

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Julia Proença Reis
Victória Guimarães Matos Santos



ESTUDO SOBRE BIOCOMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA
MOTOR CICLO OTTO NO BRASIL, NA ARGENTINA E NO
PARAGUAI

RIO DE JANEIRO

2022

Julia Proença Reis
Victória Guimarães Matos Santos

ESTUDO SOBRE BIOCOMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA MOTOR CICLO OTTO
NO BRASIL, NA ARGENTINA E NO 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 Engenheiro Químico.

Orientador(es): Yordanka Reyes Cruz
Donato Alexandre Gomes Aranda

Rio de Janeiro
2022

CIP - Catalogação na Publicação

R237e Reis, Julia Proença, Santos, Victória Guimarães Matos
Estudo sobre biocombustíveis alternativos para
motor Ciclo Otto no Brasil, na Argentina e no
Paraguai / Santos, Victória Guimarães Matos Reis,
Julia Proença. -- Rio de Janeiro, 2022.
134 f.

Orientador: Yordanka Reyes Cruz.
Coorientador: Donato Alexandre Gomes Aranda.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Engenharia Química, 2022.

1. Revisão Bibliográfica. 2. Motor Ciclo Otto.
3. Biocombustíveis Alternativos. 4. Monografia
(Graduação- UFRJ/EQ). 5. Yordanka Reyes Cruz e
Donato Alexandre Gomes Aranda. I. Cruz, Yordanka
Reyes, orient. II. Aranda, Donato Alexandre Gomes ,
coorient. III. Título.

Julia Proença Reis
Victória Guimarães Matos Santos

ESTUDO SOBRE BIOCOMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA MOTOR CICLO OTTO
NO BRASIL, NA ARGENTINA E NO 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 Engenheiro
Químico.

Aprovado em 20 de dezembro de 2022.

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

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

Carla Reis de Araújo, D.Sc, Universidade Federal do Rio de Janeiro

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

Rio de Janeiro
2022

AGRADECIMENTOS

Primeiro, agradecemos à Deus por nos guiar e proteger nossa jornada.

Aos nossos pais e nossas famílias, pelo amor, suporte e apoio incondicional em todos os momentos de nossas vidas. Sem vocês, não estaríamos aqui!

Eu, Victória, agradeço à minha mãe Wânia, por todo o suporte e incentivo na minha educação. Se eu estou aqui hoje é graças a todo o seu esforço. Muito obrigado por sempre acreditar em mim. Essa conquista também é sua!

Eu, Julia, agradeço aos meus pais, Cecy e Anizio, por terem proporcionado toda a assistência e o incentivo necessário durante esses anos. Não há palavras para agradecer todo o suporte.

Aos nossos irmãos, Felipe e Vitor, pelo apoio e companheirismo diário desde a infância.

Aos professores e amigos da UFRJ, nosso muito obrigado pelo compartilhamento de conhecimento e conselhos da jornada acadêmica. À EQ Hands-On, em especial o ciclo de 2020, pelas vivências e aprendizados.

Aos nossos companheiros de trabalho, por todas as oportunidades de aprendizado e pelo apoio no nosso desenvolvimento profissional.

Eu, Victória, agradeço à minha equipe de trabalho na Radix, Downstream BR, por todo o suporte e conselhos ao longo do caminho. Um agradecimento especial à Juliana e ao Vitor, por serem a melhor equipe de processos que eu poderia participar e por compartilharem diversos momentos especiais comigo.

Eu, Victória, agradeço à Julia pelo companheirismo e amizade durante toda a graduação. Obrigado por compartilhar todos os altos e baixos que uma graduação pode oferecer e por tornar o dia a dia da faculdade mais leve e divertido.

Eu, Victória, agradeço ao meu namorado Guilherme, por todo amor, apoio emocional e paciência durante esse final de graduação. Obrigado por sempre me incentivar e sonhar comigo.

Eu, Julia, agradeço às minhas amigas Victoria Piva, Carol, Samara, Nathalia e Mariana que me apoiaram ao longo de todo o curso e foram compreensivas com momentos difíceis. Agradeço em especial à Victória Matos pela companhia no preparo deste trabalho, mas principalmente, por ter estado ao meu lado durante nossa graduação. Sua parceria fez diferença!

Um agradecimento especial à nossa orientadora, Yordanka, pelo suporte técnico, paciência e disponibilidade durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Todos foram essenciais para que chegássemos até aqui!

RESUMO

REIS, Julia; SANTOS, Victória. **Estudo sobre Biocombustíveis Alternativos para Motor Ciclo Otto no Brasil, na Argentina e no Paraguai**. Rio de Janeiro, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Os motores à combustão interna com ignição por centelha, também conhecidos como motores de ciclo Otto, utilizam combustíveis fósseis não-renováveis para o seu funcionamento. Esses combustíveis possuem alto poder poluente, com altos níveis de emissões de gases de efeito estufa, além de serem finitos. Esses fatos trazem preocupações com a possibilidade de esses combustíveis deixarem de existir em um futuro próximo, mas, cada vez mais presentes estão a preocupação com o meio ambiente e a necessidade de realizar uma transição da matriz energética, tornando-se fundamental encontrar combustíveis alternativos, de origem renovável, para os motores. Neste cenário, o etanol de segunda geração, o biogás, o biometano e o hidrogênio surgem como alternativas para este problema, uma vez que são renováveis e menos poluentes que os combustíveis advindos do petróleo, podendo ser produzidos a partir de resíduos de outros processos. O objetivo proposto no presente trabalho é realizar um mapeamento no Brasil, na Argentina e no Paraguai em relação às diferentes qualidades de combustíveis que podem ser utilizadas em motores de ciclo Otto, de acordo com disponibilidade de recursos e incentivos governamentais. Dessa forma, foi possível avaliar como é feito o processo de conversão para a utilização dos combustíveis alternativos nos motores. Ao final, verificou-se o avanço do Brasil frente aos outros países, com plantas em escala comercial de etanol de segunda geração e contínuos investimentos em biogás e hidrogênio. Foi avaliado, também, que a Argentina e o Paraguai ainda devem se desenvolver e buscar investimentos, uma vez que não possuem plantas-piloto para alguns dos biocombustíveis avaliados.

Palavras-chave: Motor ciclo Otto. Combustíveis fósseis. Combustíveis alternativos.

ABSTRACT

Reis, Julia; Santos, Victória. **Study on Alternative Biofuels for Otto Cycle Engines in Brazil, Argentina and Paraguay**. Rio de Janeiro, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Internal combustion engines with spark ignition, also known as Otto cycle engines, use non-renewable fossil fuels for their operation. These fuels have high polluting power, with high levels of greenhouse gas emissions, in addition to being finite. These facts raise concerns about the possibility that these fuels will cease to exist in the near future, but the concern with the environment and the need to carry out a transition in the energy matrix are increasingly present, making it essential to find alternative fuels of renewable origin for the engines. In this scenario, second-generation ethanol, biogas, biomethane and hydrogen are seen as alternatives for this problem, since they are renewable and less polluting than fuels from petroleum and can be produced from residues from other processes. The objective proposed in the present work is to perform a mapping in Brazil, Argentina and Paraguay in relation to the different qualities of fuels that can be used in Otto cycle engines, according to the availability of resources and governmental incentives. Therefore, it was possible to assess how the conversion process is performed for the use of alternative fuels in engines. At last, it was verified the advance of Brazil in comparison to the other countries, having with commercial-scale second-generation ethanol plants and continuous investments in biogas and hydrogen. It was also assessed that Argentina and Paraguay still need to develop and seek investments, since they do not have pilot plants for some of the evaluated biofuels.

Keywords: Otto cycle engine. Fossil fuels. Alternative fuels.

“You may encounter many defeats, but you must not be defeated. In fact, it may be necessary to encounter the defeats, so you can know who you are, what you can rise from, how you can still come out of it.”

(Maya Angelou)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Quatro tempos de motor de ciclo Otto real.....	13
Figura 2 - Motor do ciclo Otto	14
Figura 3 - Injetor em sistema de injeção indireta (à esquerda) e em sistema de injeção direta (à direita).....	15
Figura 4 - Produção de derivados do petróleo, em milhares de m ³	19
Figura 5 - Balanço nacional de gasolina A (mil m ³ /d)	20
Figura 6 - Atendimento à demanda por região e cabotagem inter-regional de gasolina A em 2031	20
Figura 7 - Vendas mensais de gasolina C pelas distribuidoras (bilhões de litros)	21
Figura 8 - Produção de petróleo por bacia produtora 2012-2022 (em m ³).....	22
Figura 9 - Volume de gasolina (pura e com etanol) comercializada no Paraguai em 2015-2019, em litros	23
Figura 10 - Processo de destilação do petróleo em uma refinaria	25
Figura 11 - Diagrama esquemático de uma unidade de craqueamento catalítico	26
Figura 12 - Instalações produtoras de etanol no Brasil em 2022.....	29
Figura 13 - Instalações produtoras de etanol no Brasil em 2022.....	29
Figura 14 - Produção de etanol no Brasil nas safras de 2009 até 2021	30
Figura 15 - Fluxo de unidades processadoras de cana de açúcar e variação de capacidade instalada.....	31
Figura 16 - Volume importado de etanol anidro na última década	32
Figura 17 - Exportação de etanol no Brasil na última década	33
Figura 18 - Comparação das vendas de combustíveis com o mesmo mês de 2019 (em %)	34
Figura 19 - Vendas mensais de etanol hidratado (em bilhões de litros).....	34
Figura 20 - Produção de etanol de cana de açúcar e de milho na Argentina (2011-2020).....	36
Figura 21 - Produção e consumo de etanol combustível na Argentina	37
Figura 22 - Consumo de gasolina e etanol na Argentina de 2011 a 2022 (projeção).....	37
Figura 23 - Produção de etanol no Paraguai desde 2005.....	39
Figura 24 - Volume de gasolina e etanol comercializados no Paraguai em 2015-2019, em milhões de litros	40
Figura 25 - Mapa da localização de indústrias produtoras de etanol no Paraguai.....	41
Figura 26 - Rotas tecnológicas para a produção de etanol	42

Figura 27 - Produtividade das matérias-primas de etanol no Brasil.....	43
Figura 28 - Cadeia de valor do etanol de cana-de-açúcar simplificada.....	44
Figura 29 - Cadeia de valor do etanol de milho simplificada.....	44
Figura 30 - Estrutura da biomassa da cana de açúcar.....	45
Figura 31 - Fluxo da produção de açúcar e bioetanol de cana	47
Figura 32 - Estrutura da biomassa do milho.....	48
Figura 33 - Fluxo da produção de bioetanol de milho por via seca.....	49
Figura 34 - Fluxograma do processo de uma usina flex.....	50
Figura 35 - Proporção das matérias-primas utilizadas na produção de etanol no ano de 2021	51
Figura 36 - Evolução da frota de veículos movido a GNV na Argentina de 1998 a 2020.....	55
Figura 37 - Consumo setorial de gás natural na Argentina de 2010 a 2019.....	57
Figura 38 - Etapas de uma unidade de processamento de gás natural.....	58
Figura 39 - Estrutura da biomassa lignocelulósica.....	67
Figura 40 - Formação da estrutura da celulose a partir da D-glicose.....	68
Figura 41 - Produção de etanol pela hidrólise de biomassa	69
Figura 42 - Principais plantas de etanol de segunda geração no mundo	73
Figura 43 - Projeção da oferta de etanol no Brasil até 2031	75
Figura 44 - Projeção da demanda de etanol total até 2031	76
Figura 45 - Estrutura da planta de biogás	79
Figura 46 - Etapas da produção de biogás	80
Figura 47 - Crescimento do setor de biogás nos últimos cinco anos (Plantas em operação) ...	83
Figura 48 - Distribuição do número total de plantas de biogás levantadas em 2021, quanto ao status operacional	84
Figura 49 - Instalações produtoras de biogás no Brasil.....	85
Figura 50 - Crescimento do número de plantas de biogás, em operação, com aproveitamento energético, por estado.....	85
Figura 51 - Volume de biogás por estado no país	86
Figura 52 - Proporção entre número de plantas de biogás e volume, por fonte de substrato ...	87
Figura 53 - Distribuição de plantas de digestão anaeróbica por províncias na Argentina em 2016	88
Figura 54 - <i>Water Scrubbing</i> do Biogás	91
Figura 55 - Fluxograma do Pressure Swing Adsorption	92
Figura 56 - Separação por membrana.....	93
Figura 57 - Corte na membrana polimérica.....	93

Figura 58 - Produção do biometano no Brasil.....	94
Figura 59 - Novas plantas de biometano no Brasil.....	95
Figura 60 - Injeção gradual de biometano na rede de Buenos Aires (bilhões de BTU).....	96
Figura 61 - Impactos do biometano atingir 5% do consumo de gás natural em Buenos Aires, 2032	97
Figura 62 - Rotas para a produção de H ₂	99
Figura 63 - Custo nivelado da produção de H ₂ via eletrólise alimentada por sistema solar híbrido e eólico <i>onshore</i> na América Latina (projeção para 2050).....	101
Figura 64 - Demanda de hidrogênio na América Latina em 2019	102
Figura 65 - Demanda de H ₂ com projeção até 2050 no cenário de zero emissões poluentes (em milhões de toneladas)	103
Figura 66 - Demanda de hidrogênio por continente (projeção 2030).....	104
Figura 67 - Países que concentram maior parte do consumo de H ₂ na América Latina	104
Figura 68 - Ações governamentais para o H ₂ no Brasil	106
Figura 69 - Eixos estratégicos do PNH ₂	107
Figura 70 - Projeto do hub de hidrogênio no Porto do Açu	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Efeitos da adição do etanol à gasolina.....	18
Tabela 2 - Principais características físico-químicas do etanol e da gasolina.....	27
Tabela 3 - Produção e venda de etanol (em litros) no Paraguai em 2014-2019.....	39
Tabela 4 - Destilarias de etanol de milho no Brasil em 2022.....	52
Tabela 5 - Distribuição das estações de abastecimento de GNV por província em 2020 na Argentina.....	56
Tabela 6 - Propriedades dos combustíveis.....	64
Tabela 7 - Composição química dos resíduos lignocelulósicos.....	67
Tabela 8 - Composição química do bagaço de cana.....	71
Tabela 9 - Capacidade produtiva dos principais resíduos lignocelulósicos.....	71
Tabela 10 - Principais iniciativas de produção de E2G no Brasil.....	74
Tabela 11 - Equivalência entre o biogás e outros combustíveis.....	78
Tabela 12 - Características físico-químicas da vinhaça biodigerida - Usina São Martinho.....	82
Tabela 13 - Fontes de substratos para a produção de biogás utilizadas no Brasil.....	87
Tabela 14 - Substratos mais utilizados na Argentina.....	89
Tabela 15 - Objetivo das plantas de biogás na Argentina em 2016.....	89
Tabela 16 - Classificação do hidrogênio em escala de cores.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEGÁS	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado
ABIOGÁS	Associação Brasileira de Biogás
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANDE	<i>Administración Nacional de Electricidad</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CADER	<i>Cámara Argentina de Energías Renovables</i>
CCUS	<i>Carbon capture utilization and storage</i>
CENAL	Comissão Executiva Nacional do Álcool
CES	Conselho Econômico e Social
CIBIOGÁS	Centro Internacional de Energias Renováveis
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CNAL	Conselho Nacional do Álcool
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CSV	Certificado de segurança veicular
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
DDGS	<i>Distillers dried grains with solubles</i>
DRI	<i>Direct reduction of iron</i>
E2G	Etanol de segunda geração
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCC	<i>Fluid catalytic cracking</i>
FFI	<i>Fortescue future industries</i>
GDI	<i>Gasoline direct injection</i>
GEE	Gases do efeito estufa
GLP	Gás liquefeito do petróleo
GNC	Gás natural comprimido
GNV	Gás natural veicular
ICMS	Imposto sobre circulação de mercadorias e serviços
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INDEC	<i>Instituto Nacional de Estadística y Censos</i>
INTA	Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária
INTI	Instituto Nacional de Tecnologia Industrial

IPHE	<i>International partnership for hydrogen and fuel cells in the economy</i>
IPS	<i>Inter Press Service</i>
IPVA	Imposto sobre propriedade de veículo automotor
ITL	Instituição Técnica Licenciada
MAG	Ministério da Agricultura e Pecuária
MCI	Motor de combustão interna
MIC	Ministério de Indústria e Comércio
MON	<i>Motor octane number</i>
MTBE	Éter metil terc-butílico
OEE	Órgãos e Entidades Estaduais
PFI	<i>Port fuel injection</i>
PND	Plano Nacional de Desenvolvimento
PNH ₂	Programa Nacional do Hidrogênio
PSA	<i>Pressure swing adsorption</i>
RON	<i>Research octane number</i>
UDOP	União Nacional da Bioenergia
UNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar e Bioenergia
UPGN	Unidade de Processamento de Gás Natural
USDA	<i>United States department of agriculture</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>A/C</i>	Relação ar-combustível (-)
<i>C/N</i>	Relação carbono-nitrogênio (-)
<i>DBO</i>	Demanda biológica de oxigênio (mg/L)
<i>DQO</i>	Demanda química de oxigênio (mg/L)
<i>H/C</i>	Relação hidrogênio-carbono (-)
<i>pH</i>	Potencial hidrogeniônico (-)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 JUSTIFICATIVA DA PROPOSTA.....	10
1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICO.....	11
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 MOTORES CICLO OTTO	13
2.2 MOTORES FLEX	16
2.3 GASOLINA.....	17
2.3.1 Panorama da gasolina no Brasil.....	17
2.3.1.1 Oferta e demanda de gasolina.....	19
2.3.2 Panorama da gasolina na Argentina.....	21
2.3.3 Panorama da gasolina no Paraguai	22
2.3.4 Produção de gasolina.....	24
2.4 ETANOL	26
2.4.1 Panorama do etanol no Brasil	27
2.4.2 Panorama do etanol na Argentina	35
2.4.3 Panorama do etanol no Paraguai	38
2.4.4 Produção de etanol	42
2.4.4.1 Etanol 1ª geração	42
2.4.4.2 Produção a partir da cana de açúcar	44
2.4.4.3 Produção a partir do milho	47
2.4.4.4 Usinas Flex	50
2.5 GNV	53
2.5.1 Panorama do GNV no Brasil.....	53
2.5.2 Panorama do GNV na Argentina.....	54
2.5.3 Produção de GNV.....	57
3 METODOLOGIA.....	59
4 RESULTADOS	61
4.1 NOVAS PROPOSTAS PARA MOTORES CICLO OTTO	61
4.1.1 Motor com biogás	61
4.1.2 Motor com biometano	62
4.1.3 Motor com hidrogênio puro.....	63

4.1.4 Motor com etanol e adição de hidrogênio	64
4.2 NOVAS QUALIDADES DE BIOCOMBUSTÍVEIS PARA MOTORES CICLO OTTO	65
4.2.1 Etanol de 2ª geração	66
4.2.1.1 Matéria-prima	66
4.2.1.2 Produção	68
4.2.1.3 Panorama do etanol de 2ª geração no Brasil.....	72
4.2.1.4 Panorama do etanol de 2ª geração na Argentina	76
4.2.2 Biogás.....	78
4.2.2.1 Matéria-prima	79
4.2.2.2 Produção	80
4.2.2.3 Panorama do biogás no Brasil	83
4.2.2.4 Panorama do biogás na Argentina	87
4.2.2.5 Panorama do biogás no Paraguai	89
4.2.3 Biometano.....	90
4.2.3.1 Produção	90
4.2.3.2 Panorama do biometano no Brasil.....	93
4.2.3.3 Panorama do biometano na Argentina	95
4.2.4 Hidrogênio.....	98
4.2.4.1 Rotas tecnológicas	98
4.2.4.2 Cenário na América Latina.....	101
4.2.4.3 Cenário brasileiro para o hidrogênio	105
4.2.4.4 Cenário argentino para o hidrogênio	109
4.2.4.5 Cenário paraguaio para o hidrogênio.....	111
5 CONCLUSÕES.....	113
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	114
REFERÊNCIAS	115

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA DA PROPOSTA

Em um cenário de urgência por meios alternativos que diminuam as emissões de gases do efeito estufa, um dos focos globais de maior proporção é a transição energética, passagem de uma matriz energética com ênfase em combustíveis fósseis como matéria-prima para uma matriz com minimização da emissão de carbono, através do uso de fontes renováveis. Nesse panorama, os biocombustíveis tornam-se uma das alternativas mais viáveis para variados setores econômicos (UDOP, 2021).

A produção dos biocombustíveis parte de biomassa, ou seja, matéria orgânica – animal ou vegetal – derivada de produtos agrícolas, e ocorre por meio de processos bioquímicos ou termoquímicos (BALAT, 2007 *apud* MITSUHARA, 2021). Diferentemente dos combustíveis de origem fóssil, os biocombustíveis neutralizam a pegada de carbono, reduzem a emissão dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera e são de origem renovável (RAIZEN, 2021). Para serem reconhecidos como tal, os biocombustíveis devem atender a determinados parâmetros. Isso significa que o prefixo "bio" não é indicativo de origem biológica, mas sim de um processo de produção global que apresenta sustentabilidade ambiental (GRASSO, 2016).

Os biocombustíveis líquidos podem ser usados em motores de combustão interna, como os motores do ciclo Otto, nos quais a combustão se inicia com ignição por centelha. A caracterização da eficiência de um motor leva em consideração o tipo de combustível e o poder calorífico deste. Cada combustível possui propriedades específicas e constituições químicas diferentes, que influenciam no desempenho (CARVALHO, 2011). Atualmente, busca-se, cada vez mais, o desenvolvimento de motores de combustão interna mais eficientes, tanto por motivos econômicos e tecnológicos, quanto pela sustentabilidade, adaptados para os diversos tipos de combustíveis alternativos avaliados neste trabalho.

O presente trabalho foi realizado visando atender uma demanda da empresa Cargill, empresa do setor alimentício estabelecida como uma das maiores indústrias de alimentos do país, cuja proposta principal é nutrir o mundo de forma segura, responsável e sustentável. A empresa demonstrou interesse na realização de um mapeamento nos países Brasil, Argentina e Paraguai em relação às diferentes qualidades de biocombustíveis que podem ser utilizadas em motores de ciclo Otto e as diferentes alterações que vêm sendo propostas para esses motores com o objetivo de permitir o consumo desses biocombustíveis de forma eficiente.

Os três países foram selecionados pela empresa para a realização do estudo haja vista que são os maiores produtores de grãos da América do Sul e apresentam um papel relevante nesse cenário, em comparação com os demais países do continente. A pesquisa buscou satisfazer a meta da empresa de conhecer a realidade sul-americana, buscando a possibilidade de explorar esse potencial nos próximos dez anos e aumentar a sua influência nesse setor.

1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICO

O objetivo geral deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica sobre os diferentes combustíveis que podem ser utilizados nos motores de ciclo Otto, com ênfase nos combustíveis adotados no Brasil, na Argentina e no Paraguai.

Como objetivos específicos, foi proposto:

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre motor de ignição por centelha (ciclo Otto), a implementação de motores *flex* e os combustíveis convencionais utilizados nos mesmos, como a gasolina, o etanol de primeira geração e o GNV.
- Estudar sobre a produção desses combustíveis tradicionais e a presença deles nos três países avaliados, incluindo oferta, demanda e incentivos legislativos.
- Entender as novas propostas para motores de ciclo Otto, as adaptações necessárias para abranger os biocombustíveis alternativos, bem como a vantagem da utilização dos mesmos.
- Analisar, com base na literatura e nos incentivos governamentais de cada país, as alternativas de combustíveis de fontes renováveis, como o etanol de segunda geração, o biogás, o biometano e o hidrogênio, avaliando a viabilidade de implementação de acordo com o cenário dos três países.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é constituído por 7 tópicos.

No tópico 1 apresenta-se a introdução do trabalho que descreve as principais motivações e os objetivos geral e específicos do mesmo.

No tópico 2 apresenta-se o referencial teórico, onde são destacadas as tecnologias de motores de ciclo Otto existente no Brasil, na Argentina e no Paraguai. A revisão bibliográfica aborda ainda as qualidades de combustíveis aprovadas pela ANP para estes motores, um descritivo do processo para obtenção de cada combustível e o mapeamento da oferta/demanda nos três países.

A metodologia adotada para a realização deste trabalho é descrita no tópico 3.

O tópico 4 consiste nos resultados obtidos ao realizar o mapeamento sobre as tecnologias alternativas de motores de ciclo Otto incluindo as novas qualidades de biocombustíveis, fluxogramas dos processos de obtenção e estudo de oferta/demanda nos três países propostos.

Finalmente, o tópico 5 apresenta as conclusões obtidas com o trabalho, seguido por sugestões de trabalhos futuros no tópico 6. Todas as referências utilizadas na pesquisa estão listadas no último tópico.

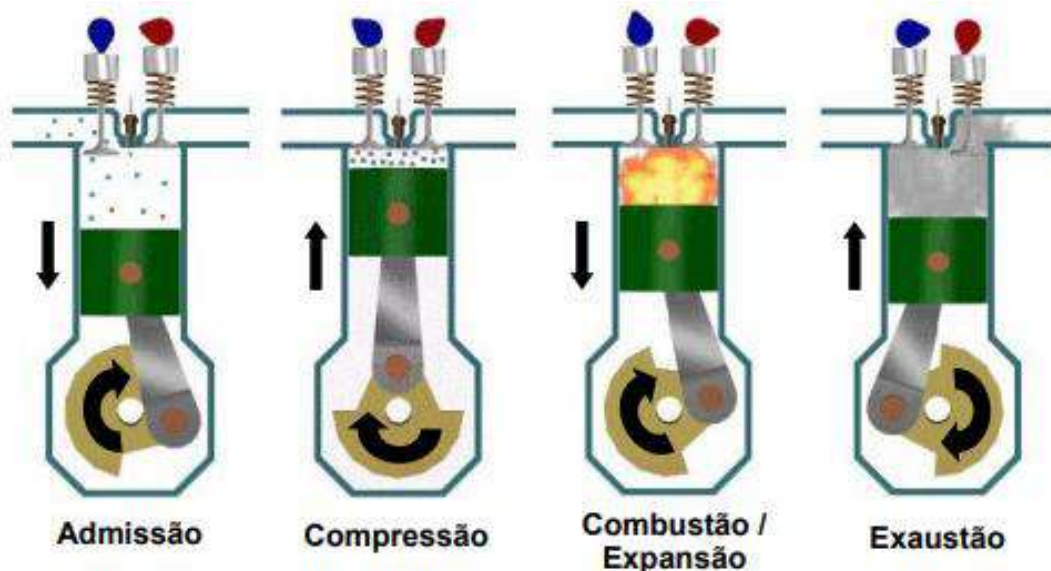
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MOTORES CICLO OTTO

O desenvolvimento de motores de combustão interna tem sido proposto há séculos. Em 1652, o Padre Hautefoille propôs a ideia de se construir um motor utilizando a força expansiva dos gases provenientes da combustão de pólvora num cilindro fechado. Ao longo dos séculos seguintes, a ideia foi sendo desenvolvida por diversos pesquisadores até que, em 1862, Beau de Rochás patenteou as premissas de atuação de motores de ciclos de quatro tempos de combustão interna com êmbolos. Esse estudo mostrou elevada eficiência para esse tipo de motor, de modo que, em 1876, o alemão Nikolaus August Otto, através de pesquisa similar, construiu um modelo que demonstrou, além da alta eficiência, também baixo nível de ruído comparado a modelos anteriores de motores (VARELLA, 2018).

Conforme os princípios de funcionamento descritos por Varella (2018), os quatro tempos do motor, exibidos na Figura 1, caracterizam-se por: admissão de combustível por recuo do pistão, compressão, combustão (ou expansão) e exaustão, na qual são liberados os resíduos da combustão.

Figura 1 - Quatro tempos de motor de ciclo Otto real



Fonte: Amorim (2005)

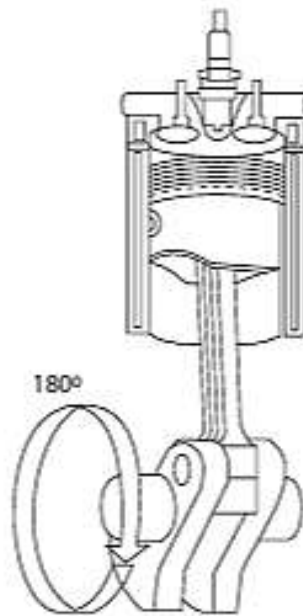
Gauto *et al* (2016) descrevem as quatro etapas da seguinte maneira:

- i. Admissão: admite-se a gasolina através de uma válvula para o interior da câmara, juntamente com o ar necessário à reação;

- ii. Compressão: o pistão realiza um movimento ascendente, comprimindo a gasolina dentro da câmara;
- iii. Combustão: a vela de ignição produz uma faísca, dando origem à combustão, provocando uma expansão e um aumento de pressão, empurrando o pistão para baixo;
- iv. Exaustão: concluída a reação, o pistão sobe novamente e ocorre o escapamento do motor, descarregando o vapor d'água e o gás carbônico formados.

No motor de ciclo Otto (Figura 2), ou motor de ignição por faísca, a mistura de ar e combustível que é inserida no motor pode ser dosada anteriormente ou formada no interior dos cilindros em uma injeção direta de combustível (GDI - *gasoline direct injection*), e é inflamada por uma faísca que ocorre entre os eletrodos de uma vela (BRUNETTI, 2012). As reações de oxidação do combustível se iniciam, ocupando um volume pequeno em torno da vela, com um aumento local da temperatura e um crescimento desprezível da pressão. Ocorre a propagação da combustão, seguida da liberação de calor que provoca reações de oxidação em cadeia.

Figura 2 - Motor do ciclo Otto



Fonte: Brunetti (2012)

As reações em cadeia, fase também conhecida como propagação da chama, fazem com que a mistura ainda não queimada sofra compressão e aquecimento, podendo atingir a temperatura de autoignição do combustível. Uma combustão considerada normal ocorre quando a chama alcança essa mistura antes da autoignição; caso contrário, ocorrerá a detonação, ou seja,

uma combustão repentina, a volume constante, elevando bruscamente a pressão e propagando ondas de pressão em alta amplitude através da câmara de combustão. Esse fenômeno acarreta um maior fluxo térmico para as paredes da câmara, aumentando a temperatura localizada, causando estresse térmico e mecânico e, conseqüentemente, diminuindo a eficiência do motor.

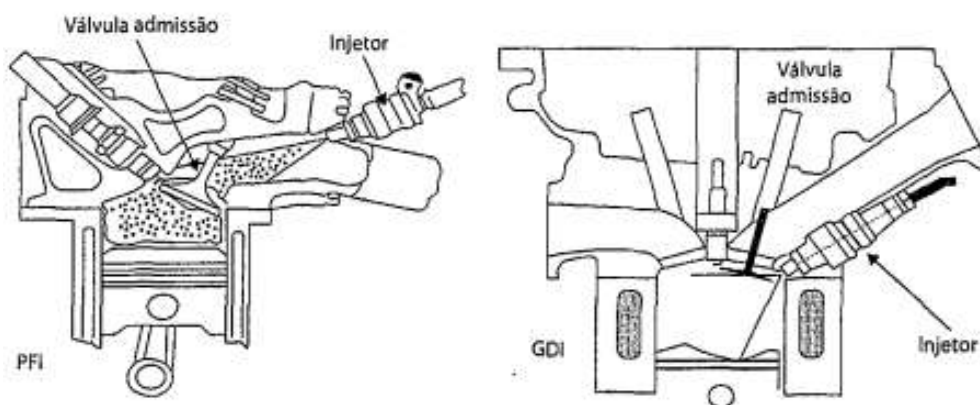
Para esses motores, há diversos fatores que influenciam na sua detonação. Ainda segundo Brunetti (2012), os combustíveis adequados a este tipo de motor devem possuir alta octanagem, o que está relacionado a uma elevada temperatura de autoignição.

A octanagem (ou Número de Octanas) é a resistência da mistura do combustível com ar à autoignição, responsável pela detonação; essa grandeza aumenta quando se mistura o combustível com compostos que possuem maior número de octanas, como o etanol ou o metanol. Devido a isto, em diversos países, etanol anidro é adicionado à gasolina, como uma forma de aumentar a octanagem. Este aumento possibilita que câmaras de motores sejam dimensionadas com maior taxa de compressão, gerando maior eficiência térmica ao motor. Efeitos da adição do etanol à gasolina serão explorados em itens posteriores.

Outros fatores que influenciam na detonação de motores são a pressão e a temperatura do ar de admissão na câmara de combustão. Quanto menores ambas, mais improvável torna-se a detonação. A taxa de compressão é o fator principal de influência em ambos os parâmetros. Além disso, quanto mais próxima da estequiometria for a mistura, mais fácil de ocorrer será a detonação (BRUNETTI, 2012).

Nos motores de ciclo Otto, conforme mencionado anteriormente, a mistura de combustível pode ser injetada direta ou indiretamente (*PFI: port fuel injection*), conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Injetor em sistema de injeção indireta (à esquerda) e em sistema de injeção direta (à direita)



Fonte: Brunetti (2012)

A injeção direta é preferível, uma vez que leva a maiores taxas de compressão, aumentando a eficiência do motor. Isso porque o sistema GDI possibilita que, no mesmo ciclo de combustão, mais de uma injeção de combustível ocorra, levando a uma temperatura reduzida no interior da câmara de combustão e, conseqüentemente, possui impacto em uma maior resistência à detonação, levando a taxas de compressão mais elevadas e eficientes (BRUNETTI, 2012). A taxa de compressão é a relação entre o volume total do motor e o volume da câmara de compressão (CARVALHO, 2011).

Por fim, a válvula de saída abre para a etapa de exaustão, na qual há a saída do gás queimado na explosão. A expansão leva o motor ao próximo estado, voltando ao seu estado inicial e reiniciando o ciclo.

2.2 MOTORES FLEX

Motores *flex* são aqueles que funcionam com mais de um tipo de combustível; por esse motivo, são considerados flexíveis, dando maior liberdade para que o usuário escolha se deseja abastecer o veículo com gasolina ou álcool – combustíveis mais comumente utilizados –, de acordo com a economia atual ou com o desempenho do veículo. Além disso, é possível misturar os combustíveis em qualquer proporção, uma vez que esta é identificada pelo módulo de injeção, que determina a quantidade necessária para uma queima completa. As motorizações bicompostíveis, independentemente de quais utilizam, possuem a mesma robustez e durabilidade do modelo que utiliza apenas um tipo de combustível; são, contudo, menos econômicos (UOL, 2020). Esses motores possuem taxa de compressão e regulagem que levam à baixa eficiência de conversão de combustível, quando se compara com uma operação com gasolina pura ou etanol puro. Isso porque, para um motor que pode operar com dois combustíveis distintos, teoricamente, a operação deveria ocorrer com uma razão de compressão ideal para cada um, mas, na prática, o motor atinge uma taxa de compressão intermediária (PRASS, 2014), refletindo em perdas de potência e consumo (UOL, 2020).

O lançamento do motor *flex* no Brasil aconteceu em 24 de março de 2003, com o primeiro veículo desse modelo desenvolvido pela Volkswagen, o Gol 1.6 Total Flex. Desde então, esse tipo de motor difundiu-se, sendo o modelo majoritário utilizado atualmente no país. Atualmente, 95% dos carros introduzidos no mercado possuem a tecnologia de motor *flex*.

Enquanto o Brasil utiliza essa tecnologia há décadas, a Argentina apenas exporta, uma vez que veículos *flex* não são vendidos em território nacional. Segundo anúncio feito pelo governador de Córdoba, Juan Schiaretti, já existe o desejo de reverter esse cenário e autorizar os motores *flex* na Argentina. O governo de Córdoba já está trabalhando em conjunto com a

empresa Oreste Berta S.A. para converter os motores da frota de veículos oficiais (INSIDEEVS, 2022).

No Paraguai, seguindo a Lei nº 5444 de 13 de julho de 2015, artigo 9º, estabelece-se que as empresas montadoras de veículos instaladas no país devem montar linhas de produção para unidades com motores *flex-fuel* (BACN, 2015), sendo os termos e prazos regulamentados pelo Ministério de Indústria e Comércio (MIC). Também é determinado que os Órgãos e Entidades Estaduais (OEE), ao obterem veículos leves, incluam, no mínimo, 30% de veículos com motores *flex*, a fim de incrementar a margem de compra dessa modalidade, visando um futuro com 100% das frotas de transporte movidas a bicombustíveis.

2.3 GASOLINA

O petróleo é uma mistura complexa de hidrocarbonetos e a gasolina representa sua principal fração, sendo suas características relacionadas à mistura de origem. Os hidrocarbonetos de sua composição são formados por moléculas de cadeia carbônica com 5 a 10 átomos de carbono. A principal função da gasolina é atuar como combustível carburante nos motores com combustão interna com ignição por centelha (CAMPANARO, 2018).

2.3.1 Panorama da gasolina no Brasil

A gasolina utilizada para automóveis é uma mistura de hidrocarbonetos como parafinas, isoparafinas, naftênicos, olefinas e aromáticos, obtidos pelos processos de destilação, craqueamento e hidrocrackeamento. É o combustível leve de maior comercialização no Brasil. Segundo a ANP (2020), os tipos utilizados no Brasil são gasolina A (comum e premium) e C (comum e premium), descritas resumidamente abaixo. A primeira, comum, é produzida a partir de processos de refinarias, destinada aos veículos automotores dotados de motores de ignição por centelha, sem adição de etanol anidro; sua versão premium possui octanagem mais elevada. Já a segunda, do tipo C, é obtida com a mistura de gasolina A comum e etanol anidro combustível, nas proporções estabelecidas pela legislação em vigor, tendo a premium também maior octanagem.

Apesar de esse combustível ser o mais utilizado, não é sempre que a gasolina realiza uma combustão completa; a consequência disso é o gás residual (parte do combustível que não sofreu combustão) gerar uma autoignição e uma detonação brusca no momento de aquecimento e compressão. Esse acontecimento leva a um impacto no pistão do motor, podendo danificar os componentes mecânicos (GUIMARÃES *et al*, 2003 *apud* SERPA *et al*, 2019).

A gasolina atualmente produzida pela Petrobras, segundo sua ficha técnica, possui as vantagens de possibilitar uma máxima eficiência dos sistemas de pós-tratamento dos gases de escapamento dos veículos, conseqüentemente, reduzindo as emissões de poluentes atmosféricos; e, ademais, de apresentar um mínimo depósito de gases residuais na câmara de combustão, em válvulas e bicos injetores, levando a um menor desgaste do motor (PETROBRAS, 2020). O nível de depósito desta gasolina equivale ao nível obtido com etanol hidratado utilizado como combustível.

Conforme a ficha técnica da Petrobras (2020), a adição de etanol anidro à gasolina de uso automotivo é obrigatória. O teor atual de etanol anidro permitido na legislação é de 27% em volume para gasolina C Comum e 25% para gasolina C premium, conforme Portaria MAPA nº 75/2015. Uma das vantagens relacionadas à essa adição é o efeito na octanagem do combustível.

A octanagem pode ser avaliada pelos métodos Motor (MON) e *Research* (RON); o primeiro refere-se ao comportamento do combustível em cargas elevadas e altas velocidades, e o segundo, em baixas velocidades e ao acelerar. A Tabela 1 explicita os efeitos da adição do etanol à gasolina, em diferentes proporções.

Tabela 1 - Efeitos da adição do etanol à gasolina

Composição da gasolina-base			Incremento da octanagem com:							
			5% de bioetanol		10% de bioetanol		15% de bioetanol		20% de bioetanol	
Aromáticos	Olefínicos	Saturados	MON	RON	MON	RON	MON	RON	MON	RON
50	15	35	0,1	0,7	0,3	1,4	0,5	2,2	0,6	2,9
25	25	50	0,4	1,0	0,9	2,1	1,3	3,1	1,8	4,1
15	12	73	1,8	2,3	3,5	4,4	5,1	6,6	6,6	8,6
11	7	82	2,4	2,8	4,6	5,5	6,8	8,1	8,8	10,6

Fonte: Carvalho (2003) *apud* BNDES (2008)

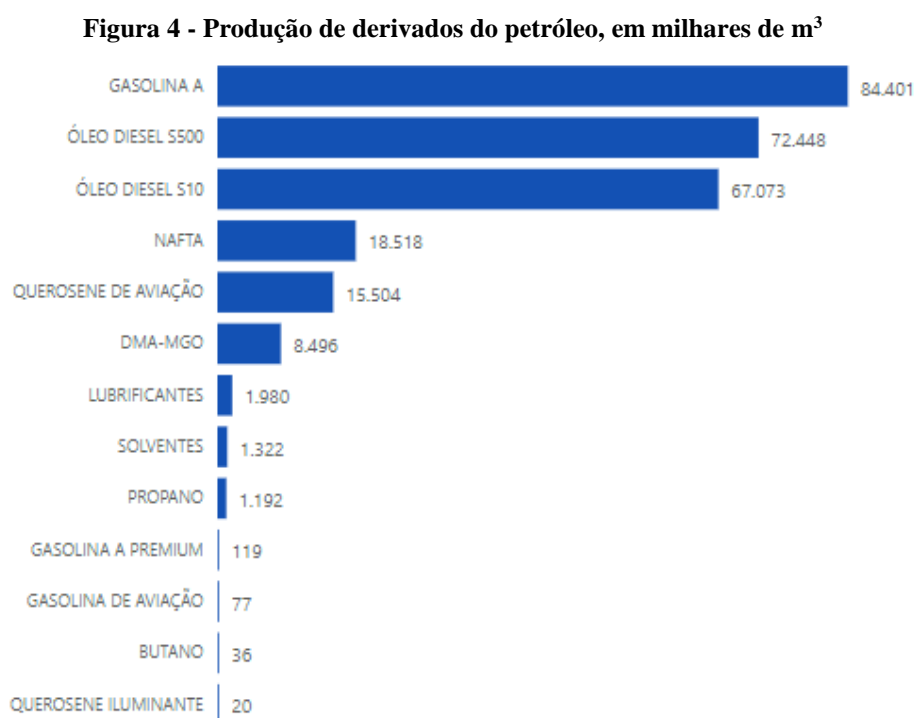
Nota-se que a octanagem RON é a mais afetada pela adição do etanol; além disso, há uma influência da composição da gasolina-base, em que uma maior saturação aumenta a influência do etanol na octanagem geral. De acordo com BNDES (2008), quanto menor for a octanagem da gasolina-base, mais significativo será o ganho com o uso do etanol.

Estudos também apontam que, em teores de até 10%, praticamente não há efeito no consumo de combustível, quando comparado ao uso somente de gasolina. Já em relação a teores como 25% de etanol,

correspondendo a um conteúdo energético em volume 10% inferior, observa-se um aumento médio no consumo da ordem de 3% a 5% sobre a gasolina pura. Esses resultados, confirmados em muitos ensaios de campo, indicam como o etanol, embora apresente menor poder calorífico, permite melhorar a eficiência do motor, graças à menor temperatura na admissão e ao maior volume dos produtos de combustão (BNDES, 2008 p. 47).

2.3.1.1 Oferta e demanda de gasolina

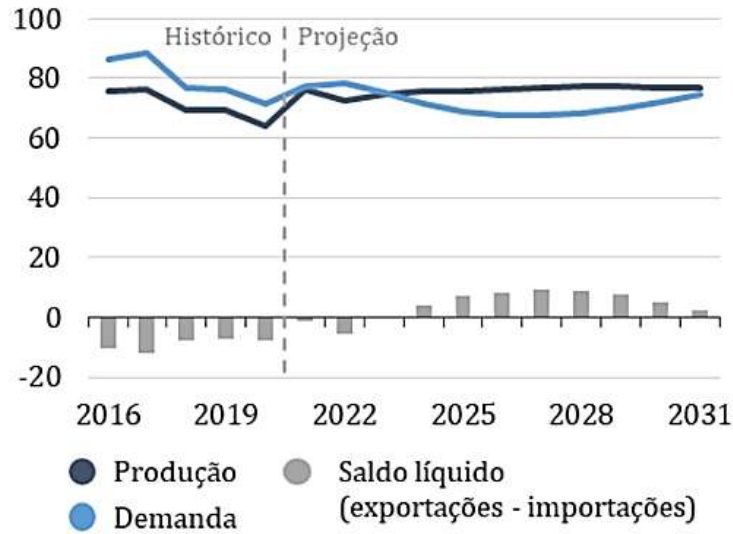
Segundo dados da ANP atualizados em 2021, dentre os produtos derivados do petróleo, com volume medido em milhares de metros cúbicos, a gasolina encontra-se em destaque (Figura 4).



Fonte: ANP (2021)

Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2031, a produção nacional da gasolina A ficará levemente estável, com a média em torno de 75 mil m³/dia. As projeções indicam que a demanda doméstica não aumentará no período analisado; pelo contrário, não há uma tendência de aumento até 2031, devido à oferta de biocombustíveis, como o etanol hidratado. A Figura 5 também projeta os volumes de exportação líquida, com uma máxima no ano de 2027. Vale ressaltar que a projeção inclui a gasolina A comum, premium e gasolina de aviação.

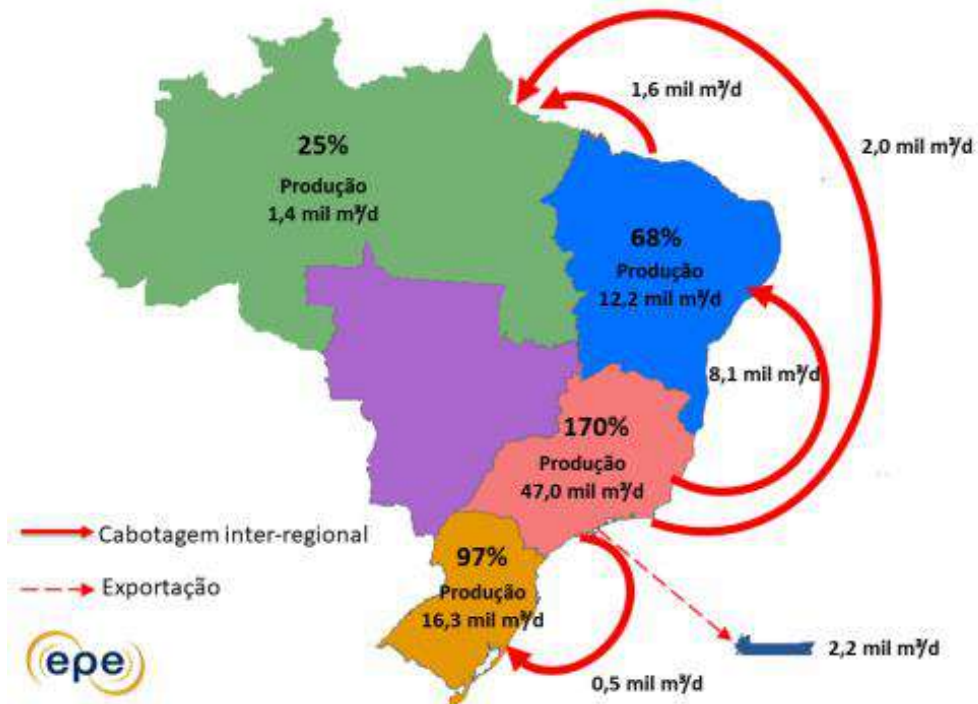
Figura 5 - Balanço nacional de gasolina A (mil m³/d)



Fonte: EPE (2021c)

Em relação à demanda da gasolina, estuda-se a demanda interna e suas movimentações inter-regionais, que ocorrem conforme a Figura 6, tendo em vista a necessidade de complementar a produção de regiões deficitárias (EPE, 2021c). A projeção até 2031 não prevê produção de derivados de petróleo na região Centro-Oeste, sendo esta dependente da movimentação inter-regional.

Figura 6 - Atendimento à demanda por região e cabotagem inter-regional de gasolina A em 2031

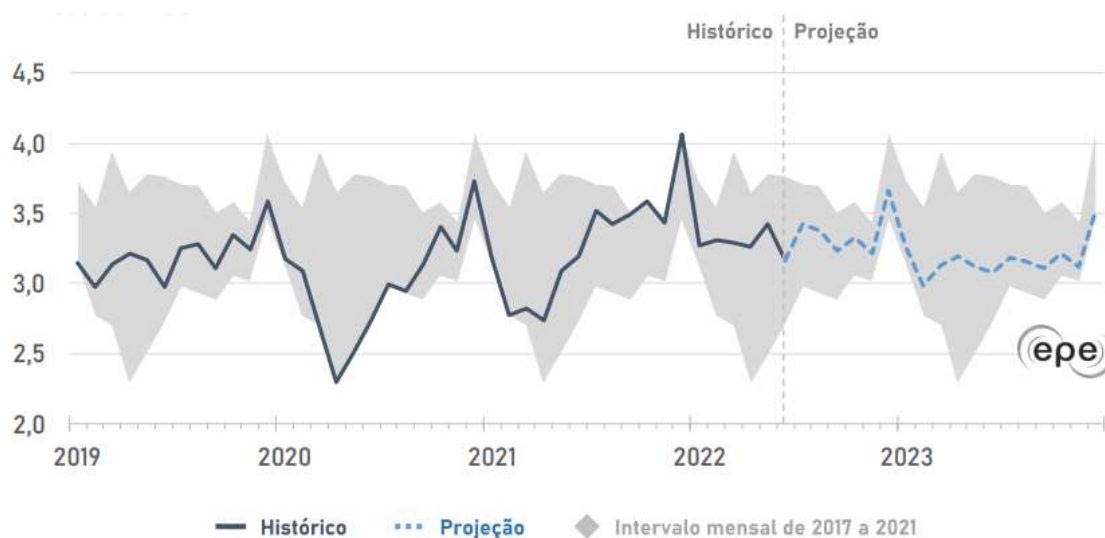


Fonte: EPE (2021c)

Percebe-se na figura que a região Sudeste possui um excedente que não só abastece as demais regiões defasadas em produção, como também tem parte destinada para a exportação, representando cerca de 3% da demanda doméstica do ano (EPE, 2021c).

Já a gasolina C possui um estudo de demanda conforme a Figura 7, a qual trata tanto do tipo comum (com 27% de etanol), quanto da premium (com 25%). Entende-se que houve um aumento das vendas no intervalo de meados de 2021 a meados de 2022, em comparação com o mesmo período de 2020 a 2021. De acordo com as perspectivas da EPE (2022), apesar de o período analisado terminar em queda nas vendas, projeta-se ainda um aumento de 1,6% até o final do ano de 2022; o consumo impulsionado deve-se às isenções dos tributos federais e a limitação do imposto sobre circulação de mercadorias e prestação de serviços (ICMS) em 17% ou 18%, o que levou à redução dos preços.

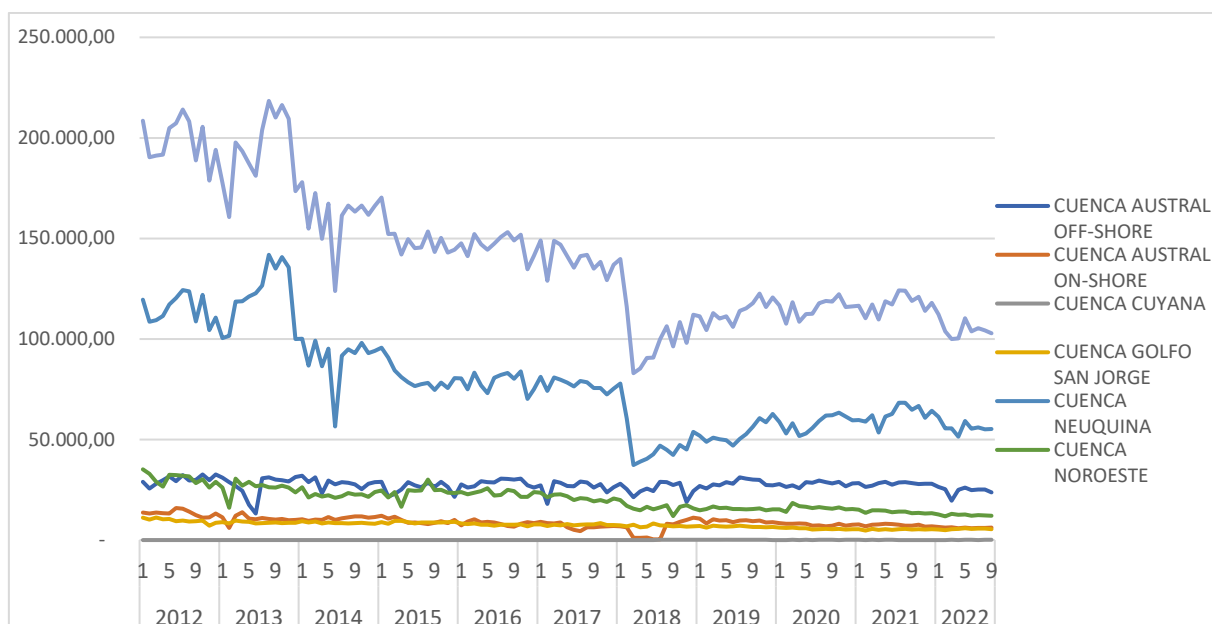
Figura 7 - Vendas mensais de gasolina C pelas distribuidoras (bilhões de litros)



Fonte: EPE (2022)

2.3.2 Panorama da gasolina na Argentina

Considerando que a gasolina é originada do petróleo, é possível analisar os dados de produção deste na Argentina nos últimos dez anos nas bacias produtoras do país (Figura 8), conforme dados atuais da Secretaria de Energia, que analisou, desde 2012, cada mês produtivo, descritos na coordenada X do gráfico. Percebe-se uma queda na produção total ao longo dos anos.

Figura 8 - Produção de petróleo por bacia produtora 2012-2022 (em m³)

Fonte: Argentina (2022)

O consumo de gasolina na Argentina possui uma alta projeção para o ano de 2022. Após uma retração da demanda durante o período da quarentena causada pela Covid-19, espera-se que o volume consumido chegue a 9,5 bilhões de litros, acima dos valores pré-pandemia (USDA, 2022). Entre os motivos para a alta demanda, estão a reconstrução econômica do país desde o fim da quarentena, a volta da população para as suas rotinas com uso de fontes de energia para transporte, o incentivo ao turismo interno e os baixos preços locais do combustível, sendo atrativos inclusive para consumidores de países vizinhos, devido a subsídios do governo argentino.

A gasolina disponibilizada nos postos da Argentina contém menor adição de etanol anidro. De acordo com o professor de engenharia de energia Ricardo Hartmann em reportagem ao G1 (2021), a composição do combustível é de 78% da gasolina proveniente da refinaria, 12% de etanol e 10% de MTBE (éter metil terc-butílico), composto oxigenado também usado com antidetonante.

2.3.3 Panorama da gasolina no Paraguai

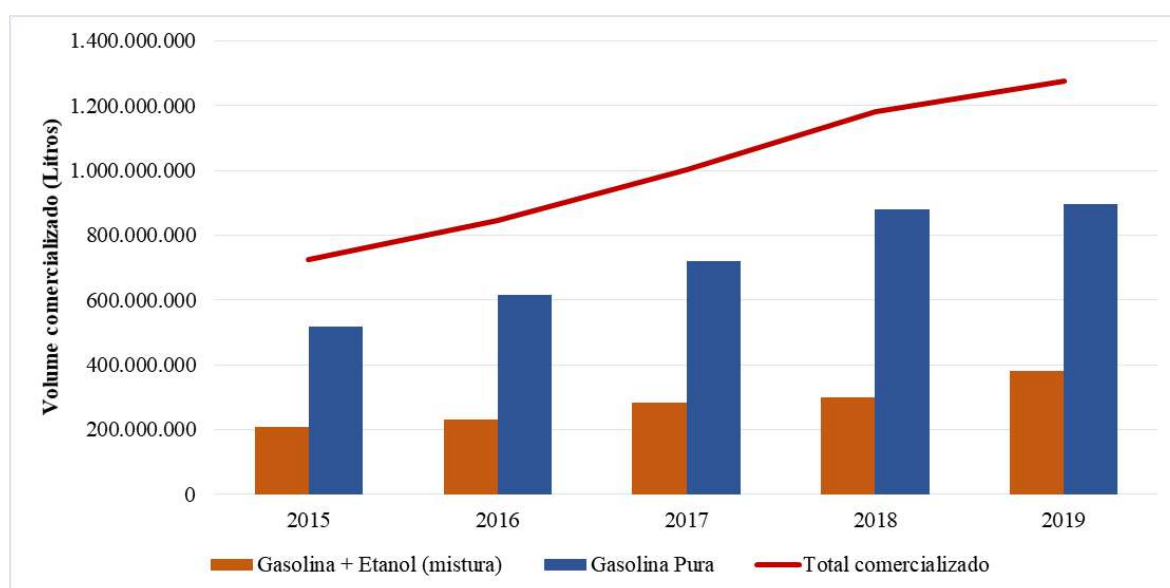
No Paraguai, a gasolina é conhecida como “nafta”, mistura homogênea das frações mais leves do petróleo bruto, separadas das mais pesadas durante o refino. A volatilidade e a octanagem fornecem ao motor menor impedimento de partida a frio e potência adequada. No país, as regulações de qualidade e ambientais determinam uma formulação aos combustíveis

comercializados, a qual maximiza o desempenho do motor e reduz a liberação de compostos tóxicos para o meio ambiente. Os principais parâmetros de qualidade medidos são a cor, que ajuda a identificar o teor da nafta, a octanagem, o teor de enxofre – causador de problemas ao ambiente –, a pressão de vapor e a destilação (PETROPAR, [20--]a).

O MIC determina no decreto nº 4562 de 2015 o teor de etanol anidro na mistura com a gasolina, de acordo com a octanagem da mesma. Para os níveis de octanagem RON 85, 90 e 95, tem-se um percentual médio de 25% em volume acrescentado do composto oxigenado. Há também a gasolina com octanagem RON 97, sem mistura de etanol anidro. É estabelecido pela Lei nº 5444 que a gasolina com menos de 97 octanas deve ser misturada na porcentagem máxima possível com etanol anidro, em volume, com base em estudos realizados pelo MIC. Segundo a mesma instituição, há uma preferência por utilizar, principalmente, o álcool derivado da cana de açúcar produzido nacionalmente; tendo o mesmo já sido consumido, permite-se o uso de originados de outras matérias-primas. Os níveis médios de mistura de álcool combustível na gasolina atingiram 26,42% v/v em 2021, patamar relativamente semelhante ao do ano anterior (MOPC, 2022).

A partir da análise de Gimenez (2020), tem-se a Figura 9 exibindo o volume em litros de gasolina pura e em mistura com etanol anidro comercializada no país no período de 2015 a 2019, no qual se observa que a maior parte do volume corresponde à comercialização de gasolina pura, cerca de 72%, enquanto a mistura de etanol alcançou um percentual de 28%.

Figura 9 - Volume de gasolina (pura e com etanol) comercializada no Paraguai em 2015-2019, em litros



Fonte: Elaboração própria a partir de dados de Gimenez (2020)

2.3.4 Produção de gasolina

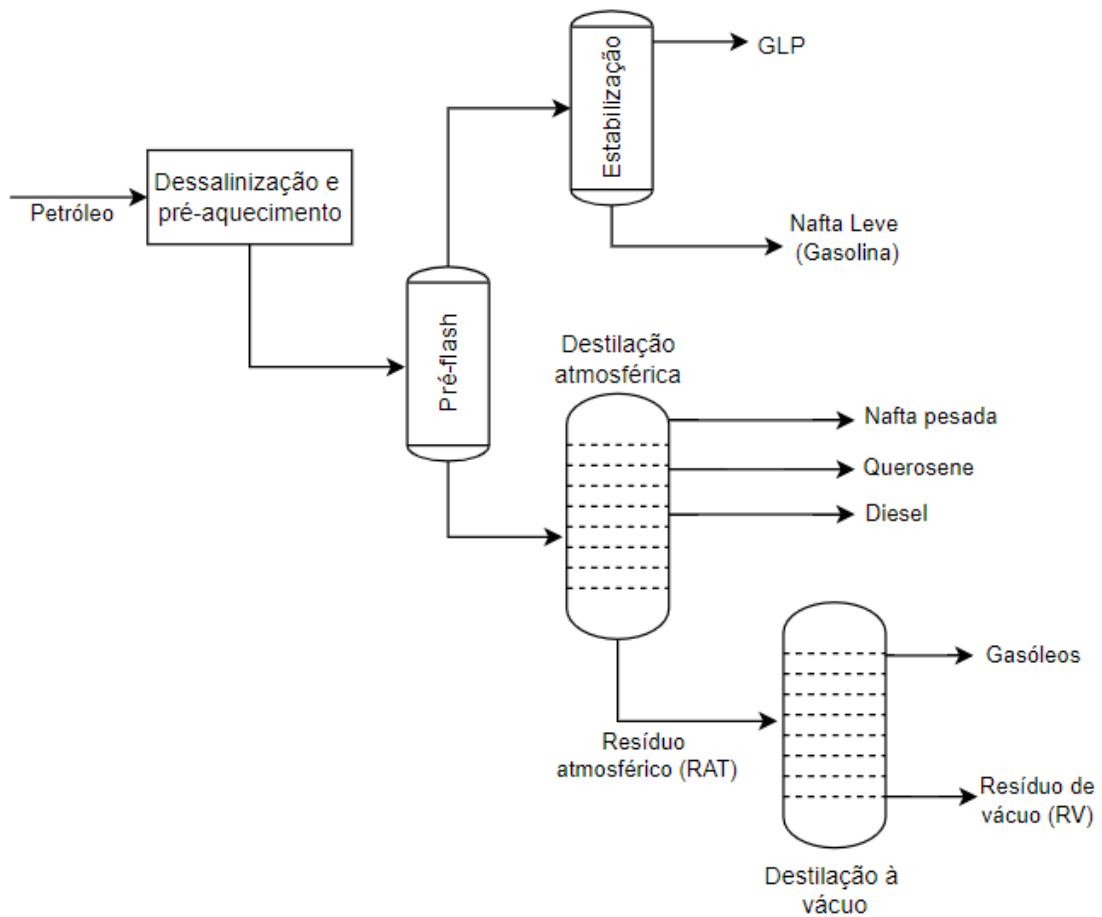
A gasolina é originada do refino do petróleo, o qual se divide em processos físicos, químicos, de tratamento e auxiliares. Os processos físicos promovem a separação das frações de petróleo, sem alterar a estrutura química dos compostos, sendo a destilação (atmosférica e à vácuo) a forma mais conhecida de separar os componentes (PERISSE, 2007).

O petróleo que chega às refinarias traz consigo sais minerais que devem ser removidos na seção de dessalinização, visto que podem danificar os equipamentos por meio de corrosão ou entupimento. Em seguida, o petróleo é aquecido em baterias de trocadores de calor ou fornos e a carga, parcialmente vaporizada, alimenta uma torre de pré-flash, existente em algumas refinarias, a qual opera com pressões elevadas, promovendo uma primeira separação.

Encaminha-se, então, a fração de fundo para uma torre de destilação à pressão atmosférica (PERISSE, 2007), na qual há sistemas de troca térmica, sendo o calor retirado no topo e fornecido no fundo, a fim de separar os componentes de diferentes pontos de ebulição. A substância com maior ponto de ebulição é a primeira a condensar, enquanto a de menor cadeia só condensa no ponto mais alto da coluna (LIMA, 2018). Entre o topo e a entrada de carga na torre, na parte lateral, são recolhidos os produtos intermediários: a nafta pesada, o querosene, e o óleo diesel.

Na seção de estabilização, na qual há uma torre de fracionamento adicional, separa-se as frações leves: GLP e nafta leve, como também é conhecida a gasolina (PERISSE, 2007). O processo de destilação do petróleo está representado de forma simplificada na Figura 10.

Figura 10 - Processo de destilação do petróleo em uma refinaria

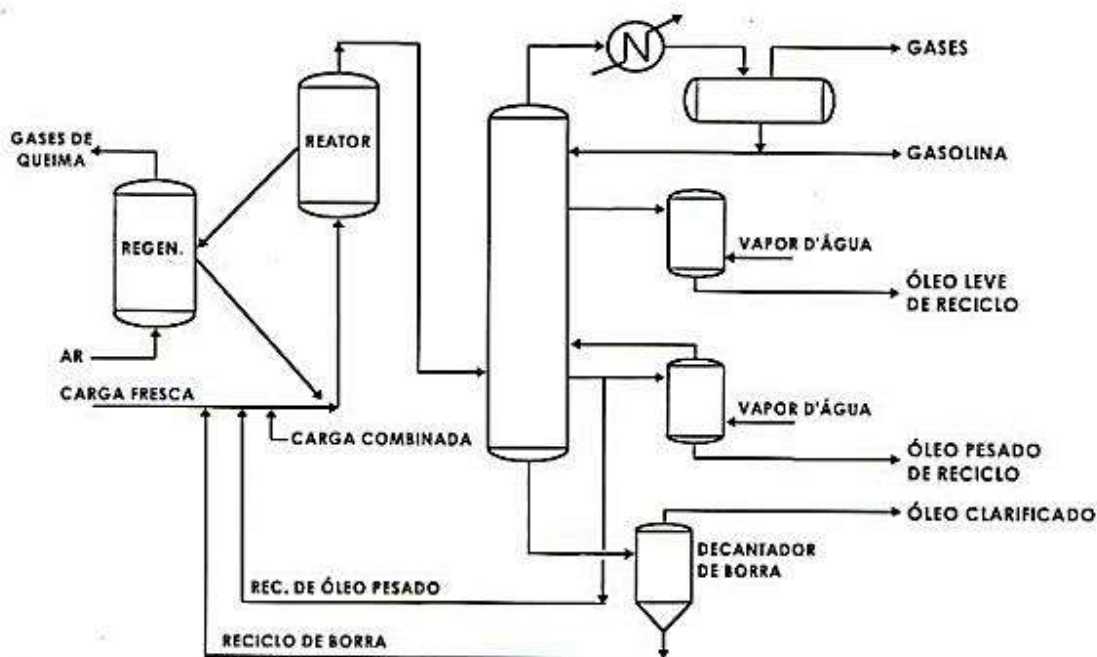


Fonte: Elaboração própria a partir de dados de Perisse (2017)

A gasolina também pode ser produzida a partir de processos químicos, como o craqueamento catalítico (FCC), o qual quebra as grandes moléculas de gásóleo e determinados resíduos (atmosférico e de vácuo) utilizando-se temperatura, pressão e catalisador. Através desse processo, é possível gerar mais gasolina de alta octanagem, assim como menor quantidade de frações pesadas (PERISSE, 2007).

A Figura 11 exibe o diagrama esquemático do craqueamento catalítico em uma unidade de produção.

Figura 11 - Diagrama esquemático de uma unidade de craqueamento catalítico



Fonte: Farah (2002) *apud* Perisse (2007)

A carga pré-aquecida entra em contato com o catalisador quente em uma torre, onde a maioria das reações ocorre. Ao término das reações de craqueamento, o catalisador com coque em sua superfície é separado dos gases no reator e levado para o retificador, onde vapores de hidrocarbonetos arrastados são removidos com o vapor d'água. Os produtos craqueados são fracionados numa torre, obtendo-se os diversos cortes: gás combustível, GLP, nafta craqueada (gasolina), óleo leve de reciclo e óleo clarificado (PERISSE, 2007). Os processos de tratamento posteriores promovem a retirada de enxofre, por exemplo, e outras adequações necessárias para que os derivados tenham o padrão de qualidade exigido pelo mercado.

2.4 ETANOL

Ao longo dos anos, com o aumento do preço do petróleo e a consciência cada vez maior de redução de emissões de poluentes e de gases de efeito estufa, aumenta-se o interesse em pesquisas sobre o etanol como alternativa para motores de combustão.

O etanol, conhecido também como álcool etílico, possui a fórmula molecular C_2H_6O , e pode ser usado como combustível em motores de combustão interna com ignição por centelha em misturas de gasolina e etanol anidro, ou como etanol hidratado. Na Tabela 2 estão sintetizadas as características principais do etanol e da gasolina.

Tabela 2 - Principais características físico-químicas do etanol e da gasolina

PARÂMETRO	UNIDADE	GASOLINA	ETANOL
	kJ/kg	43.500	28.225
Poder calorífico inferior	kJ/litro	32.180	22.350
Densidade	kg/litro	0,72 – 0,78	0,792
Octanagem RON (<i>Research Octane Number</i>)	-	90 – 100	102 – 130
Octanagem MON (<i>Motor Octane Number</i>)	-	80 – 92	89 – 96
Calor latente de vaporização	kJ/kg	330 – 400	842 – 930
Relação ar/combustível estequiométrica	-	14,5	9,0
Pressão de vapor	kPa	40 – 65	15 – 17
Temperatura de ignição	°C	220	420
Solubilidade em água	% em volume	~ 0	100

Fonte: Goldemberg e Macedo (1994) *apud* BNDES (2008)

O álcool pode ser obtido através da fermentação de açúcares de plantas ricas em sacarose ou amido, como milho, beterraba e sorgo, mas, principalmente, a cana-de-açúcar. É um combustível sustentável, visto que a cana absorve durante a fotossíntese a maior parte do gás carbônico lançado na atmosfera em sua produção. Com a utilização deste álcool, há uma redução em 89% da emissão de gases de efeito estufa, comparativamente à gasolina (RAMOS, 2019).

Apesar de o poder calorífico do etanol ser inferior ao da gasolina, a relação entre ar e combustível também é menor; isso significa que se necessita de uma menor quantidade de ar para obter uma combustão completa, tendo em vista que o oxigênio faz parte de sua composição. Assim, a mistura entre ar e etanol possui maior quantidade de energia disponível para uma mesma massa de ar (AMORIM, 2005). Ademais, o etanol puro hidratado, utilizado nos motores atuais, possui um consumo de combustível de 25% a 30% superior.

2.4.1 Panorama do etanol no Brasil

No Brasil, devido à necessidade de obter combustíveis alternativos, principalmente com as preocupações com o preço do petróleo, foi criado, em novembro de 1975, o Programa Nacional do Álcool. Esse programa buscou estimular a produção de etanol, a fim de atender aos mercados interno e externo e reduzir os custos com a importação de petróleo; com isso, houve uma expansão da oferta de matérias-primas, ampliação de unidades produtoras e aumento da produção agrícola.

Durante a fase inicial do programa, o foco foi produzir etanol anidro para que este fosse misturado com a gasolina. Em 1978, surgiram os primeiros carros movidos somente a álcool. Já na fase seguinte, com o contínuo aumento do preço do petróleo, foram criados o Conselho Nacional do Álcool (CNAL) e a Comissão Executiva Nacional do Álcool (CENAL). Assim, o número de carros com motor de ciclo Otto movidos a etanol chegou, após a metade da década de 1980, a 76% (AMORIM, 2005).

Segundo a legislação brasileira, o etanol anidro deve conter menos de 0,6% em massa de água, enquanto para o etanol hidratado, o teor mássico deve estar entre 6,2% e 7,4%.

Segundo o BNDES (2008, p. 43):

O etanol hidratado puro deve ser usado em motores fabricados ou adaptados especificamente para esse fim, em particular com a adoção de taxas de compressão mais elevadas, visando utilizar adequadamente a octanagem mais alta do etanol frente à gasolina e obter ganhos de eficiência de 10%. Em outras palavras, a maior octanagem do etanol permite que os motores obtenham mais energia útil do calor do combustível, comparativamente à gasolina.

Após o aperfeiçoamento de motores fabricados para o uso de etanol, a tecnologia automotiva encontra-se desenvolvida, possibilitando que veículos à etanol puro hidratado possuam desempenhos similares aos motores à gasolina (BNDES, 2008).

A redução de investimentos do setor sucroenergético na última década, devido ao endividamento de parte das empresas, dificultou a manutenção e o aprimoramento do ativo biológico (renovação dos canaviais, desenvolvimento e inserção de novas variedades etc.), afetando parâmetros de produtividade e rendimento do setor industrial. Ademais, o preço do açúcar no mercado internacional também impacta a produção nacional de etanol; desse modo, o setor sucroenergético brasileiro aproveita a flexibilidade industrial de produção de açúcar e álcool, a fim de ajustar-se às flutuações de mercado, assim, maximizando suas receitas ou minimizando suas perdas (EPE, 2021a).

No ano de 2021, notou-se uma restauração do consumo do ciclo Otto, apesar da pandemia da Covid-19. Observou-se que essa recuperação estava relacionada à retomada das atividades devido ao avanço da vacinação. Apesar disso, a safra 2021/22 de cana-de-açúcar passou por uma defasagem do sistema hídrico, impactando negativamente a etapa de moagem e reduzindo a disponibilidade de matéria-prima, tendo reflexos negativos na relação de preços favorável ao biocombustível (EPE, 2021a).

Segundo dados da ANP (2022), atualmente no Brasil a produção de etanol, seja anidro ou hidratado, ocorre principalmente nas regiões Centro-Oeste e Sudeste. A Figura 12 exhibe a distribuição das instalações produtoras do biocombustível no país, até junho de 2022, com o

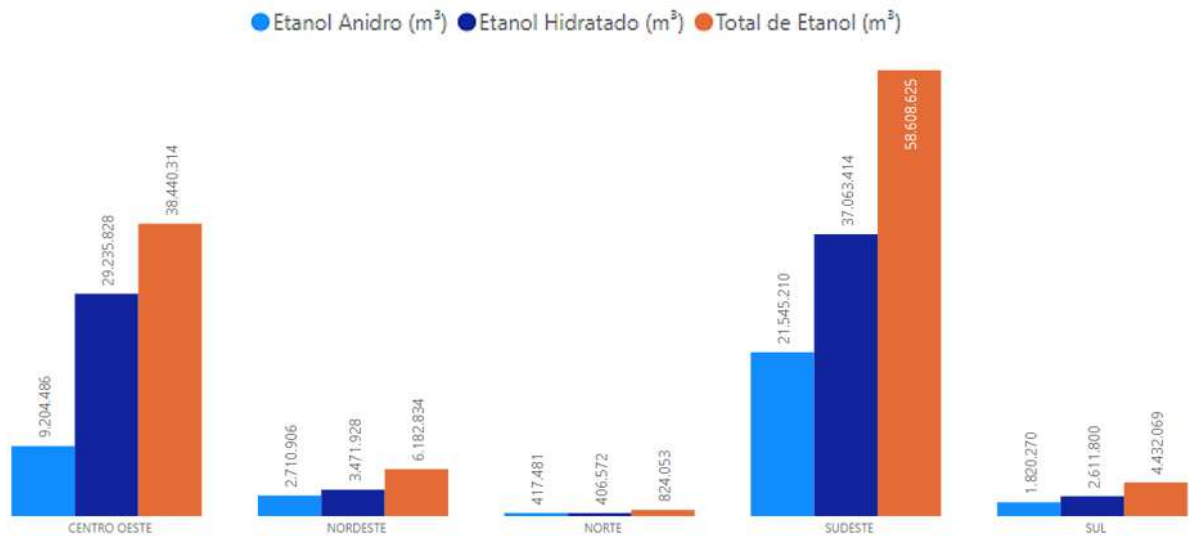
gráfico em seguida (Figura 13) explicitando o foco do tipo de etanol produzido em cada região. Tem-se, de modo geral, o etanol hidratado com o maior volume de produção.

Figura 12 - Instalações produtoras de etanol no Brasil em 2022



Fonte: ANP (2022)

Figura 13 - Instalações produtoras de etanol no Brasil em 2022

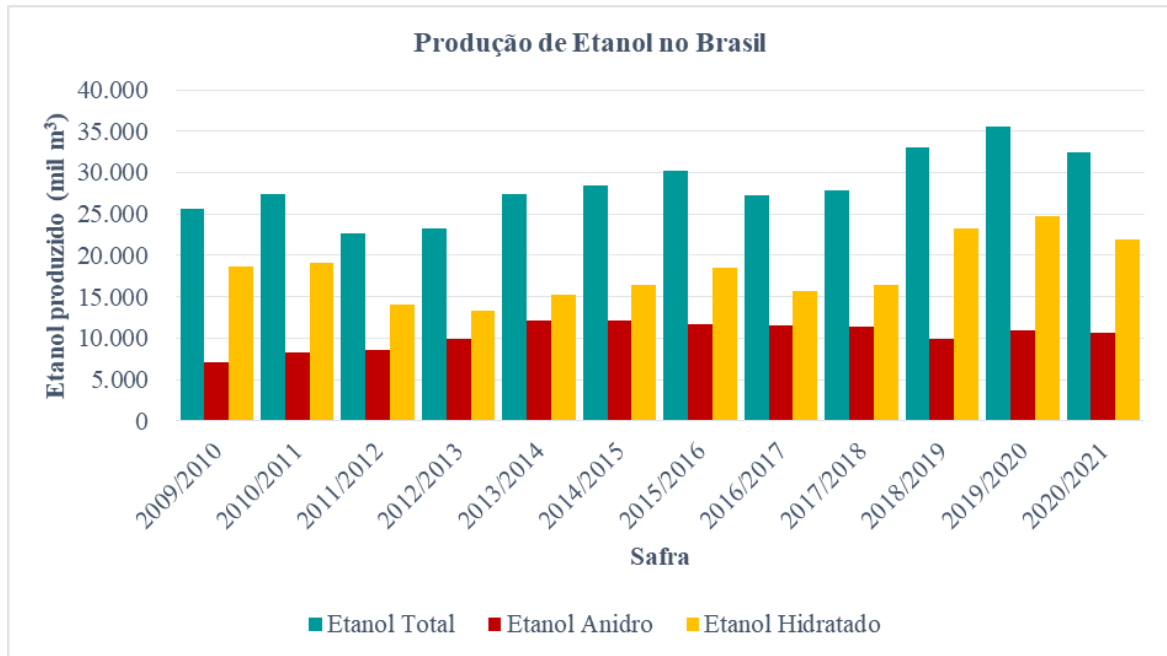


Fonte: ANP (2022)

Além do gráfico por região, a distribuição da produção de etanol anidro e hidratado no Brasil desde a safra de 2009/2010, segundo dados da Unica (2021), até o ano de 2021, segue conforme a Figura 14. É possível observar que há um maior volume de etanol hidratado sendo gerado nas instalações manufatureiras, com leve mudanças na proporção dos dois tipos ao longo dos anos analisados. Pode-se inferir que, por este tipo de etanol ter passado a ser uma alternativa

de biocombustível amplamente utilizada isoladamente no lugar da gasolina, tem-se como maior foco a sua produção, devido à maior competitividade.

Figura 14 - Produção de etanol no Brasil nas safras de 2009 até 2021

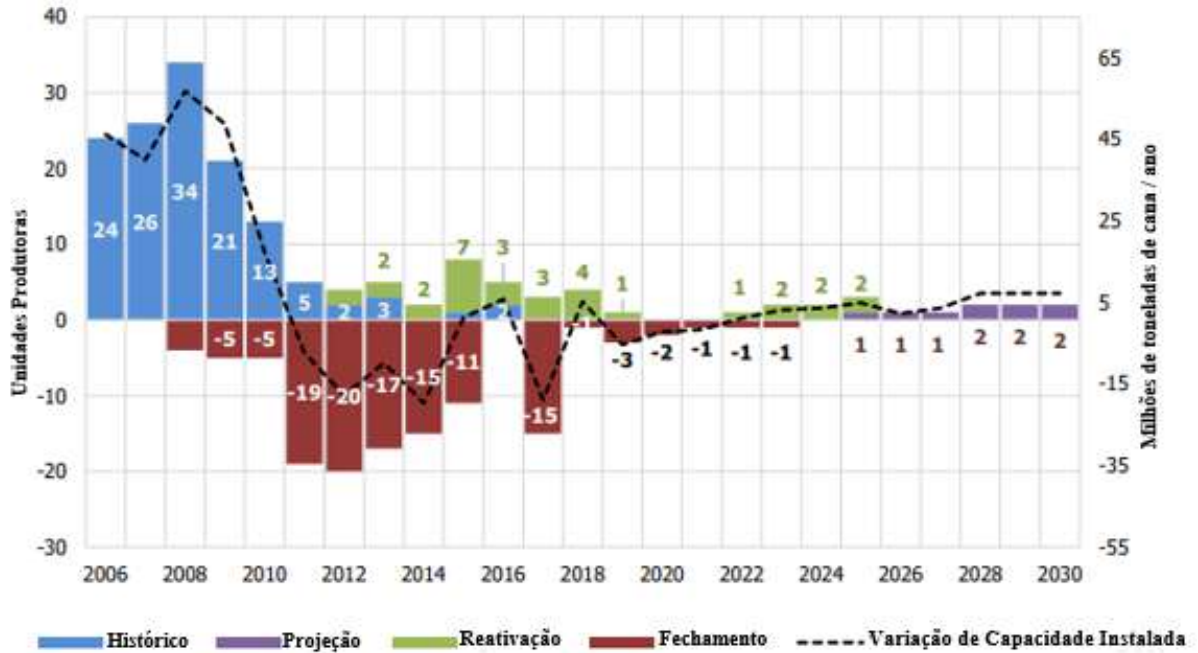


Fonte: Elaboração própria a partir de dados de Unica (2021)

O Plano Decenal de Expansão de Energia (EPE, 2020) realizou uma projeção da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar até o ano de 2030. A expansão até 2025 leva em consideração projetos em andamento; após esse ano, até 2030, considera-se a implementação de nove unidades produtivas com capacidade de moagem de 3,5 milhões de toneladas de cana por ano, por usina.

O gráfico apresentado na Figura 15 exibe o fluxo de unidades processadoras de cana, incluindo o histórico, as novas unidades, a reativação e o fechamento de unidades, e a variação da capacidade instalada projetada para o período projetado.

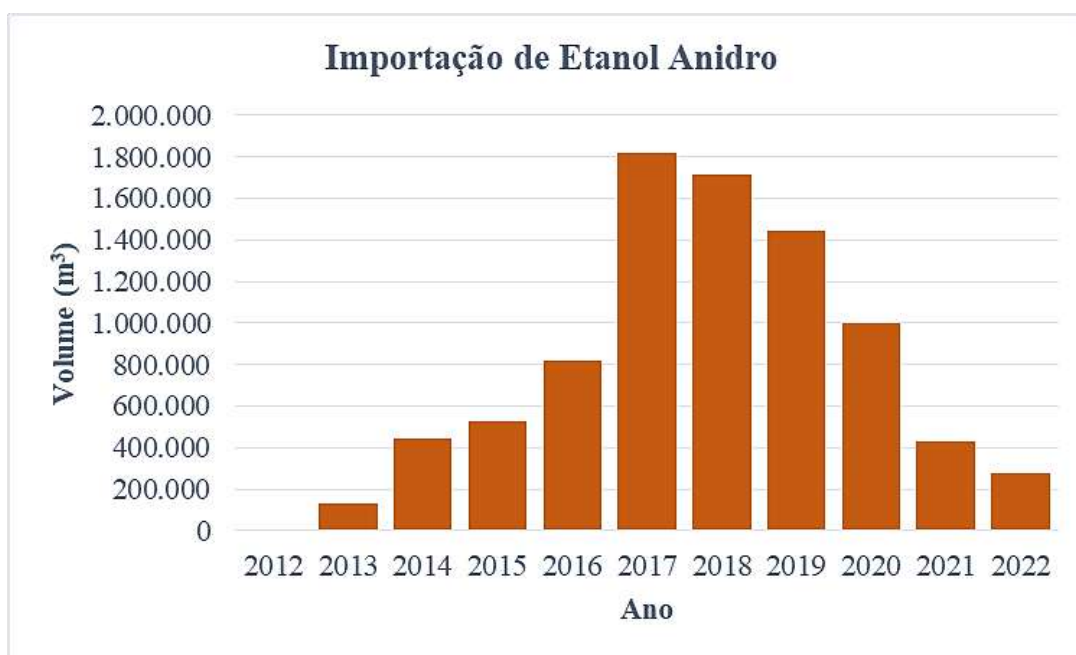
Figura 15 - Fluxo de unidades processadoras de cana de açúcar e variação de capacidade instalada



Fonte: EPE (2020b)

Quanto às importações de etanol, segundo dados do Observatório da Cana e da Unica (2022), na última década, o Brasil tem importado etanol anidro, tendo como principal fonte os Estados Unidos. Em março deste ano, o governo anunciou uma medida a fim de zerar o imposto da importação do etanol, com o objetivo de reduzir a inflação e o preço da gasolina, uma vez que o anidro é misturado à mesma. Contudo, segundo a plataforma Nova Cana (2022), o produto importado chegaria ainda 8 a 10% acima do preço doméstico, apesar da tarifa zero. A Figura 16 representa o volume importado de etanol anidro pelo Brasil desde 2012, com dados do Observatório da Cana. É possível observar que houve uma significativa queda no ano de 2021. Conforme noticiado pela plataforma G1 em 2022, a queda do volume importado ocorreu devido à quebra na safra da cana-de-açúcar após geadas no Centro-Sul do país, disparando os preços do etanol e, com isso, o volume produzido foi destinado para gasolina, ou seja, a produção nacional de etanol anidro foi incentivada e a demanda de importação caiu.

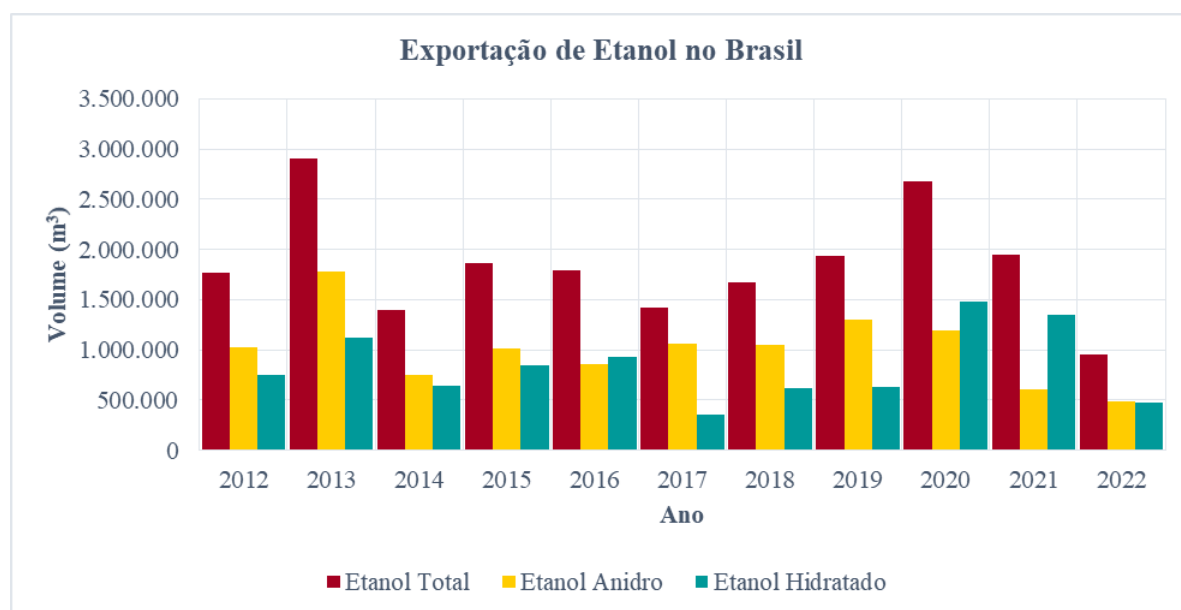
Figura 16 - Volume importado de etanol anidro na última década



Fonte: Elaboração própria com dados do Observatório da Cana (2022)

Avalia-se, também, a demanda total de etanol, que é constituída pela demanda do mercado interno (combustível e outros usos não energéticos) e do mercado internacional, suprido pelas exportações brasileiras. A primeira possui uma projeção de crescimento ao longo da próxima década, segundo dados do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (EPE, 2021c) de, partindo de 28 bilhões de litros em 2021, atingir até 43 bilhões de litros em 2031. Conforme avaliado anteriormente, o etanol hidratado possui alta competitividade em relação à gasolina; com isso, pode-se entender o aumento da demanda como resultado. Ademais, devido à pandemia da Covid-19, o uso do álcool como agente antisséptico aumentou consideravelmente, atingindo um consumo de 1,4 bilhão de litros em 2020. Já a utilização em bebidas, cosméticos e produtos farmacêuticos, além de outros usos não carburantes, possui a tendência de atingir até 1,2 bilhão de litros em 2031.

O mercado internacional de biocombustíveis também foi afetado com a pandemia da Covid-19, com um maior consumo do álcool pelos países importadores, sendo os maiores produtores os Estados Unidos e o Brasil. Nota-se pela Figura 17 que, no ano de 2020, houve uma alta nas exportações do produto frente aos anos anteriores, atingindo 2,7 milhões de metros cúbicos.

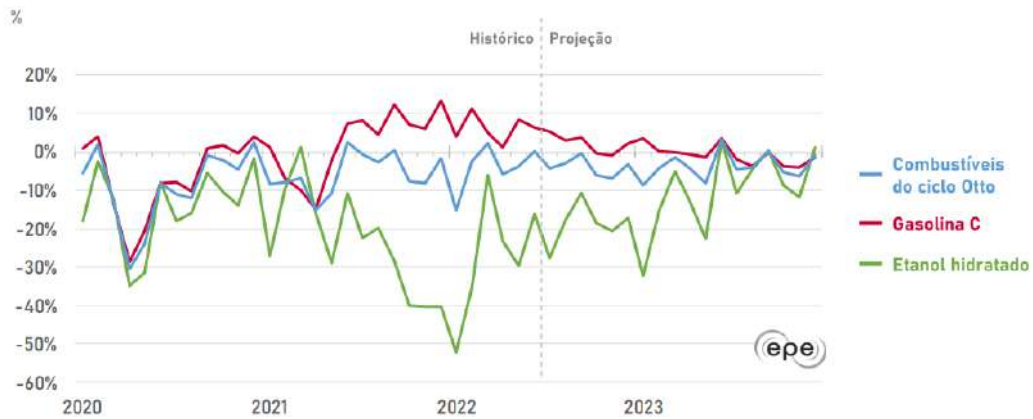
Figura 17 - Exportação de etanol no Brasil na última década

Fonte: Elaboração própria com dados da ÚNICA

Ademais, avaliou-se a publicação bimestral da EPE de agosto de 2022 sobre as perspectivas do mercado brasileiro de combustíveis a curto prazo, estudo no qual principalmente foi possível analisar a demanda interna do etanol hidratado em relação à gasolina C, modalidade que leva adição de cerca de 27% de etanol anidro.

A Figura 18 mostra uma comparação das vendas nos últimos três anos, em relação ao mesmo mês de 2019 (EPE, 2022). Pode-se observar reduções das vendas do etanol hidratado ao longo de 2021, e uma forte queda no final do ano. Isso porque, não somente houve um enfraquecimento da demanda por combustíveis, segundo análise da União Nacional de Bioenergia (UDOP, 2022), como também não houve competitividade suficiente entre o biocombustível em relação ao derivado do petróleo; no ano de 2021, o volume de vendas foi o menor desde 2016.

Figura 18 - Comparação das vendas de combustíveis com o mesmo mês de 2019 (em %)

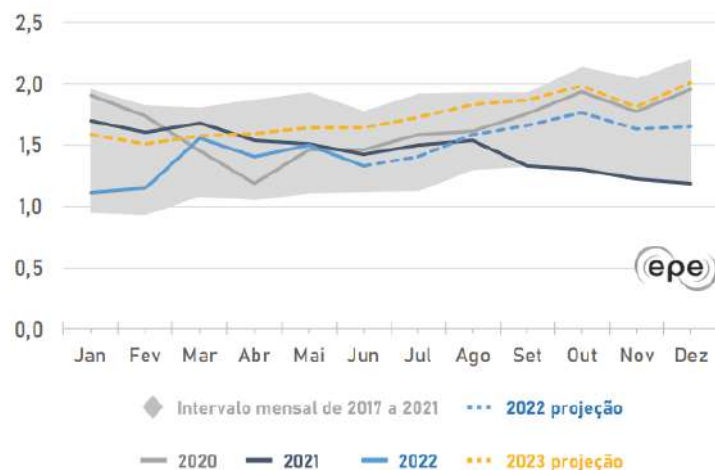


Fonte: EPE (2022)

Analisando de forma detalhada e isolada as vendas do etanol hidratado, tem-se a Figura 19, retirada do mesmo estudo, na qual há o comparativo de 2022 com o ano anterior, ocorrendo um aumento médio de 1,1% no total das vendas, o que representa 17,7 bilhões de litros a mais ao longo do ano todo. Já para 2023, a projeção é de um acréscimo mais acentuado, chegando a quase 21 bilhões de litros totais a mais do que em 2021 (EPE, 2022).

O motivo para os aumentos relatados nas vendas do produto em questão está relacionado à influência exercida pelo mercado internacional de açúcar, dentre outros fatores (EPE, 2022). Relata-se que o preço da *commodity* tem apresentado boa atratividade, enquanto a competitividade do biocombustível é elevada com a queda nos preços devido às reduções tributárias. Outrossim, o aumento da produção do etanol hidratado também contribui para a competitividade frente à alternativa fóssil, e a primeira poderá ser alavancada pela recuperação na safra de cana de açúcar de 2022/2023, além do crescimento do etanol de milho.

Figura 19 - Vendas mensais de etanol hidratado (em bilhões de litros)



Fonte: EPE (2022)

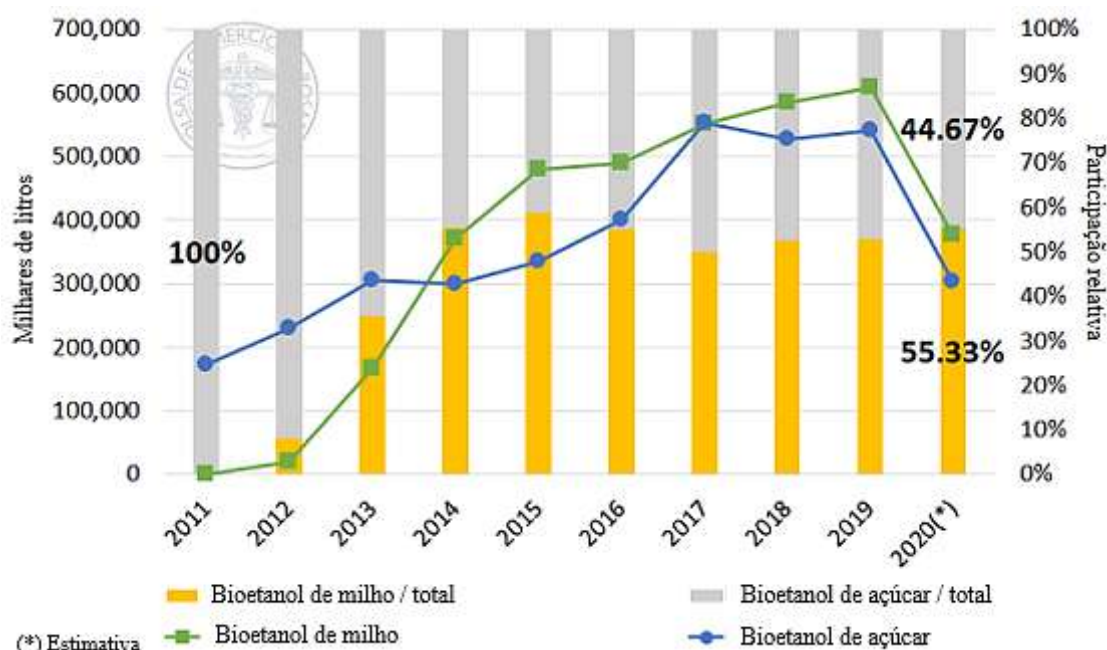
2.4.2 Panorama do etanol na Argentina

Em 2006, foi aprovada pelo Congresso da Nação Argentina a Lei nº 26.093 do Regime de Regulação e Promoção da Produção e Uso Sustentável de Biocombustíveis, a qual foi implementada no ano de 2010. Em janeiro de 2008, a Lei 26.334 foi aprovada, promovendo a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, e em dezembro de 2013, o governo argentino anunciou a instalação de novas fábricas de etanol produzido a partir de milho. A Secretaria de Energia do país determinou preços diferentes para o produto, dependendo da matéria-prima utilizada, tendo o álcool produzido com uso do cereal menor valor para o consumidor (ASCURRA *et al*, 2019).

Segundo dados informados pela Rede Global de Informação Agrícola do Serviço Agrícola Exterior do USDA (2020), a produção de etanol na Argentina foi negativamente afetada pela pandemia da Covid-19, tendo em vista a queda da demanda de combustíveis, a recessão interna prolongada e câmbios políticos. Já em 2022, há uma projeção de consumo de bioetanol de cerca de 1.1 bilhão de litros, devido à alta da demanda de gasolina e uma maior taxa de mistura.

A Argentina possui 21 plantas de etanol combustível. Conforme visto, o percentual de etanol obrigatório pela legislação para mistura com a gasolina é de 12%; destes, 6% correspondem a etanol anidro obtido da cana-de-açúcar, e 6%, do milho, conforme a nova Lei nº 27640, publicada no Boletim Oficial da República da Argentina, artigo 12. Pela Figura 20, pode-se avaliar que a crescente produção de etanol no país a partir das duas matérias-primas somente apresentou queda no ano de 2020, pelos motivos mencionados anteriormente. A cada ano, a partir de 2012, o percentual de distribuição de ambas se apresentou de forma mais equitativa. Apesar da queda da demanda, houve um aumento na capacidade instalada da indústria de etanol de até 60% em uma das maiores usinas (CALZADA *et al*, 2020).

Figura 20 - Produção de etanol de cana de açúcar e de milho na Argentina (2011-2020)

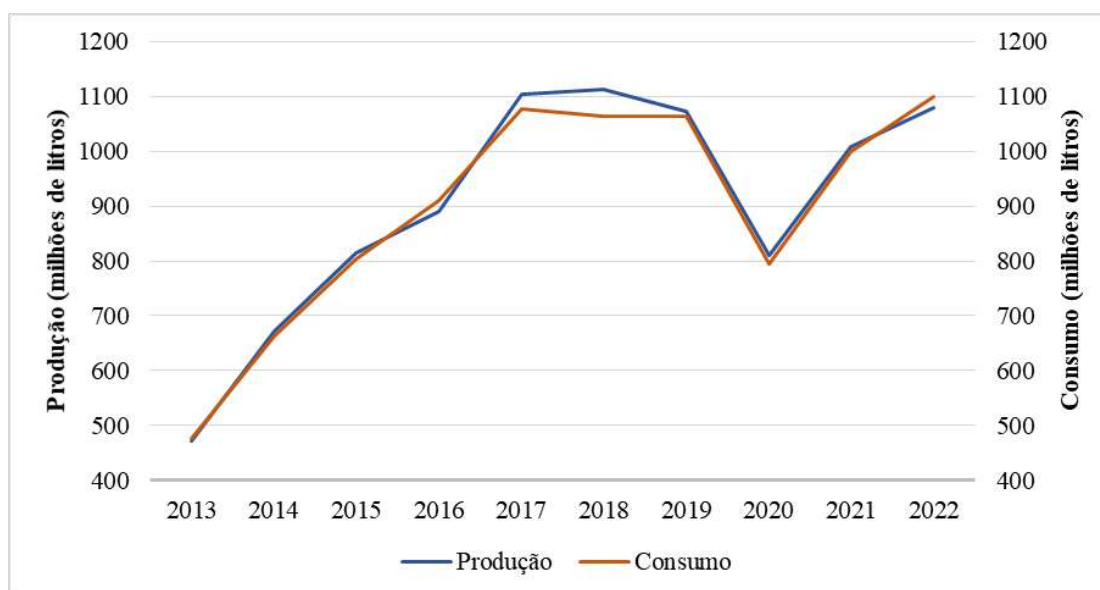


Fonte: Adaptado de Calzada *et al.* (2020)

Após drásticas mudanças no mercado de combustíveis, com a perda de demanda e flutuação do preço durante o período de quarentena causado pela pandemia, e ainda agora durante a guerra na Ucrânia causando desequilíbrios na oferta e demanda dos combustíveis fósseis, a legislação (Lei nº 27640) sobre biocombustíveis foi imposta, a fim de construir políticas mais flexíveis para as misturas com etanol (USDA, 2022).

A indústria de milho no país, conforme o relatório anual de biocombustíveis da USDA (2022), possui cinco plantas operacionais com capacidade de 900 milhões de litros por ano. O aumento da produção de milho permite à Argentina produzir etanol com essa matéria-prima, ao mesmo tempo em que se mantém como grande exportadora do cereal. Já a produção de açúcar do país tem volume suficiente para o abastecimento interno, exportações e uso para gerar etanol; são 15 usinas para a manufatura do biocombustível, com 16 destilarias e capacidade de produzir 700 milhões de litros anualmente, e vendas ao longo de todo o ano. Percebe-se pela Figura 21 que o consumo do etanol como combustível no país, em milhões de litros, possui uma proporção próxima à produção na última década. Ademais, é evidente pelo gráfico, gerado a partir de dados do USDA (2022), o crescimento deste item de manufatura ao longo dos anos, até o período da pandemia, no qual houve uma brusca queda até a recuperação em andamento atualmente.

Figura 21 - Produção e consumo de etanol combustível na Argentina



Fonte: Elaboração própria com dados de USDA (2022)

Apesar da produção de etanol, a gasolina permanece altamente consumida no país, cerca de nove vezes mais que o primeiro, em bilhões de litros, conforme evidencia a Figura 22 abaixo, a qual exhibe o consumo de etanol hidratado e de gasolina (incluindo a adição de etanol anidro).

Figura 22 - Consumo de gasolina e etanol na Argentina de 2011 a 2022 (projeção)



Fonte: Adaptado de USDA (2022)

Há conversas em andamento no governo do país para um possível aumento de 12%, de teor de etanol na mistura com a gasolina, para 15%, de modo a permitir uma menor importação de gasolina.

Ainda segundo o relatório da USDA (2022), há exportações constantes de etanol para uso industrial, para o Chile e para a União Europeia, apesar de não se conhecer a finalidade do

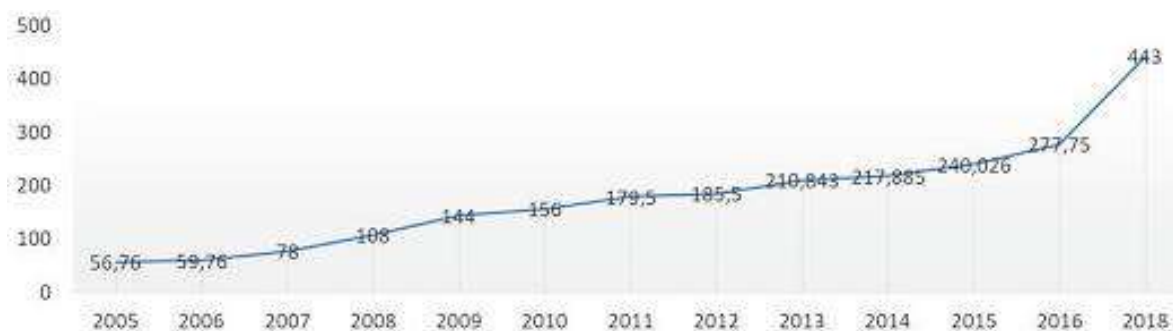
produto exportado; o país exporta mais da metade de sua produção de biocombustíveis (VIDAL, 2021).

Uma vez que o etanol anidro utilizado na mistura com a gasolina, de acordo com a legislação, deve ser produzido domesticamente, é preciso obter autorização da Secretaria de Energia para as importações do produto oxigenado. Conforme mencionado anteriormente, a produção interna de açúcar e milho tem suprido as demandas tanto das matérias-primas, quanto do etanol; com isso, nos recentes anos não tem sido necessária a importação do último na forma de combustível.

Enquanto o Brasil necessita de importações de etanol para abastecer o mercado interno, há uma oportunidade para a Argentina em termos de exportação do produto. Entretanto, o país deve superar o obstáculo dos custos logísticos, uma vez que a produção está localizada no interior, distante dos portos de Gran Rosário, principal escoadouro para a produção de grãos, farinhas, óleos e biodiesel (CALZADA *et al*, 2020). Calzada, D'Angelo e Lugones (2020) ainda explicam que, de acordo com um relatório do INDEC sobre complexos de exportação, 99,1% das exportações do complexo de milho em 2020 foram de milho em grão. Deste modo, entende-se que, desenvolvendo as indústrias, é possível alcançar um melhor percentual de utilização da capacidade instalada, acarretando um aprofundamento da industrialização da cadeia do milho.

2.4.3 Panorama do etanol no Paraguai

O Paraguai possui 12 usinas de produção de etanol com capacidade total e anual de cerca de 340 milhões de litros (JORNALCANA, 2016), sendo nove plantas flexíveis, utilizando cana de açúcar ou milho como matérias-primas; as outras três, produzem exclusivamente partindo da cana, incluindo uma usina da empresa Petropar. Esta é operante desde 1980 e é a maior destilaria do país, com capacidade para produzir 240.000 litros de etanol anidro por dia, e para a geração também de etanol hidratado, utilizado diretamente nos motores *flex-fuel* (PETROPAR, [20--]b). A produção de etanol desde 2005, ano da implementação da Lei nº 2748 de incentivo aos biocombustíveis, é exibida na Figura 23, na qual pode-se notar a curva ascendente, com projeção de aumento de cerca de dez vezes até 2020.

Figura 23 - Produção de etanol no Paraguai desde 2005

Fonte: Lovera *et al* (2021)

A produção e a venda de etanol no Paraguai no período de 2014 a 2019 são apresentadas na Tabela 3. A venda corresponde somente a volumes comercializados no próprio país, segundo informes dos produtores de álcool (GIMENEZ, 2020). Não foram incluídos dados de exportação nem volumes alocados em reservas em tanques de usinas ou de plantas distribuidoras. Nota-se que, enquanto a produção manteve um crescimento a uma baixa taxa, as vendas mais do que duplicaram nos cinco anos avaliados.

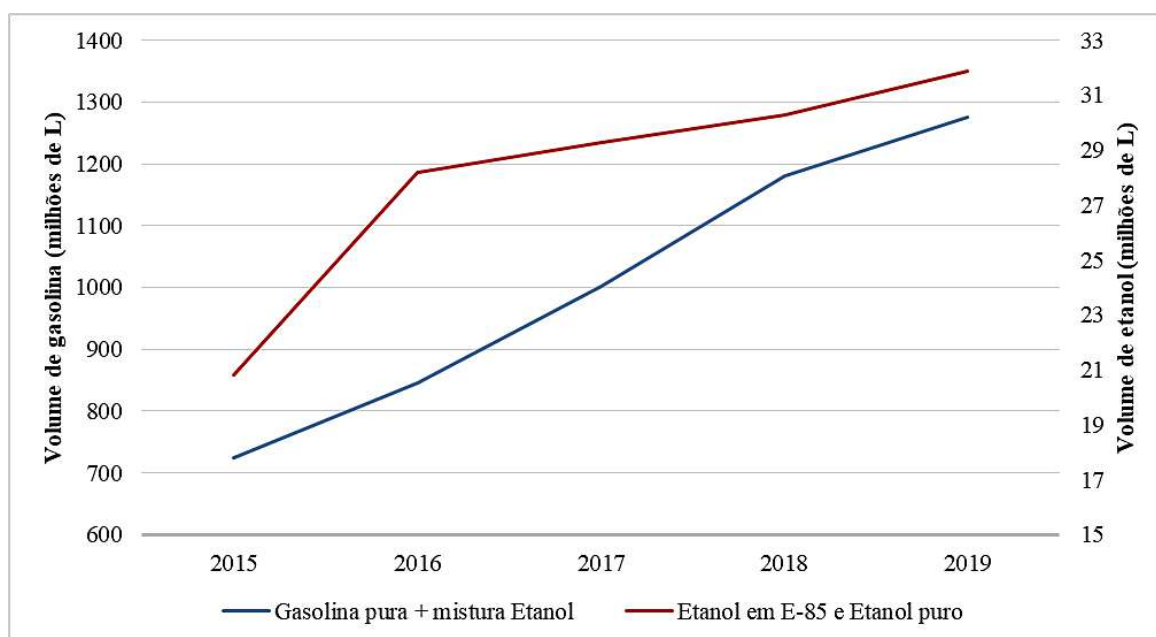
Tabela 3 - Produção e venda de etanol (em litros) no Paraguai em 2014-2019

Ano	Vendas (Litros)	Produção (Litros)
2014	175.702.680	210.843.216
2015	208.632.564	217.884.896
2016	230.063.001	240.026.392
2017	282.901.303	247.312.212
2018	299.618.352	272.111.249
2019	379.714.916	272.111.249

Fonte: Gimenez (2020)

O artigo também analisou o volume, em milhões de litros, comercializado no país, de 2015 a 2019, de gasolina, pura e misturada com etanol anidro, e de etanol, incluindo a versão pura e E-85, ou seja, com 15% de gasolina. Pode-se observar na Figura 24 que o combustível fóssil possui uma quantidade cerca de trinta ou quarenta vezes maior do que o derivado da cana de açúcar e do milho, ou seja, ainda que o biocombustível no país esteja em progressão, a taxa de aumento do consumo da gasolina ainda não se encontra perto de ser superada.

Figura 24 - Volume de gasolina e etanol comercializados no Paraguai em 2015-2019, em milhões de litros

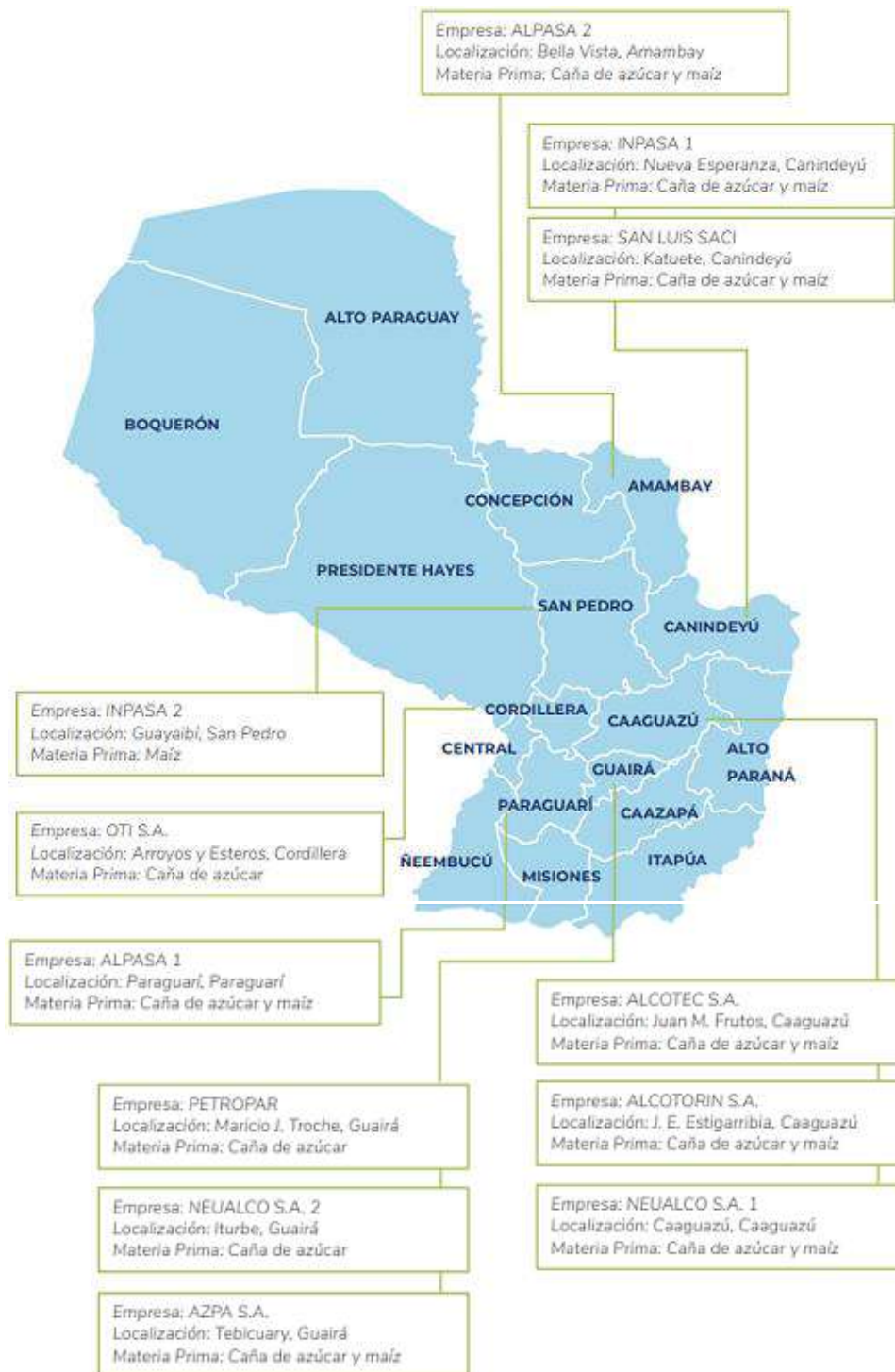


Fonte: Elaboração própria a partir de dados de Gimenez (2020)

Ainda nos mais recentes anos, explora-se o potencial de manufatura de etanol. Há um plano de expansão da estatal Petropar que pretende dobrar a produção, com um aumento do volume anual para 56 milhões de litros, tendo uma nova linha de moagem de cana de açúcar. Conforme a BNamericas (2021), em 2020, o país produziu cerca de 23,5 milhões de litros, atendendo a 40% da demanda da empresa. O plano de expansão possibilitaria cobrir 100%.

Como mencionado anteriormente, o governo incentiva o uso da cana para a produção de etanol; o biocombustível originado desta matéria-prima é prioritariamente usado em todo o território. Entretanto, o uso do milho vem ganhando espaço no país, uma vez que, ao redor do mundo, tem sido cada vez mais estabelecido. É possível ver na Figura 25 o mapa da localização das indústrias de etanol no país, com a especificação de cada matéria-prima utilizada.

Figura 25 - Mapa da localização de indústrias produtoras de etanol no Paraguai



Fonte: VMME (2021)

O Ministério da Agricultura e Pecuária (MAG) certifica-se da origem das matérias-primas utilizadas na indústria de biocombustíveis, garantindo a disponibilidade destas em quantidade suficiente no país. Só se pode ocorrer importação de biocombustíveis caso seja comprovada escassez dos mesmos na oferta nacional. A produção atual de etanol atende à demanda local (LOVERA *et al*, 2021).

2.4.4 Produção de etanol

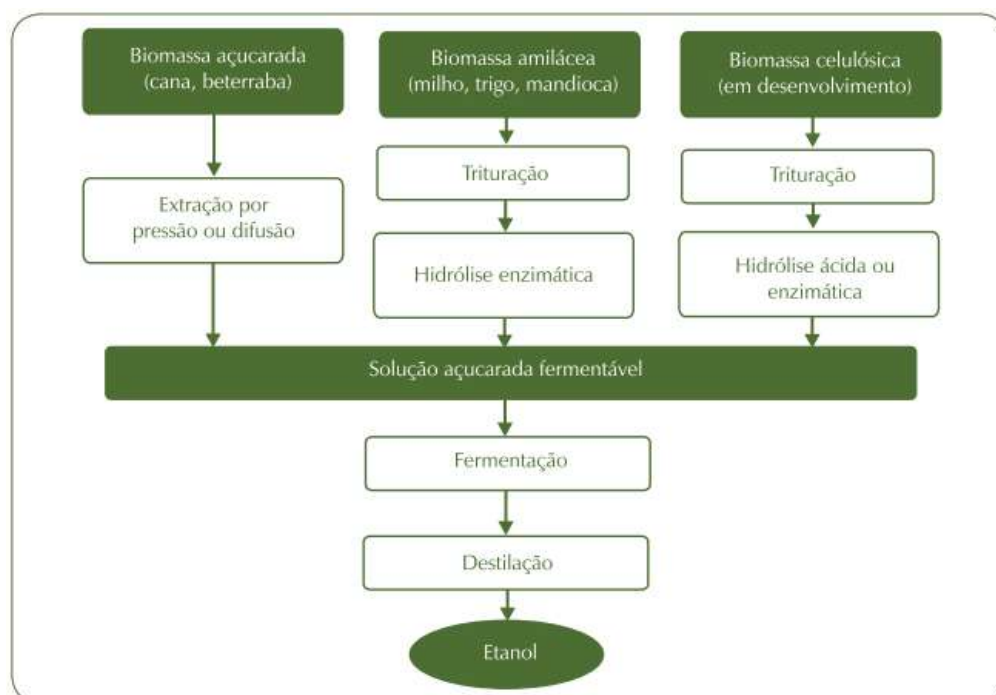
2.4.4.1 Etanol 1ª geração

O etanol de primeira geração pode ser produzido a partir de matérias-primas sacarídeas e amiláceas. As primeiras acumulam energia na forma de sacarose (união entre moléculas de glicose e frutose) e têm como exemplos a beterraba, o sorgo sacarino e, principalmente, a cana-de-açúcar; as segundas acumulam energia na forma de amido – constituído de uma mistura de dois polissacarídeos: amilose (15 – 25%) e amilopectina (75 – 85%) – e são o trigo, a mandioca, a batata e o milho, principal alternativa para a cana.

O produto oriundo da cana-de-açúcar e do milho representa 82% do mercado mundial de biocombustíveis, sendo que, no Brasil, a produção ocorre principalmente a partir do primeiro (BORTOLETTO & ALCARDE, 2015). O uso da cana-de-açúcar como principal matéria-prima para a produção do etanol é devido ao rendimento energético satisfatório e a realidade brasileira, haja vista que o Brasil é um dos líderes de mercado e tecnologia dessa cultura (BERNARDO NETO, 2009 *apud* AGUIAR, 2017).

A Figura 26 explicita as rotas tecnológicas para produção de bioetanol, utilizando as possíveis matérias-primas. A biomassa celulósica será abordada posteriormente, no processo de produção do etanol de segunda geração.

Figura 26 - Rotas tecnológicas para a produção de etanol



Comparando as matérias-primas, a Figura 27 aponta a produtividade por hectare de milho e de cana, e a quantidade, em toneladas, de produto resultante (considerando, no caso do primeiro, a produtividade em grão, ou seja, após a retirada do sabugo). Estudos indicam que uma tonelada de milho resulta, aproximadamente, em cerca de 400 litros do produto combustível, enquanto a mesma quantidade de cana-de-açúcar produz em torno de 90 litros. Contudo, quando se fala de rendimento por área, a cana-de-açúcar possui uma produtividade de sete mil litros por hectare (AZEVEDO, 2018); já a partir do milho, são de menos de três mil litros (CANNAVAL, 2021).

Figura 27 - Produtividade das matérias-primas de etanol no Brasil



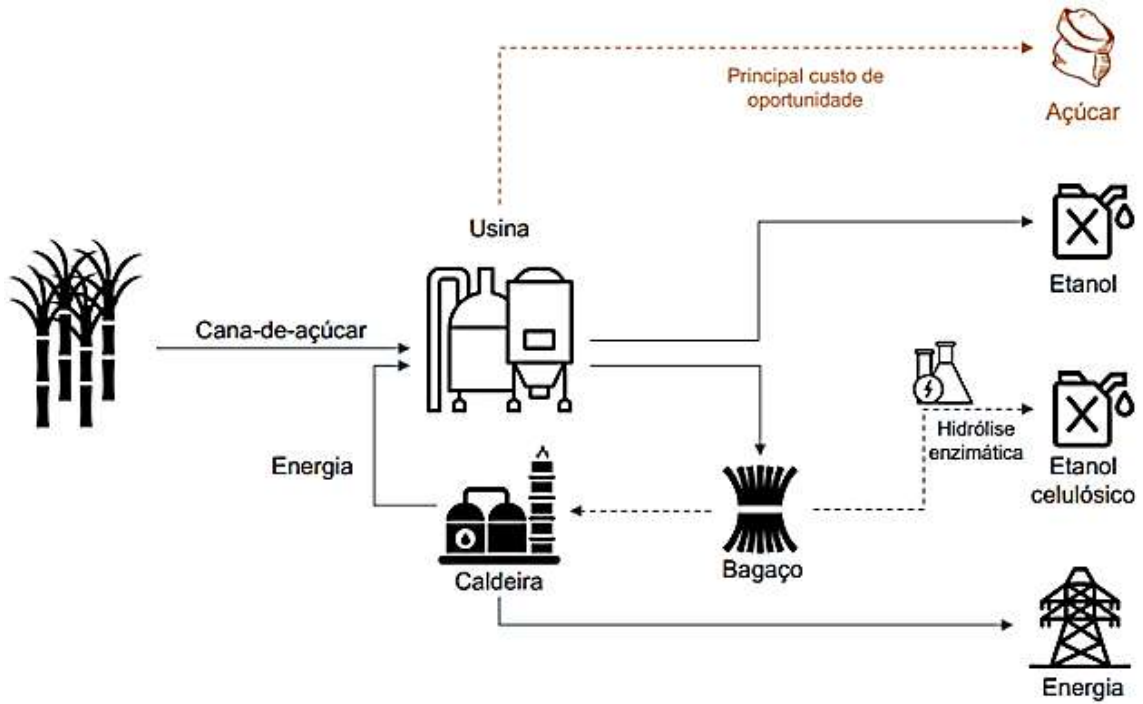
Fonte: Cannaval (2021)

Ademais, a forma canvieira de produção é ambientalmente mais vantajosa, haja vista que a quantidade de energia gerada para cada unidade de energia fóssil utilizada para gerar o combustível é de 9,3 unidades, enquanto para o milho, essa quantidade é de 1,5 (BORTOLETTO & ALCARDE, 2015); assim, mais da metade das usinas de cana do Brasil comercializam excedentes de energia, durante a safra (CANNAVAL, 2021). Desta forma, quando se trata de cadeias de valor distintas, não se deve comparar somente a produtividade das culturas para avaliar a atratividade do negócio; deve-se considerar também tanto os coprodutos, quanto os custos de produção e de oportunidade (CANNAVAL, 2021). A Figura 28 e a Figura 29 retratam a cadeia de valor do etanol de cana-de-açúcar e de milho, respectivamente. Enquanto a primeira matéria-prima possui uma entressafra, como já mencionado, devido à impossibilidade de armazenamento, a segunda pode ser produzida continuamente ao longo do ano.

Em relação ao custo de oportunidade de ambas as matérias-primas, a produção de etanol e a de açúcar competem entre si, uma vez que quando os preços deste aumentam, a atratividade

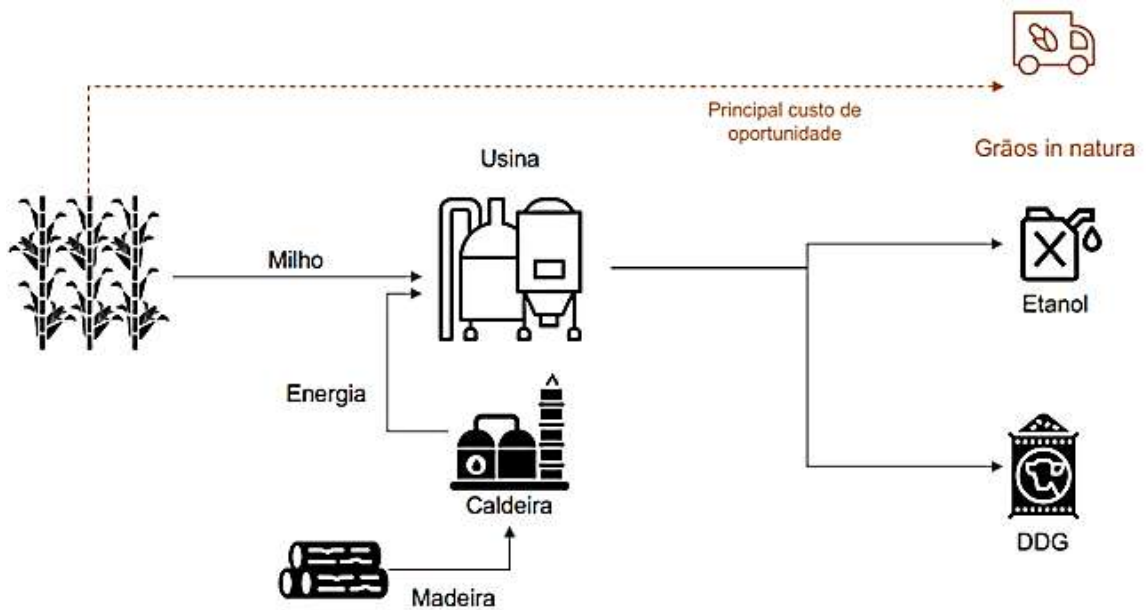
do combustível reduz; já para o milho, o álcool etílico contribui para a agregação de valor ao grão, quando este encontra-se em baixa de preço.

Figura 28 - Cadeia de valor do etanol de cana-de-açúcar simplificada



Fonte: Cannaval (2021)

Figura 29 - Cadeia de valor do etanol de milho simplificada

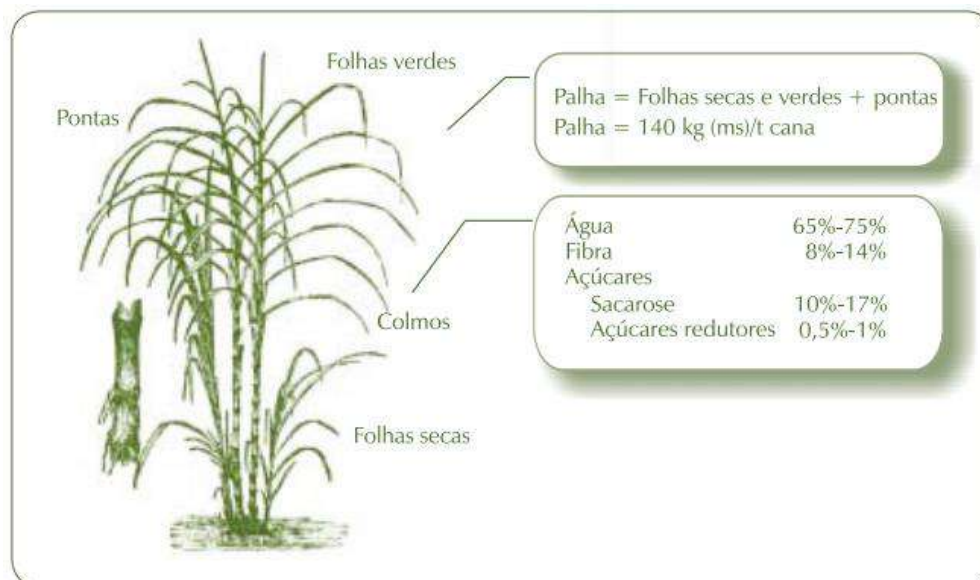


Fonte: Cannaval (2021)

2.4.4.2 Produção a partir da cana de açúcar

A Figura 30 abaixo ilustra os componentes da cana-de-açúcar: os colmos, nos quais a sacarose é concentrada, as pontas e as folhas, constituintes da palha da cana; somados, totalizam cerca de 35 toneladas de matéria seca por hectare.

Figura 30 - Estrutura da biomassa da cana de açúcar



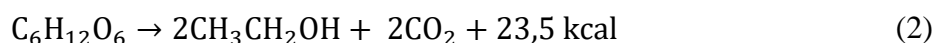
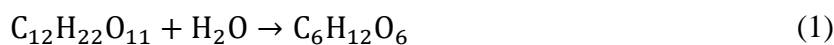
Fonte: Seabra (2008) *apud* BNDES (2008)

O ciclo produtivo da cana-de-açúcar depende do clima local. Anteriormente ao plantio, o solo é preparado para o recebimento de fertilizantes ricos em fosfato e sementes. Após um período de 12 a 18 meses, é possível realizar o primeiro corte e, em seguida, levar a colheita para a planta industrial (VAN DEN WALL BAKE, 2009 *apud* SANTOS, 2020).

Oliveira *et al* (2012) explicitam as etapas da produção, que começa com a lavagem da cana, tendo como objetivo retirar as impurezas. A cana é então encaminhada para as etapas de picagem e desfibrilação, para a desintegração e rompimento das células, facilitando a extração do caldo pela moagem, etapa que separa o caldo da fibra (bagaço). O bagaço pode ser utilizado como combustível nas caldeiras das usinas, gerando eletricidade de modo que o processo seja autossuficiente (SANTOS, 2020).

Em seguida, o caldo é peneirado e recebe um tratamento químico com adição de cal para a neutralização do ácido sulfuroso. É necessário também fazer o aquecimento e a decantação do caldo, de modo que ocorra a precipitação de coloides. Para facilitar a fermentação, prepara-se o mosto, que é uma solução concentrada de açúcar; além disso, prepara-se o fermento para o processo seguinte. Ainda segundo Oliveira *et al* (2012), fermentação pode ser em batelada ou contínua, sendo a primeira a técnica mais utilizada no

Brasil, na qual a levedura é recuperada a partir da centrifugação do vinho; o processo constitui na transformação dos açúcares (sacarose) em etanol, segundo as equações abaixo:



Ao longo da fermentação, há liberação de calor e de gás carbônico, além da geração de subprodutos, como glicerol e aldeídos. A mistura obtida ao final da etapa é denominada vinho fermentado, o qual passa por uma centrifugação, a fim de recuperar o fermento.

A destilação é a etapa em que ocorre a recuperação do etanol presente no vinho, processando a mistura em três colunas superpostas e separando os compostos com base nos diferentes pontos de ebulição. Os componentes voláteis (ésteres e aldeídos) retirados da coluna são condensados, e uma fração retorna ao topo de uma das colunas de destilação. Nesta etapa também é gerada a vinhaça, produto de fundo da destilação, obtido a uma proporção de treze litros para cada litro de etanol produzido. No fim, inicia-se o processo de retificação, com o objetivo de retirar as impurezas do álcool (álcoois superiores, ésteres, ácidos e outros).

Ao final das etapas de destilação e retificação, o etanol hidratado é uma mistura binária (azeotrópica) de etanol e água, com um teor aproximado de 96°GL. Esse etanol pode ser comercializado ou pode passar pela desidratação, a qual pode ocorrer de três maneiras:

- Destilação azeotrópica com ciclohexano: o ciclohexano forma uma mistura ternária (azeotrópica) com etanol e água, com ponto de ebulição a 63°C, menor que do etanol (78°C). Neste processo, a água é retirada pelo topo e, após condensação, duas fases são formadas, separando ciclohexano e etanol anidro. Este, é obtido com um teor de 99,3%.
- Destilação extrativa com monoetilenoglicol: o MEG absorve e arrasta a água para o fundo da coluna, e vapores de etanol anidro são obtidos no topo.
- Desidratação por adsorção, com peneiras moleculares: absorção da água através da rede de microporos, passando vapores de etanol, que poderão ser condensados em etanol anidro.

Na Figura 31, apresenta-se o fluxograma das etapas do processamento de matérias-primas sacarídeas para produção de etanol de primeira geração pela cana-de-açúcar.

Figura 31 - Fluxo da produção de açúcar e bioetanol de cana



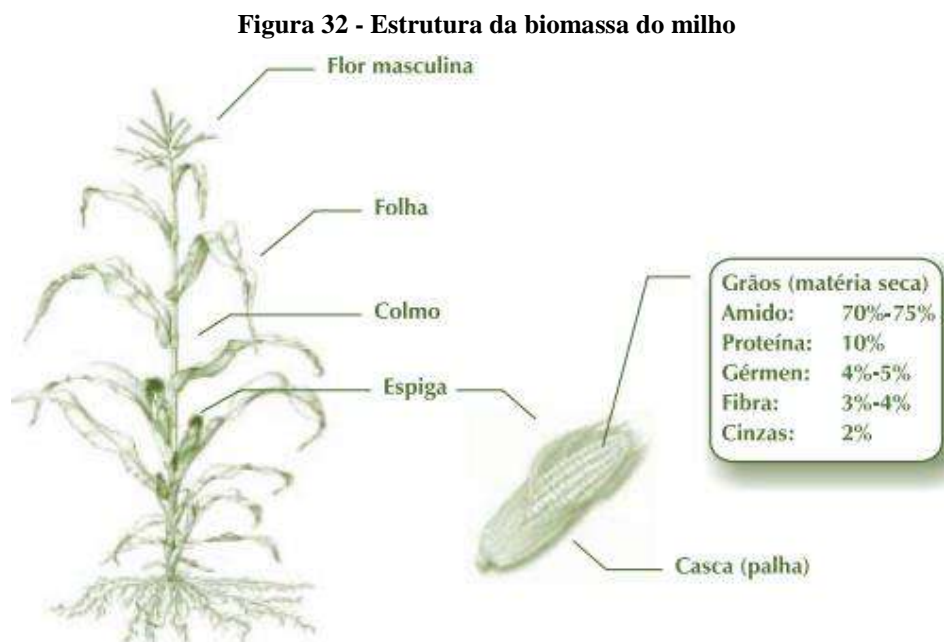
Fonte: Seabra (2008) *apud* BNDES (2008)

Contudo, há uma entressafra muito definida para a produção da cana-de-açúcar, o que gera um período ocioso de cerca de quatro meses, nos quais não há processamento de matéria-prima. Assim, há maiores custos para a produção das usinas, uma vez que não se pode fazer estoque de cana (BREISSAN FILHO, 2009 *apud* AZEVEDO, 2018). Considerando que, mundialmente, o milho como matéria-prima é uma alternativa já consolidada, principalmente nos Estados Unidos, e também devido ao grande volume do vegetal produzido no Mato Grosso, as usinas começaram a utilizar essa nova forma de geração de álcool etílico, a partir de 2012. As indústrias passaram a ser consideradas usinas *flex*, haja vista que processam, além do milho, cana-de-açúcar e sorgo.

2.4.4.3 Produção a partir do milho

O milho é um importante componente da alimentação, humana e animal, em diversos países, sendo a produção do mesmo liderada pelos Estados Unidos. A Figura 32 representa a estrutura de sua biomassa. A cultura do milho é limitada por fatores ambientais, uma vez que seu crescimento e desenvolvimento dependem da água, da temperatura e da radiação solar

(CRUZ, 2006). A condição ótima de temperatura varia com a etapa de crescimento da planta, e a variação climática tem efeitos em seus processos metabólicos.

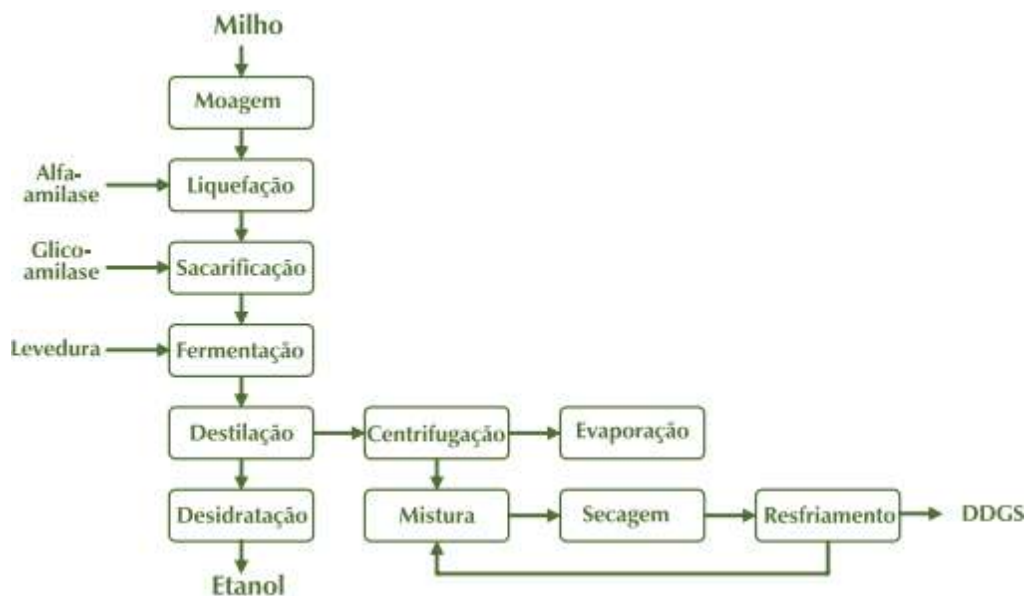


Fonte: Seabra (2008) *apud* BNDES (2008)

A empresa pioneira na utilização do milho para produzir etanol no Brasil foi a Usimat. Foram necessárias adaptações para introduzir esse novo desenvolvimento industrial. Segundo Vital Silva Nogueira, gerente industrial da empresa, em entrevista para a página Canaonline (2018), as alterações incluíram um novo silo de armazenamento para o milho e investimentos nas etapas de recepção, moagem e cozimento da matéria. O processo torna-se, em seguida, parecido com o do etanol.

A produção de bioetanol a partir de milho possui duas vias possíveis: uma com moagem úmida e outra, seca, esta última mais interessante para a indústria, devido a menores custos de processo. Na primeira separam-se diferentes frações do grão, sendo possível recuperar produtos, como proteínas, nutrientes, gás carbônico, amido e óleo de milho. Na segunda, obtém-se como único subproduto os DDGS (*distillers dried grains with solubles*); a Figura 33 esquematiza este processo, no qual adiciona-se água e enzimas (alfa-amilase) ao grão moído, a fim de hidrolisar o amido em cadeias menores e, em seguida, estas passam pela sacarificação, encaminhando a solução resultante para a fermentação (BNDES, 2008).

Figura 33 - Fluxo da produção de bioetanol de milho por via seca



Fonte: Wyman (1996) *apud* BNDES (2008)

A fermentação leva em torno de 30h e degrada cerca de 94% de açúcar do mosto. Ao contrário do processo envolvendo a cana-de-açúcar, a densidade do mosto e a quantidade de sólidos em suspensão dificultam a separação do fermento. A mistura de vinho e fermento é, então, encaminhada para destilação, retificação e desidratação. Ao final, o etanol anidro é armazenado e a vinhaça separada é processada, gerando DDGS (BORTOLETTO & ALCARDE, 2015), que são grãos de destilaria secos e possuem aplicação na pecuária brasileira, contendo altos teores de proteínas e possibilitando o uso como nutriente animal.

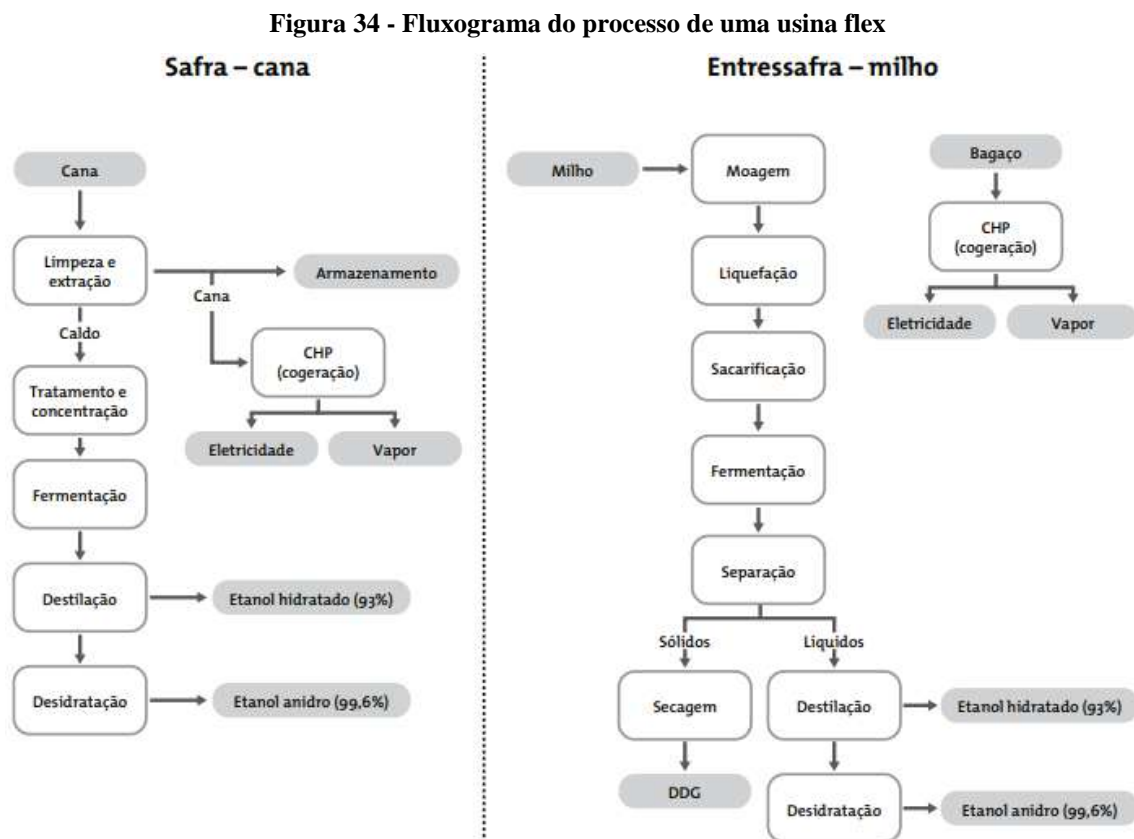
Mais de 60% do custo do etanol é comportado pela base genética do milho. Há uma diversidade de fatores que influenciam na qualidade do grão, na produtividade da área e no rendimento da produção, sendo exemplos deles: as condições climáticas, os fertilizantes aplicados no solo, decisões de manuseio na plantação e na colheita e a quantidade de água.

Uma usina de etanol proveniente de matéria-prima alimentar é possibilitada com o aumento da produtividade do milho e da sua biomassa, visto que esta proporciona um alto rendimento para o produto combustível desejado, tendo como consequência positiva a redução do uso de recursos naturais para a geração do biocombustível (BORTOLETTO & ALCARDE, 2015). Em relação ao DDG, este é considerado um coproduto do etanol, haja vista que, sem ele, não haveria capacidade competitiva do milho relativo à cana; cada tonelada de milho processada gera em torno de 200 kg do coproduto (CANNAVAL, 2021).

A produção do álcool com origem no milho tem progredido nos últimos anos, atingindo um valor produzido de 2,4 bilhões de litros no ano de 2020 (EPE, 2021a).

2.4.4.4 Usinas Flex

No âmbito das usinas *flex*, há dois tipos de cenários industriais: usinas que processam a cana durante a safra e, durante a entressafra, processam milho adaptando a mesma planta; e usinas integradas, as quais realizam o processamento de ambas as matérias-primas ao longo de todo o ano, dependendo da disponibilidade da matéria, com unidades separadas. Segundo revista do BNDES (2014), na entressafra da cana-de-açúcar, existe a possibilidade de operação de parte da estrutura da usina (caracterizada como *flex*) para o processamento de milho, por até 120 dias, conforme o fluxograma da Figura 34.



Fonte: Revista do BNDES (2014)

Desta forma, o processo da usina contempla, além das operações de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, também as operações específicas do processo partindo do milho: moagem, liquefação, sacarificação e secagem, estando agregadas às etapas já presentes em ambos os processos (fermentação, destilação e desidratação). Estados que produzem um alto volume de cana e de milho têm potencial para realizar as operações com tecnologias *flex*; um grande exemplo é o Mato Grosso, visto que a maior parte da manufatura dos produtos no país é concentrada no estado, além de possuir projetos de expansão da capacidade (CANNAVAL,

2021). O Centro-Oeste, de modo geral, é a região de maior potencial para usinas *flex*, haja vista que foi a região responsável pelo significativo crescimento da produção de milho do país, passando de 82 para 114 milhões de toneladas por ano, da safra de 2017/18 para 2021/22 (MACHADO, 2022). Apesar da alta produção, a região possui empecilhos para exportar o produto, uma vez que deve haver transporte para as regiões litorâneas, gerando maior custo pelo ponto de vista econômico; torna-se, portanto, mais interessante e viável o processamento do milho para outras finalidades e em plantas *flex* que se encontrem próximas ao local de cultivo.

O outro cenário mencionado anteriormente é de uma planta paralela para a produção de etanol de milho, compartilhando somente as utilidades (vapor e energia elétrica) disponíveis em uma usina de cana-de-açúcar, com potencial para operar durante toda a safra e entressafra.

A revista do BNDES (2014) ainda considera a necessidade de monitoramento do uso do milho para tal finalidade, uma vez que se precisa evitar choques inflacionários e os efeitos em cadeias alimentícias, como a substituição do milho como alimento pela matéria-prima como fonte de energia.

Segundo dados da ANP para 2021, a principal fonte de energia utilizada foi a cana-de-açúcar, sendo aproximadamente 93,4% entre todas as matérias-primas de possível uso. Entre os outros produtos da Figura 35, encontram-se principalmente o melaço e o milho. Ainda em 2021, o Brasil possuía 18 usinas de produção de etanol de milho, sendo 16 delas localizadas na região Centro-Oeste e onze somente no estado do Mato Grosso (GALERA, 2021).

Figura 35 - Proporção das matérias-primas utilizadas na produção de etanol no ano de 2021



Fonte: ANP (2022)

O cenário para o ano de 2022, de acordo com a página Nova Cana (2022), através de dados da ANP, é de novos investimentos em unidades de produção de etanol. Atualmente 23 usinas encontram-se em processo de construção, com capacidade futura de acrescentar “até 8,23

milhões de litros diários à oferta nacional de etanol hidratado e 5,93 milhões à de anidro” (Cana Online, 2022). Até 2031 espera-se, ainda, que o Brasil tenha 40 novas usinas de etanol em funcionamento, conforme planos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), sendo nove de cana-de-açúcar, 23 somente de milho e oito usinas *flex*, que utilizam ambas as matérias-primas.

O levantamento realizado pelo Cana Viral com base nos dados das usinas até maio de 2022, comprova a concentração das unidades na região Centro-Oeste e pode ser vista na Tabela 4 abaixo, a qual exhibe tanto as usinas *full* de milho, quanto as *flex* (milho e cana-de-açúcar).

Tabela 4 - Destilarias de etanol de milho no Brasil em 2022

	Empresa	Cidade	Cap. de Esmagamento (ton/dia)	Cap. de Produção de Etanol (m³/dia)	Tipo
1	Cerradinho Bio/ Neomille	Chapadão do Céu/ GO	1800	720	Flex
2	SJC Bioenergia	Quirinópolis/ GO	1500	600	Flex
3	Caçú	Vicentinópolis/ GO	1200	480	Flex
4	Usina Rio Verde	Rio Verde/ GO	600	240	Flex
5	Usina Jataí	Jataí/ GO	150	60	Flex
6	Inpasa	Sinop/ MT	6500	2600	Full
7	Inpasa	Nova Mutum/ MT	2750	1100	Full
8	FS Bioenergia	Sorriso/ MT	6000	2400	Full
9	FS Bioenergia	Lucas do Rio Verde/ MT	3875	1550	Full
10	Usimat	Campos de Júlio/ MT	1800	720	Flex
11	Libra	São José do Rio Claro/ MT	1300	520	Flex
12	ALD	Nova Marilândia/ MT	700	280	Full
13	Etamil	Campo Novo do Parecis/ MT	700	280	Flex
14	Usina Porto Seguro	Jaciara/ MT	700	280	Flex
15	Safras	Sorriso/ MT	10	4	Full
16	Bioflex	Poconé/ MT	20	8	Full
17	Inpasa	Dourados/ MS	2750	1100	Full
18	Cooperval	Jandaia do Sul/ PR	300	120	Flex

Fonte: Elaboração própria com dados da Cana Viral (2022)

2.5 GNV

Derivado do petróleo, o gás natural veicular (GNV) é composto por uma mistura de hidrocarbonetos leves na faixa do metano e etano, que na temperatura e pressão ambiente permanece no estado gasoso. Diferentemente de outros combustíveis fósseis, durante sua queima praticamente não emite monóxido de carbono e não apresenta enxofre em sua composição, sendo considerado um combustível mais limpo.

O principal constituinte do GNV é o metano, molécula composta por um átomo de carbono e quatro de hidrogênio. Essa razão hidrogênio-carbono (H/C) é vantajosa para a redução da emissão de poluentes quando comparada com a gasolina que apresenta uma razão H/C de 1,85:1 (MALENSHEK & OLSEN, 2009 *apud* BHASKER, 2018). Isso porque, durante a combustão, a energia térmica e o oxigênio misturam-se com o metano para quebrar as ligações moleculares e recombina-los para transformar, idealmente, carbono em CO₂ e hidrogênio em H₂O. Assim, se houver menos carbono e mais hidrogênio como reagente, a quantidade desses produtos será menor. No caso do GNV, é observada uma redução de 20% nas emissões de dióxido de carbono comparado à gasolina (CHIODI *et al*, 2006 *apud* BHASKER, 2018).

De acordo com a Abegás (2022), além da vantagem ambiental, o combustível proporciona uma economia de até 65% sobre o valor do litro da gasolina. No quesito eficiência, apresenta um rendimento 20% maior em relação à gasolina e de 50% maior em relação ao etanol.

A conversão de um motor *flex* ao GNV consiste em uma adaptação do veículo com a adição de um conjunto de equipamento conhecido como kit gás, incluindo um “reservatório para o GNV, rede de tubos de alta e baixa pressão, regulador de pressão, válvula de abastecimento, dispositivo de troca de combustível e indicadores de condição do sistema” (SCHWOB *et al*, 2003 *apud* BASTOS & FORTUNATO, 2014, p. 173). Feito o processo de conversão, o veículo passa a ter outra alternativa de uso de combustível, além do tradicional etanol e gasolina. A escolha do combustível a ser usado é feita a cada abastecimento, não limitando o motor apenas ao gás após a adição do kit. Como aspecto negativo deve-se destacar a tendência dos veículos à perda de potência e de espaço interno, devido ao peso e ao volume do reservatório do GNV (BASTOS & FORTUNATO, 2014).

2.5.1 Panorama do GNV no Brasil

Antes de instalar o kit gás em oficina homologada pelo Inmetro, solicita-se uma autorização prévia ao Detran. Após a instalação, é realizada uma inspeção veicular em empresas acreditadas pelo Inmetro e licenciadas pela Senatram (ITL – Instituição Técnica Licenciada);

e, ao ser aprovado, o veículo recebe o certificado de segurança veicular (CSV) e o selo GNV, permitindo regularização no Detran e incluindo o tipo de combustível no documento. Todos os anos, os veículos adaptados devem passar por inspeção periódica por questões de segurança e, a cada cinco anos, necessitam de um processo de requalificação para a avaliação de suas características mecânicas (AAAPV, 2022).

Segundo Bastos e Fortunato (2014), um dos impeditivos ao avanço do uso de GNV é a possibilidade de escassez, ou seja, probabilidade de não encontrar um posto que forneça esse tipo de combustível a cada necessidade de abastecimento.

Por outro lado, carros com kit GNV ganham desconto no valor do IPVA, com alíquota de 1,5%. Essa alíquota do IPVA varia de 1% a 6%, variando de acordo com o tipo de veículo e o combustível utilizado. Para efeito de comparação, carros do tipo *flex* apresentam uma alíquota de 4% no estado do Rio de Janeiro. Dessa forma, esse desconto é um incentivo para o consumo de um combustível menos poluente (MOTTA, 2022).

De acordo com a Abegás, o Brasil apresenta mais de 1,6 milhões de automóveis circulando com GNV. No primeiro semestre de 2022, o número de veículos que migraram para este combustível subiu 6,54%, quando comparado ao mesmo período em 2021, registrando alta pelo segundo ano consecutivo no país, segundo dados divulgados pelo Ministério da Infraestrutura. Comparando com 2020, a diferença é ainda maior, de 56,7%, tendo o Rio de Janeiro como estado de maior frota de veículos circulando com gás natural veicular (AAAPV, 2022).

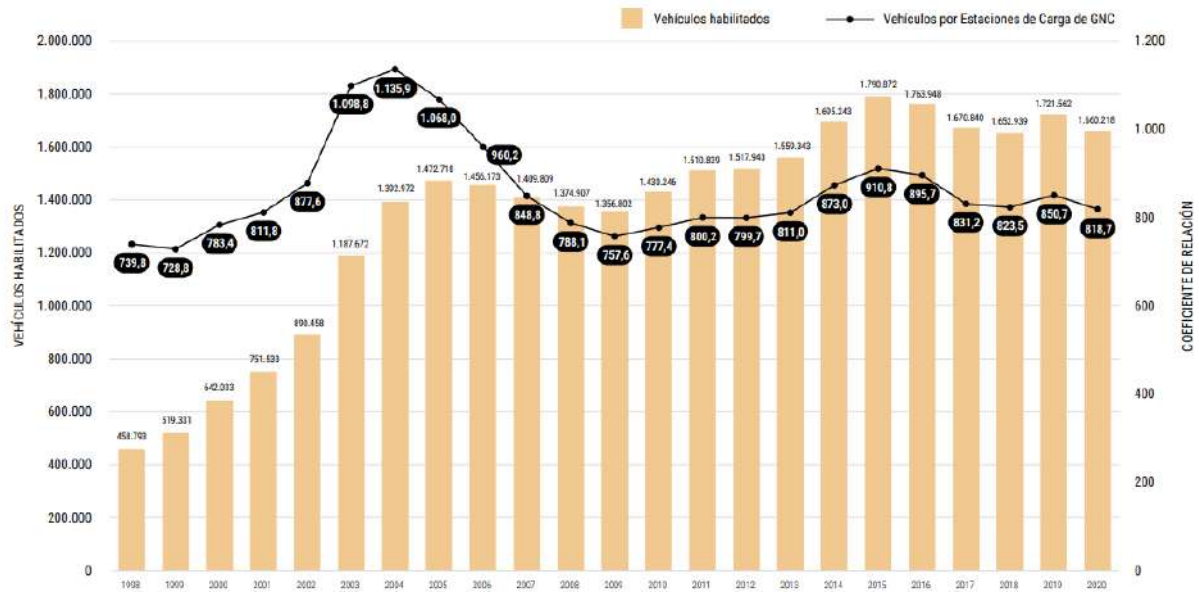
A nota técnica da EPE (2020a) explica que a demanda nacional do GNV corresponde a uma parcela de 5% da demanda do gás natural. Embora o setor automotivo apresente um aumento constante em termos de volume ano a ano, a infraestrutura logística ainda é bastante limitada e concentrada em grandes centros urbanos, principalmente naqueles que possuem incentivos para a utilização de carros movidos a gás e onde há uso recorrente de táxis e/ou aplicativos de transportes.

2.5.2 Panorama do GNV na Argentina

A Argentina apresenta-se como um dos países com papel de liderança da América do Sul em relação ao uso do gás natural veicular. O mercado nacional, no ano de 2020, apresentou uma demanda de 4,65% do consumo interno anual de gás natural, além de uma média de mais de oito mil veículos convertidos mensalmente para a utilização deste combustível. Dessa forma, em dezembro de 2020, o país atingiu a marca de 1.660.218 veículos adaptados, considerando carros particulares, táxis e caminhões, referente à recente frota de veículos pesados movidos a

gás (ENERGAS, 2020). A evolução do número de veículos convertidos a GNV desde 1998 a 2020 na Argentina está representada na Figura 36, na qual se percebe uma grande evolução desde o final do século passado até o ano de 2005, seguindo de um sutil crescimento nos anos mais recentes analisados.

Figura 36 - Evolução da frota de veículos movido a GNV na Argentina de 1998 a 2020



Fonte: ENERGAS (2020)

Por sua vez, os postos de abastecimento totalizaram mais de dois mil até o mês de dezembro de 2020, sendo distribuídos, majoritariamente, nas áreas de grande tráfego; nota-se, pela Tabela 5, que a província de Buenos Aires concentra a maior parte das estações, representando mais de 40% do total do país. Além disso, a Cidade Autônoma de Buenos Aires (conhecida como CABA) e as províncias de Córdoba e Santa Fé representam uma porcentagem significativa, em comparação às demais províncias (ENERGAS, 2020).

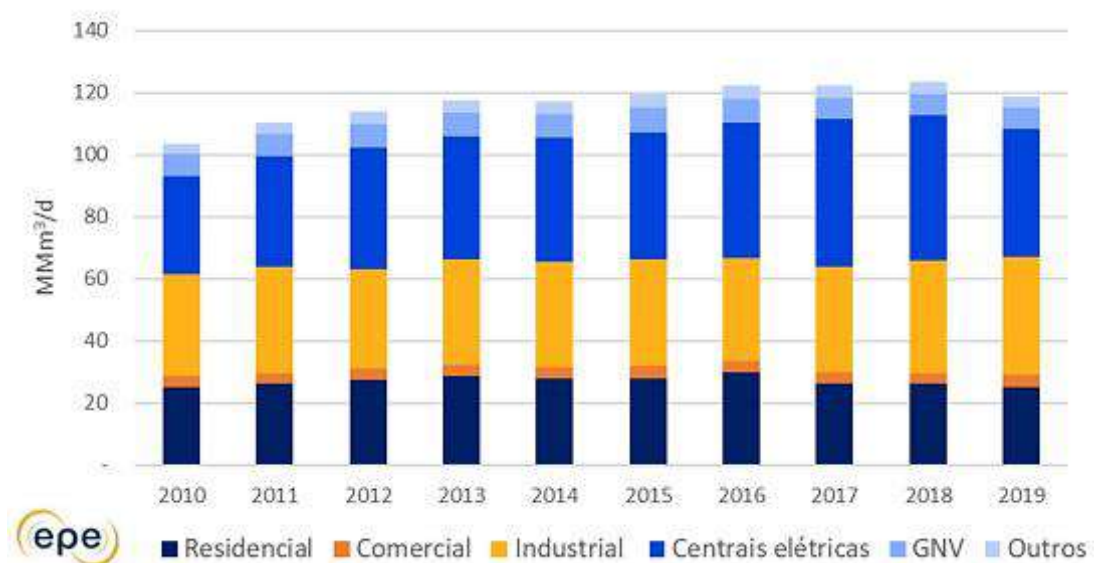
Tabela 5 - Distribuição das estações de abastecimento de GNV por província em 2020 na Argentina

Província	Quantidade	%
Buenos Aires	883	43,5%
Cidade Autônoma de Buenos Aires	126	6,2%
Catamarca	14	0,7%
Córdoba	288	14,2%
Chubut	2	0,1%
Entre Rios	54	2,7%
Jujuy	38	1,9%
La Pampa	14	0,7%
La Rioja	9	0,4%
Mendoza	149	7,3%
Neuquén	17	0,8%
Rio Negro	20	1,0%
Salta	54	2,7%
San Juan	40	2,0%
San Luis	30	1,5%
Santa Cruz	-	0,0%
Santa Fé	146	7,2%
Santiago del Estero	41	2,0%
Tierra del Fuego, AIAS	1	0,0%
Tucumán	100	4,9%
TOTAL	2028	100,0%

Fonte: Elaboração própria com dados da ENERGAS (2020)

A oferta interna do gás natural no país destina-se, principalmente, à geração de eletricidade e ao consumo final industrial e residencial, conforme representado na Figura 37. A distribuição desse gás entre os diversos setores manteve-se estável de 2010 a 2019, com o consumo anual das usinas termelétricas acumulando uma média de 35% do consumo total, representando em torno de 40 Mm³/d. O setor industrial apresentou um volume de 34 Mm³/d, equivalente a 29% do total, seguido pelo setor residencial com 27 Mm³/d (23%). Já o uso do GNV correspondeu a aproximadamente 6% do consumo anual total (EPE, 2020).

Figura 37 - Consumo setorial de gás natural na Argentina de 2010 a 2019



Fonte: EPE (2020)

Para o Paraguai, não foi encontrada nenhuma informação sobre a utilização desse combustível no país.

2.5.3 Produção de GNV

O GNV é produzido nas Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGN) a partir do condicionamento e fracionamento do gás natural em compostos de maior valor agregado.

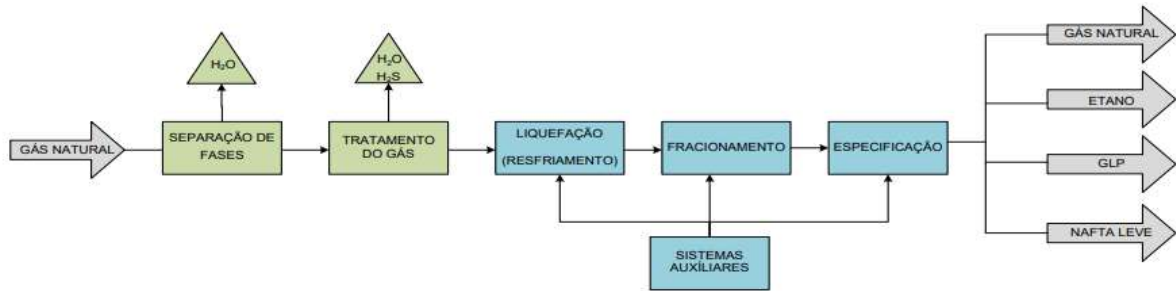
O condicionamento do gás contempla as etapas de desidratação, com o objetivo de evitar a corrosão e a formação de hidratos nos gasodutos, e dessulfurização, remoção de enxofre, componente também corrosivo. Dependendo da composição do gás, é feita a remoção de CO₂, caso sua presença seja expressiva, de modo a reduzir o custo de transporte e evitar processos de corrosão (SANT'ANNA, 2005 *apud* SANTOS, 2016).

Após essas etapas, o gás natural passa por um processo de resfriamento através de trocas térmicas, onde os componentes mais pesados são liquefeitos. Nessa etapa, podem ser utilizados diversos processos conforme a pressão disponível ou a recuperação desejada (SANTOS, 2016).

O gás já resfriado vai para uma coluna de destilação, onde ocorre a separação das frações leves. Como saída de topo da coluna, há uma mistura de metano e etano, chamada de gás residual. Ao chegar ao consumidor final, postos de abastecimento, esse gás residual é nomeado como GNV.

As frações pesadas, com maior valor agregado, formam o gás liquefeito de petróleo (GLP) constituído por propano, butano e gasolina natural (SANTOS, 2016). As etapas simplificadas de uma UPGN estão esquematizadas na Figura 38.

Figura 38 - Etapas de uma unidade de processamento de gás natural



Fonte: Eckert (2013) *apud* Santos (2016)

3 METODOLOGIA

De maneira geral, pode-se definir o propósito do trabalho como descritivo, apresentando uma visão ampla sobre o panorama dos biocombustíveis no Brasil, na Argentina e no Paraguai, bem como sobre as principais tecnologias de motores de combustão interna.

Nesse sentido, utilizou-se uma abordagem qualitativa com levantamento de literatura bibliográfica, fazendo uso de tabelas e gráficos demonstrativos para resumir dados. Segue uma descrição da metodologia utilizada especificamente para os tópicos do presente trabalho.

Para o segundo tópico, foi realizada uma pesquisa bibliográfica de forma ampla para a avaliação das tecnologias atuais utilizadas nos três países estudados, em relação ao motor de ciclo Otto com combustíveis tradicionais (gasolina e GNV) e com etanol de primeira geração, bem como dos processos produtivos para a formação desses combustíveis. Foram verificados dados de oferta, demanda e projeções para anos futuros destes para os três países, de acordo com dados disponibilizados em suas plataformas governamentais, como a ANP e a EPE para o Brasil, e USDA e ENERGAS para a Argentina, além de artigos e fontes de notícias, incluindo para o Paraguai.

Para o quarto tópico, apresentando os resultados e discussão sobre novas qualidades de biocombustíveis para motores de ciclo Otto, assim como as adaptações necessárias para estes, adotaram-se técnicas variadas para a apuração das informações, conforme descrito em seguida. No que concerne os motores, os dados foram adquiridos a partir de artigos científicos e dissertações, pesquisando, principalmente, em plataformas como a revista científica *Elsevier*, a revista do BNDES e Google Acadêmico. A pesquisa sobre o etanol de segunda geração seguiu a metodologia do segundo tópico, buscando dados tanto em dissertações e artigos sobre o processo produtivo, quanto na plataforma brasileira ANP para dados nacionais sobre oferta e demanda e EPE para projeções relacionadas ao tema; já para a Argentina, além da busca no site do governo argentino, pesquisou-se, também, em plataformas de notícias *online*, a fim de obter informações atualizadas sobre o tema no país. Ao avaliar o hidrogênio, suas rotas tecnológicas e seu desenvolvimento de pesquisa na América Latina, além da EPE, plataformas como a Confederação Nacional da Indústria (CNI), a Agência Internacional de Energia (IEA) e a KPMG foram consultadas, a fim de obter dados atualizados sobre o assunto; incluiu-se o CES (Conselho Econômico e Social) e artigos argentinos, de modo a analisar dados do país. Como fonte adicional de informações, foram utilizadas fontes de notícias do Paraguai. Para avaliação do biogás utilizou-se plataformas como o Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBIOGÁS), a Associação Brasileira do Biogás (ABIOGÁS), plataformas de notícias *online*,

além da EPE e de dissertações e artigos. Já para a pesquisa do biometano, utilizou-se como referência dados da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado (ABEGÁS) e ANP, além de todas as fontes citadas anteriormente para o biogás, de modo a obter informações sobre o Brasil; para a Argentina, foram utilizados dados divulgados de estudos realizados pela Câmara Argentina de Energias Renováveis (CADER).

4 RESULTADOS

4.1 NOVAS PROPOSTAS PARA MOTORES CICLO OTTO

A queima de combustíveis fósseis gera consequências ambientais no planeta, e grande parte é causada por motores a combustão interna. Além disso, a nível mundial, percebe-se a crescente quantidade de veículos no mundo, elevando os índices de emissão de poluentes. Para que estes problemas não tendam a aumentar no decorrer dos anos, uma alternativa é diminuir, ou até mesmo extinguir, a utilização destes combustíveis (BARRETIRI & HAUS, 2013).

Por esse motivo, avalia-se que, entre as vantagens do uso de biocombustíveis em motores de ciclo Otto, está a redução de liberações de gases danosos do escapamento da gasolina, como, por exemplo, as nanopartículas, os hidrocarbonetos policíclicos e aromáticos gerados na mistura de gasolina com etanol em motores *flex* (MUÑOZ *et al.*, 2016 *apud* MITSUHARA, 2021).

No contexto nacional e internacional, encontra-se o aumento de pesquisas e investimentos relacionados a novas propostas de motores ciclo Otto, utilizando biocombustíveis alternativos e cada vez mais sustentáveis, como o biogás, o biometano e o etanol com adição de hidrogênio. Sabe-se que, para cada nova modalidade de combustível, é necessário estudar sobre possíveis adaptações requeridas pelos motores, a viabilidade de implementação e as vantagens obtidas. Outro tópico a ser discutido e de crescente relevância é a utilização de hidrogênio em motores de ignição por centelha; este uso pode ser tanto como combustível primário ou suplementar, sendo adicionado à gasolina, gás natural ou biogás, e outros combustíveis.

4.1.1 Motor com biogás

Os motores de ciclo Otto podem ser facilmente adaptados para utilizar o biogás como combustível, uma vez que esse tipo de motor utiliza uma mistura de ar e combustível com ignição por faísca. A principal modificação necessária está ligada ao fornecimento de ar e ao processo de mistura do mesmo com o biogás (kit-gás), que substituiria o carburador de um motor a combustível no estado líquido. Dessa forma, o motor é controlado pela quantidade de biogás abastecido (GARLET, 2022).

Com base em estudos anteriores, a razão ar/combustível (A/C) estequiométrica para o biogás com 60% de metano é de 5,71 m³ de ar por metro cúbico de gás metano (CONSTANT & NAVEAU, 1989). Para uma combustão completa do biogás, essa relação deve ser seguida.

Logo, para o funcionamento adequado da mudança de gasolina para biogás deve ser feita a instalação de um misturador de gás, que vai ajustar a alimentação de biogás de forma a atender essa razão. Além disso, é preciso levar em consideração que em um motor de potência elevada, outras modificações são necessárias tendo em vista a variação da menor velocidade de frente de chama e maiores temperaturas da vela de ignição (CONSTANT & NAVEAU, 1989 *apud* ALMEIDA *et al.* 2012)

Para otimizar o sistema, é preciso aumentar a razão de compressão, o que leva a um menor consumo e uma maior potência. Entretanto, um motor Otto operando com biogás apresenta uma produção de energia inferior quando comparado a um motor operando a gasolina. Isso se deve à eficiência volumétrica do sistema ser reduzida, devido ao fato de que em um mesmo volume de mistura, o líquido possui maior energia do que uma mistura de combustível gasoso. Essa menor eficiência volumétrica é, contudo, normalmente compensada pelo fato de os motores a gás funcionarem com maiores taxas de compressão. Isso ocorre devido ao poder antidetonante do gás, que está ligado ao número de metano, ou seja, quanto maior a proporção de metano, maior será a resistência à detonação (ALMEIDA *et al.* 2012).

Além disso, a velocidade de combustão do biogás é mais lenta do que a da gasolina e do álcool, porém é possível adaptar o sistema de ignição para trabalhar nesta condição (MIHIC, 2004 *apud* MACHADO, 2014). O controle de velocidade e potência deste tipo de motor é realizado através da variação da vazão de alimentação da mistura ar-combustível por uma válvula do tipo borboleta. No efeito estrangulamento, válvula fechada, há uma menor vazão de A/C; com isso, a potência e eficiência do motor são reduzidas (SUZUKI *et al.*, 2011 *apud* MACHADO, 2014).

Além da taxa de compressão e da razão ar/combustível, a análise da influência da variação do ponto de ignição também deve ser considerada. Segundo alguns trabalhos experimentais com biogás, o melhor ponto de ignição é adiantado em 45° (ALMEIDA *et al.* 2012). Ademais, estudos de 2017, reportados por Garlet (2022), avaliaram o desempenho de um motor com a variação da razão de compressão ao operar com biogás, tendo como resultado um aumento na potência máxima e eficiência térmica de eixo, e redução do consumo específico de combustível em 25%.

4.1.2 Motor com biometano

As adaptações para o motor de ciclo Otto alimentado com 100% de biometano são iguais às do motor abastecido com biogás, uma vez que a molécula combustível é a mesma (CH₄).

Os parâmetros que influenciam no desempenho do motor são a taxa de compressão, ponto de ignição, tamanho do misturador e a razão ar/combustível que será aplicada. Para fazer a conversão no motor Otto é preciso realizar a instalação do kit gás, composto pelos itens necessários para que ocorra a mistura do gás com o ar na medida correta antes de ser injetado no motor.

4.1.3 Motor com hidrogênio puro

O hidrogênio apresenta-se como uma alternativa de energia renovável a ser utilizada em veículos, este uso podendo ocorrer através de células a combustível ou hidrogênio alimentado em motores de combustão interna (CUNHA, 2017). O presente trabalho aborda a segunda possibilidade. A adição aos motores possui três maneiras de acontecer: pode ser inserido por injeção contínua ou controlada pelo coletor de ar de admissão do motor, ou através da injeção direta do gás na câmara de combustão, apresentando melhores resultados (PEREIRA, 2017 *apud* PICHELI *et al*, 2019). De acordo com Sainz *et al* (2012, *apud* CUNHA, 2017), durante a transição da matriz energética e implementação de maiores estudos sobre o uso do hidrogênio em motores, é fundamental a viabilidade de os MCI operarem com bicomcombustíveis (gasolina/diesel/etanol ou hidrogênio puro) ou com misturas de combustíveis (hidrogênio adicionado à gasolina, diesel ou etanol).

Uma propriedade do hidrogênio interessante para os MCI é o seu coeficiente de difusão. Por este ser maior que o da gasolina e do etanol (Tabela 6), há maior estímulo ao fluxo da carga e a homogeneidade da mistura ar/combustível aumenta, proporcionando maior rapidez e eficiência à combustão (WANG *et al.*, 2011), além de resultar em um aumento na eficiência do motor, com redução da fuligem gerada e de hidrocarbonetos não queimados, liberados em uma combustão incompleta (ZHAO *et al*, 2010).

Segundo Yilmaz *et al* (2010, *apud* CUNHA, 2017), o hidrogênio apresenta um amplo intervalo de inflamabilidade, o que permite ao motor trabalhar com diversas proporções de ar/combustível, mas é preciso tomar cuidado porque uma combustão pobre reduz a potência. De acordo com estudos de Picheli *et al* (2019), pode-se avaliar a adaptação do hidrogênio aos motores de combustão interna, tendo como vantagem uma alta velocidade de rotação. A combustão do hidrogênio, por este possuir baixo limite de ignição, pode iniciar sem dificuldade mesmo em misturas pobres, ou seja, com mais ar do que combustível, facilitando a utilização em motores de ciclo Otto. Além disso, a menor energia mínima de ignição do H₂ confere uma combustão mais estável e facilita a operação do motor com arranque a frio, apesar de aumentar o risco de detonação, de acordo com Zhao *et al* (2010). Wu *et al* (2016 *apud* AYAD, 2021)

estudou as características da partida a frio de um motor de ignição por faísca, com injeção direta de gasolina e indireta de hidrogênio, e operando com misturas de gasolina-hidrogênio e hidrogênio puro. Avaliou-se que, com a adição do composto em questão, houve uma redução significativa de emissões de CO, CO₂ e hidrocarbonetos, quando comparadas ao uso da gasolina pura, propriedade que favorece a utilização do hidrogênio nos motores, haja vista a ausência de átomos de carbono em sua composição (CUNHA, 2017). Apesar disso, as emissões de NO_x aumentaram (WU *et al.*, 2016 *apud* AYAD, 2021).

O hidrogênio apresenta ainda uma alta temperatura de autoignição, bem como mais elevado valor de octanagem, o que lhe confere uma maior propriedade antidetonante (CUNHA, 2017).

A Tabela 6 abaixo apresenta um comparativo entre as propriedades da gasolina, do etanol e do hidrogênio.

Tabela 6 - Propriedades dos combustíveis

Propriedades	Gasolina	Etanol	Hidrogênio
Difusividade no ar (cm ² /s)	0,08	0,02	0,63
Limite de inflamabilidade (% em volume de ar)	1,4-7,6	4,3-19	4-75
Velocidade de chama (cm/s)	37-43	41	265-325
Energia mínima de ignição (mJ)	0,24	0,7	0,02
Temperatura de autoignição (K)	533-733	831	858
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	43,9	26,9	119,9
Número de octano (RON)	92-98	100-114	130

Fonte: Adaptado de Cunha (2017)

Avalia-se, também, o maior poder calorífico e a velocidade de chama do hidrogênio, percebendo valores significativamente maiores do que os outros dois combustíveis. Isso possibilita uma diminuição do período de combustão e melhor operação do motor com um grau elevado de combustão a volume constante (KARAGOZ *et al.*, 2015 *apud* CUNHA, 2017), levando a, entre outras vantagens, um menor consumo de combustível.

4.1.4 Motor com etanol e adição de hidrogênio

A utilização de hidrogênio como combustível suplementar é uma das novas alternativas em motores de ignição por centelha, de modo a compensar as deficiências do etanol utilizado nesses motores. Como resultado dessa adição, tem-se como vantagens as propriedades do hidrogênio descritas no item anterior. Há uma redução da duração da combustão devido à alta

velocidade de propagação da chama (JI et al, 2013 *apud* AYAD, 2021). Além disso, é possível operar em regimes de mistura pobre ou diluída devido a ampla faixa de inflamabilidade e baixa energia de ignição do hidrogênio, o que leva a um aumento de estabilidade de combustão (AYAD, 2021).

Essa adição de hidrogênio geralmente confere uma menor emissão de carbono, devido a sua composição; contudo, por apresentar alta temperatura de queima, há um aumento da emissão de NO_x, conforme descrito no item anterior. Operar em regimes de mistura pobre ou diluída é uma opção para reduzir a liberação desse gás (JORDAN, 2012 *apud* AYAD, 2021). Dessa forma, de acordo com Ji *et al.* (2013), a utilização do combustível suplementar confere uma melhoria na eficiência e desempenho dos motores de ignição por centelha.

A melhoria no desempenho dos motores que utilizam o hidrogênio como combustível suplementar tem sido relatada há alguns anos na literatura.

Wang *et al.* (2010) analisaram o desempenho de um motor de ciclo Otto movido a etanol com a adição de hidrogênio em condições estequiométricas e em marcha lenta. Como resultado, obteve-se que a taxa de fluxo de consumo de energia combustível foi reduzida em 20% quando a fração de volume de hidrogênio no ar alimentado aumentou de zero para 6,38%. Dessa forma, com a adição do H₂ a eficiência térmica do motor aumentou de 17,21% para 21,65% (CUNHA, 2017).

Greenwood *et al.* (2014) analisaram experimentalmente o efeito da adição de hidrogênio ao etanol em regimes de funcionamento de misturas muito pobres. Os resultados obtidos demonstraram que com a adição de H₂ houve uma diminuição nas emissões, bem como estabilização e aceleração do processo de combustão. O estudo foi realizado com duas frações de hidrogênio (15 e 30% em volume), e em ambas, reduziram as emissões de NO_x em 95% quando comparadas com as emissões de um motor a gasolina com mistura estequiométrica. Entretanto, a potência e o torque diminuíram consideravelmente em misturas ultra pobres, o que já era esperado (CUNHA, 2017).

4.2 NOVAS QUALIDADES DE BIOCOMBUSTÍVEIS PARA MOTORES CICLO OTTO

Conforme dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2021), o Brasil possui uma posição privilegiada na transição energética para fontes renováveis, uma vez que as energias renováveis correspondem a 48,4% da matriz energética do país, além de este ser o segundo maior produtor e consumidor de biocombustíveis do mundo, possuindo 80% de automóveis *flex-fuel*.

Entre as políticas que favorecem a transição energética, encontra-se a 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).

A Argentina permanece muito dependente de energias não renováveis. A demanda energética no país está em constante aumento, oscilando em torno de 10% ao ano, enquanto vê-se a necessidade de importar petróleo e derivados, uma vez que, internamente, não foi possível atender a essa demanda (ORLANDI *et al*, 2019). O crescimento projetado do consumo de gasolina torna necessário a análise da viabilidade de exploração de outros combustíveis, de fontes renováveis (como o etanol lignocelulósico), de modo a reduzir a importação de petróleo, fato que favorecerá a economia do país, eficiência energética e permitirá a diversificação da matriz energética (ASCURRA *et al*, 2019), e, portanto, não depender apenas de combustíveis fósseis.

Em relação ao Paraguai, o Plano Nacional de Desenvolvimento (PND) de 2030 estabeleceu estratégias de desenvolvimento econômico e sustentável, considerando o consumo de fontes de energia renováveis, entre outros objetivos de valorização do meio ambiente (GIMÉNEZ, 2020). As estratégias visam aumentar em 60% o consumo de energia renovável e reduzir em 20% o consumo de combustíveis fósseis, em relação ao total de energia consumida para veículos no país anualmente. A projeção para o ano de 2040 estima que o consumo energético do Paraguai dobrará, levando à necessidade de outras fontes de energia serem implementadas para atender à demanda (LOVERA *et al*, 2021); neste caso, os biocombustíveis e suas tecnologias cada vez mais avançadas representam uma oportunidade para suprir as necessidades energéticas do futuro.

4.2.1 Etanol de 2ª geração

4.2.1.1 Matéria-prima

Conforme visto, o etanol possui suas principais matérias-primas sendo a cana-de-açúcar e o milho; entretanto, há vantagens ambientais e econômicas quando se estuda sobre o etanol de segunda geração, também conhecido como etanol lignocelulósico, uma vez que possui origem na lignocelulose, a qual constitui-se de resíduos de origem vegetal.

O uso de materiais lignocelulósicos para a produção de etanol através da hidrólise e fermentação destes tem sido realizado desde o final do século XIX. Contudo, nos últimos anos, a tecnologia tem sido estudada e avançada para atender ao mercado de biocombustíveis. Esses materiais estão presentes em praticamente todos os resíduos de biomassa, produzidos nas atividades agrícolas e industriais, bem como no lixo urbano (BNDES, 2008). A Tabela 7 exibe a composição química dos principais resíduos lignocelulósicos.

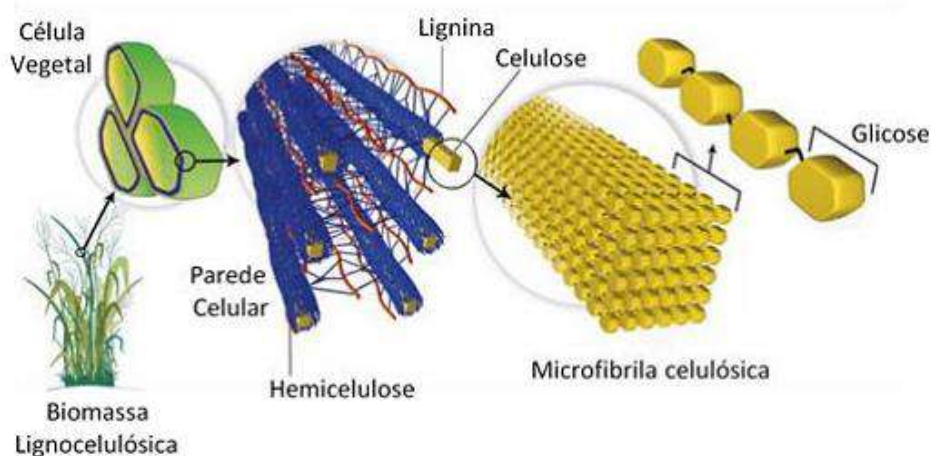
Tabela 7 - Composição química dos resíduos lignocelulósicos

Resíduos	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Palha de arroz	32-47	19-27	5-24
Palha de trigo	35-47	20-30	8-15
Palha de milho	42,6	21,6	8,2
Palha de cana	40-44	30-32	22-25
Bagaço de cana-de-açúcar	33-36	28-30	18,4

Fonte: Sarkar *et al* (2012) *apud* Santos (2012); Santos (2018)

O bagaço de cana-de-açúcar sempre foi aproveitado pelas usinas para a geração de energia em produção de vapor e eletricidade, na sua queima em caldeiras. Entretanto, a quantidade de bagaço gerada no processamento da cana passou a ser também considerada como matéria-prima para obter outros produtos, dentre estes, o etanol.

Figura 39 - Estrutura da biomassa lignocelulósica



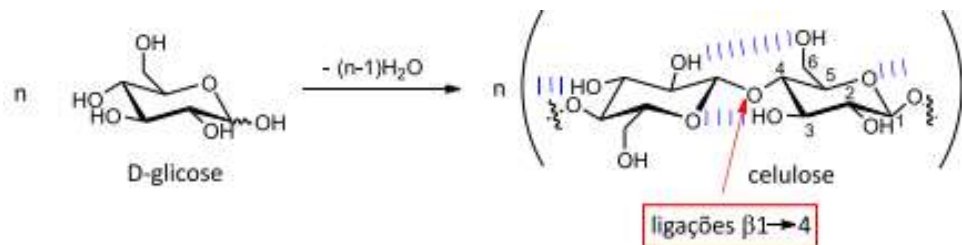
Fonte: Santos (2018)

A biomassa lignocelulósica (Figura 39) é formada por celulose (40-50%), hemicelulose (25-35%) e lignina (15-25%) (PRAUCHNER *et al*, 2022). A lignina é um polímero fenólico, responsável pelas propriedades de rigidez, impermeabilidade à água e resistência mecânica e microbiológica dos tecidos vegetais.

A lignina, por ser altamente energética, pode ser utilizada para produzir calor e eletricidade necessários ao processo de produção de etanol. Além disso, pode ser utilizada para formação de diversos produtos, incluindo compostos fenólicos, aromáticos, ácidos dibásicos e metil, formado pela reação da fração fenólica com álcoois (WYMAN, 1994 *apud* SANTOS, 2012, p. 26).

A celulose e a hemicelulose são polímeros de carboidratos, os quais podem ser convertidos em seus monômeros, pentoses e hexoses respectivamente, através da hidrólise (SOARES & ROSSELL, 2007). A celulose, de fórmula $(C_6H_{10}O_5)_n$ é um polímero linear formado por milhares de unidades de glicose; possui uma parte amorfa e uma maior parte cristalina. A primeira é facilmente hidrolisável, enquanto a segunda possui resistência alta e necessita de um pré-tratamento para desorganização do complexo lignocelulósico, aumentando a área superficial, a fim de tornar possível o seu aproveitamento.

Figura 40 - Formação da estrutura da celulose a partir da D-glicose



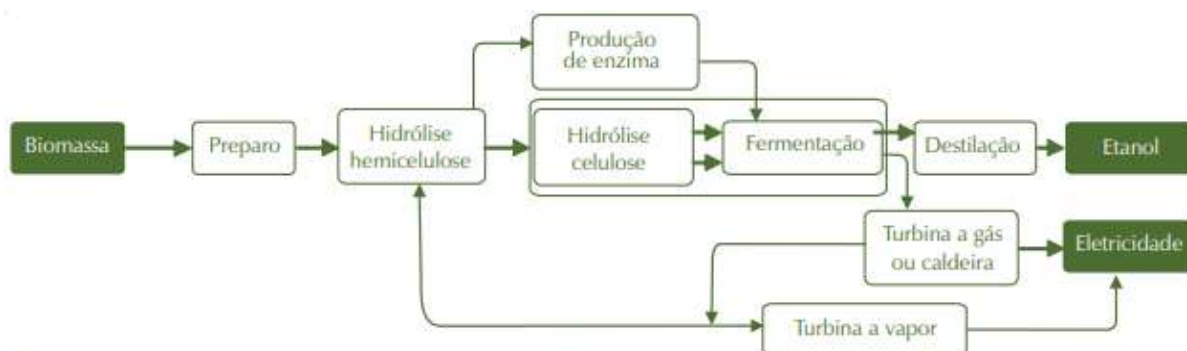
Fonte: Prauchner *et al* (2022)

O composto pode ser convertido integralmente em glicose por ação enzimática, após passar pela etapa de pré-tratamento. A glicose resultante é um monossacarídeo utilizado pela maioria dos microrganismos, sendo possível obter uma imensa variedade de substâncias de interesse comercial, desde combustíveis até polímeros (KNAUF & MONIRUZZAMAN, 2004 *apud* SANTOS, 2012).

4.2.1.2 Produção

A obtenção do etanol a partir dessa fonte envolve a hidrólise dos polissacarídeos da biomassa em açúcares fermentescíveis, seguida de sua fermentação. A hidrólise é realizada para a separação dos açúcares e remoção da lignina (BNDES, 2008). Uma rota simplificada do processo é apresentada na Figura 41.

Figura 41 - Produção de etanol pela hidrólise de biomassa



Fonte: Sebra (2008) *apud* BNDES (2008)

O processo se inicia com a etapa de pré-tratamento da matéria-prima, em que ocorre a quebra do material, destruindo sua estrutura celular e tornando-o mais acessível aos tratamentos químicos ou biológicos posteriores. Ainda nesta fase, ocorre a remoção da lignina e a hidrólise da hemicelulose (BNDES, 2008). As alternativas para o pré-tratamento (químico e físico) seguem abaixo, conforme Mitsuhara (2021):

- i. Pré-tratamento ácido: utiliza-se ácido sulfúrico, ácido clorídrico ou ácido nítrico; possui grande eficácia na transformação da biomassa. O processo ocorre rapidamente e há facilidade de controle operacional da temperatura. As desvantagens são a necessidade de resistência à corrosão e a possível liberação de produtos inibitórios à fermentação;
- ii. Pré-tratamento com solventes orgânicos: utiliza-se etanol, metanol, acetona, etilenoglicol, entre outros. Ocorre a quebra das ligações lignina-lignina e carboidratos-lignina; após a etapa, os solventes devem ser removidos do meio, pois podem inibir a hidrólise enzimática e a fermentação;
- iii. Pré-tratamento alcalino: utilizado em conjunto com o ácido, haja vista que, enquanto este hidrolisa a hemicelulose, aquele remove a lignina por dissolução. Nesta alternativa, acontece a saponificação das ligações intermoleculares entre ambos os componentes;
- iv. Moagem (pré-tratamento físico): processo com alto consumo energético; pode ocorrer em moinho de bolas, pressão e rolo duplo;
- v. Explosão à vapor: consiste no aumento da temperatura por vapor saturado, entre 160°C e 240°C com uma descompressão repentina do reator em seguida. Com isso, o vapor que havia se inserido no material lignocelulósico condensa devido à mudança de temperatura pela redução da pressão; a formação de água dentro das fibras causa a explosão das mesmas.

Dentre as opções, o pré-tratamento ácido mostra-se como uma alternativa interessante, uma vez que desestrutura o complexo e provoca a hidrólise da hemicelulose, resultando em uma fração líquida contendo xilose, para o caso do bagaço de cana (SANTOS, 2012), principalmente quando utilizado em conjunto com a opção alcalina (MITSUHARA, 2021). Outrossim, a explosão à vapor é considerada um método promissor, por aumentar a susceptibilidade à hidrólise (PITARELO *et al.*, 2012 *apud* MITSUHARA, 2021). Um dos entraves do pré-tratamento é a diversificação das possibilidades de matérias-primas utilizadas nas usinas, levando à necessidade de adaptação dos processos para cada tipo de componente (LORENZI & ANDRADE, 2019).

Na hidrólise da celulose, em seguida, é feita a conversão em glicose, podendo ser uma hidrólise ácida ou enzimática, sendo o investimento desta maior devido aos catalisadores utilizados (MITSUHARA, 2021). Para ambos os métodos, a fermentação posterior segue os mesmos princípios da produção com amido ou açúcares (BNDES, 2008). Segundo Soares e Rossell (2007), as atividades de hidrólise podem aproveitar a mesma estrutura do setor sucroalcooleiro para serem realizadas, tendo em vista que as principais matérias primas têm origem neste setor, sendo elas o bagaço da cana e os resíduos da colheita. Além disso, por estarem disponíveis em grande quantidade na proximidade das instalações industriais, há um baixo custo associado e a cana pode ser integralmente aproveitada para a produção do biocombustível.

O bagaço da cana é a fração de biomassa resultante após a limpeza, o preparo e a extração do caldo de cana; apresenta variações em sua composição e na estrutura morfológica, devido aos procedimentos de corte no campo e no processamento industrial, não sendo, assim, uma biomassa homogênea. A Tabela 8 mostra a composição do bagaço; percebe-se as altas frações de pentoses e hexoses, além de 50% consistir em umidade para o bagaço. Os resíduos da colheita, por sua vez, constituem as folhas verdes, as folhas secas e o ponteiro da cana.

Tabela 8 - Composição química do bagaço de cana

Composição Química	%
Glicose	19,50
Xilose	10,50
Arabinose	1,50
Galactose	0,55
Lignina	9,91
Organossolúveis	2,70
Outros (AR) Açúcares Redutores	1,85
Cinzas	1,60
Umidade	50,00
Hexoses Totais	20,04
Pentoses Totais	12,00

Fonte: Soares (2011) *apud* Santos (2012)

O potencial produtivo dos principais resíduos lignocelulósicos encontra-se na Tabela 9. É válido ressaltar a alta conversão de celulose em etanol para a palha de cana, palha de trigo e bagaço de cana, sendo superior a 80%. A palha de cana, composta por folhas secas e copas verdes, constitui cerca de 33% da energia primária da planta, além de apresentar semelhanças ao bagaço, em suas características (AGUIAR *et al*, 2021 *apud* MITSUHARA, 2021).

Tabela 9 - Capacidade produtiva dos principais resíduos lignocelulósicos

Resíduos	Celulose (%)	Conversão de celulose em etanol (%)	Produção residual anual (milhões de toneladas)	Produção de bioetanol (bilhões de litros)
Palha de cana	39	85	208	87,38
Palha de trigo	35	89	6	2,37
Palha de arroz	38	80	3	1,15
Bagaço de cana-de-açúcar	43	89	208	100,88

Fonte: Adaptada de Nunes *et al* (2013) *apud* Aguiar (2017)

A produção em larga escala do etanol de segunda geração ainda está em progresso, uma vez que é necessário encontrar uma maneira eficiente e economicamente viável para a obtenção do álcool; entretanto, o “desmonte” da biomassa lignocelulósica, a fim de promover a liberação

de polissacarídeos, é uma das dificuldades do processo a serem superadas com o crescente investimento na pesquisa (PINTO *et al.*, 2021 *apud* MITSUHARA, 2021).

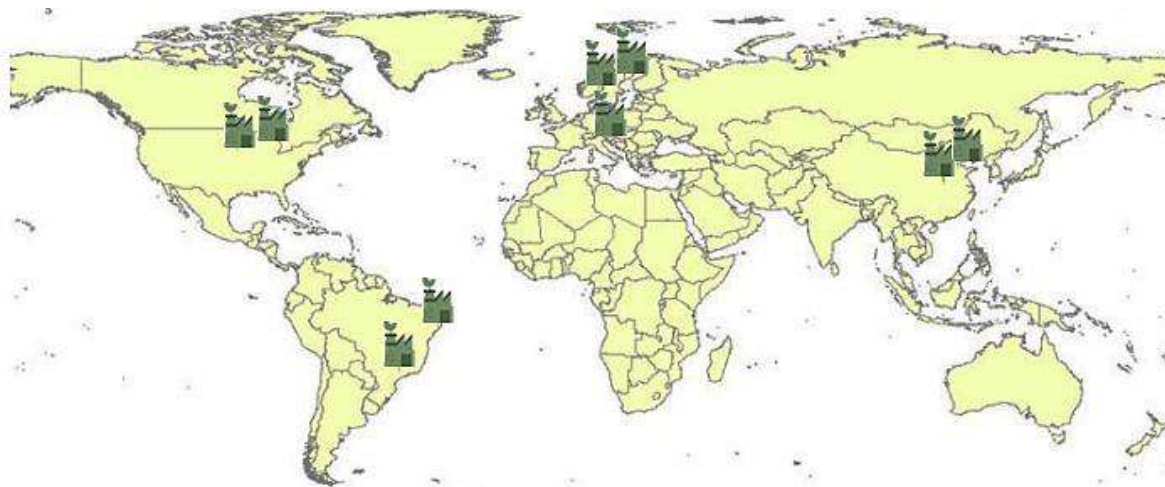
A isso, somam-se outros desafios da implementação desta modalidade de biocombustível. A logística de produção e de transporte das matérias-primas até as usinas deve ser adaptada para os materiais utilizados e os novos processos industriais e o uso das enzimas catalíticas da etapa da hidrólise gera altos custos para as fábricas (EPE, 2021d). A superação dos obstáculos leva a um processo vantajoso ao meio ambiente: ao comparar o etanol comum (de primeira geração) com o etanol lignocelulósico, este reduz em 80% o índice de emissões de gases de efeito estufa; ao comparar com a gasolina, esse índice sobe para 93% (RAÍZEN, 2022).

4.2.1.3 Panorama do etanol de 2ª geração no Brasil

Mundialmente há uma demanda crescente por energia renovável de baixo custo e com minimização de emissões de poluentes; até o momento, o etanol oriundo da cana de açúcar é o único combustível que atende a essa necessidade (MITSUHARA, 2021). Contudo, a produção de etanol de segunda geração (E2G) tem sido uma das inovações tecnológicas mais exploradas nos anos recentes. Este processo gera um produto com a mesma composição química do álcool etílico comum, mas com uma metodologia circular, utilizando matérias-primas renováveis, originadas do processo da cana de açúcar, entre outros resíduos lignocelulósicos. Há, por este motivo, um maior aproveitamento energético da biomassa e o produto tem potencial de tornar-se essencial no desenvolvimento sustentável de energia para uma economia de baixo carbono, “à medida que inclua outros países no mercado internacional, gerando simultaneamente abatimento de CO₂ e inserção econômica para países em desenvolvimento” (EPE, 2021d, p. 1).

Segundo Milanez *et al.* (2015), a produção de etanol de origem lignocelulósica no Brasil pode possibilitar um aumento da produtividade de até 50%, comparada à produção atual. Um dos principais fatores para a viabilização desta linha de manufatura é a matéria-prima, tendo o Brasil grande vantagem, considerando que a cana-de-açúcar possui maior produtividade do que materiais utilizados em outros países, como o milho ou a beterraba (LORENZI & ANDRADE, 2019). Em diversos países, projetos relacionados ao E2G foram interrompidos, haja vista que não obtiveram alcance produtivo comercial de sucesso (EPE, 2021c). As principais plantas para o produto de origem lignocelulósica estão espalhadas pelo mundo no Brasil, nos Estados Unidos, na China e outros países na Europa.

Figura 42 - Principais plantas de etanol de segunda geração no mundo



Fonte: EPE (2021d)

Uma das restrições para a disseminação das plantas de E2G no mundo é a necessidade de acesso a aproximadamente 200.000 toneladas/ano de biomassa na região geográfica, alcançando uma alta escala de produção, de modo a tornar o processo economicamente viável (GRASSO, 2016).

No Brasil, há duas plantas comerciais deste produto: Granbio e Raízen, esta com capacidade de produção nominal de 40 milhões de litros por ano (EPE, 2021c). As projeções consideram uma integração entre a produção convencional de etanol com a produção a partir de material lignocelulósico; faz-se necessária uma avaliação das usinas em relação à disponibilidade da matéria-prima.

Além das duas plantas mencionadas do setor sucroenergético, a rede formada pelas empresas interessadas em etanol lignocelulósico no Brasil é heterogênea e inclui outros diferentes setores, como setor financeiro público (BNDES), laboratórios e universidades públicas, empresas de tecnologia e pesquisa privadas, grupos internacionais e associações representativas (LORENZI & ANDRADE, 2019). Até 2019, ano analisado por Lorenzi e Andrade (2019), as tentativas de produção do produto em questão foram protagonizadas pela GranBio, pela Raízen e pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC); a soma de suas capacidades instaladas era de 125 milhões de litros de E2G por ano (Tabela 10), tornando o Brasil o quarto país do mundo em capacidade instalada de segunda geração, atrás dos Estados Unidos, da China e do Canadá; apesar disso, apenas cerca de 10% desse potencial anual foi produzida, sendo o maior desafio o pré-tratamento.

Tabela 10 - Principais iniciativas de produção de E2G no Brasil

Empresa/Variável	GranBio	Raízen	CTC
Capacidade da planta	82 milhões de litros/ano	40 milhões de litros/ano	3 milhões de litros/ano
Tipo	Comercial	Comercial	Piloto
Local	São Miguel dos Campos (AL)	Piracicaba (SP)	São Manoel (SP)
Custo da planta	R\$ 350 milhões	R\$ 231 milhões	R\$ 80 milhões
Financiamento (BNDES)	R\$1,225 bilhão	R\$ 207 milhões	R\$ 380 milhões
Tecnologia processo	Proesa (Beta Renewables, – italiana)	Iogen (Iogen Corporation, canadense)	Própria (CTC)
Hidrólise (enzimas)	Novozymes (dinamarquesa)	Novozymes (dinamarquesa)	Novozymes (dinamarquesa) e própria
Fermentação (leveduras)	C5 e C6 (DSM, holandesa)	C5 e C6 (Iogen, canadense)	Apenas C6 (própria)
Pré-tratamento	Hidrotérmico (Proesa, API)	Explosão a vapor (Iogen)	Vapor e catalisadores (própria)
Matéria-prima	Bagaço e palha	Bagaço	Bagaço e palha

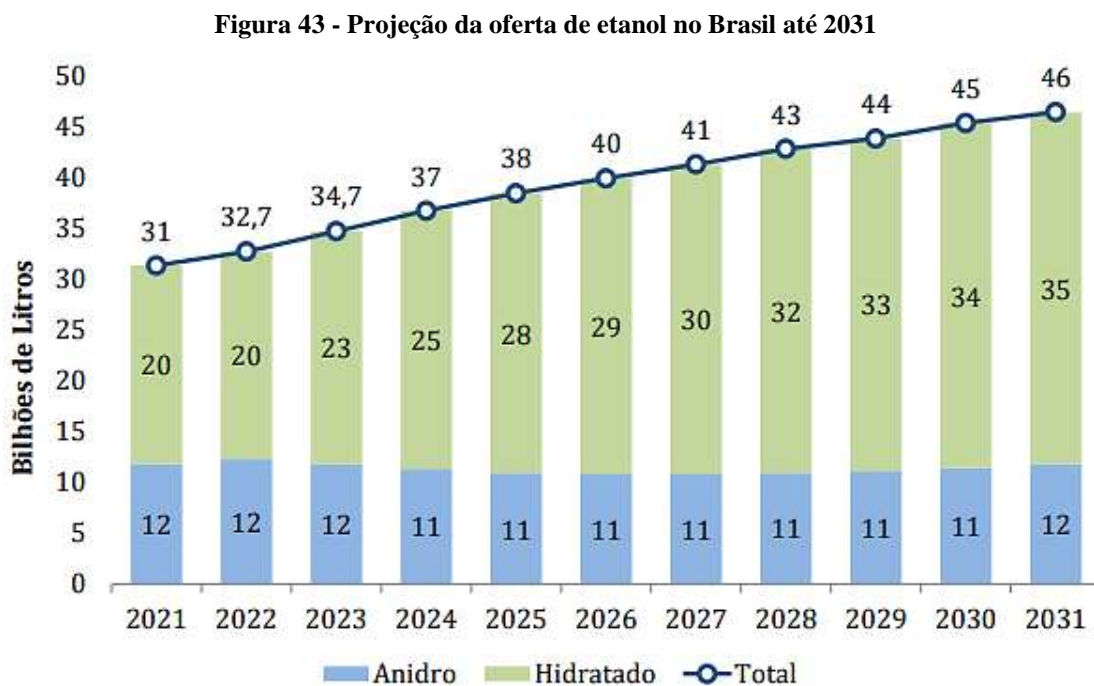
Fonte: Lorenzi & Andrade (2019)

A rede brasileira do E2G possui alguns pontos desafiadores para o avanço das tecnologias relacionadas, como a escassez de iniciativas de produção, o baixo nível de investimento privado, pouca pesquisa e desenvolvimento ou criação de patentes, dependência das empresas estrangeiras para fornecimento de material e tecnologias de produção, além dos problemas de processo, principalmente no pré-tratamento (LORENZI & ANDRADE, 2019).

Apesar dos desafios ainda enfrentados pela indústria, avaliando dados mais recentes, segundo a Raízen (2022), a produção do etanol de segunda geração já ocorre em escala comercial, de forma contínua, e já foram exportados para os Estados Unidos e para a Europa mais de 80 milhões de litros, até o presente ano. Além disso, de acordo com o portal da UDOP (2022), a empresa prevê acelerar o plano de expansão das usinas de E2G com, no mínimo, a implementação de três plantas por ano. O plano é que, até 2030, 20 usinas tenham sido instaladas.

No segundo tópico, foi analisado a produção de etanol (total, hidratado e anidro) no Brasil até 2021, assim como da importação do último pelo país. Agora, tem-se uma projeção da oferta

do biocombustível até o ano de 2031, levando em conta alguns fatores, como o ciclo da cana-de-açúcar, a expansão da capacidade produtiva, o estágio tecnológico do etanol de segunda geração e a produção de etanol de milho (EPE, 2020).

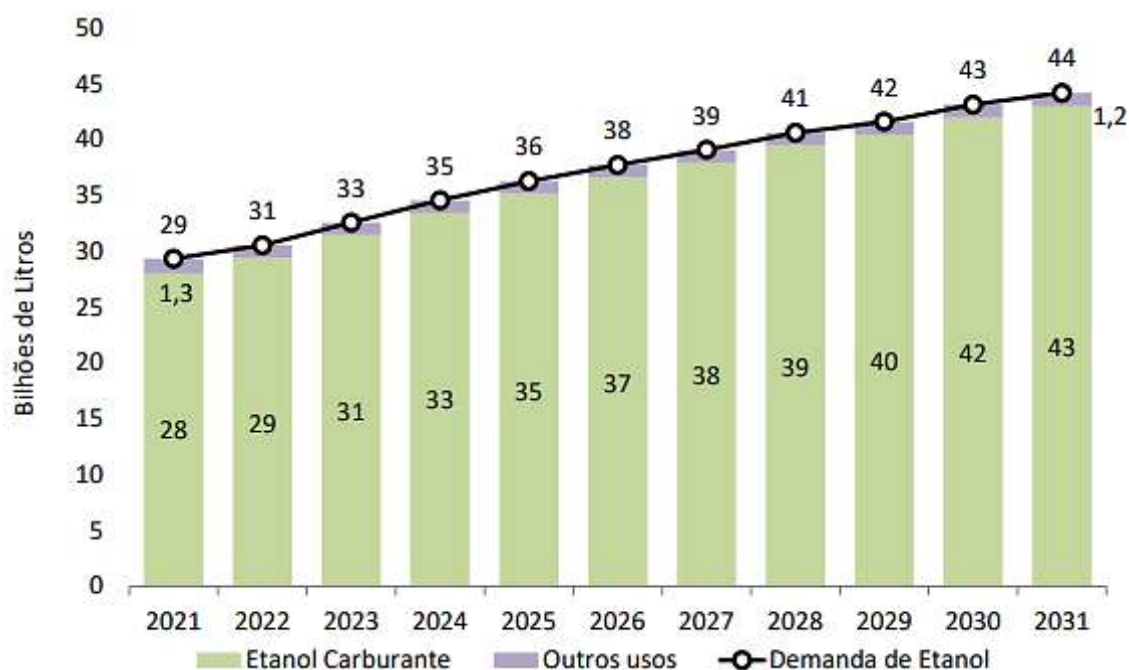


Fonte: EPE (2021c)

Conforme a Figura 43, a taxa anual de crescimento da oferta de etanol será de 4,0%, alcançando 46,4 bilhões de litros no último ano projetado (EPE, 2021c), sendo a taxa de hidratado 5,9% a.a. A produção de E2G possui previsão de utilizar uma pequena parcela de bagaço e palha de cana produzidos, chegando a cerca de 500 milhões de litros em 2031.

Tal como para a oferta de etanol, para a demanda foi realizada uma projeção para os próximos dez anos pela Empresa de Pesquisa Energética (2021c), considerando uma integração da manufatura de etanol lignocelulósico com a convencional. O volume do biocombustível exportado pelo Brasil foi projetado a partir de análises de mercado, considerando a produção nacional e o atendimento ao mercado interno. Desta forma, chegou-se a um aumento de 0,4 bilhão de litros exportados até 2031. O gráfico abaixo, Figura 44, mostra uma tendência de crescimento da demanda total de etanol a uma taxa anual de 4,2%, com uma participação majoritária de etanol carburante. Este eleva sua contribuição na demanda de combustíveis do ciclo Otto de 44% em 2021 para 55% em 2031, favorecendo a diminuição das emissões do setor de transportes rodoviário.

Figura 44 - Projeção da demanda de etanol total até 2031



Fonte: EPE (2021c)

Infere-se que, na próxima década, as melhorias dos fatores de produção e resultados positivos do programa *RenovaBio* trarão maior competitividade do etanol hidratado frente à gasolina, e, para o biocombustível, está previsto um aumento de 15% no *Market share* em veículos *flex fuel* (de 33% para 48% em 2031). A utilização de etanol não carburante encontrar-se-á em 1,2 bilhão de litro ao final da projeção (EPE, 2021c).

Foram estimados em conjunto os investimentos em novas usinas produtoras do etanol de segunda geração, baseando-se nos valores das unidades comerciais operantes (cerca de R\$ 5,6/litro). Chegou-se a um total de R\$ 2,1 bilhões entre o ano atual deste trabalho e 2031, podendo alcançar valores menores devido à curva de aprendizagem do setor (EPE, 2021c).

4.2.1.4 Panorama do etanol de 2ª geração na Argentina

Após a implementação da lei de biocombustíveis na Argentina, a incorporação de etanol à gasolina tornou-se uma realidade no país. A capacidade produtiva das refinarias instaladas no território para gerar etanol a partir de cana de açúcar e milho reduziu o consumo de gasolina do país em cerca de 20% (GRASSO, 2016). Ainda segundo Grasso (2016), para o Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária (INTA), a obtenção de energia através do uso de biomassa lignocelulósica por meio de tecnologia de segunda geração é essencial para a aceitação pública dos biocombustíveis, uma vez que o uso da biomassa que faz parte da cadeia alimentícia (exemplo do milho) pode gerar competitividade e incertezas.

Dessa forma, o projeto BabetReal-5 foi criado visando o desenvolvimento de uma solução alternativa para produzir biocombustíveis de segunda geração a partir da biomassa lignocelulósica, sem competir com a indústria alimentícia em termos de matérias-primas e recursos naturais. O projeto envolveu diversos países ao redor do mundo, incluindo a Argentina, e possuiu os objetivos de estudar o processo tecnológico, levantar recursos adequados e analisar os impactos socioeconômicos e ambientais da instalação desse tipo de usina (GRASSO, 2016).

O projeto foi encerrado em janeiro de 2020, quando foram apresentados os resultados alcançados para diferentes tipos de biomassa testados em plantas piloto, para investigações de parâmetros de processo adequados e conceitos tecnológicos adequados para uma planta com capacidade anual de 30.000 toneladas. Ao final do projeto, a tecnologia estudada foi implementada na França, país também participante nas análises (BABETREAL-5, 2020). Não foram encontrados resultados de plantas instaladas na Argentina. Infere-se, a partir de análise por Permingeat (2017), que o país enfrenta barreiras ainda não superadas, relacionadas a fatores como: necessidade de pré-tratamento com alto custo energético, grande diversidade de composição de biomassa e capacidade de fermentação desta em microrganismos naturais.

Foi estudada a espécie de gramínea *Spartina argentinensis* para o cultivo da biomassa, possuindo um potencial de rendimento de 3.900 L etanol/ha (equivalente para o milho seria de 3.700 L/ha), além de ser uma pastagem não utilizada para cultivo de alimentos, não acarretando competitividade (PERMINGEAT, 2017). Pesquisadores do Instituto de Biotecnologia do INTA estudam formas de melhorar o processo biológico de enzimas degradar a lignina, obtendo maior eficiência no rendimento do bioetanol. Considera-se uma vantagem que a Argentina tenha grande quantidade de biomassa disponível e um preço de colheita acessível, diferentemente de outros países (ARGENTINA, 2019).

Um estudo realizado por Ascurra, Manosalva e Morris (2019) avaliou a colheita de milho entre 2004 e 2015, tendo uma produção de cerca de 255 milhões de toneladas distribuídas nas províncias de Córdoba, Buenos Aires, Santa Fé e Entre Ríos; no período, houve um aumento de produção de 126%. Os valores analisados de hectares plantados, produção e produtividade comprovam que o país possui matéria-prima suficiente para o aproveitamento do material lignocelulósico para gerar etanol. Estima-se, a partir de literatura estudada pelos autores, que até 50% dos resíduos da colheita de milho podem ser removidos do solo para outras aplicações, sem prejudicar o mesmo em termos de balanço de nutrientes para a manutenção da fertilidade, quantidade de água e conteúdo de carbono, entre outros fatores essenciais para a condição do local de plantio.

A Argentina encontra-se ainda em fase de pesquisas e estudos de viabilização desta mais recente modalidade de produção de etanol. Deste modo, por não existir até o momento uma planta piloto de manufatura de etanol lignocelulósico, não é possível estimar dados de custos produtivos (ASCURRA & MANOSALVA & MORRIS, 2019). Apesar disso, sendo um país com recursos naturais abundantes, terras ricas para produção agrícola, mão de obra qualificada e muito potencial de inovação, pode-se considerar um planejamento sustentável de longo prazo para a obtenção do E2G.

No Paraguai, a partir de 2005, com o início do incentivo da legislação à produção de biocombustíveis, o cultivo da cana de açúcar cresceu consideravelmente. Atualmente, no entanto, não há oferta de biomassa sustentável para atender às demandas energéticas dos setores industriais, não sendo possível encontrar dados relacionados ao E2G no país.

4.2.2 Biogás

O biogás é o nome utilizado para a mistura inflamável de gases que são gerados quando a matéria orgânica sofre decomposição anaeróbica. É composto de 55-70% de metano (CH_4) e 30-45% de dióxido de carbono (CO_2), podendo ainda apresentar pequenas quantidades de ácido sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3), traços de hidrogênio, nitrogênio, monóxido de carbono (CO), carboidratos e oxigênio (DEUBLEIN & STEINNHAUSER, 2008 *apud* ARAÚJO, 2017).

O potencial energético do biogás relaciona-se diretamente com a quantidade de metano presente na mistura. Quanto maior for o teor de metano, mais puro é o gás e maior é o seu poder calorífico. O processo de biodigestão, além de reduzir o potencial poluente das emissões dos resíduos orgânicos com alto teor de demanda bioquímica de oxigênio, produz metano e gera como subproduto adubo orgânico (MAFACIOLLI, 2012 *apud* SALOMON, 2009). A Tabela 11 apresenta a equivalência entre o biogás e outros combustíveis de uso mais comum.

Tabela 11 - Equivalência entre o biogás e outros combustíveis

Combustível	Quantidade equivalente a 1 m ³ de biogás
Querosene	0,342 L
Lenha	1,450 kg
Gás Liquefeito de Petróleo	0,396 L
Óleo diesel	0,358 L
Gasolina	0,312 L

Fonte: Souza *et al* (1981)

Conforme Deublein e Steinhauser (2008), existem alguns fatores que podem ser utilizados para manipular a composição do biogás, principalmente a concentração de metano e dióxido de carbono:

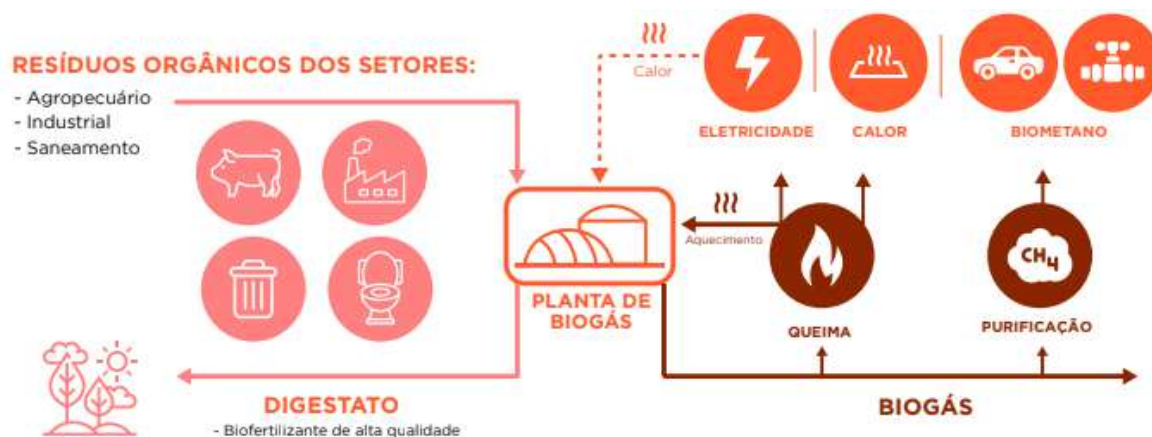
- Adição de hidrocarbonetos de cadeia longa, ricos em gordura, pode melhorar a qualidade do biogás. A quantidade adicionada deve evitar acidificar o processo;
- Normalmente, a digestão anaeróbica da biomassa melhora com o passar do tempo de exposição; porém, o teor de metano aumenta desproporcionalmente, principalmente assim que se inicia o processo de hidrólise;
- O material do biodigestor deve ser uniforme e homogêneo para que o processo de fermentação ocorra mais rapidamente;
- Ao aumentar a temperatura do processo de fermentação, menor será a concentração de dióxido de carbono dissolvido em água.

4.2.2.1 Matéria-prima

A biomassa utilizada no processo pode ser oriunda de vários setores, dentre eles, agricultura (resíduos da limpeza de grãos), pecuária (dejetos de animais), resíduos sólidos urbanos (restos de alimentos) e lodo do tratamento de esgoto. A decomposição da biomassa sob a ação de bactérias metagênicas produz o biogás sob condições específicas de temperatura, pH, relação C/N, presença ou ausência de oxigênio, nível de umidade e quantidade de bactérias por volume de biomassa (ARAÚJO, 2017).

A Figura 45 apresenta como é a estrutura de uma planta de biogás, desde suas possíveis matérias-primas até o destino final.

Figura 45 - Estrutura da planta de biogás



Fonte: CIBiogás (2021)

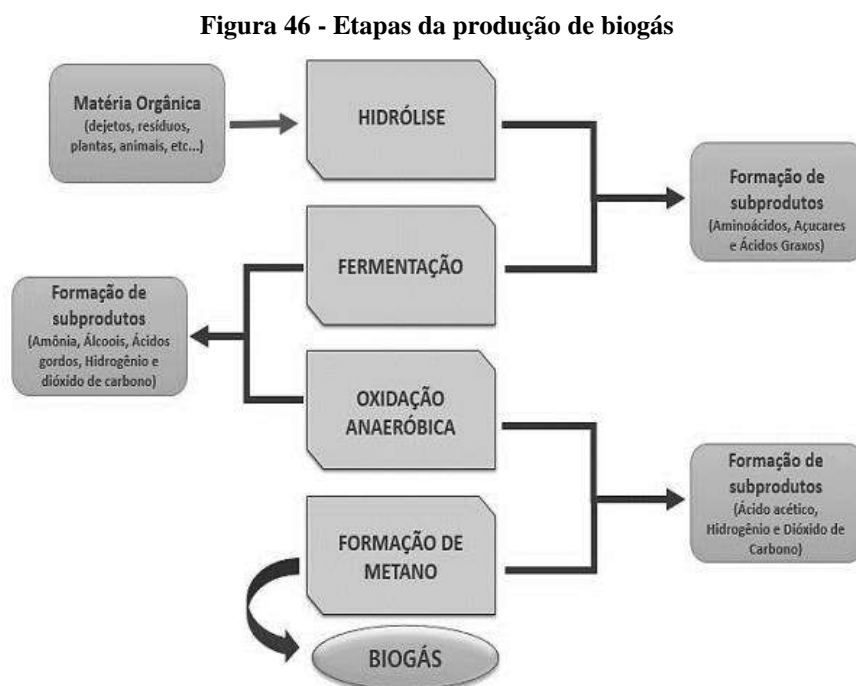
Estuda-se, também, a utilização da vinhaça no processo produtivo do biogás. Conforme Christofolletti *et al.* (2013), a produção de um litro de etanol gera de 10 a 15 litros de vinhaça. O problema deste resíduo, além do volume gerado que inviabiliza seu transporte por bombas, é o alto potencial de poluição associado ao seu transporte através de canais abertos escavados.

A vinhaça é geralmente utilizada em sua forma *in natura* para fertirrigação no Brasil, o que leva a uma redução no uso de água doce e de fertilizante mineral. Entretanto, a aplicação direta ao solo pode ser um problema devido ao baixo pH e altas concentrações de sulfato e matéria orgânica, que podem afetar não somente o solo, como também os corpos hídricos próximos à região de aplicação (FUESS *et al.*, 2014).

Nos últimos anos, os resíduos da produção de etanol e açúcar, vinhaça concentrada e a torta de filtro, ganharam uma aplicação mais nobre e estão sendo utilizados como biomassa para a produção de biogás.

4.2.2.2 Produção

O processo de produção ocorre em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. É indispensável que as reações químicas ocorram de forma sinérgica; logo, as fases 1-2 e 3-4 são organizadas em dois estágios e as taxas de degradação devem ser iguais (DEUBLEIN & STEINNHAUSER, 2008 *apud* ARAÚJO, 2017). A Figura 46 apresenta o esquemático dos processos bioquímicos envolvidos na produção do biogás.



Na primeira etapa de degradação anaeróbica, ocorre a hidrólise dos compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e gorduras) em monômeros básicos como aminoácidos, ácidos graxos e açúcares, através de enzimas hidrolíticas. O tipo de hidrólise varia em função da biomassa utilizada. Para a formação de açúcares ocorre a hidrólise de glicosídeos e para a produção de aminoácidos, ocorre a hidrólise das proteínas. Após a quebra das ligações moleculares, inicia-se a segunda etapa que corresponde ao processo de biodigestão (ARAÚJO, 2017).

A acidogênese equivale ao processo de oxidação dos compostos de cadeia menor por bactérias anaeróbicas obrigatórias e facultativas, dando origem à ácidos orgânicos, como o ácido propanóico, ácido butanóico, ácido láctico, a álcoois, hidrogênio e gás carbônico. A formação desses produtos depende da quantidade de hidrogênio presente na mistura. Se a concentração deste for muito alta, a eficiência dessa etapa será afetada, e conseqüentemente, haverá acúmulo de ácidos orgânicos. Dessa forma, o pH da mistura é reduzido e todo o processo é afetado (ARAÚJO, 2017).

A terceira fase do processo envolve a transformação dos ácidos orgânicos formados anteriormente em acetato, hidrogênio e gás carbônico, por ação de bactérias acetogênicas. É necessário manter o equilíbrio entre a quantidade de hidrogênio produzido e consumido pelas bactérias responsáveis pela etapa de metanogênese (ARAÚJO, 2017). Por fim, as arqueas metanogênicas (bactérias estritamente anaeróbias obrigatórias) convertem o acetato e hidrogênio em gás metano e dióxido de carbono. É uma fase lenta, que determina as taxas de conversão do processo. Os ácidos, álcoois e compostos de nitrogênio orgânico que não foram degradados acumulam-se no biodigestor, desequilibrando o sistema (MAFACIOLLI, 2012).

As archeas dividem-se em dois grupos: os microrganismos acetoclásticos, que consomem o ácido acético e metanol para a produção de biogás (metano e gás carbônico); e os hidrogenotróficos, que utilizam o hidrogênio e dióxido de carbono. As reações abaixo representam, respectivamente, a ação de cada tipo de bactéria (ARAÚJO, 2017).



As bactérias metanogênicas sobrevivem em pH de 6,5 a 8; dessa forma, enquanto as bactérias das fases iniciais da fermentação são responsáveis por produzir ácidos, as

metanogênicas devem consumir esses ácidos e manter o sistema neutro (CASSINI, 2003 *apud* MAFACIOLLI, 2012).

Em relação à vinhaça, segundo a projeção divulgada pela EPE (2021), o potencial de biogás brasileiro alcança 7,1 bilhões de Nm³ em 2031, equivalente a 3,8 bilhões de Nm³ de biometano, com a destinação de toda vinhaça e torta de filtro. De acordo com Pompermayer e Paula (2000), o biogás produzido a partir da vinhaça apresenta uma proporção em volume de CH₄ de 55 a 65%, o restante sendo constituído principalmente por dióxido de carbono.

A biodigestão da vinhaça *in natura* modifica suas propriedades físico-químicas e observa-se os seguintes efeitos, conforme apresentado na Tabela 12:

- Elevação do pH até atingir pH neutro;
- Diminuição substancial da DBO e DBQ;
- Aumento de nitrogênio amoniacal;
- Não há variação da quantidade de potássio.

Tabela 12 - Características físico-químicas da vinhaça biodigerida - Usina São Martinho

Parâmetro	Vinhaça (antes da biodigestão)	Vinhaça (depois da biodigestão)
pH	4,0	6,9
DQO (mg/L)	29.000	9.000
Nitrogênio total (mg/L)	550	600
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	40	220
Fósforo P ₂ O ₅ (mg/L)	17	32
Sulfato (mg/L)	450	32
Potássio K ₂ O	1400	1400

Fonte: Cortez *et al* (1998)

Um desafio para a utilização do biogás é controlar a composição do mesmo, devido à matéria orgânica utilizada tanto na produção, quanto no tratamento anaeróbio. Após sua produção, é necessário que o biogás bruto passe por um processo de purificação para remover componentes como vapor de água, H₂S, amônia, siloxanos e particulados, visto que quando o vapor d'água se combina com o sulfeto de hidrogênio, é produzido o ácido sulfúrico. Além de o sulfeto ser tóxico, o ácido pode deteriorar os equipamentos usados no processamento do biogás (GARLET, 2022).

4.2.2.3 Panorama do biogás no Brasil

Segundo a Associação Brasileira do Biogás (ABiogás), é estimado que R\$ 60 bilhões de reais sejam investidos para a construção de novas usinas até 2030; com isso, a produção nacional passaria dos atuais quatro milhões de metros cúbicos diários – dos quais 10% são do derivado biometano – para trinta milhões.

Segundo dados divulgados pela CIBiogás, houve um aumento de 16% no número de plantas em operação e 10% no volume de biogás produzido em 2021, em comparação com o ano anterior. A Figura 47 demonstra o crescimento do setor nos últimos cinco anos.

Figura 47 - Crescimento do setor de biogás nos últimos cinco anos (Plantas em operação)



Fonte: CIBiogás (2021)

Em 2021, o Brasil apresentou 811 plantas de biogás, das quais apenas 755 encontram-se em operação, e em relação a 2020, houve o surgimento de 102 novas plantas e com isso a capacidade produtiva do país foi de 2,3 bilhões Nm³/ano. Do restante das plantas, 44 encontram-se em fase de implantação e doze estão passando por reformulação ou reforma, conforme apresentado na Figura 48 (CIBiogás, 2021).

Figura 48 - Distribuição do número total de plantas de biogás levantadas em 2021, quanto ao status operacional



Fonte: CIBiogás (2021)

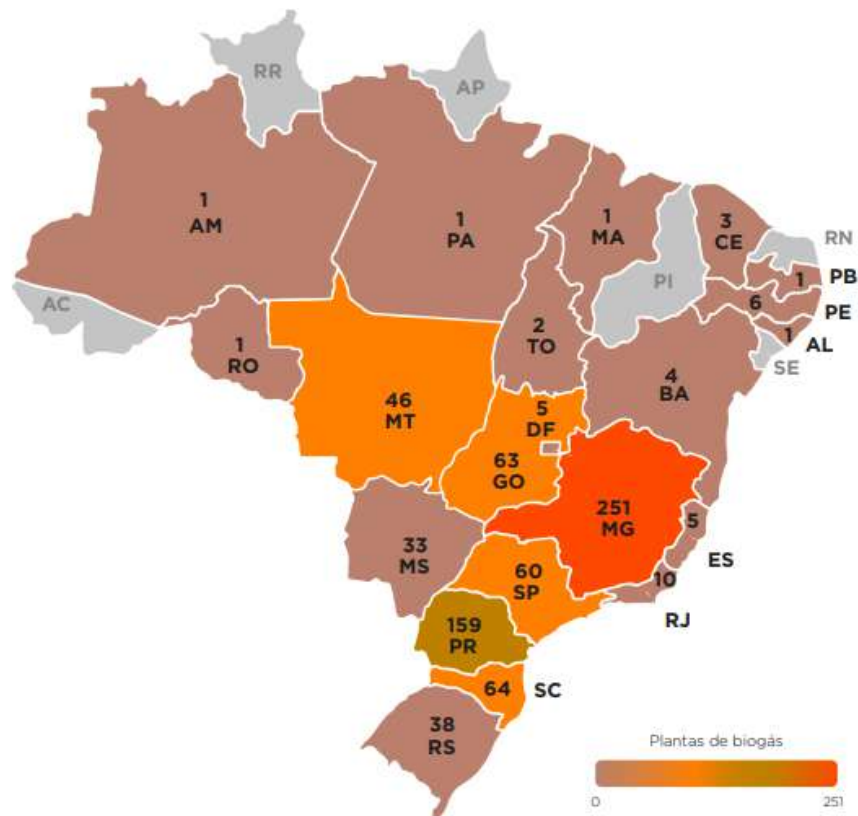
A expectativa para 2022 é que o setor de biogás apresente um crescimento de mais de 22% com a entrada em operação das 56 plantas que estavam em fase de implantação ou em reforma. Espera-se, portanto, alcançar uma capacidade produtiva anual de 2,8 bilhões de Nm³/ano (CIBiogás, 2021).

A Raízen possui planos de construir em todas as suas 35 usinas sucroenergéticas, unidades de produção de biogás no período de dez anos. A expectativa é de que as plantas da companhia sejam capazes de produzir três milhões de metros cúbicos diários de biogás, utilizando resíduos da cana, como a vinhaça e a torta de filtro (NOVACANA, 2022).

O avanço do biogás e do biometano tem ocorrido de forma exponencial, com crescimento de 30% ao ano em volume de produção e, segundo Alessandro Gardemann, CEO da Geo Biogás & Tech, deve aumentar mais com o Programa Metano Zero, lançado pelo governo federal em março de 2022. Essa iniciativa inclui linhas de crédito e desoneração tributária para projetos no setor e possui o objetivo de reduzir as emissões de carbono com foco no aproveitamento dos resíduos urbanos e orgânicos para a produção (EMPRESAS, 2022).

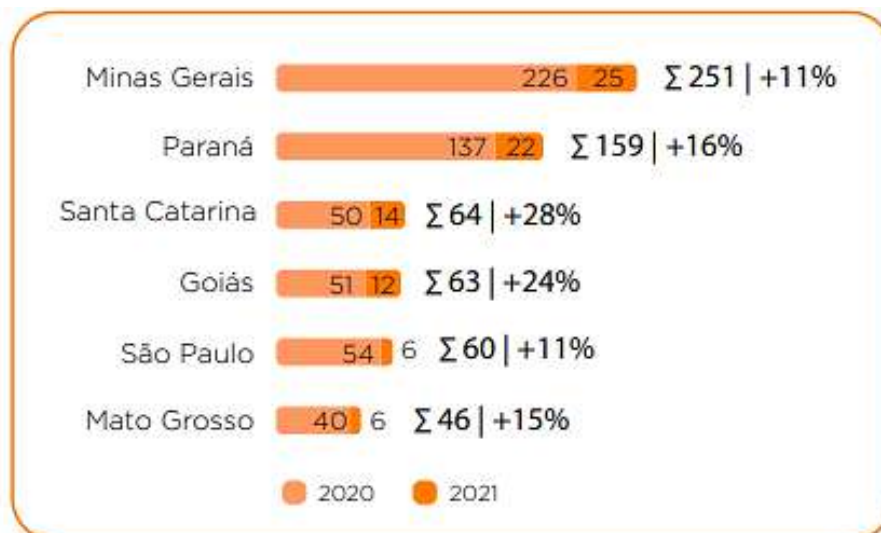
Segundo dados da CIBiogás (2021), no Brasil a produção de biogás ocorre principalmente nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, com destaque para Minas Gerais que concentra o maior número de plantas deste produto. A Figura 49 exhibe a distribuição das instalações produtoras do biocombustível no país, com o gráfico em seguida (Figura 50) explicitando o crescimento da capacidade produtiva dos principais estados.

Figura 49 - Instalações produtoras de biogás no Brasil



Fonte: CIBiogás (2021)

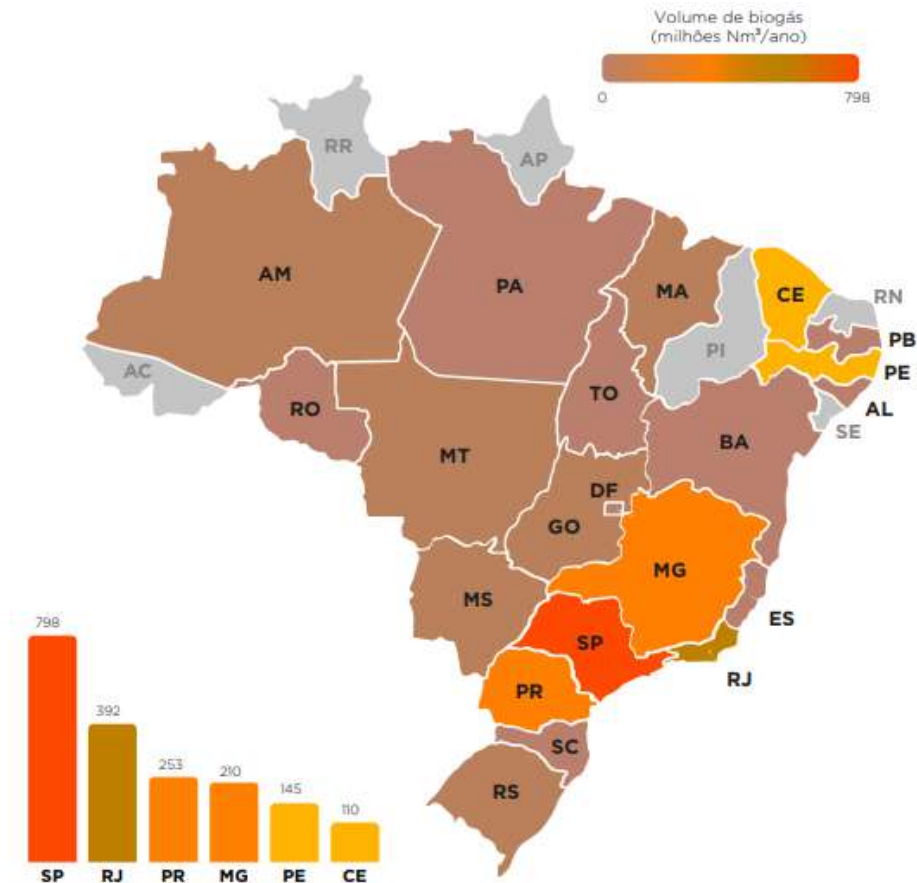
Figura 50 - Crescimento do número de plantas de biogás, em operação, com aproveitamento energético, por estado



Fonte: CIBiogás (2021)

Em termos de volume de biogás e sua equivalência energética, os seis estados com maior produção são São Paulo, Rio de Janeiro, Paraná, Minas Gerais, Pernambuco e Ceará, conforme demonstrado na Figura 51.

Figura 51 - Volume de biogás por estado no país



Fonte: CIBiogás (2021)

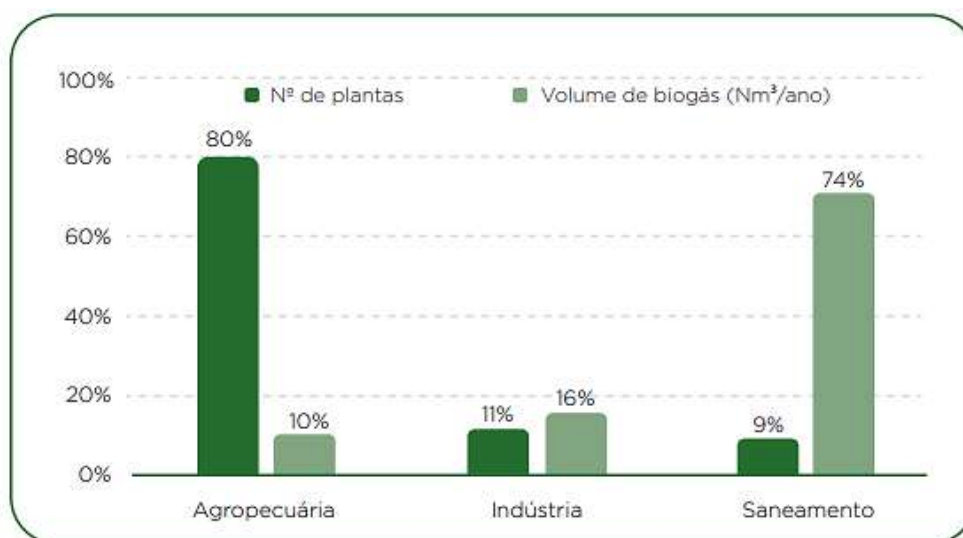
Os substratos utilizados para a produção do biocombustível no país são separados em três categorias de acordo com sua fonte: agropecuária, indústria ou saneamento, conforme explicitado na Tabela 13. A Figura 52 apresenta a proporção entre número de plantas de biogás e volume, por fonte de substrato.

Tabela 13 - Fontes de substratos para a produção de biogás utilizadas no Brasil

FONTE	DESCRIÇÃO	SUBSTRATO
Agropecuária	Envolve atividades de criação animal (aves, bovinos, caprinos, suínos, entre outros)	Esterco animal, efluente proveniente do manejo dos dejetos (urina, fezes, água de lavagem etc.), restos de ração, carcaça de animais mortos não abatidos, entre outros
Indústria (agroindústrias)	Contempla abatedouros e frigoríficos, usinas de açúcar e etanol, fecularias e amidonarias, cervejarias, indústrias de óleo vegetal, gelatina, entre outras	Efluente industrial e demais resíduos orgânicos provenientes do processo industrial
Saneamento	Contempla os aterros sanitários (RSU), as usinas de tratamento de resíduos orgânicos e as estações de tratamento de esgoto (ETE)	Resíduos sólidos urbanos (RSU) depositado em aterro sanitário, RSU segregado na fonte (fração orgânica), resíduo de frutas e vegetais (CEASA), restos alimentares (restaurantes, supermercado), esgoto sanitário

Fonte: Elaboração própria com dados de CIBiogás (2021)

Figura 52 - Proporção entre número de plantas de biogás e volume, por fonte de substrato



Fonte: CIBiogás (2021)

Em 2021, o setor agropecuário foi responsável por 80% das plantas em operação no país. Já em relação a capacidade produtiva, o setor de saneamento se destaca representando 74% do volume total produzido.

4.2.2.4 Panorama do biogás na Argentina

A Argentina destaca-se por ter um sólido setor agropecuário, agroindustrial e pela sua produção de grãos, carnes, laticínios e alimentos. Estas atividades geram uma grande quantidade e variedade de resíduos e subprodutos. Nesse sentido, a Argentina apresenta-se como um país de grande potencial para a produção de biogás e seu consequente aproveitamento elétrico e térmico (CIBIOGAS, 2017).

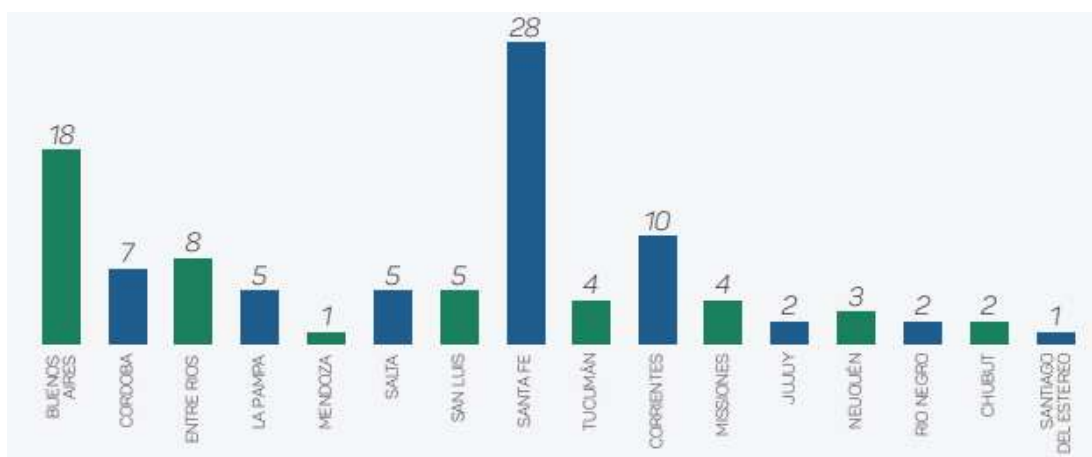
O uso do biogás na Argentina cresceu muito desde 2015, juntamente com a pesquisa e geração de conhecimento. Infelizmente, devido às dificuldades de financiamento que atravessou a Argentina desde 2019, esse crescimento estagnou, segundo Jorge Hilbert, assessor internacional do Instituto Nacional de Tecnologia Agrícola da Argentina (INTA), em entrevista à Inter Press Service (IPS, 2021).

O projeto Global Digital Biogas Cooperation na Argentina, coordenado por Hilbert, é uma iniciativa financiada pela União Europeia, que tem interesse em exportar sua tecnologia de produção do biogás para países emergentes como Etiópia, Gana, Indonésia, África do Sul, além da Argentina. Em 2020, foi feito um estudo para analisar as condições de mercado do país que apontou a existência de 100 usinas de biogás em operação e que o potencial é derivado majoritariamente da produção de suínos e bovinos e da indústria de laticínios (IPS, 2021).

O setor de biogás recebeu um impulso em 2015 devido à aprovação da Lei de Promoção de Energias Renováveis e ao programa do governo RenovAr, no qual o estado garante a compra da energia elétrica gerada por fontes não fósseis. Com a ajuda desse programa, 36 grandes usinas de biogás foram construídas ou estão em construção no país (IPS, 2021).

Conforme demonstrado na Figura 53, um estudo realizado, em 2016, pelo Instituto Nacional de Tecnologia Industrial (INTI/FAO) indicou as plantas de biodigestão existentes, de diferentes tamanhos, grau de tecnologia, usos e aplicações em território argentino.

Figura 53 - Distribuição de plantas de digestão anaeróbica por províncias na Argentina em 2016



Fonte: INTI (2016) *apud* CIBiogás (2017)

Dentro do espaço amostral avaliado, os substratos mais utilizados para a alimentação dos biodigestores dividiam-se em quatro grupos de resíduos: agrícolas, da atividade pecuária, industriais e urbanos, conforme apresentado na Tabela 14 (CIBIOGÁS, 2017).

Tabela 14 - Substratos mais utilizados na Argentina

Categoria de Substrato	Quantidade de Plantas	
Biomassa Virgem	1	1%
Resíduo Urbano	17	28%
Resíduo da Indústria	24	38%
Resíduo da Pecuária	16	27%
Resíduo da Agricultura	4	6%
TOTAL	62	100%

Fonte: Elaboração própria com dados de CIBiogás (2017)

Ainda segundo este estudo, a maior proporção das plantas é destinada ao tratamento de resíduos, em oposição aos 4% das usinas de biogás que são implementadas para cobrir uma demanda energética conforme demonstrado na Tabela 15 (CIBIOGÁS, 2017).

Tabela 15 - Objetivo das plantas de biogás na Argentina em 2016

Objetivo da Planta	Participação
Educativo	28%
Necessidade Energética	4%
Outro	12%
Pressão Pública	4%
Tratamento de Resíduos	52%

Fonte: Elaboração própria com base nos dados INTI (2016) *apud* CIBiogás (2017)

4.2.2.5 Panorama do biogás no Paraguai

Traçaram-se diversos projetos de implantação do uso de biodigestores para obtenção de biogás no Paraguai; porém, por motivos pouco claros, ou pela inexistência de incentivos ou entendimento sobre os benefícios obtidos com esse processo, até 2017, não havia biodigestores em operação (CIBIOGÁS, 2017).

O biogás como fonte de bioenergia, ainda é pouco desenvolvido no país devido, principalmente, ao excesso de energia proveniente das hidroelétricas. No entanto, utiliza-se comumente o gás liquefeito do petróleo (GLP), que é importado. É importante ressaltar que existem pesquisas em andamento para determinar qual a tecnologia adequada para o uso do

biogás a partir de diferentes fontes. A base da economia do Paraguai é a agropecuária; existe, dessa forma, a disponibilidade de grande quantidade de resíduos do setor agrícola e pecuário (CIBIOGÁS, 2017).

Alguns empreendimentos como Granja San Bernardo, o Frigorífico Bertin S.A. aliados a ANDE e Itaipu Binacional desenvolveram projetos para a produção de energia elétrica a partir do biogás, mas não estão operando na atualidade.

A empresa Bertín S.A. possui capacidade de 640 m³/dia de biogás. O combustível gerado era composto por 80% de metano, que se utilizou em um motor-gerador para fornecer energia elétrica a diversas indústrias. Foi firmado um acordo entre o frigorífico, a administração nacional de eletricidade (ANDE) e a ITAIPU para que o primeiro produzisse energia que seria injetada na rede do sistema elétrico, especificamente no horário de pico, mas, para isso, a produção deveria ser de 900 kW/h/dia. A geração, contudo, não ocorreu como esperado (CIBIOGÁS, 2017).

Já a granja San Bernardo, localizada no Alto Paraná, produz 1000 m³/dia de biogás, o que pode gerar 250 kW durante 14 horas/dia, resultando no fornecimento de energia elétrica para a própria fábrica. Na atualidade, o biogás produzido é liberado na atmosfera (CIBIOGÁS, 2017).

4.2.3 Biometano

4.2.3.1 Produção

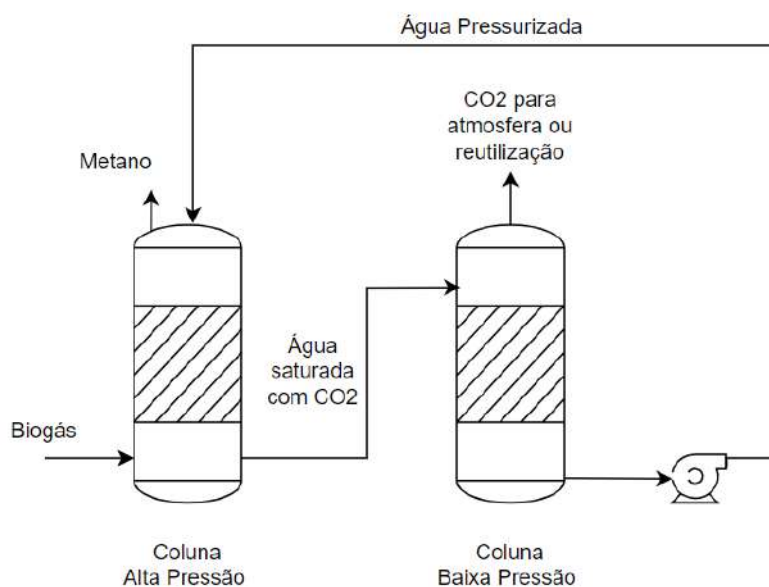
O biometano é obtido a partir do processo de purificação do biogás. Dessa forma, a produção desse biocombustível está atrelada a uma planta de biogás. O processo de conversão consiste na separação das moléculas de metano e do dióxido de carbono. Essa transformação depende de 90 a 95% da purificação do biogás, por isso, a importância de políticas públicas e iniciativas privadas que impulsionem o investimento de novas plantas, com obtenção de equipamentos e desenvolvimento tecnológico que permita o uso do biometano (CIBIOGÁS, 2020).

Segundo Rafael González, diretor presidente do CIBiogás, existem alguns processos de purificação do biogás para obtenção do biometano: (i) *Water Scrubbing* (lavagem de gases); (ii) Refino por *pressure swing adsorption* (PSA); e (iii) Refino por membranas.

A lavagem de gases ocorre em um conjunto de colunas mantidas a uma determinada pressão para a lavagem inversa do gás. Dessa forma, o biogás em alta pressão em contato com a água, geralmente gelada, no sentido de contracorrente faz com que a molécula de metano

consiga passar pela coluna de água e as moléculas de CO_2 e H_2S , sejam absorvidas pela água e posteriormente, após um processo de despressurização, liberadas para a atmosfera ou reaproveitadas (CIBIOGÁS, 2020). O processo está representado na Figura 54.

Figura 54 - Water Scrubbing do Biogás



Fonte: Elaboração própria com dados de CIBiogás (2020)

Já o processo de refino por *pressure swing* ocorre em um conjunto de colunas que permite a separação dos componentes do biogás através da utilização de elementos filtrantes que ajudam na adsorção das moléculas de CO_2 e H_2S , permitindo que o metano permeie por dentro do filtro molecular. Nesse processo, utiliza-se filtros de carvão ativado, sílica gel, alumina ativada, entre outros.

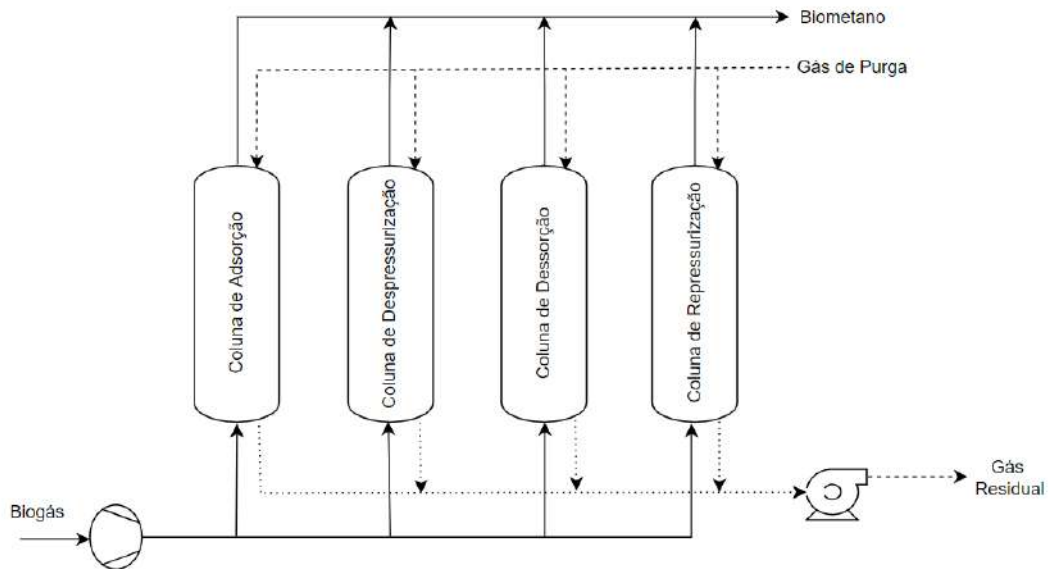
O conjunto de colunas funcionam em paralelo e sob pressão. A etapa principal do processo consiste em um meio adsorvente que separa as moléculas de gás com base no peso molecular e tamanho. Existe uma etapa de pré-secagem do gás antes da coluna de adsorção, que trabalha a aproximadamente 5°C , e é necessária para manter a umidade fora dos vasos a fim de maximizar seu desempenho como adsorvedores secos (GREENE, 2018).

O dióxido de carbono é preferencialmente adsorvido por ser uma molécula menor que o metano, o que permite a penetração nos poros do meio filtrante com mais facilidade e profundidade. Dessa forma, a molécula de metano passa pelas colunas relativamente intocada, enquanto o CO_2 fica retido. Por se tratar de um processo reversível, esse gás capturado é eliminado durante o ciclo de regeneração. Quando o recipiente atinge a saturação com gás

contaminante, ele é regenerado reduzindo a pressão. Em pressões mais baixas, os compostos são removidos e desorvidos do meio em um fluxo de gás chamado de gás residual. Este resíduo é um gás de baixa qualidade que contém CO_2 , H_2S e traços de metano que foram previamente adsorvidos (GREENE, 2018).

Um ciclo, que corresponde ao início do processo até a saturação, demora de 2 a 4 minutos. Cada vaso alterna seu modo de operação entre serviço, despressurização, dessorção e por fim, repressurização antes de voltar para o modo serviço. O conjunto pode ter de quatro a dez vasos adsorvedores para otimizar o desempenho e a economia do sistema (GREENE, 2018). A Figura 55 representa um fluxograma do processo PSA.

Figura 55 - Fluxograma do Pressure Swing Adsorption

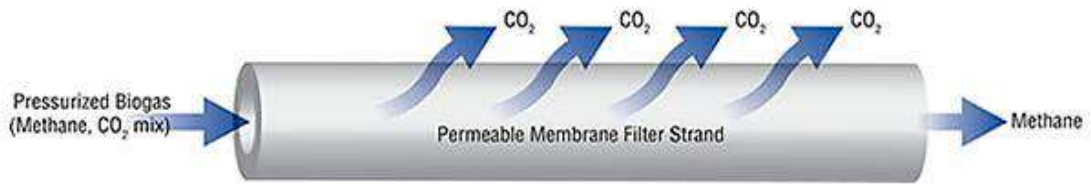


Fonte: Elaboração própria com dados de Greene (2018)

O refino por membranas é um processo de purificação de alta tecnologia muito utilizada na Europa e nos Estados Unidos. O princípio de funcionamento é baseado na permeabilidade das moléculas, quanto maior a diferença entre as moléculas que se deseja separar, mais fácil é a separação. Essas membranas são constituídas de materiais poliméricos de alta performance (CIBIOGÁS, 2020).

O gás comprimido percorre o comprimento da fibra e o CO_2 , por ser uma molécula menor e carregada ionicamente, permeia através da membrana porosa como mostra a Figura 56.

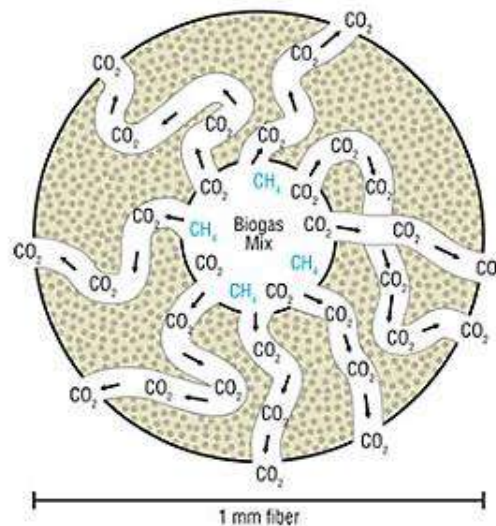
Figura 56 - Separação por membrana.



Fonte: Greene (2018)

O metano por ser uma molécula maior e apolar em carga iônica, permanece no núcleo central. A Figura 57 representa um corte na membrana e mostra como o dióxido de carbono permeia através dos poros da membrana.

Figura 57 - Corte na membrana polimérica



Fonte: Greene (2018)

A permeabilidade da membrana pode ser manipulada controlando a temperatura de operação. A baixa temperatura, as membranas apresentam poros mais apertados, e, portanto, maior seletividade por moléculas menores como o CO_2 . Operando a altas temperaturas, a membrana apresenta poros maiores que acomodam elevadas taxas de fluxo, reduzindo, assim, a seletividade (GREENE, 2018).

Após as etapas de purificação, a ANP determina a composição do biometano como, no mínimo, 90% de metano e 10% de gases inertes, sendo aceitável até 3% de dióxido de carbono (GARLET, 2022).

4.2.3.2 Panorama do biometano no Brasil

De acordo com Marcelo Mendonça, diretor de estratégia e mercado da Abegás, atualmente o Brasil não produz sequer 1% de seu potencial, na ordem de 100 milhões de m³/dia de biometano. A produção atual é de aproximadamente 400 mil m³/dia, porém, apenas 100 mil m³/dia é injetado nas redes de distribuição.

As unidades que realizam a purificação do biogás para autoconsumo ou comercialização contabilizam 10 plantas, conforme apresentado na Figura 58. Esse somatório equivale a apenas 1% do total nacional, porém em termos de volume, correspondem a 23% do volume total de biogás produzido em 2021 (CIBIOGAS, 2021).

Figura 58 - Produção do biometano no Brasil



Fonte: CIBiogás (2021)

Segundo a ANP, em 2021 foram mapeadas quatro usinas autorizadas a produzir e comercializar biometano em território nacional e duas em processo de autorização (ANP, 2021). A produção de biometano para fins comerciais é regulamentada pela Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis.

Segundo levantamento realizado pela Abegás em conjunto com a Abiogás, o Brasil apresenta 27 novas plantas de biometano previstas para os próximos anos. A expectativa é que a produção nacional alcance 2,2 milhões de m³/dia até 2027. Desse volume, 1,3 milhão m³/dia corresponde ao biogás proveniente do setor de saneamento, 700 mil m³/dia do segmento sucroenergético e o setor agroindustrial contribui com 200 mil m³/dia.

Conforme apresentado na Figura 59, São Paulo é o estado com maior número de novos projetos, totalizando quinze novas plantas, seguido pelo Rio Grande do Sul com seis. Além disso, existem projetos novos mapeados no Rio de Janeiro, Pará, Amazonas, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás.

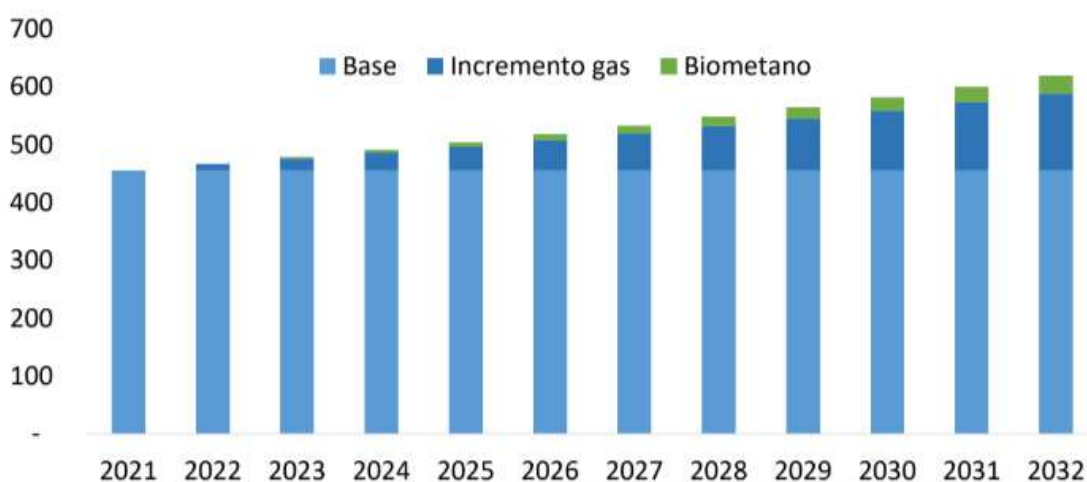
autoridades para a elaboração de novos programas, tanto a nível nacional como nas províncias com grande potencial de desenvolvimento (CADER, 2021).

O biometano atinge uma composição e poder energético muito semelhante ao do gás natural, podendo ser utilizado para os mesmos fins, como o uso em transporte público, substituindo o GLP em indústrias, substituindo gásóleo e óleo combustível na geração de eletricidade e no desenvolvimento de injeção de biometano em dutos (CADER, 2021). Com uma maior inclusão do biometano na matriz energética nacional, o país passará a contribuir para a redução das emissões de GEE a nível nacional e global, como já fazem muitos países desenvolvidos e emergentes (CADER, 2021).

Uma lei nacional de biometano que promova a produção e injeção dele na rede de gás natural deve estabelecer a proporção de biometano a ser consumida. Uma primeira meta que pode ser definida, segundo um estudo relatado pelo relatório do CADER de 2022 para as cidades de Buenos Aires, Córdoba e Santa Fé, é atingir 5% do consumo de gás natural a nível provincial em 2032. Isso implicaria começar com 0,5% do consumo em 2023, para terminar com 5% em 2032 (CADER, 2022). Como referência, a nível nacional, uma suplementação de 5% equivale a 72% da importação base de gás natural.

A injeção gradual linear do biometano como complemento do gás natural em Buenos Aires pode ser vista na Figura 60.

Figura 60 - Injeção gradual de biometano na rede de Buenos Aires (bilhões de BTU)



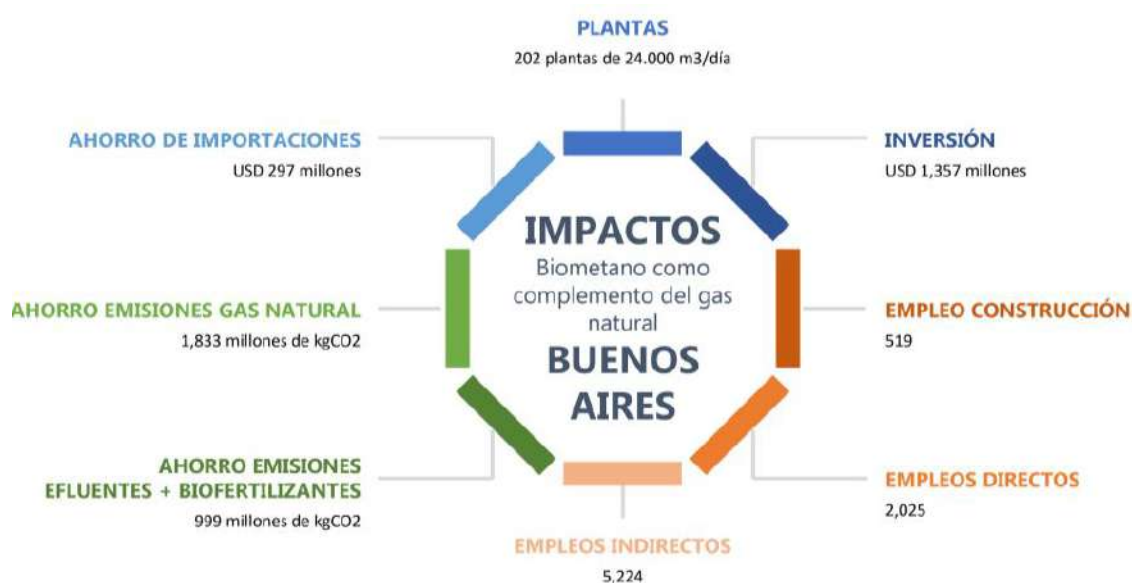
Fonte: CADER (2022)

Nesse estudo foi considerado como base, o consumo de gás natural da província de Buenos Aires em 2021. De acordo com a figura, a injeção de biometano apenas consegue absorver 19% do aumento da demanda de gás natural para 2032, deixando espaço para

incorporação de gás de origem fóssil de fontes convencionais ou não convencionais (CADER, 2022).

A implementação dessa meta dos 5% impactaria toda a cadeia de Buenos Aires, por exemplo, implicaria em acumular 202 plantas em 10 anos, com um investimento de USD 1.357 milhões, a criação de até 519 empregos anualmente para a construção, podendo atingir 2.025 empregos diretos e 5.224 indiretos até 2032. Já em termos ambientais, levaria a província uma economia de 1.833 milhões de kgCO₂ pela substituição do gás natural, 906 milhões de kgCO₂ do tratamento de efluentes e 93 milhões de kgCO₂ pela substituição de fertilizantes inorgânicos, por ano (CADER, 2022). Um resumo desses impactos está representado na Figura 61.

Figura 61 - Impactos do biometano atingir 5% do consumo de gás natural em Buenos Aires, 2032



Fonte: CADER (2022)

Ainda segundo relatório do CADER de 2022 para a cidade de Buenos Aires, outra proposta é a substituição de 100% do consumo de gásóleo do transporte público urbano pelo Bio-GNC, biometano comprimido para uso em veículos. Com a produção do Bio-GNC, substitui-se o gásóleo, que geralmente é importado de outras províncias e regiões, para um combustível renovável, com baixa emissão e produzido localmente, o que acarreta empregos, investimento e atividade econômica na própria província.

Já para o Paraguai, não foi encontrada nenhuma informação sobre a utilização desse combustível no país.

4.2.4 Hidrogênio

É cada vez mais urgente buscar alternativas que promovam a descarbonização de setores-chaves da economia, substituindo combustíveis fósseis por recursos renováveis, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa, freando o aquecimento global e cumprindo com as metas estabelecidas no Acordo de Paris. Nesse contexto está o hidrogênio, que se configura como uma opção com potencial para alinhar o desenvolvimento da economia mundial às metas de zerar as emissões de carbono na atmosfera.

O hidrogênio é uma matéria-prima importante na indústria, muito utilizado, por exemplo, no processo de refino de petróleo. No entanto, atualmente, a maior parte do volume de hidrogênio produzido no mundo é de origem fóssil, obtido a partir da reforma do gás natural.

4.2.4.1 Rotas tecnológicas

O hidrogênio é o elemento mais abundante do universo, correspondendo a cerca de 90% de todos os átomos, e possui a capacidade de armazenamento de uma quantidade significativa de energia por unidade de massa. Apesar disso, encontrá-lo na natureza é raro; por esse motivo, tem sua produção partindo de compostos que o contêm de origem fóssil (carvão, óleo ou gás natural), de biomassa ou de água, sendo considerado uma fonte energética secundária. É possível transportar e armazená-lo na forma de gás, de líquido ou absorvido em materiais (CNI, 2022).

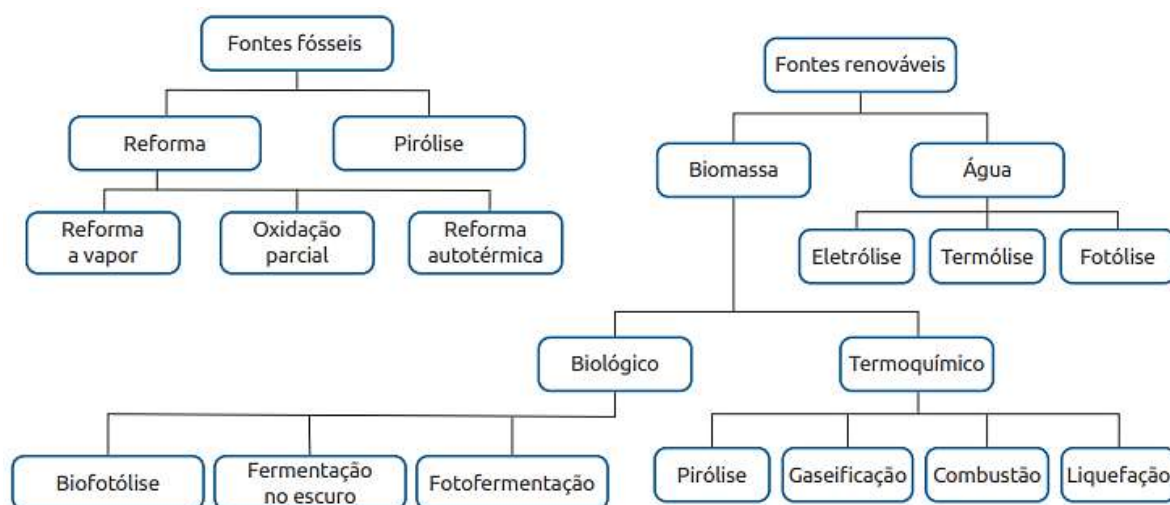
Na literatura, refere-se ao hidrogênio por diferentes cores, dependendo de sua origem e tecnologia de captura de carbono (CCUS – *Carbon Capture Utilization and Storage*), conforme a Tabela 16.

Tabela 16 - Classificação do hidrogênio em escala de cores

Cor	Classificação	Descrição
■	Hidrogênio preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
■	Hidrogênio marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
■	Hidrogênio cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
■	Hidrogênio azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), sem CCUS
■	Hidrogênio verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar)
□	Hidrogênio branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
■	Hidrogênio turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
■	Hidrogênio musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa, com ou sem CCUS
■	Hidrogênio rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

Fonte: EPE (2021) *apud* CNI (2022)

É possível produzir o hidrogênio utilizando diversas tecnologias, como a reforma à vapor, a eletrólise (separando o oxigênio do hidrogênio na água com uma corrente elétrica), a gaseificação e a hidrólise (KPMG, 2022). As rotas tecnológicas para a produção do H₂ estão resumidas na Figura 62.

Figura 62 - Rotas para a produção de H₂

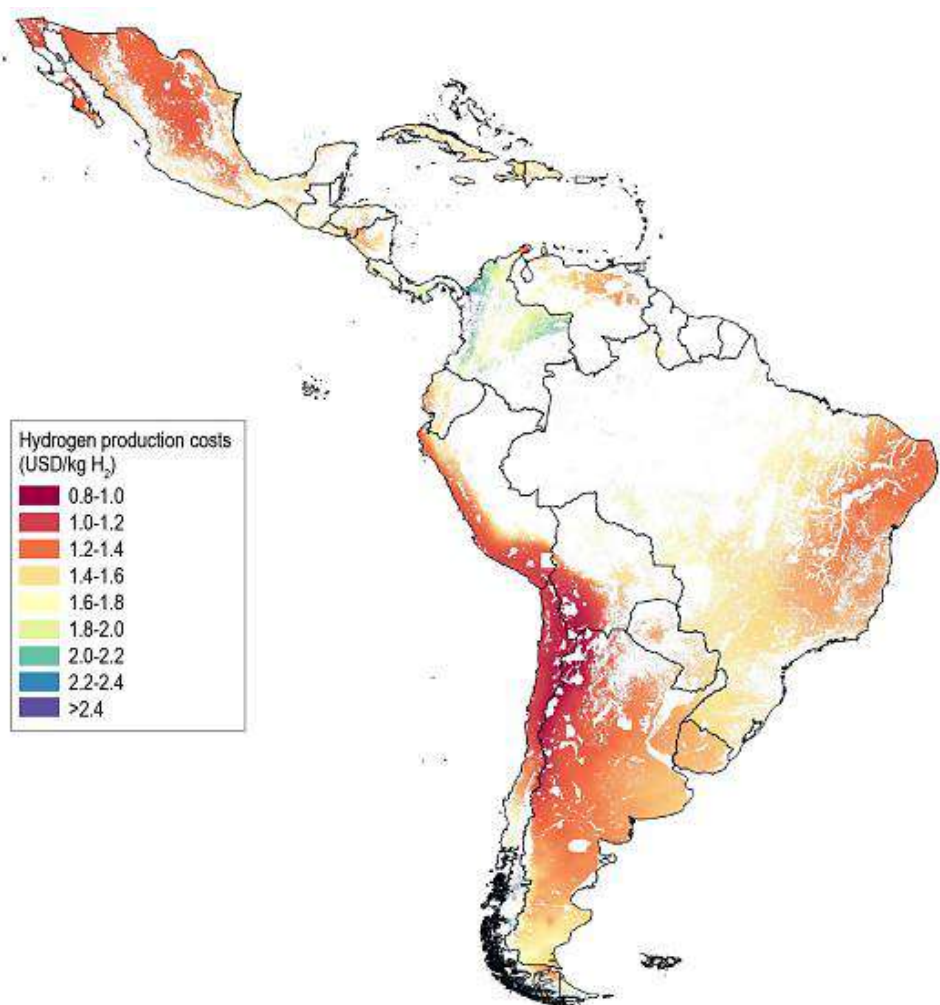
Fonte: Nikolaidis & Poullikka (2017) *apud* CNI (2022).

Atualmente, tem-se a importância do hidrogênio medida, principalmente, por dois fatores: o custo viável de produção, uma vez que, quando se utiliza fontes fósseis encontra-se entre US\$ 0,50 e 1,70/KgH₂, e ao ser originado de fontes renováveis, tem-se valores entre US\$ 3 e 8/KgH₂; e a possibilidade de geração utilizando estas últimas em grandes quantidades, favorecendo a descarbonização. Ainda assim, há o desafio da viabilização econômica do produto de baixo carbono, à alternativa fóssil; conseqüentemente, apenas 10% do volume de produção de hidrogênio gerado globalmente é considerado limpo (KPMG, 2022). Torna-se fundamental viabilizar a economia de escala, reduzindo os custos de manufatura das energias renováveis para a geração de eletricidade e os custos associados às tecnologias usadas para gerar hidrogênio sustentável; e, com isso, seria possível reduzir os custos produtivos do mesmo e elevar sua competitividade.

As rotas tecnológicas atuais produzem hidrogênio cinza, marrom e preto, utilizando fontes fósseis como o gás natural (hidrogênio cinza) ou o carvão (hidrogênio marrom ou preto), e realizando o processo de reforma a vapor, com alta eficiência (entre 70 e 85%). Nesse processo, estão inclusas as etapas de reforma catalítica, reação de deslocamento gás-água (reação de *shift*) e metanação (CNI, 2022).

O hidrogênio verde é gerado a partir da eletrólise da água e fornecimento de energia renovável, como a solar, a eólica e a hidrelétrica. Nesse processo, faz-se a separação entre hidrogênio e oxigênio da água, através da passagem de uma corrente elétrica. Pode ocorrer em três formas: eletrólise alcalina, em membranas de troca de prótons e com óxidos sólidos. O produto de todas as modalidades é altamente puro, o que o destina principalmente para uso em células a combustível (CNI, 2022). Na América Latina, alguns países possuem o potencial para a produção de mais hidrogênio de baixo carbono do que consomem, devido aos recursos de energias renováveis abundantes e competitivos (IEA, 2021). A partir do exemplo da Figura 63 pode-se analisar a projeção para o custo produtivo do combustível em questão para o processo de eletrólise, com o aproveitamento das energias mencionadas, sendo a solar em um sistema híbrido, ou seja, a parcela gerada é conectada à rede elétrica e, simultaneamente, integrada a um sistema de armazenamento. Nota-se que o Chile possui os menores custos, uma vez que o país é considerado avançado em termos de energia solar; em 2021, a geração energética por combustíveis fósseis no país foi ultrapassada pelas fontes renováveis (NASSA *et al*, 2021). No Brasil, os custos são mais reduzidos no Nordeste; infere-se a causa como a alta incidência de luz solar na região.

Figura 63 - Custo nivelado da produção de H₂ via eletrólise alimentada por sistema solar híbrido e eólico *onshore* na América Latina (projeção para 2050)



Fonte: IEA (2021)

O armazenamento de energia sazonal pode ter como consequência positiva o aumento da segurança energética e a integração de fontes renováveis no sistema elétrico, sendo o hidrogênio de baixo carbono um contribuinte para tal. Há também a possibilidade de o hidrogênio produzido em determinados países substituir parte das importações de gás natural (IEA, 2021).

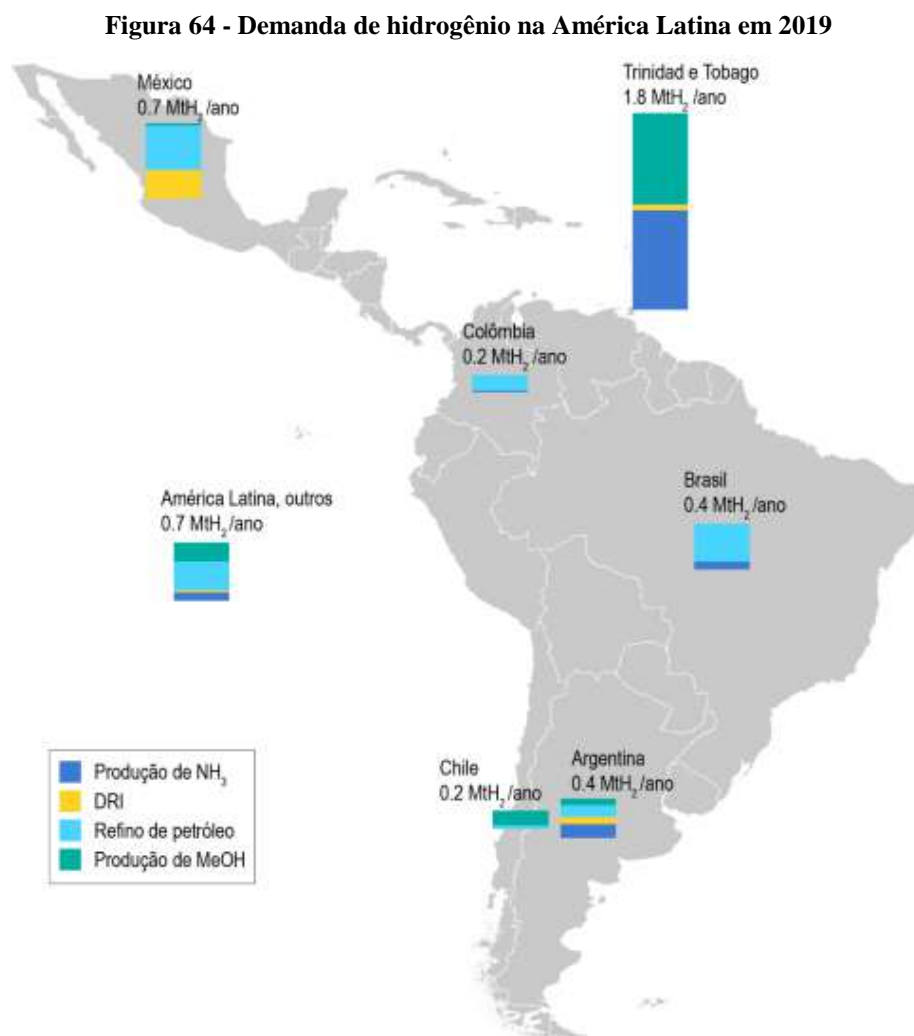
Vale ressaltar que o hidrogênio verde não é uma fonte de energia, mas sim um vetor energético. Isso significa que ele tem a capacidade de armazenar energia e liberá-la em outro momento ou local de forma controlada, o que é sua principal vantagem (BENITEZ, 2022).

4.2.4.2 Cenário na América Latina

Atualmente, o Brasil, a Argentina e o Chile encontram-se em vantagem em relação a custos produtivos em projeções até 2050, com baixos custos que podem chegar US\$ 0,55/KgH₂

para esse ano (KPMG, 2022). A abundância de recursos naturais e condições favoráveis para o desenvolvimento de energias renováveis tornam esses países, somados a outros da América Latina, promissores para a futura transformação das matrizes energéticas globais e transição para uma economia de baixo carbono, apesar de crises socioeconômicas pelas quais os países podem passar (KPMG, 2022).

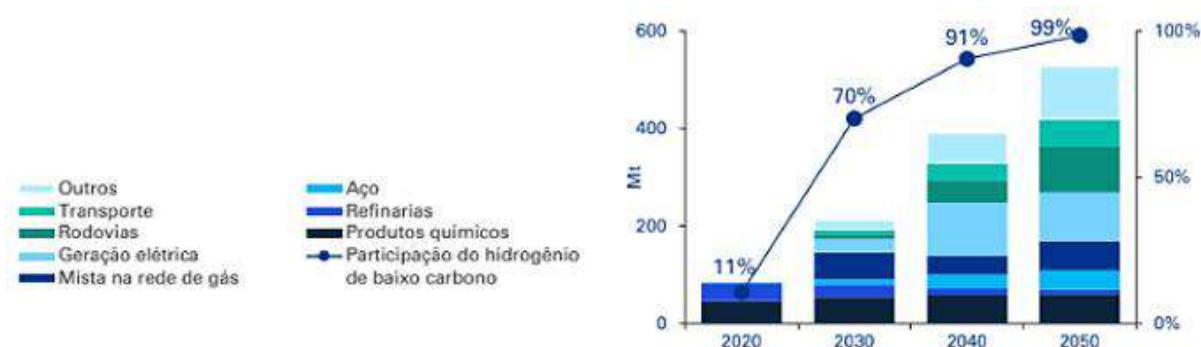
Segundo dados da Agência de Energia Internacional (IEA, do inglês *International Energy Agency*, 2019), os setores industriais e de refino de petróleo consumiram mais de 4 milhões de toneladas de H₂ em 2019, correspondendo a cerca de 5% da demanda mundial, para a produção de amônia, metanol, redução de aço (DRI = *direct reduction of iron*) e produtos refinados de petróleo. A Figura 64 exibe a demanda na região, de acordo com os modos de uso mencionados para o produto.



Fonte: IEA (2021)

A Figura 65 mostra a projeção dos níveis globais de produção e demanda de hidrogênio entre 2020 e 2050; observa-se que este é mais utilizado, hoje em dia, nos setores de produtos químicos e refinarias, como fonte energética. Espera-se um aumento gradual da demanda do produto até 2050, com mais de 500 milhões de toneladas e maior diversificação das indústrias que o utilizam, chegando a maior participação dos setores rodoviários e de geração elétrica no último ano.

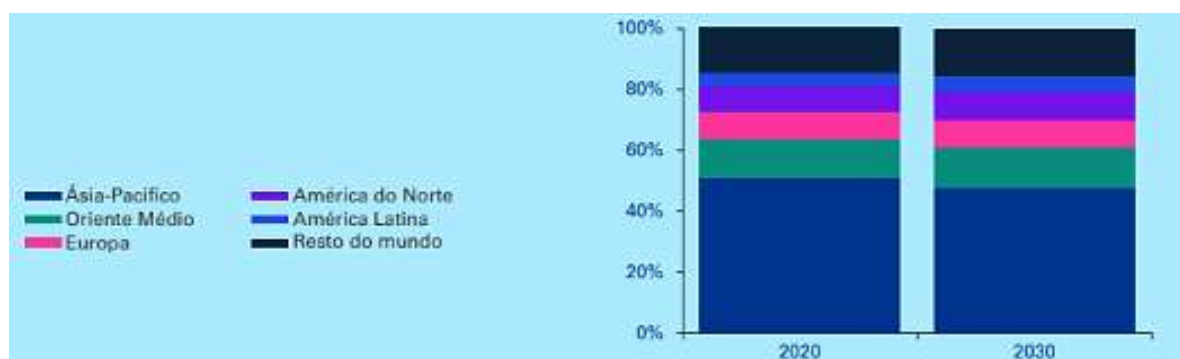
Figura 65 - Demanda de H₂ com projeção até 2050 no cenário de zero emissões poluentes (em milhões de toneladas)



Fonte: KPMG (2022)

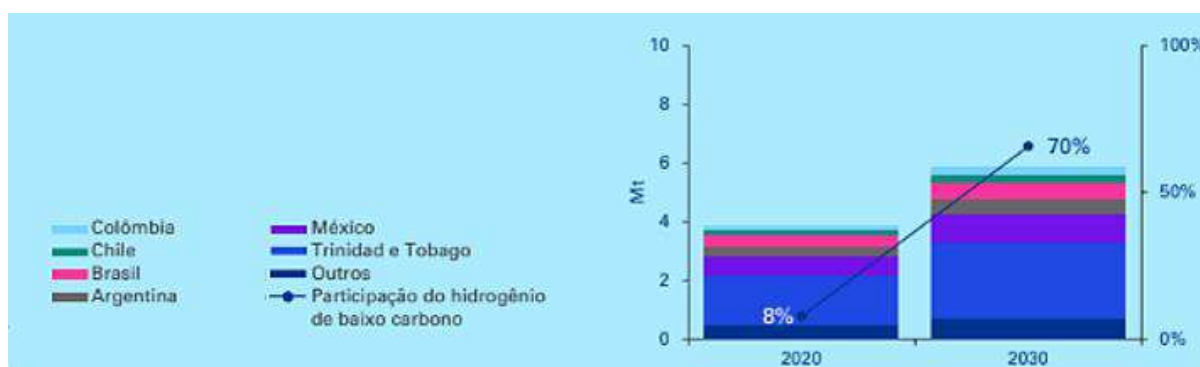
A demanda mundial de hidrogênio por continente é exibida na Figura 66, de acordo com a projeção até 2030, sendo a região Ásia-Pacífico o principal produtor e consumidor mundial do combustível, e a China, o país que concentra mais de 60% do consumo total (KPGM, 2022). Além disso, a América Latina possui apenas 5% de participação na demanda global do hidrogênio, conforme visto anteriormente, estando o Brasil e a Argentina entre os países com maior concentração do consumo, de acordo com a Figura 67. Em relação a Trinidad e Tobago, país com maior índice, cerca de 50% das emissões de carbono originam-se na indústria química, a qual consome uma quantidade significativa de hidrogênio de origem fóssil, sem compensar as emissões (IEA, 2021).

Figura 66 - Demanda de hidrogênio por continente (projeção 2030)



Fonte: KPMG (2020)

Figura 67 - Países que concentram maior parte do consumo de H₂ na América Latina



Fonte: Adaptado de KPMG (2020)

Apesar de 90% da produção latino-americana de hidrogênio ser originada a partir de combustíveis fósseis, fazendo uso de tecnologias que não contribuem para a redução das emissões de CO₂, segundo as projeções para a região, a produção desta forma de combustível de baixo carbono pode chegar a representar 70% do total em 2030, com 40% sendo gerado por eletrólise.

Contudo, há desafios para o desenvolvimento do hidrogênio sustentável na América Latina. Na situação atual, não há tecnologias avançadas para a captura, o transporte e o armazenamento do gás carbônico que é gerado no processo produtivo em questão (KPMG, 2022). A produção de H₂ de baixo carbono, em 2019, limitou-se a três projetos pilotos na Argentina, no Chile e na Costa Rica (IEA, 2021). Ademais, torna-se essencial a integração e a otimização da operação das cadeias de valor que produzem o combustível, além da exigência de maiores investimentos e níveis de maturidade que as indústrias deverão obter, a fim de viabilizar a economia de escala, sem afetar a margem de lucro das empresas de forma significativa, situação que só pode ser atingida a médio e longo prazos (KPMG, 2022). A

América Latina pode se tornar uma região propícia para o desenvolvimento da tecnologia em questão; porém, deve-se analisar as mudanças financeiras e regulatórias requeridas para tal.

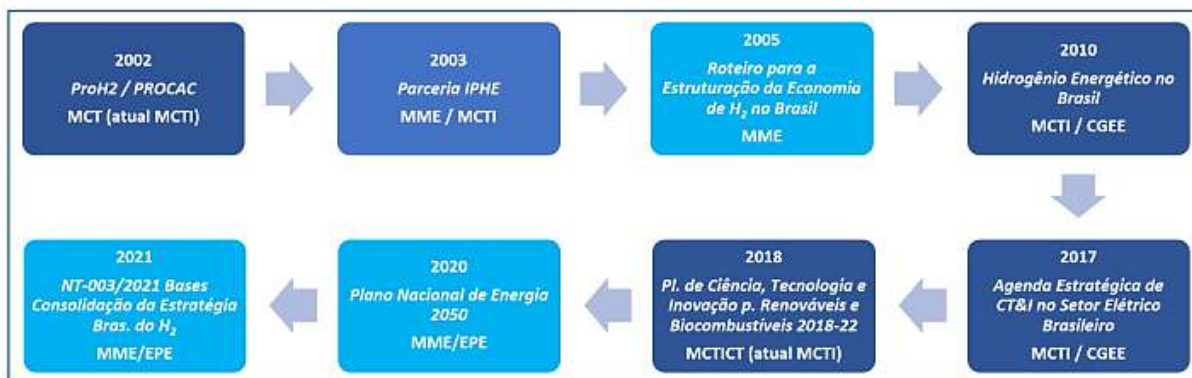
4.2.4.3 Cenário brasileiro para o hidrogênio

Algumas políticas públicas possuíram, e ainda possuem, relevância para o desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio no Brasil, conforme listadas abaixo, a partir de publicação da plataforma alemã *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH* (GIZ, 2021).

- Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia de Hidrogênio (ProH₂): estruturado no início dos anos 2000, o programa do Ministério de Ciência e Tecnologia foi responsável pelo avanço da pesquisa, principiando a viabilidade técnica do gás e criando normas para a economia do mesmo;
- Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil: originado do Ministério de Minas e Energia dois anos após o anterior, contribuiu para o desenvolvimento da estratégia nacional, relacionada à diversificação da matriz energética (reduzindo a dependência de derivados do petróleo) e aos investimentos na nova tecnologia, sendo o foco inicial a geração de H₂ a partir de gás natural;
- Hidrogênio Energético no Brasil (2010): apresentou recomendações para o incentivo à economia, à produção, ao desenvolvimento da logística e aos sistemas de utilização do hidrogênio;
- Agenda Estratégica de CT&I no Setor Elétrico Brasileiro (CGEE, 2017): propôs uma atualização das recomendações anteriores, com novas metas e ações de ciência, tecnologia e inovação;
- Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Renováveis e Biocombustíveis em 2018-2022 (2018): o plano abrangeu, no campo de energias renováveis, o hidrogênio como tecnologia alternativa, incentivando o desenvolvimento de pesquisas. Recomendou-se o uso do produto como fonte de energia em veículos e para a produção de combustíveis;
- Plano Nacional de Energia 2050 (2020): o hidrogênio foi incluso no capítulo de “Tecnologias Disruptivas”, sendo elemento de interesse no contexto da descarbonização da matriz energética;
- Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio (2021): na nota técnica, mostrou-se a intenção de consolidar um plano de ação do Governo Federal para as tecnologias de hidrogênio.

Além dos planos apresentados, o Brasil é membro do Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio (IPHE), fundado em 2003, contribuindo para o avanço dos incentivos à pesquisa e às atividades de utilização comercial relacionadas ao gás em questão. A Figura 68 indica um diagrama com as políticas públicas mencionadas, as quais possuem impacto direto e indireto na amplificação da cadeia de produção de hidrogênio no Brasil.

Figura 68 - Ações governamentais para o H₂ no Brasil



Fonte: GIZ (2021)

Quatro empresas de gases industriais são responsáveis por fornecer gás hidrogênio como insumo para as indústrias brasileiras, sendo elas: Linde (representada pela White Martins no Brasil), Air Liquide, Air Products e Messer. Mais de 95% do hidrogênio produzido no país é cinza e é utilizado nos setores petroquímico, siderúrgico e metalúrgico, alimentício, de vidros planos e de geração de energia. Embora esta versão seja amplamente comercializada, as empresas fornecedoras possuem o H₂ verde em seu planejamento estratégico, com portfólio mundial de projetos piloto para o mesmo (GIZ, 2021).

O Ministério de Minas e Energia do Brasil declarou, em 2021, que o hidrogênio deve ser uma prioridade para estudos sobre seu desenvolvimento no país. Atualmente, alguns projetos encontram-se em fase inicial e com datas estimadas para início das operações em 2023, 2025 e 2030: Marítimo Dragão – Qair, Porto de Pecem - Base Um e Fortescue Future Industries - Porto de Pecem, respectivamente (KPMG, 2022).

O Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂) tem como objetivo incentivar o desenvolvimento sustentável do país e estabelece avaliações que devem ser feitas de riscos e oportunidades relacionados a recursos de gás natural para a produção de H₂ azul, ao potencial de fontes renováveis de geração elétrica para produzir o verde, à pesquisa sobre rotas alternativas utilizando energia nuclear, hidrogênio natural (proveniente de rochas) e plásticos, ao potencial de uso do combustível em veículos pesados (caminhões, embarcações e

aeronaves), entre outros. O programa é estruturado em seis eixos a serem desdobrados, conforme Figura 69 e novas diretrizes para cada um, de maneira que sejam estabelecidas ações para promover a comunicação com a sociedade e esclarecer os riscos e benefícios relacionados ao hidrogênio (PNH₂, 2021).



Fonte: PNH₂ (2021)

A abundância de recursos naturais, como ventos fortes e alta incidência de luz solar, bem como a disponibilidade de terras para instalação de usinas eólicas e solares, tornam o Brasil um país promissor para o desenvolvimento da cadeia do hidrogênio verde e azul. A isso soma-se a ampla rede de transmissão de eletricidade, a qual conecta grande parte do território brasileiro, além do fato de a matriz elétrica nacional ter um índice de descarbonização alto, comparado a outras economias mundiais; nesse sentido, há oportunidades significativas para a descarbonização do setor industrial, da mobilidade de grande porte e para as exportações (CNI, 2022).

Outra vantagem da implementação do hidrogênio de baixo carbono na indústria brasileira é a oportunidade de exportação desse vetor de energia para os mercados internacionais, principalmente para a Europa (CNI, 2022).

Segundo CNI (2022), dois hubs de hidrogênio lideram a corrida aqui no Brasil: o do Porto do Pecém, no Ceará, e o do Porto do Açu, no Rio de Janeiro, seguidos pela iniciativa do Porto do Suape, em Pernambuco, os quais serão resumidos a seguir.

I. Porto do Açu:

A estrutura do Porto do Açu divide-se em diversos hubs, cada qual com um foco. Com isso, pretende-se desenvolver um especificamente para o hidrogênio, tendo o objetivo de atrair empresas produtoras e distribuidoras de H₂ verde, indústrias de amônia verde e biorrefinarias ou indústrias de aço de baixo carbono, que podem utilizar o produto como vetor de energia ou como matéria-prima (CNI, 2022). Uma vez que o foco é a forma verde do produto, também se incluem nos planos a instalação de usinas fotovoltaicas e plantas *offshore* de energia eólica, além da exportação como gás ou amônia. O Porto do Açu firmou uma parceria com a empresa australiana *Fortescue Future Industries* (FFI), e estuda-se o potencial para produzir 250 mil toneladas de amônia verde por ano.

Figura 70 - Projeto do hub de hidrogênio no Porto do Açu



Fonte: CNI (2022)

II. Complexo do Pecém:

O Complexo do Pecém (CIPP) é um *joint venture* formado pelo governo do Ceará e pelo porto de Rotterdam, na Holanda. Em fevereiro de 2021 foi lançado o “Hub de hidrogênio verde” e entende-se que a localização favorável, os incentivos tributários e o grande potencial de geração de energia renovável são vantagens competitivas importantes que esse hub se estabeleça e avance seu desenvolvimento (CNI, 2022).

Entre as parcerias do Complexo do Pecém com empresas do setor energético encontram-se a australiana *Fortescue Future Industries*, com investimento planejado de seis bilhões de

dólares e meta de produzir 15 milhões de toneladas de hidrogênio verde por ano até 2030. Além disso, tem-se *Enegix Energy*, *Transhydrogen Alliance*, *White Martins* e *Qair Brasil* (CNI, 2022).

III. Porto de Suape:

O Complexo Industrial Portuário de Suape é constituído de 150 empresas de capital nacional e internacional, em operação ou implantação. Diversas indústrias com potencial para envolvimento em projetos de H₂ são atendidas, como de gases industriais, petroquímica, de geração de energia elétrica, entre outras. Firmou-se uma parceria com a Qair Energia para um estudo de viabilidade técnica e econômica para a implantação de uma planta de hidrogênio verde, prevendo a instalação de quatro conjuntos de eletrolisadores de água (CNI, 2022).

Apesar de as tecnologias envolvidas nos hubs mencionados terem atingido maturidade tecnológica, algumas delas, como a de aço de baixo carbono e a de produção de químicos verdes, têm pouco tempo de comercialização em grande escala, não sendo ainda economicamente competitivas em relação às soluções tradicionais (CNI, 2022).

4.2.4.4 Cenário argentino para o hidrogênio

Desde a década de 1970, o trabalho científico sobre o hidrogênio começou a se aprofundar na comunidade científica da Argentina; na década seguinte, os primeiros passos foram dados.

Anualmente, na Argentina, produz-se cerca de 395 kton de hidrogênio, aplicado a quatro processos principais: fertilizantes de amônia, hidrotratamento em refinarias, redução de óxidos de ferro em siderúrgicas e produção de metanol (Y-TEC, 2021). Por suas características geográficas e climáticas, o país tem um alto potencial para a geração de energias renováveis, pois possui bons níveis de radiação na região noroeste e ventos adequados na região patagônica (MAYDS, 2020).

Segundo o Conselho Econômico e Social (CES), a Argentina tem potencial para uma produção competitiva de hidrogênio, permitindo exercer um papel relevante no futuro mercado internacional e contribuir significativamente para a transição para uma matriz energética renovável, uma vez que há condições necessárias em seu território para posicionar o país como referência global, como grandes áreas com ventos, radiação solar e água abundante. Apesar de sua capacidade produtiva de hidrogênio, o país ainda não conta com uma tecnologia adequada para a captura de carbono e redução do impacto ambiental (CES, 2021).

Busca-se desenvolver seu mercado interno de hidrogênio, na medida em que este é uma grande oportunidade para o desenvolvimento dos primeiros projetos e investimentos de médio porte. Isso permitirá acelerar a curva de aprendizado, incluindo uma melhora do armazenamento de hidrogênio e a conversão de cinza em azul, e a preparação da tecnologia necessária para avançar a etapa de exportação de hidrogênio (CES, 2021). O país conta com custos competitivos para reforma do gás natural com captura de CO₂ e espera-se que o hidrogênio verde atinja a paridade econômica em 2030 (Y-TEC, 2021). Ademais, a geração de H₂ rosa utilizando o calor das usinas nucleares de quarta geração é um dos pontos focais do país, tendo em vista que esta forma será um dos elementos-chave para alcançar a transição energética. A energia nuclear ainda tem muito a contribuir e a diversificação da matriz será essencial nesse sentido (CES, 2021).

Em 2021, foi criado na Argentina um grupo interdisciplinar e interministerial, visando à criação de um roteiro para o desenvolvimento do hidrogênio e, simultaneamente, a atualização da Lei de Promoção do Hidrogênio, originalmente sancionada em 2006 (KPMG, 2022). Ademais, a empresa de pesquisa e desenvolvimento energético mais importante da Argentina, Y-Tec, criou o consórcio H2AR no final de 2020, um trabalho colaborativo de mais de 50 empresas que atuam na cadeia de valor do hidrogênio, desde a produção, até a aplicação; são mercados como: automotivo, gerador de energia elétrica, refinarias, entre outros (Y-TEC, 2021).

Em relação às projeções, o cenário mais otimista prevê oportunidades em hidrogênio limpo na segunda metade da década atual (Y-TEC, 2021). Os planos do país para o setor de transporte em 2030 incluem a implementação de medidas de eficiência energética em todos os modos de transporte com uma abordagem visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa no setor; serão promovidas matrizes energéticas sustentáveis, com foco na gaseificação, biocombustíveis, eletrificação da mobilidade e uso do hidrogênio (MAYDS, 2020).

Espera-se, no futuro, a criação de um mercado diferencial de moléculas limpas, incluindo o hidrogênio produzido por reforma de gás natural com captura das emissões. O interesse dos compradores estará voltado para a relação entre preço do produto e poder de descarbonização (Y-TEC, 2021); a transição para uma economia do hidrogênio é viável através dos tipos azul, na medida em que o país é um grande produtor de gás natural, e verde, a partir da biomassa. Este último processo é similar ao processo de obtenção a partir do gás natural, mas com a vantagem de ser neutro em carbono, pois o CO₂ produzido é consumido pela fotossíntese da biomassa em crescimento. Essa forma de produção é uma tecnologia de reforma mais madura, conhecida no país há muitos anos. Nesse ponto, abre-se a possibilidade de

substituição de refinarias tradicionais que utilizam petróleo por biorrefinarias utilizadoras de biomassa (CES, 2021). Com isso, há uma oportunidade para a Argentina posicionar-se como exportador do produto, enquanto desenvolve a cadeia de H₂ por eletrólise, usando recursos renováveis (Y-TEC, 2021).

4.2.4.5 Cenário paraguaio para o hidrogênio

Após avaliação dos cenários na América Latina como um todo, no Brasil e na Argentina, ressalta-se que outros países da região, incluindo o Paraguai, também buscando desenvolver diferentes iniciativas voltadas à produção de hidrogênio limpo (KPMG, 2022).

As emissões do setor energético do Paraguai vêm crescendo nas últimas décadas e, somente entre 2015 e 2017, aumentaram 31,56%, aumento considerado uma consequência do maior consumo de combustíveis líquidos derivados do petróleo no transporte terrestre (BENITEZ, 2022). Esse consumo tem uma participação de 41% no consumo final de energia nacional, sendo o diesel e a gasolina os principais combustíveis. Assim, o setor de transportes é o principal nicho para introduzir o hidrogênio na matriz energética (VMME, 2021). O Estado paraguaio aposta fortemente na indústria do hidrogênio verde, uma vez que este é visto como uma das prioridades para mitigar as mudanças climáticas e descarbonizar o setor mencionado. Estudos avaliaram o potencial para o produto e grandes empresas internacionais viram o Paraguai como um país possível para investir na área, na produção e até na exportação de hidrogênio verde (BENITEZ, 2022).

Em agosto de 2022, o diretor e presidente da Atome Paraguai SA, James Spalding, afirmou o plano de a empresa iniciar sua produção de hidrogênio verde em abril de 2023, utilizando um eletrolisador de capacidade para produzir, diariamente, 450 kg do produto. Na segunda etapa do projeto, os planos são de elevar a produção para a escala industrial até 2025 (VILELA, 2022).

Em setembro de 2022, a Atome Energy, empresa sediada em Londres, anunciou a compra de 30 hectares na cidade paraguaia de Villeta, com o objetivo de construir uma usina para produção de hidrogênio, sendo a primeira fase do que se espera que seja um total de cerca de 400 MW de capacidade no Paraguai (INI, 2022). Segundo Benitez (2022), planeja-se promover o uso do hidrogênio verde para transporte de longa distância e fluvial, visto que o componente transporta energia com facilidade e dá mais autonomia ao veículo que o utiliza. Isso explica o motivo de a energia gerada pelas hidrelétricas no Paraguai não ser utilizada diretamente para a mobilidade urbana e fluvial, e sim ser convertida em hidrogênio primeiro.

Em 2021, foi anunciado o investimento do Paraguai de dez milhões de dólares em três usinas dedicadas à geração de hidrogênio. O projeto transcende a descarbonização da economia paraguaia, incluindo, também, interesses econômicos estratégicos para o país, tendo em vista que, até o momento, 100% dos combustíveis são importados (ICEX, 2021).

O Vice-Ministério de Minas e Energia preparou, em 2021, um marco conceitual para promover o desenvolvimento do hidrogênio verde. De acordo com o documento, será buscada a instalação de plantas-piloto no país e busca-se apoio da iniciativa privada e da população no investimento, haja vista que o setor público não dispõe de grandes recursos suficientes. O documento também descreve as vantagens da produção de hidrogênio no país, como a disponibilidade de recursos naturais, os estudos realizados sobre a viabilidade do produto a nível regional e nacional e o espaço físico disponível (da Petropar) para a instalação de uma planta. Contudo, ainda não há normas e regulamentos específicos de hidrogênio como vetor de energia, faltam modelos de negócios adequados para o desenvolvimento e não há infraestrutura para distribuição de hidrogênio ao usuário (VMME, 2021). Essas são algumas barreiras ainda a serem transpostas, mas já se sabe que o país possui oportunidades para o negócio, principalmente se tiver apoio do governo e do setor privado.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou como, em cenário de transição da matriz energética e de urgência em reduzir as emissões de gases de efeito estufa, há investimentos do Brasil, da Argentina e do Paraguai na busca por biocombustíveis alternativos e nas adaptações necessárias aos motores de Ciclo Otto.

Nesse contexto, foi possível avaliar o destaque do Brasil em relação ao desenvolvimento de biocombustíveis para motores ciclo Otto, frente aos demais países avaliados, uma vez que já possui produção em escala comercial do etanol de segunda geração e contínuos investimentos no setor de biogás e hidrogênio. Além disso, cerca de 80% da frota de veículos do país funciona como motor *flex*.

A Argentina, de modo geral, encontra-se em fase de pesquisas e estudos de viabilização para os novos biocombustíveis, apresentando plantas comerciais apenas para o biogás; entretanto, possui potencial e projeções para um futuro mais sustentável envolvendo as demais alternativas.

Em relação ao Paraguai, foi possível notar que o país se encontra ainda em um menor nível de desenvolvimento sobre o tema, uma vez que não possui projeção de desenvolvimento para a maior parte dos biocombustíveis, apresentando planos apenas para o hidrogênio verde.

Tendo em vista que cada combustível apresenta propriedades específicas e composição química diferente, que impacta diretamente no desempenho do motor de combustão interna, é necessário realizar ajustes para a utilização dos mesmos. Para o biogás e o biometano, essas adaptações incluem o uso do kit-gás e o aumento da taxa de compressão. Já para o hidrogênio, que pode ser utilizado como combustível principal ou suplementar, a combustão é mais estável e eficiente.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, destaca-se:

- Acompanhamento de novos incentivos governamentais e propostas para a instalação de plantas de E2G na Argentina e no Paraguai;
- Mapeamento de dados mais atualizados sobre biogás no Paraguai;
- Confirmar se o estudo técnico-econômico elaborado pela CADER sobre as oportunidades do biogás na Argentina desencadeou a elaboração de programas a nível nacional ou provincial;
- Acompanhamento da possibilidade de utilização de biometano no Paraguai.

REFERÊNCIAS

- AAAPV – Agência de Autorregulamentação das Entidades de Autogestão de Planos de Proteção Contra Riscos Patrimoniais. **Portal do Trânsito**. Disponível em: <https://aaapv.org.br/pelo-segundo-ano-consecutivo-sobe-o-numero-de-carros-convertidos-para-gnv/>. Acesso em: 11 out. 2022.
- ABEGÁS – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado. **Uso automotivo**. Disponível em: <https://www.abegas.org.br/uso-automotivo>. Acesso em: 08 out. 2022.
- ABIOGÁS - Associação Brasileira do Biogás. Infográficos. Biogás no Brasil: Conhecendo o Mercado no País. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/01/Infograficos-Abiogas_D_2021-1.pdf. Acesso em: 27 set. 2022.
- AGUIAR, H. R. R. **Produção de etanol de segunda geração**. 2017. 72 p. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- ALMEIDA, S.; NIRENBERG, H.; BELCHIOR, C. Adaptações no motor para operar com biogás. *In*: Congresso nacional de engenharia mecânica, 7., 2012, São Luís. **Anais eletrônicos** [...] São Luís: ABCM, 2012. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/conem/2012/PDF/CONEM2012-0701.pdf>. Acesso em: 24 out. 2022.
- AMORIM, R. J. **Análise da razão volumétrica de compressão de um motor flexível multicomcombustível visando melhoria de desempenho**. 2005. 124 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Ministério de Minas e Energia**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em: 5 jun. 2022.
- ANP espera sete novas usinas de etanol em 2022; no total, 23 estão em construção. **Nova Cana**, 8 mar. 2022. Usinas. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/industria/usinas/anp-espera-novas-usinas-de-etanol-2022-23-construcao-080322>. Acesso em: 25 jun. 2022.
- ANP. Resolução ANP nº 842, de 15 de maio de 2021. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-842-de-14-de-maio-de-2021-32005961>. Acesso em: 15 set. 2022
- ANP. Resolução ANP nº 856, de 22 de outubro de 2021. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-856-de-22-de-outubro-de-2021-354349404>. Acesso em: 27 jun.2022.
- ARGENTINA. Lei nº 27640, de 15 julho de 2021. Dispõe sobre o quadro regulatório para biocombustíveis. Disponível em: <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/247667/20210804>. Acesso em: 28 set. 2022

ARGENTINA. Regalías de Petróleo Crudo, Gas Natural, GLP, Gasolina y Condensado. Secretaria de Energia Presidencia de la Nación. 2022. Disponível em: <https://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3181>. Acesso em: 30 out. 2022.

ASCURRA, A. M.; MANOSALVA, J.; MORRIS, J. Estudio económico para la obtención del bioetanol lignocelulósico. **RIIYM - Revista Científica de Ingeniería Industrial y Mecánica**, Argentina, 2019, v. 4, n. 6, p. 21, jul. 2019.

AYAD, S. E. **Avaliação do desempenho de um motor de combustão interna operando com etanol e adição de hidrogênio**. 2021. 216 p. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

AZEVEDO, R. G. **Análise econômica da produção de etanol pela integração do milho nas usinas flex e full no estado do Mato Grosso**. 2018. 20 p. Dissertação (MBA em Gestão do Agronegócio) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

BABET-REAL5 end of project meeting in Pau and Mourenx, France. **BABET-REAL-5**, jan. 2020. Disponível em: <https://www.babet-real5.eu/2-uncategorised/81-babet-real5-end-of-project-meeting-in-pau-and-mourenx,-france.html>. Acesso em: 14 out. 2022.

BARRETIRI, T. R.; HAUS, T. L. Análise da viabilidade da utilização de hidrogênio em motores a combustão interna. **Caderno PAIC**, Curitiba, 2013, v. 14, n. 1, 2013.

BASTOS, S.; FORTUNATO, G. Conversão de veículos flex para o gás natural: problema de escassez e contribuição à sustentabilidade. **Revista de Administração Mackenzie**, v.15, n.5, p. 171-194, 2014.

BENITEZ, A. S. Hidrógeno verde en Paraguay, ¿la carreta delante de los bueyes?. *Ciencia del Sur*, 2 set. 2022. Disponível em: <https://cienciasdelsur.com/2022/09/02/hidrogeno-verde-en-paraguay-carreta-delante-bueyes/>. Acesso em: 29 out. 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_mc1tf8pg_N2_raizen_blog_google_awareness_&utm_content=mc1tf8pg_blog_google_search_awareness_interesses_cpc_search__bioenergia_&gclid=Cj0KCQjw1vSZBhDuARIsAKZlijTI7Zt_CA713n5w0rcatxU4MR4CS5DcRuCJIEL_I_0EEsG80CeLgvAaAtrmEALw_wcB. Acesso em: 05 out. 2022.

BIOGÁS tem crescimento em ritmo acelerado no Brasil. **Empresas**, 29 abr. 2022. *Econômico Valor*. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2022/04/29/biogas-tem-crescimento-em-ritmo-acelerado-no-brasil.ghtml>. Acesso em: 27 set. 2022.

BNDES. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. 1 ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2008. 314 p. ISBN

BORTOLETTO, A. M., ALCARDE, A. R. Dominante nos EUA, etanol de milho é opção, no Brasil, para safra excedente. **Visão Agrícola**, n. 13, 2015.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2012. 553 p. v. 1.

BUSCAN obtener biocombustibles de segunda generación. **Argentina.gob.ar**, 01 out. 2019, INTA. Disponível em: <https://www.argentina.gob.ar/noticias/buscan-obtener-biocombustibles-de-segunda-generacion>. Acesso em: 14 out. 2022.

CADER – Cámara Argentina de energías renovables. **Biometano a nivel provincial Buenos Aires**, 2022. Disponível em: <https://www.cader.org.ar/biometano-en-las-provincias-de-buenos-aires-cordoba-y-santa-fe/>. Acesso em: 27 out. 2022.

CADER trabaja en un nuevo informe que analiza el potencial del biometano en Argentina. **Cader.org.ar**, c2021. Disponível em: <https://www.cader.org.ar/cader-trabaja-en-un-nuevo-informe-que-analiza-el-potencial-del-biometano-en-argentina/>. Acesso em: 27 out. 2022.

CALZADA, J.; D'ANGELO, G.; LUGONES, A. Radiografía del etanol brasileño y oportunidades del mercado argentino. **Bolsa de Comercio de Rosario**, 20 nov. 2020, Commodities. Disponível em: <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/radiografia-1>. Acesso em: 14 out. 2022.

CAMPANARO, D.; JUNIOR, M. C. **Desempenho do motor com a utilização de gasolina e aditivo para combustível via tanque**. 2012. 59 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - FATEC, Curso de Tecnologia em Mecânica Automobilística, Santo André, 2018.

CANNAVAL, R. Etanol de milho e cana. **Innovatech Consulting**, Campinas, São Paulo. 2021. Disponível em: <https://esgtech.com.br/wp-content/uploads/2021/05/Etanol-de-Milho-e-Cana.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

CARVALHO, M. A. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. 2011. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

CES. Hacia una Estrategia Nacional Hidrógeno 2030. **Consejo Económico y Social**. 2021. Disponível em: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/segundo_documento_ces_hidrogeno.pdf. Acesso em: 25 out. 2022.

CHRISTOFOLETTI, C.A. *et al.* Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. **Waste Manag**, São Paulo, v.33, n. 12, p. 2752-2761, dez. 2013.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis. **BiogásMap**. Panorama do biogás no Brasil. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiODc2NTlhOGItOTc2Ny00ZDc1LWl5MTMtYjYwZTRlYjFiOWQ3IiwidCI6ImMzOTg3ZmI3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWE4NGViNSJ9&pageName=ReportSection6ed365e9760a3c113b0d>. Acesso em: 29 set. 2022.

CIBIOGÁS. **Relatório de biogás e biometano do mercosul/ GAHB** – grupo ad hoc de biocombustíveis do mercosul, Foz do Iguaçu, v. 1, n.1, p. 60, 2017.

CNI. Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira.

Confederação Nacional da Indústria. Brasília, 2022. Disponível em:

<https://static.poder360.com.br/2022/08/CNI-hidrogenio-verde-sustentavel-13ago2022.pdf>.

Acesso em: 19 out. 2022.

COMO investir em biometano? Saiba mais sobre o combustível verde. **CIBiogás**, 2020.

Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/como-investir-em-biometano-saiba-mais-sobre-o-combustivel-verde/#:~:text=O%20biometano%20surge%20a%20partir,digest%C3%A3o%20anaer%C3%B3bia%20do%20material%20org%C3%A2nico>.

Acesso em: 15 out. 2022.

CONSTANT, M.; NAVEAU, H. **Biogas: End Use in the European Community**. Elsevier Science Publishing Co., New York, 1989.

CORDOBA propone usar biocombustibles em los autos oficiales. Insideevs, 2022. Disponível em:

<https://insideevs.com.ar/news/589411/cordoba-propone-biocombustibles-autos-oficiales/>.

Acesso em: 23 out. 2022.

CRUZ, J. C. *et al.* Manejo da cultura do milho. **Circular Técnica**, Sete Lagoas, nº 87, p. 12. dez. 2006.

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 (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2017.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. Ed. Wiley-VCH, 2008.

ENARGAS (2020). Informe anual 2020. **Ente Nacional Regulador Del Gas**. 2020.

Disponível em: <https://www.enargas.gob.ar/secciones/publicaciones/informes-anuales-de-balance-y-gestion/pdf/anuales/2020/informe-anual-2020.pdf>. Acesso em: 11 out. 2022.

EPE (2020). A indústria de gás natural na Argentina. **Empresa de Pesquisa Energética**.

2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-492/Nota%20Tecnica%20A%20Industria%20Gas%20Natural%20na%20Argentina_Panorama%20perspectivas%20e%20oportunidades%20para%20o%20Brasil_DPG_SPG.pdf.

Acesso em: 10 Set. 2022.

EPE (2020a). Demanda de gás natural nos mercados nacional e internacional 2020-2030.

Empresa de Pesquisa Energética. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-531/EPE,%202020%20-%20Nota%20T%C3%A9cnica%20Demanda%20de%20G%C3%A1s%20Natural%20vFinal.pdf>.

Acesso em: 08 out. 2022.

EPE (2020b). Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. **Empresa de Pesquisa Energética**.

2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>. Acesso em: 14 ago. 2022.

EPE (2021a). Cenários de Oferta de Etanol e Demanda do Ciclo Otto 2022 - 2031. **Empresa de Pesquisa Energética**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 14 ago. 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 (2021c). Plano Decenal de Expansão de Energia 2031. **Empresa de Pesquisa Energética**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>. Acesso em: 21 ago. 2022.

EPE (2021d). Etanol lignocelulósico ou de segunda geração – E2G. **Empresa de Pesquisa Energética**. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-628/FS-EPE-DPG-SDB-2021-01-E2G_PT.pdf. Acesso em: 14 out. 2022.

EPE (2022). Perspectivas para o Mercado Brasileiro de Combustíveis no Curto Prazo. **Empresa de Pesquisa Energética**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Paginas/Perspectivas-para-o-mercado-brasileiro-de-combustiveis-no-curto-prazo.aspx>. Acesso em: 05 out. 2022

ETANOL de milho no Brasil começou com a Usimat. **Cana Online**, 27 fev. 2018. Usinas. Disponível em: <http://www.canaonline.com.br/conteudo/etanol-de-milho-no-brasil-comecou-com-a-usimat.html>. Acesso em: 18 jun. 2022.

ETANOL: entenda o que é, para que serve e como é usado no Brasil. **Raízen**, 18 fev. 2022. Sustentabilidade. Disponível em: https://www.raizen.com.br/blog/etanol?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=g81z_cdq6taok_N2_raizen_blog_google_awareness&utm_content=cdq6taok_blog_google_search_awareness_interesses_cpc_search__etanol&gclid=Cj0KCQjwhY-aBhCUARIsALNIC04rNGKVQ5_5TfqxO7GLgVdO-4ZiMIAhssbPglKLI63-jbtG2nS90ogaAnOpEALw_wcB. Acesso em: 11 out. 2022.

FUESS, L.T., GARCIA, M.L. Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertirrigation. **J. Environ. Manag**, São Paulo, v. 145, p. 210-229, dez. 2014.

GALERA, V. Etanol de milho é alternativa sustentável de biocombustível e pode conquistar 20% do mercado. **União Nacional do Etanol de Milho**, 2021, Uol São Paulo. Disponível em: <https://etanoldemilho.com.br/2021/07/06/etanol-de-milho-e-alternativa-sustentavel-de-biocombustivel-e-pode-conquistar-20-do-mercado/>. Acesso em: 23 out. 2022.

GARLET, R. A. **Análise de desempenho de um motor ciclo Otto a biometano em comparação com gasolina e etanol**. 2022. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

GAUTO, M. A. *et al.* **Petróleo e gás: princípios de exploração, produção e refino**. 1 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

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.

GIZ. Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro. **Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH**. 2021. Disponível em: https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf. Acesso em: 22 out. 2022.

GRANBIO. **Bioflex I: produção de biocombustível**. Granbio. São Paulo, 2019. Disponível em: <http://www.granbio.com.br/conteudos/bioflex-biocombustiveis/>. Acesso em: 16 ago. 2022.

GRASSO, D. H. Bioetanol de 2ª generación en el INTA: comenzó el proyecto Babetreal-5. **INTA**, 24 fev. 2016. Noticia. Disponível em: <https://inta.gob.ar/noticias/bioetanol-de-2%C2%AA-generacion-en-el-inta-comenzo-el-proyecto-babetreal-5>. Acesso em: 14 out. 2022.

GREENE, P. Basics of biogas upgrading. **Biocycle**, 2018. Disponível em: <https://www.biocycle.net/basics-biogas-upgrading/>. Acesso em: 15 out. 2022.

GUTMAN, D. Biogas in Argentina: Turning an environmental Problem into a Solution. **IPS**, 2021. Disponível em: http://www.ipsnews.net/2021/05/biogas-argentina-turning-environmental-problem-solution/?utm_content=166382233&utm_medium=social&utm_source=twitter&hss_channel=tw-93695985. Acesso em: 28 set. 2022.

IEA. Hidrogênio na América Latina: de oportunidades no curto prazo à implantação em larga escala. International Energy Agency. Sumário Executivo, 2021. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/760f6626-19c4-42d3-b830-9d2a0d897323/IEA_HydrogeninLatinAmerica_ES_BrazilianPortuguese.pdf. Acesso em: 22 out. 2022.

INI, L. Adquieren en Paraguay terrenos para instalar una planta de producción de hidrogeno. **Pv Magazine**, 6 set. 2022. Disponível em: <https://www.pv-magazine-latam.com/2022/09/06/adquieren-en-paraguay-terrenos-para-instalar-una-planta-de-produccion-de-hidrogeno/>. Acesso em: 29 out. 2022.

KPMG. A Produção de Hidrogênio com Tecnologias Limpas para Acelerar a Transformação Energética na América Latina. **KPMG**. 2022. Disponível em: <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/br/pdf/2022/6/a-producao-de-hidrogenio-com-tecnologias-limpas.pdf>. Acesso em: 19 out. 2022.

LORENZI, B. R.; ANDRADE, T. N. O etanol de segunda geração no Brasil: políticas e redes sociotécnicas. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**. 2019, v. 34, n. 100, set. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcsoc/a/j5wbmgNHJcNh8YDM7L98Gzx/?lang=pt#>. Acesso em: 24 out. 2022.

LOVERA, L. *et al.* Situación energética del Paraguay. **Red Iberomasa**, Paraguai, p. 153-164, 2021.

MACHADO, D. O. **Análise de desempenho de um motor ciclo Otto com biogás**. 2014. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014.

MACHADO, L. O. Produção de milho no centro-oeste bate recorde. **Campo & Negócios Online**, 09 mai. 2022, Grãos. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/producao-de-milho-no-centro-oeste-bate-recorde/>. Acesso em: 23 out. 2022.

MAFACIOLLI, D. **Produção de biogás através do processo de digestão anaeróbia utilizando dejetos de aves de postura com suplementação de glicerina bruta**. 2012. 73 p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade do Vale do Taquari, Rio Grande do Sul, 2012.

MANSO, L. F. Brasil tem 27 novas plantas de biometano previstas para os próximos anos. **Epbr**, 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/brasil-tem-27-novas-plantas-de-biometano-previstas-para-os-proximos-anos/>. Acesso em: 17 out. 2022.

MAYDS. Segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional de la República Argentina. **Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible**, Argentina, 2020. Disponível em: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/segunda_contribucion_nacional_final_ok.pdf. Acesso em: 24 out. 2022.

MILANEZ, A. Y. *et al.* A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política. **BNDES - Biblioteca Digital**, n. 41, jun. 2014. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2496/1/RB%2041%20A%20produ%c3%a7%c3%a3o%20de%20etanol_P.pdf. Acesso em: 19 jun. 2022.

MILANEZ, A. Y. *et al.* De promessa à realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar - uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública. **BNDES Setorial**, n. 41, 2015.

MITSUHARA, A. T. **Revisão sobre o potencial de produção de etanol de segunda geração a partir da palha de cana-de-açúcar**. 2021. 44 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, Araraquara, 2021.

MOPC. Balance Energético Nacional 2021. **Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones**. Asunción, Paraguay, ago. 2022. Disponível em: <https://www.ssme.gov.py/vmme/pdf/balance2021/Balance%20Energ%C3%A9tico%20Nacional%202021%20-%20VFinal.pdf>. Acesso em: 16 out. 2022.

MOTOR flex: como funciona, cuidados na manutenção e outras dúvidas. **UOL**, 02 dez. 2020, Meu Carro. Disponível em: <https://www.uol.com.br/carros/faq/motor-flex-como-funciona-cuidados-na-manutencao-e-outras-duvidas.htm>. Acesso em: 05 nov. 2022.

MOTTA, M. Carro com kit gás tem IPVA reduzido, entenda mais. **Unigásgnv**, 2022. Disponível em: <https://unigasgnv.com.br/carro-com-kit-gas-tem-ipva-reduzido/>. Acesso em: 19 out. 2022.

NASSA, T. *et al.* No Chile, pela primeira vez, a geração por fontes renováveis ultrapassa os combustíveis fósseis. **Portal Solar**, 19 jan. 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-renovavel/no-chile-pela-primeira-vez-a-geracao-por-fontes-renovaveis-ultrapassa-os-combustiveis-fosseis.html>. Acesso em: 22 out. 2022.

OLIVEIRA, L.M.; VÁLDES SERRA, J.C.; MAGALHÃES, K.B. Estudo comparativo das diferentes tecnologias utilizadas para produção de etanol. *GeoAmbiente On-line*, Campus Jataí, n. 19, jul./dez. 2012.

ORLANDI, L. A.; NO, I. M.; CIBAU, M. F.; Geoposicionamiento estadístico sinérgico de una planta industrial de bioetanol lignocelulósico en argentina. **RIIYM - Revista Científica de Ingeniería Industrial y Mecánica**, Argentina, 2019, v. 4, n. 7, p. 14, dez. 2019.

PARAGUAI. Decreto nº 4562, de 11 de dezembro de 2015. Presidencia de la República del Paraguay, Ministerio de Industria y Comercio, p. 35

PARAGUAY invertirá 10 millones de dólares en tres plantas de producción de hidrógeno para facilitar la descarbonización del transporte. *Icex*, abr. 2021. Disponível em: <https://www.icex.es/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/paises/navegacion-principal/noticias/paraguay-plantas-hidrogeno-new2021880982.html?idPais=PY#:~:text=El%20proyecto%20de%20generaci%C3%B3n%20de,%20de%20abril%2C%20publica%20abc>. Acesso em: 29 out. 2022.

PERISSE, J. B. **Evolução do refino de petróleo no Brasil**. 2007. 160 p. Dissertação (Mestrado em Processos Químicos e Meio Ambiente) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

PETROBRAS. Gasolina - Informações técnicas. **Petrobras**. 2020. Disponível em: <https://petrobras.com.br/data/files/02/93/A0/4C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/manual-de-gasolina.pdf>. Acesso em: 26 set. 2022.

PETROPAR. Naftas. **Petróleos Paraguayos**. [20--]a. Disponível em: https://www.petropar.gov.py/?page_id=4156. Acesso em: 08 out. 2022.

PETROPAR. Planta Mauricio J. Troche. **Petróleos Paraguayos**. [20--]b. Disponível em: https://www.petropar.gov.py/?page_id=4242. Acesso em: 09 out. 2022.

PARAGUAI. Decreto nº 4562, de 11 de dezembro de 2015. Presidencia de la República del Paraguay, Ministerio de Industria y Comercio, p. 35

PARAGUAI. Lei nº 5444, de 13 de julho de 2015. Fomento de consumo de alcohol absoluto y alcohol carburante. Republica del Paraguay. Paraguai, 14 jul. 2015. Disponível em: <https://bacn.gov.py/archivos/4433/20151215142446.pdf>. Acesso em: 09 out. 2022.

PARAGUAY detalla plan de expansión de biocombustibles. **Bnamericas**, 15 out. 2021, Notícia. Disponível em: <https://www.bnamericas.com/es/noticias/paraguay-detalla-plan-de-expansion-de-biocombustibles>. Acesso em: 09 out. 2022.

PARAGUAY espera um récord en la producción de etanol. **JornalCana**, 01 fev. 2016. Disponível em: <https://jornalcana.com.br/biosugar-es/paraguay-espera-un-record-en-la-produccion-de-etanol/#:~:text=Seg%C3%BAAn%20el%20reporte%20del%20USDA,granos%20tambi%C3%A9n%20como%20materia%20prima>. Acesso em: 09 out. 2022

PERMINGEAT, H. Biocombustibles de segunda generación: un buen fichaje para el campo argentino. **Aapresid**, 24 ju. 2017. Disponível em: <https://www.aapresid.org.ar/blog/biocombustibles-de-segunda-generacion-un-buen-fichaje-para-el-campo-argentino/>. Acesso em: 14 out. 2022.

PICHELI, G. D. et al. O uso do hidrogênio em motores de combustão interna. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v. 5, n. 12, p.29041-29069, dez. 2019.

PNH2 – Programa Nacional do Hidrogênio: Proposta de Diretrizes. Ministério de Minas e Energia. Brasília, DF: PNH2, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogênioRelatriodiretrizes.pdf>. Acesso em: 22 out. 2022.

POMPERMAYER R.S., PAULA JR D.R. Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos. In: 3º ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, **Anais**, Setembro, 2000.

POSTOS da Argentina limitam quantidade de combustível para brasileiros que cruzam a fronteira. **G1**, 04 nov. 2021, RPC Foz do Iguaçu. Disponível em: <https://g1.globo.com/pr/oeste-sudoeste/noticia/2021/11/04/postos-da-argentina-limitam-quantidade-de-combustivel-para-brasileiros-que-cruzam-a-fronteira.ghtml>. Acesso em: 26 set. 2022.

POVEDA, R.M.M. **Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético**. 2014. 160 p. Dissertação (Pós-Graduação em Energia) - Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

PRASS, G. S. **Análise termodinâmica da injeção de hidrogênio em motores de combustão interna operando com etanol**. 2014. 43 p. Dissertação (Graduação em Engenharia Automotiva) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.

PRAUCHNER, J.M.; BRANDÃO, R. D.; JÚNIOR, A. F.; OLIVEIRA, S. C. Combustíveis Hidrocarbônicos Alternativos, com ênfase para os combustíveis sustentáveis para aviação. **Revista virtual de química**. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/RVq220822-a1.pdf>. Acesso em: 15 set. 2022.

RAÍZEN deve acelerar planos de etanol de segunda geração, diz CEO. **União Nacional da Bioenergia**, 25 mai. 2022. Diversas. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2022/05/25/raizen-deve-acelerar-planos-de-etanol-de-segunda-geracao-diz-ceo.html>. Acesso em: 13 out. 2022.

RAÍZEN quer produzir biogás em todas suas usinas de etanol em dez anos. **Nova Cana**, 9 mai. 2022. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/industria/usinas/raizen-produzir-biogas-todas-suas-usinas-etanol-dez-anos-090522>. Acesso em: 19 set. 2022.

RAMOS, V. R. **Análise técnica do uso de etanol em um motor de combustão interna para diferentes razões de compressão**. 2019. 64 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

SANTANA, M. Informe: Pronóstico de producción de etanol para 2021 em Argentina. **Republik**, 2020. Disponível em: <https://www.republik.com.ar/informe-pronostico-de-produccion-de-etanol-para-2021-en-argentina/>. Acesso em: 27 set. 2022

SANTOS, A. M. **Caracterização química da biomassa: Potencial da palha da cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração**. 2018. 63 p. Dissertação (Mestrado em Energia da Biomassa) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2018.

SANTOS, D. S. **Produção de etanol de segunda geração por *Zymomonas mobilis* naturalmente ocorrente e recombinante, empregando biomassa lignocelulósica**. 2012. 218 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2012.

SANTOS, L. M. **Otimização do sistema de fracionamento de uma unidade de processamento de gás natural**. 2016. 58 p. Monografia (Graduação em Engenharia Agroindustrial Agroquímica) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande do Sul, 2016.

SANTOS, P. H. **Panorama atual da produção de bioetanol no Brasil e no mundo**. 2020. 54 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

SERPA, E. A.; RANGEL, Y. P.; OLIVEIRA, B. F.; ALVARENGA, S. D.; SILVA, S. E. Avaliação da performance de um motor de combustão interna do ciclo Otto utilizando gasolina e uma mistura gasolina-etanol. **Perspectivas Online: Exatas & Engenharia**, v. 9, n. 26, p. 01-21, dez. 2019.

SOARES, P. A.; ROSSELL, C. V. **Conversão de celulose pela tecnologia Organosolv**. 3. vol. São Paulo: NAIPPE, 2007. 29 p.

TAXA zero do etanol importado deve ter pouco impacto, mas indústria do Brasil protesta. **Nova Cana**, 23 mar. 2022. Etanol: Importação. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/etanol/mercado/importacao/taxa-zero-etanol-importado-pouco-impacto-industria-brasil-protesta-230322>. Acesso em: 17 ago. 2022

UDOP – União Nacional da Bioenergia. **Udop**: entenda a importância do biocombustível, 2021. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2021/10/20/entenda-a-importancia-do-biocombustivel.html>. Acesso em: 05 out. 2022.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar. **Observatório da Cana**. 2021. Disponível em: <https://observatoriodacana.com.br/>. Acesso em: 14 ago. 2022

USDA – United States Departamento of Agriculture. **Biofuels Annual**: Argentina. Buenos Aires: USDA, 2020, 20 p. Disponível em: https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Buenos%20Aires_Argentina_07-27-2020. Acesso em: 08 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

VARELLA, C. A. **Histórico e desenvolvimento dos motores de combustão interna**. 2018. 4 p. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. [S.l.]. 2018. Disponível em: http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Aulas/historico_e_desenvolvimento_dos_motores.pdf. Acesso em: 5 jun. 2022.

VENDAS de etanol hidratado em 2021 foram as menores em cinco anos. **União Nacional da Bioenergia**, 01 fev. 2022. Diversos. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2022/02/01/vendas-de-etanol-hidratado-em-2021-foram-as-menores-em-cinco-anos.html>. Acesso em: 06 out. 2022.

VER mapa etanol de milho 2022. **Cana Viral**, 2022. Disponível em: <https://www.canaviral.com.br/ver-mapa-etanol-milho-2022/>. Acesso em: 23 out. 2022.

VIDAL, M. F. Produção e mercado de etanol. **Caderno Setorial ETENE**, n. 159, p. 11, abr. 2021.

VILELA, A. Paraguay producirá 450 kg diários de hidrógeno verde em 2023. **H2 Business News**, 10 ago. 2022, Hidrógeno. Disponível em: <https://h2businessnews.com/paraguay-producira-450-kg-diarios-de-hidrogeno-verde-en-2023/>. Acesso em: 29 out. 2022.
VMME. Hacia la Ruta del Hidrógeno Verde en Paraguay - Marco conceptual. **Viceministerio de Minas y Energías**. 2021. Disponível em: https://www.ssme.gov.py/vmme/pdf/H2/H2%20Marco_Conceptual_DIGITAL.pdf. Acesso em: 29 out. 2022.

VOLUME de etanol importado segue baixo e imposto de importação zero deve ter impacto mínimo nos preços. **G1**, 25 mar. 2022. Economia. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2022/03/25/volume-de-etanol-importado-segue-baixo-e-imposto-de-importacao-zero-deve-ter-impacto-minimo-nos-precos.ghtml>. Acesso em: 17 ago. 2022.

WANG, S.; JI, C.; ZHANG, B. A. Starting a spark-ignited engine with the gasoline-hydrogen mixture. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.36, p. 4461-4468, 2011.

Y-TEC. Consorcio H2AR: Resumen de resultados 2021. **YPF Tecnologia**. 2021. Disponível em: https://y-tec.com.ar/wp-content/uploads/2022/03/Informe-de-resultados-2021_web.pdf. Acesso em: 24 out. 2022.

YILMAZ, A. C.; ULUDAMAR, E.; AYDIN, K. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.35, p. 11366-11372, 2010.

ZHAO, H.; STONE, R.; ZHOU, L. Analysis of the particulate emissions and combustion performance of a direct injection spark ignition engine using hydrogen and gasoline mixtures. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.35, p. 4676-4686, 2010.