em: <https://paraguay.justia.com/nacionales/decretos/decreto-7412-apr-27-2006/gdoc/>. Acesso em: 08 de jan. 2023.

Petrobras prevê venda de novos lotes de Diesel R5 em 2023 e expansão da produção. **NovaCana**. 2022. Disponível em: Acesso em: 20 jan. 2023.

PETROBRAS. Composição de preços ao consumidor. **Petrobras**. 2021. Disponível em: Acesso em: <https://petrobras.com.br/en/our-activities/composition-of-sales-prices-to-the-consumer/diesel/>. 20 out. 2022.

PETROBRAS. Diesel renovável traz mais qualidade, competição e sustentabilidade para o segmento de biocombustíveis no Brasil. **Petrobras**. 2020. Disponível em: https://petrobras.com.br/en_us/fatos-e-dados/diesel-renovavel-traz-mais-qualidade-competicao-e-sustentabilidade-para-o-segmento-de-biocombustiveis-no-brasil.htm. Acesso em: 08 jan. 2023.

PETROBRAS. Óleo diesel – Informações técnicas. Petrobrás. 2021. Disponível em: https://petrobras.com.br/data/files/04/93/72/4C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/Manual-de-Diesel_2021.pdf Acesso em: 26 set. 2022.

PETROBRAS. Petrobras comercializa primeiro lote de Diesel R5. **Petrobras**. 2022. Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/petrobras-comercializa-primeiro-lote-de-diesel-r5.htm>. Acesso em: 07 jan. 2023.

PETROBRAS. Verdades sobre o preço do diesel que você precisa saber. Petrobras. 2021. Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/verdades-sobre-o-preco-do-diesel-que-voce-precisa-saber.htm>. Acesso em: 26 de jun. 2022.

Petróleo Argentino. **Worlometer**. 2016. Disponível em: <https://www.worldometers.info/oil/argentina-oil/>. Acesso em: 26 jun. 2022.
Petróleo Bruto da Argentina: Produção. **Ceic**. 2021. Disponível em: <https://www.ceicdata.com/en/indicator/argentina/crude-oil-production>. Acesso em: 26 jul. 2022.

Petróleo Refinado no Paraguai. **OECD**. 2021. Disponível em: <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/refined-petroleum/reporter/py>. Acesso em: 22 out. 2022.

PETROPAR. **Diesel**. 2022. Disponível em: https://www.petropar.gov.py/?page_id=4103. Acesso em: 30 ago. 2022.

PETROPAR. **Resenha histórica**. 2022. Disponível em: https://www.petropar.gov.py/?page_id=1852. Acesso em: 30 ago. 2022.

PETUCO, V. O mercado de biodiesel no Brasil. **APRIX**. 2021. Disponível em: <https://aprix.com.br/o-mercado-de-biodiesel-no-brasil>. Acesso em: 18 set. 2022.

PINHO, L. A.; TEIXEIRA, F.M. Biodiesel no Brasil: Uma análise da regulação e seus reflexos na diversificação das matérias-primas usadas no processo de produção. **Revista Brasileira de Administração Política**. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/rebap/article/view/17212>. Acesso em: 26 ago. 2022.

PNPB – **Ministério da Agricultura e Pecuária**. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/mda/biodiesel/programa-nacional-de-producao-e-uso-do-biodiesel-pnpb>. Acesso em: 10 set. 2022.

PINTO, C. A. **Biodiesel: Uma Alternativa de Combustível Limpo. 2008**. Disponível em: http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc31_1/11-EEQ-3707.pdf. Acesso em: 18 de julho de 2023.

Preços do diesel na Argentina. **GlobalPetroPrices**. 2023. Disponível em: https://www.globalpetrolprices.com/Argentina/diesel_prices/#:~:text=Diesel%20prices%3A%20We%20show%20prices,on%202%2DJan%2D2023. Acesso em: 20 jun. 2023.

Preços do diesel no Brasil. **GlobalPetroPrices**. 2023. Disponível em: https://www.globalpetrolprices.com/Brazil/diesel_prices/. Acesso em: 26 abr. 2023.

Processo H-BIO: Tecnologia Petrobras para produção de óleo diesel renovável. **Eurodiesel**. Disponível em: http://www.eurodiesel.com.br/temp/h_bio/index.htm. Acesso em: 07 jan. 2023.

Produção de biodiesel da Argentina avança 11% em 2022. **Biodieselbr**. 2023. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/inter/argentina/producao-de-biodiesel-da-argentina-avanca-11-em-2022-270223>. Acesso em: 10 abr. 2023.

Produção industrial de diesel verde começa a virar realidade no Brasil. **Expostos e conveniência**. 2022. Disponível em: <https://expopostos.com.br/2022/01/21/producao-industrial-de-diesel-verde-comeca-a-virar-realidade-no-brasil/>. Acesso em: 07 jan. 2023.

Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) – Ministério da Agricultura e pecuária. **Portal Gov.br**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/mda/biodiesel/programa-nacional-de-producao-e-uso-do-biodiesel-pnpb>. Acesso em: 20 mai. 2023.

RAMOS, L. P; SILVA, Fabiano R. Da; MANGRICH, Antonio S.; *et al.* Biodiesel Production Technologies. **Revista Virtual de Química**, v. 3, n. 5, 2011. Disponível em: <http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/1984-6835.20110043>. Acesso em: 28 jun. 2023.

REN21. **Renewables Global Status Report**. 2021. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf. Acesso em: 28 fev. 2023.

RESENDE, F. BURA, R. GUSAFSON, R. **Convertendo álamo híbrido em biocombustíveis: preparação da matéria-prima e técnicas de conversão**. Advanced Hardwood Biofuels. In: Tópicos Especiais em Economia Aplicada - LES5797. Apresentação. 2011. Universidade de Washington. Disponível em:

file:///C:/Users/Windows/Downloads/2%20Advanced%20Hardwood%20Biofuels.pdf.
Acesso em: 20 nov. 2022.

RESOLUÇÃO ANP Nº 842, DE 14 DE MAIO DE 2021. **Diário Oficial da União** 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-842-de-14-de-maio-de-2021-320059616>. Acesso em: 20 ago 2022.

ROSAL, A.G.C. **Desenvolvimento de Modelo Matemático e Simulação do Forno de uma Unidade de Coqueamento Retardado**. 2013. 152 p. Tese de Doutorado (Pós- Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SANTOS, L. K. **Avaliação da Aplicação do Processo de Hidroesterificação na Produção de Biodiesel a partir de Matérias-Primas de Baixa Qualidade**. 2016. 136 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2016.

SARAVANAN, N; NAGARAJAN, G. An experimental investigation of hydrogenenriched air induction in a diesel engine system. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33. p. 1769 – 1775. 2008a.

SARAVANAN, N; NAGARAJAN, G. Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with diesel as an ignition source. **Applied Energy**,v. 87. p. 2218 – 2229. 2010.

SILVA, N. S. **Efeito da mistura alternativa diesel-biodiesel comerciais/H₂ nos motores de combustão interna do tipo diesel: testes em bancada dinamométrica**. 2018. 97 p. Dissertação de Mestrado (Pós-graduação em Biocombustíveis) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2018.

SILVA, R. T. **Aplicações da Teoria de Controle em uma Refinaria de Petróleo**. 2009. 52 p. Monografia (Graduação em Bacharelado em Matemática Aplicada e Computacional) - Universidade de São Paulo, SP, 2009.

SNÄRE, Mathias; KUBIČKOVÁ, Iva; MÄKI-ARVELA, Päivi; *et al.* Heterogeneous Catalytic Deoxygenation of Stearic Acid for Production of Biodiesel. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 45, n. 16, p. 5708–5715, 2006.

Soja em números (safra 2021/22). **Embrapa**. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 20 set. 2022.

SOUSA, R. M. **Avaliação da predição de algoritmos de treinamento supervisionado de redes neurais artificiais aplicado a qualidade de biodiesel**. 2015. 80 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2015.

TAGOMORI, I. S. **Potencial Técnico e Econômico para a Produção de Fischer-Tropsch Diesel a partir de Biomassa (FT-BTL) Associada à Captura de Carbono no Brasil**. 2017. 239 p. Dissertação de mestrado (Pós-graduação em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2017.

Taxa de Inflação Argentina. **Trading Economics**. 2023. Disponível em: <https://tradingeconomics.com/argentina/inflation-cpi>. Acesso em: 30 mai. 2023.

Tecnologia da Honeywell escolhida para biorrefinaria avançada no Paraguai. **Biodiesel Magazine**. 2021. Disponível em: <https://biodieselmagazine.com/articles/2517471/honeywell-technology-chosen-for-advanced-biorefinery-in-paraguay>. Acesso em: 20 ago. 2022.

Triacilgliceróis. **Wikiwand**. Disponível em: https://www.wikiwand.com/pt/Triacilglicerol#Media/Ficheiro:Fat_triglyceride_shorthand_for_mula.svg. Acesso em: 20 ago. 2022.

UDOP. Biodiesel/Argentina/USDA: Produção em 2021 deve ser a 2ª menor em 11 anos. **União Nacional da Bioenergia**. 2021. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2021/08/30/biodiesel-argentina-usda-producao-em-2021-deve-ser-a-2-menor-em-11-anos.html>. Acesso em: 05 out. 2022.

UDOP. Brasil BioFuels investirá R\$1,8 bi na 1ª biorrefinaria de diesel verde do Brasil. União Nacional da Bioenergia. 2021. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2021/11/24/brasil-biofuels-investira-r-1-8-bi-na-1-biorrefinaria-de-diesel-verde-do-brasil.html>. Acesso em: 05 out. 2022.

UDOP. H-Bio substituto do diesel...e do biodiesel? **União Nacional da Bioenergia**. 2007. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2020/03/06/hvo-desponta-como-tendencia-para-producao-de-diesel-renovavel.html#:~:text=Para%20ser%20considerado%20diesel%20verde,similares%20aos%20derivados%20de%20petr%C3%B3leo>. Acesso em: 07 jan. 2023.

UDOP. HVO desponta como tendência para produção de diesel renovável. **União Nacional da Bioenergia**. 2020. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2020/03/06/hvo-desponta-como-tendencia-para-producao-de-diesel-renovavel.html#:~:text=Para%20ser%20considerado%20diesel%20verde,similares%20aos%20derivados%20de%20petr%C3%B3leo>. Acesso em: 05 out. 2022.

UDOP. Paraguai quer substituir diesel importado por biodiesel. **União Nacional da Bioenergia**. 2022. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2022/04/13/paraguai-quer-substituir-diesel-importado-por-biodiesel.html>. Acesso em: 05 out. 2022.

UDOP. Por falta de combustível, Argentina aumenta mistura de biodiesel no diesel. **União Nacional da Bioenergia**. 2022. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2022/06/17/por-falta-de-combustivel-argentina-aumenta-mistura-de-biodiesel-no-diesel.html>. Acesso em: 07 jan. 2023.

UDOP. Biodiesel/Argentina/USDA: Produção em 2021 deve ser a 2ª menor em 11 anos. **União Nacional da Bioenergia**. 2021. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2021/08/30/biodiesel-argentina-usda-producao-em-2021-deve-ser-a-2-menor-em-11-anos.html>. Acesso em: 05 out. 2022.

USDA – United States Departamento of Agriculture. **Biofuels Annual: Argentina**. Buenos Aires: USDA, 2022, 22 p. Disponível em:

https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Buenos%20Aires_Argentina_AR2022-0013.pdf. Acesso em: 08 out. 2022.

USDA – United States Departamento of Agriculture. **Biofuels Annual: Paraguay Buenos Aires**: USDA, 2015, 10 p. Disponível em:

https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Biofuels%20Annual_Buenos%20Aires_Paraguay_8-10-2015.pdf. Acesso em: 08 out. 2022.

USDA – United States Departamento of Agriculture. **Biofuels Annual: Argentina. Buenos Aires**: USDA, 2021, 22 p. Disponível em:

https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Buenos%20Aires_Argentina_07-26-2021.pdf. Acesso em: 08 out. 2022.

USDA – United States Departamento of Agriculture. **Oilseeds and Products Update. 2020. 05 p.** Disponível em:

https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Oilseeds%20and%20Products%20Update_Buenos%20Aires_Argentina_02-22-2020. Acesso em: 08 out. 2022.

VERDÉLIO, A. Presidente aprova mistura de 10% de biodiesel no óleo diesel. **Agência Brasil**. 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-12/presidente-aprova-mistura-de-10-de-biodiesel-no-oleo-diesel#:~:text=O%20presidente%20Jair%20Bolsonaro%20aprovou,para%20o%20ano%20de%202022>. Acesso em: 18 set. 2022.

VIDAL, M. F. Biocombustíveis: Biodiesel e Etanol. **Caderno Setorial Etene**. 2022.

Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1441/1/2022_CDS_248.pdf. Acesso em: 07 jan. 2023.

VINHADO, F. S.; SOUZA, L. M. GONÇALVES, M. F. Apresentação. Curso 1.

Regulamentação e garantia da qualidade de combustíveis de aviação sustentáveis. 1º Congresso Brasileiro da Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Renováveis para aviação. ANP. Embraer. 2019. Disponível em: <https://ubrabilio.com.br/wp-content/uploads/2019/08/CURSO-1-FABIO-VINHADOANP-LORENAANP-MARCELO-GON%C3%87ALVESEMBRAER-1.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2023.

WANG, Wei-Cheng; TAO, Ling. Bio-jet fuel conversion technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 801–822, 2016.

WEI, H.; LIU, W.; CHEN, X.; *et al.* Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review. **Fuel**, v. 254, p. 115599, 2019.

WESTFALL, P. J; GARDNER, T. S. Industrial fermentation of renewable diesel fuels. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 22, n. 3, p. 344–350, 2011.

WINANGUN, K.; SETIYAWAN, A.; SUDARMANTA, B. The combustion characteristics and performance of a Diesel Dual-Fuel (DDF) engine fueled by palm oil biodiesel and hydrogen gas. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 42, p. 102755, 2023.

WU, H, W; WU, Z ,Y. Combustion characteristics and optimal factors determination with Taguchi method for diesel engines port-injecting hydrogen. Energy, v. 47. p. 411 - 420. 2012.