

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEMEC**

AMANDA BANDEIRA GRIGORIADIS

PEDRO AGUIAR DA SILVA

ORIENTADOR: PROF. ME. SYLVIO JOSE GOMES MAGRANI

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO
COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS LEVES NO BRASIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RIO DE JANEIRO

AGOSTO DE 2022

AMANDA BANDEIRA GRIGORIADIS

PEDRO AGUIAR DA SILVA

ORIENTADOR: PROF. ME. SYLVIO JOSE GOMES MAGRANI

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO
COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS LEVES NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do DEMEC, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Me. Sylvio Jose
Gomes Magrani

RIO DE JANEIRO

AGOSTO DE 2022

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

G857 Grigoriadis, Amanda Bandeira
Análise da utilização do hidrogênio como combustível em
veículos leves no Brasil / Amanda Bandeira Grigoriadis [e] Pedro
Aguiar da Silva. — 2022.
107f. : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2022.

Bibliografia : f. 102-107

Orientador: Sylvio Jose Gomes Magrani

1. Engenharia mecânica. 2. Hidrogênio. 3. Veículos - Brasil. 4.
Gases do efeito estufa. I. Silva, Pedro Aguiar da. II. Magrani, Sylvio
Jose Gomes. (Orient.). III. Título.

CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

RESUMO

GRIGORIADIS, Amanda Bandeira. SILVA, Pedro Aguiar. **ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS LEVES NO BRASIL.** 2022. 49 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro, 2022.

Os combustíveis fósseis são os recursos energéticos mais utilizados atualmente. A Primeira Revolução Industrial foi marcada pela utilização do carvão mineral como fonte de energia e, a partir de meados do século XIX na Escócia, foram desenvolvidas as primeiras técnicas para extração e refino do Petróleo. O “Ouro Negro” como assim era chamado, se tornou a fonte energética mais utilizada no mundo. Entretanto, tanto o carvão quanto o petróleo, são fontes não renováveis e os principais emissores de gases de efeito estufa (GEE). As discussões em torno dos impactos que essas duas fontes fósseis poderiam causar ao meio ambiente vêm ganhando força e, nos últimos anos, as fontes renováveis (eólica, hidráulica, solar e biomassa) entraram em pauta com o objetivo de serem alternativas limpas, diminuindo os impactos gerados pelas fontes atuais. Porém, há desafios devido à baixa atratividade econômica comparada às fontes fósseis, estilo de vida da população mundial, e características geográficas de muitos países que podem ser limitantes, que explica o porquê dessas alternativas ainda não serem utilizadas em larga escala. Em relação à substituição dos combustíveis para uso veicular, o hidrogênio se mostra uma alternativa com grande potencial. Apesar de ser o elemento com maior presença no planeta e com poder energético superior à gasolina, ainda não está sendo utilizado em larga escala devido aos desafios para a sua obtenção, armazenamento e distribuição. O Hidrogênio pode ser utilizado na queima direta, na célula de combustível e misturado aos combustíveis convencionais. Esse trabalho, a partir de uma pesquisa bibliográfica, irá apresentar informações referentes ao desafio da mudança da matriz energética mundial, a obtenção e utilização do hidrogênio como combustível, e os benefícios ambientais e tecnológicos que a sociedade poderá ter com a sua utilização.

Palavras-chave: Carvão Mineral; Petróleo; Hidrogênio; Gases de Efeito Estufa; Transição Energética.

ABSTRACT

Fossil fuels are the most common sources of energy today. The First Industrial Revolution was marked by the use of mineral coal as energy source but from the mid-19th century on this scenario started changing as the first techniques for extracting and refining oil were developed in Scotland. The “Black Gold” as it was called has become the most used energy source in the world. However, both coal and oil are non-renewable sources and the main emitters of greenhouse gases (GHG). Discussions around the impacts that these two fossil sources could cause to the environment have been increasing and in recent years, renewable sources (wind, hydraulic, solar and biomass) have come into the agenda with the aim of being clean alternatives able to reduce impacts generated by the current sources. Nevertheless, challenges are still on the way for these alternative energy sources to be used on a large scale, such as its low economic attractiveness when compared to fossil sources, lifestyle of the world population, and many countries geographic characteristics limitations. Regarding the replacement of fossil fuels for vehicular applications, hydrogen is an alternative with great potential. Despite of being the element with the largest presence on the planet and providing an energy power superior to gasoline, it is still not being large scale used due to challenges of obtaining, storing and distributing it. Hydrogen can be applied in direct combustion, in the fuel cell or mixed with conventional fuels. This report is constructed based on bibliographic researches to present information regarding the challenges behind changing the world energy matrix, obtaining and using hydrogen as fuel, and the environmental and technological benefits that society can have with its use.

Keywords: Mineral coal; Petroleum; Hydrogen; Greenhouse gases; Energy transition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética Mundial 2019 (IEA, 2021).....	16
Figura 2 - Emissões totais de CO ₂ por ano (Global Carbon Project, 2019)	17
Figura 3 - Variação na temperatura global média 1850 - 2020 (IPCC, 2021)	18
Figura 4 - Países que mais emitem CO ₂ através do Carvão no mundo (<i>Global Carbon Atlas</i> , 2021).....	19
Figura 5 - Emissões de CO ₂ nos três cenários (BP, 2020).....	21
Figura 6 - Matriz Energética Brasileira 2019 (BEN, 2021)	22
Figura 7 - Matriz Elétrica Brasileira 2020 (BEN, 2021)	23
Figura 8 - Geração de Energia Elétrica: Fontes não renováveis 2000-2020 (BEN, 2021)	24
Figura 9 - Oferta Interna de Energia no Brasil (%) (Ministério de Minas e Energia – MME, 2020).....	24
Figura 10 - Consumo de Energia nos Transportes no Brasil (BEN, 2021)	26
Figura 11 - Metas para diminuição das emissões de gases veiculares - PROCONVE (AEA, 2020).....	27
Figura 12 - Projeção da evolução de demanda por combustíveis no Brasil (AEA, 2020)	28
Figura 13 - Emissões mundiais no setor de transporte de 1990 a 2018 (IPCC, 2019).....	29
Figura 14 - Principais emissores mundiais no setor de Transporte (IPCC, 2019).....	30
Figura 15 - Emissão bruta de CO ₂ por setor no Brasil (SEEG, 2022)	31
Figura 16 - Emissões de CO ₂ por setor no Brasil (MME, 2020)	32
Figura 17 - Emissões de CO ₂ por fonte de energia no Brasil (MME, 2020)	32
Figura 18 - Emissão bruta de CO ₂ pela queima de combustíveis no Brasil (SEEG, 2022)	33
Figura 19 - Parcela do consumo final de energia no transporte por fonte de energia em diferentes cenários (<i>BP Statistical Review</i> , 2020).....	34
Figura 20 - Projeção da utilização do hidrogênio por uso até 2070 (EPE, 2022)	35
Figura 21 - Evolução da demanda Mundial de Hidrogênio (IEA, 2019)	36
Figura 22 - Linha do tempo das publicações das estratégias de vários países em relação à política do hidrogênio (Adaptado de CASTRO et al., 2021)	37
Figura 23 - Linha do tempo das iniciativas brasileiras para produção de hidrogênio (Nota Técnica Hidrogênio Turquesa, 2022)	38

Figura 24 - Rotas tecnológicas possíveis para a produção de hidrogênio como matéria-prima de amônia ou combustível fóssil (Adaptado de KPMG (2021); U.S. DOE (2020); SOUZA (2018)).....	39
Figura 25 - Principais vias de produção de hidrogênio com seus balanços energéticos e quantidades de produtos (GTM, 2021).....	41
Figura 26 - Eficiências típicas de conversão em processos de produção de hidrogênio (PNNL, 2020).....	41
Figura 27 - Classificação de hidrogênio em escala de cores (EPE, 2022)	42
Figura 28 - Projeção da evolução de custos de produção de hidrogênio (IRENA, 2019).....	43
Figura 29 - Desenho esquemático para eletrólise da água e obtenção do gás hidrogênio e oxigênio (SANTOS JÚNIOR, 2004).....	43
Figura 30 - Representação da reforma a vapor com remoção de CO ₂ por solventes (Adaptado de SOUZA (2018) e VELAZQUEZ ABAD e DODDS (2017)).....	46
Figura 31 - Desenho esquemático para Reforma do etanol e produção de hidrogênio (TORRES, 2009)	47
Figura 32 - Planta Integrada de Gaseificação de Carvão por ciclo combinado (STIEGEL e RAMENZAN, 2006)	49
Figura 33 - Fluxograma gaseificação de biomassa (MYERS, 2002)	50
Figura 34 - <i>Tube-trailer</i> para H ₂ (200 bar, capacidade aprox.: 22 m ³) (Linde, 2022).....	53
Figura 35 – <i>Cryogenic-trailer</i> para H ₂ (Praxair, 2014)	54
Figura 36 - Métodos de armazenagem de hidrogênio comercial (Anderson & Grönkvist, 2019)	57
Figura 37 - Estrutura de um motor de combustão interna de 4 tempos (WOLLMANN, 2013)	61
Figura 38 - Ciclo Otto 4 tempos (MAHLE, 2019)	62
Figura 39 - Gráfico da Razão de Equivalência para o Hidrogênio no motor a combustão interna (Alastair C. Lewis, 2021)	63
Figura 40 - Entrada do gás hidrogênio no ânodo (NETO, 2005)	66
Figura 41 - Separação do gás hidrogênio (NETO, 2005)	67
Figura 42 - Entrada do gás oxigênio no Cátodo (NETO, 2005).....	68
Figura 43 - Produto do processo (NETO, 2005)	68

Figura 44 - Revisão histórica das células de combustível (Ahmed Mohamed Elshekh, 2014; J.M. Andújar, 2009).....	69
Figura 45 - Célula de combustível do tipo PEMFC estacionária (BALLARD, 2013).....	71
Figura 46 - Diagrama simplificado de operação de uma PEMFC (TRINDADE, L. G., 2015)	72
Figura 47 - Mecanismo do sistema da Célula de Combustível de Óxido Sólido (Adaptado de Nissan, 2022).....	73
Figura 48 - Esquema do princípio de operação de uma DEFC (Marczynski, E.S., 2013).....	74
Figura 49 - Os mecanismos das reações e as espécies ativas das células de combustível diferentes (André Luis Lenz, por Automóveis Elétricos Blog, 2013).....	79
Figura 50 - Representação de uma Pilha a Combustível (FERRACIN & BIAGGIO, 2000)...	80
Figura 51 - Etapas de funcionamento de um protótipo à hidrogênio (KENSKI, 2016).....	82
Figura 52 - Toyota Mirai (Toyota, 2022)	83
Figura 53 - Principais componentes do Toyota Mirai (Toyota, 2015)	84
Figura 54 - Nissan e-NV200, (Nissan, 2016)	84
Figura 55 - Sistema Alternativo Nissan e-NV200 (Nissan e IPEN, 2016)	86
Figura 56 - Membros da Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio (IPHE Website, 2017).....	89
Figura 57 - Membros do Conselho do Hidrogênio (Hydrogen Council, 2018)	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Eliminação gradual do Carvão Mineral.....	20
Tabela 2 - Exemplos de sítios de estocagem subterrânea de hidrogênio.....	55
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos principais tipos de célula de combustível	77
Tabela 4 - Visão Geral das Estratégias Nacionais de Hidrogênio por Setores Prioritários.....	91
Tabela 5 - Comparação entre as células de combustível e as baterias	94
Tabela 6 - Comparação entre os motores elétrico e a combustão	95
Tabela 7 - Recomendações de incentivo aos sistemas de utilização do hidrogênio.....	96

LISTA DE ACRÔNIMOS

- GEE – Gases de efeito estufa**
- ABH2 - Associação Brasileira do Hidrogênio**
- AEA - Associação Brasileira de Engenharia Automotiva**
- AFC - Célula de Combustível Alcalina**
- ANP - Agência Nacional do Petróleo**
- BEN - Balanço Energético Nacional**
- CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**
- COP 26 - Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**
- CTCF - Comitê Técnico do Combustível do Futuro**
- DEFC - Célula de Combustível do tipo Etanol Direto**
- DMFC - Célula de Combustível do tipo Metanol Direto**
- EPBR - Agência de notícias especializada em política energética**
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética**
- FMI – Fundo Monetário Internacional**
- GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit**
- IEA - Agência Internacional de Energia**
- INPE - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação**
- IPCC - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas**
- IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares**
- IPHE - Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio**
- IRENA - Agência Internacional para as Energias Renováveis**
- MCFC - Célula de Combustível do tipo Carbonato Fundido**
- MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia**
- MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações**
- MME - Ministério de Minas e Energia**
- NUPHI - Pesquisa de Hidrogênio junto da hidrelétrica Itaipu**
- ONU - Organização Mundial das Nações Unidas**
- PAFC - Célula de Combustível do tipo Ácido Fosfórico**
- PEMFC - Célula de Combustível do tipo Membrana de Troca de Prótons**

PIB - Produto interno bruto

PNE - Plano Nacional de Energia

PNH2 - Plano Nacional do Hidrogênio

PNNL - Pacific Northwest National Laboratory

PNPB - Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel

PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

PROALCOOL - Programa Nacional do Álcool

PROCONVE - Programa de controle de emissões veiculares

ProH2 - Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa

SOFC - Célula de Combustível do tipo Óxido Sólido

UNECE - Comissão Econômica da ONU para a Europa

UNFCCC - Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas

PSA – *Pressure Swing Absortion* (Processo de purificação)

SMR – *Steam Methane Reforming* (Reforma a Vapor de Metano)

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

USP – Universidade de São Paulo

NO_x – Óxidos de Nitrogênio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2 MOTIVAÇÃO.....	14
1.3 OBJETIVO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA MUNDIAL	16
2.2 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA	22
2.3 O SETOR DE TRANSPORTES NA MATRIZ ENERGÉTICA	25
2.4. O SETOR DE TRANSPORTES VERSUS EMISSÃO DE CO ₂	29
2.5.O PAPEL DO HIDROGÊNIO NA MATRIZ ENERGÉTICA.....	34
2.6 OBTENÇÃO DO HIDROGÊNIO.....	38
2.6.1 Processos de Obtenção do Hidrogênio	43
2.6.1.1 Eletrólise da água e o hidrogênio verde.....	43
2.6.1.2 Reforma do gás natural e o hidrogênio cinza, o azul e o turquesa.	45
2.6.1.3 Reforma a vapor de etanol e o hidrogênio musgo	47
2.6.1.4 Gaseificação do carvão e o hidrogênio preto e marrom.	48
2.6.1.5 Gaseificação da biomassa.....	50
2.7 TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO DO HIDROGÊNIO	51
2.7.1 Transporte do Hidrogênio.....	51
2.7.1.1 Transporte do hidrogênio gasoso em tubulações.....	52

2.7.1.2 Transporte do hidrogênio gasoso via <i>tube-trailers</i>	53
2.7.1.3 Transporte do hidrogênio líquido via <i>cryogenic-trailers</i>	54
2.7.2 Armazenamento do Hidrogênio	55
2.7.2.1 Armazenamento de gás hidrogênio comprimido.....	57
2.7.2.2 Armazenamento de hidrogênio líquido	59
2.7.2.3 Armazenamento via adsorção de hidrogênio.....	59
2.7.2.4 Hidretos metálicos	59
2.7.2.5 Hidretos Químicos.....	60
2.8 USO DO HIDROGÊNIO EM VEÍCULOS	60
2.8.1 O Motor a Combustão Interna.....	60
2.8.2 O Uso do Hidrogênio no Motor a Combustão Interna	62
2.9 A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL.....	66
2.9.1 Célula de Combustível do tipo Membrana de Troca de Prótons (PEMFC).....	70
2.9.2 Célula de Combustível do tipo Óxido Sólido (SOFC)	72
2.9.3 Célula de Combustível do tipo Etanol Direto (DEFC).....	73
2.9.4 Célula de Combustível do tipo Metanol Direto (DMFC).....	74
2.9.5 Célula de Combustível do tipo Carbonato Fundido (MCFC).....	75
2.9.6 Célula de Combustível Alcalina (AFC).....	75
2.9.7 Célula de Combustível do tipo Ácido Fosfórico (PAFC).....	76
2.9.8 Comparativo entre as Células de Combustível.....	76

2.10 O USO DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL EM APLICAÇÕES AUTOMOBILÍSTICAS	79
3 DISCUSSÃO	88
3.1 O MERCADO ATUAL DO HIDROGÊNIO	88
3.2 ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA VEÍCULOS LEVES	93
3.3 PERSPECTIVAS FUTURAS PARA CONSOLIDAÇÃO DO HIDROGÊNIO NO BRASIL	95
4 CONCLUSÃO.....	99
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Fundamental para a produção de riqueza industrial, comercial e social, a energia proporciona igualmente conforto e mobilidade pessoal. No entanto, a sua produção e o seu consumo exercem uma pressão considerável sobre o ambiente: emissões de gases do efeito estufa (GEE) e de poluentes atmosféricos, uso dos solos, geração de resíduos e derrames de petróleo. Esta pressão contribui para as alterações climáticas, danifica ecossistemas naturais e o ambiente antropogênico, e tem efeitos adversos na saúde humana (Agência Europeia do Ambiente - AEA, 2021).

O petróleo, abundante e barato, ofereceu as condições básicas para o vertiginoso desenvolvimento da indústria automobilística, com seus fornecedores, e uma poderosa estrutura de distribuição e comercialização que se estende pelo mundo inteiro, em paralelo à indispensável rede de postos de combustíveis. Esse complexo industrial, que em poucas décadas consagrou o transporte individual e transformou o automóvel em suprema aspiração de posse das famílias, deu forma aos modernos sistemas de transporte e passou a responder por grande parte do PIB mundial (Campbell, 2005).

Junto a toda essa estrutura, há também uma quantidade considerável de impactos ambientais gerados pelo petróleo, como desde a procura por jazidas até o consumo dos produtos, muitas vezes com consequências significativas para o meio ambiente. Além de sua produção, o processo de refino e outros processos feitos na indústria petrolífera, geram vários outros tipos de contaminantes e poluentes atmosféricos (OLIVEIRA, 2007).

1.2 MOTIVAÇÃO

Atualmente, pode-se observar um crescimento no número de especialistas que relacionam o aumento da emissão de GEE, como por exemplo, o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), ao aumento da temperatura média anual da biosfera do planeta, fenômeno conhecido como aquecimento global. Este fator, associado ao aumento da demanda energética mundial, principalmente nos países em desenvolvimento como o Brasil, Índia e China, têm

incentivado a utilização de fontes renováveis de energia.

As projeções do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, em inglês) indicam que nos próximos 100 anos poderá haver um aumento da temperatura média global entre 1,8°C e 4,0°C, e um aumento do nível médio do mar entre 0,18m e 0,59m, o que pode afetar significativamente as atividades humanas e os ecossistemas terrestres. Segundo o Prof. Paul Crutzen, Prêmio Nobel de Química, em 1995, a possibilidade do rápido aumento na temperatura global define os últimos 200 anos a partir da Revolução Industrial como o “antropoceno”, isto é, uma era geológica dominada pelas transformações ambientais globais causadas pelas atividades humanas (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – INPE, 2021).

A utilização do hidrogênio como um vetor energético produzido a partir de biomassas e biocombustíveis ou utilizando a energia elétrica produzida a partir de fontes renováveis (hidráulica, eólica e solar fotovoltaica), transformando eletricidade em energia transportável e armazenável, vem sendo avaliada como uma das formas mais eficientes e ambientalmente interessantes, principalmente quando associada à utilização de células de combustível para sua conversão em energia elétrica. Esta característica do hidrogênio, que é a possibilidade de sua produção através de diversos insumos e processos, colocam-no como um elemento de integração entre diversas tecnologias e principalmente na área automobilística, como o combustível limpo para o futuro (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE, 2010).

1.3 OBJETIVO

Este trabalho irá abordar o uso do hidrogênio como combustível para veículos leves no Brasil, apresentando a motivação da transição energética em âmbito mundial, os desafios da sua obtenção e como este elemento vêm sendo objeto de estudo. As projeções indicam que o hidrogênio vai desempenhar um papel significativo na transição energética, sendo considerado uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis, podendo apresentar em 2050, entre 5 e 15% da demanda global de energia. (BP, 2020).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA MUNDIAL

A matriz energética mundial, como mostrado na Figura 1, é a representação do conjunto de fontes de energia, renováveis ou não, com potencial para suprir as demandas globais. Basicamente ela representa a oferta de energia, com sua devida origem, renovável ou não-renovável.

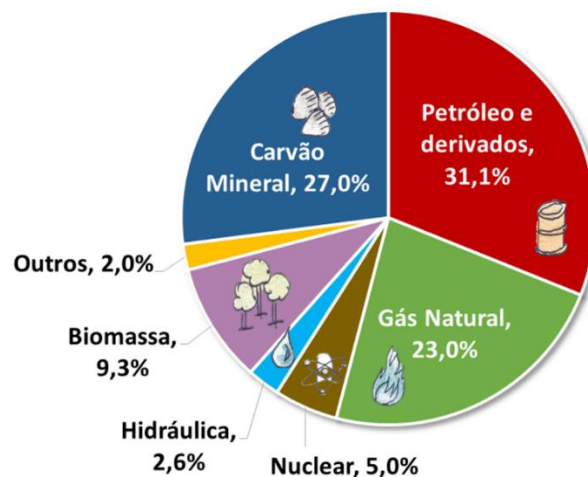


Figura 1 - Matriz Energética Mundial 2019 (IEA, 2021)

As fontes energéticas de origem fóssil como petróleo, carvão e gás natural, atualmente predominante na matriz energética global, são grandes emissores de gases de efeito estufa (GEE), Figura 2. A redução do uso do carvão e a utilização do gás natural como combustível de transição por se tratar de um combustível fóssil menos poluente, se apresenta como alternativa importante para a tentativa de se obter segurança energética. (*BP Statistical Review 2020*).

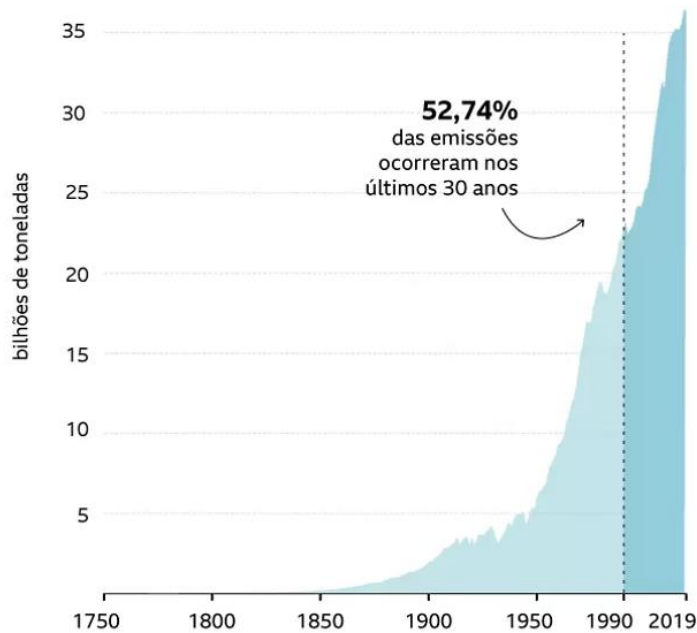


Figura 2 - Emissões totais de CO₂ por ano (Global Carbon Project, 2019)

A Primeira Revolução Industrial, século XVIII, marca o início de um processo de transformações progressivas que vêm ocorrendo em diversas áreas da humanidade. O advento da máquina a vapor, representa também o início de um aumento acelerado do consumo de combustíveis fósseis, sendo o carvão mineral o principal combustível durante muitos anos. Posteriormente, a utilização de derivados do petróleo como fonte energética para iluminação através da sua combustão em lâmpadas e conseguinte desenvolvimento de técnicas para o uso de seus derivados e do gás natural em motores de combustão, já no século XX, explicam a explosão no consumo de combustíveis fósseis.

A Segunda Revolução Industrial, a partir do final do século XIX, significou uma maior expansão da produção industrial, que deu início à emissão de gases de efeito estufa na atmosfera de forma considerável. Embora ainda exista muita controvérsia quanto a relevância das mudanças climáticas antropogênicas e sua relação com o aquecimento global, há fortes indícios de que o clima está mudando, pois as últimas décadas foram as mais quentes dos últimos anos (Figura 3).

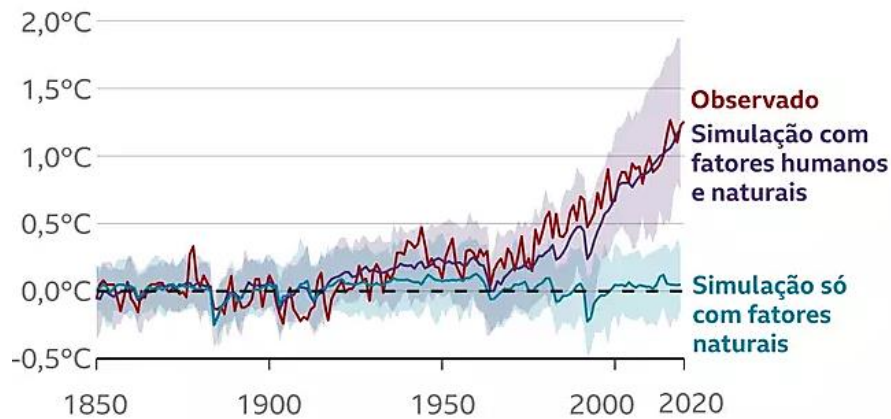


Figura 3 - Variação na temperatura global média 1850 - 2020 (IPCC, 2021)

Há um marco nos anos 90 que indica um interesse em comum de nações mundiais em deter o avanço do aquecimento global, o tratado ambiental internacional Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (*UNFCCC*, em inglês). Inicialmente, o objetivo do tratado foi criar limites obrigatórios para as emissões de GEE, incluindo protocolos como atualizações no passar dos anos. O Protocolo de Kyoto, realizado em 1997, uniu assinaturas de 84 países com o objetivo de controlar a emissão de GEE na atmosfera através de metas específicas, onde não houve uma meta geral para todas as partes, ou seja, países que compõem a União Europeia, por exemplo, estabeleceram meta de 8% na redução dos GEE, enquanto o Japão fixou esse percentual em 6% e os Estados Unidos com 7% quando aderiram ao acordo inicialmente (Agência Senado, 2022).

Dando continuidade ao interesse dos países em frear o aquecimento global, em 2015 ocorreu o Acordo de Paris, no qual foi a ocasião em que ficou estabelecido manter o aumento de temperatura global neste século bem abaixo de 2^oC e empregar esforços para limitar o aumento de temperatura em 1,5^oC com relação aos níveis pré-industriais, além de ampliar o financiamento em ação climática. Após isso, ocorreu em 2021 a COP 26 (Conferência das Partes), na cidade escocesa de Glasgow, que reuniu quase 200 países para acelerar a ação em direção aos objetivos do Acordo de Paris e da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Desta vez, os países precisaram entrar num acordo sobre prazos comuns da frequência das revisões e acompanhamento dos seus compromissos climáticos. Ou seja, Paris fixou a meta, limitando o aquecimento global para abaixo de dois graus, mas Glasgow é

a última chance de tornar isso realidade (Nações Unidas Brasil - ONU, 2022).

O acordo firmado na COP26 defende a necessidade de acelerar a transição energética para fontes limpas, pede para que os países acelerem os esforços para reduzir subsídios ineficientes a combustíveis fósseis e uso de carvão que não use tecnologia de compensação de emissões. Porém, por grande pressão de países que defendem a energia proveniente do carvão (Figura 4) e de grandes exportadores de petróleo, como Arábia Saudita, Índia, China e Rússia, o trecho sobre a “eliminação” do uso do carvão foi retirado durante as negociações e, no final das contas, foi esvaziado (BBC News Brasil, 2021).

Rank	Country	MtCO ₂
1	China	7421
2	India	1588
3	United States of America	889
4	Japan	403
5	South Africa	394
6	Russian Federation	357
7	Indonesia	301
8	South Korea	283
9	Germany	199
10	Kazakhstan	172

Figura 4 - Países que mais emitem CO₂ através do Carvão no mundo (Global Carbon Atlas, 2021)

Sendo assim, um grupo de 40 países incluindo Reino Unido, Canadá e Polônia, assinou um acordo paralelo para eliminar o uso de carvão mineral de sua matriz energética entre 2030 e 2040, mas a lista não incluiu os dois maiores emissores de GEE do mundo: China e Estados Unidos. Entretanto, há um consenso sobre a vitória do Acordo: o reconhecimento de todas as partes da necessidade de haver urgentemente uma transição de fontes fósseis para renováveis. (BBC, 2021).

O carvão é uma das principais fontes de poluição e tem papel importante nas mudanças do clima, respondendo por 44% das emissões mundiais de CO₂. As usinas térmicas a carvão também liberam dióxido de enxofre, óxido de nitrogênio, material particulado e mercúrio no ar e nos rios, córregos e lagos. Portanto, essas emissões não só degradam o meio ambiente, quanto também são prejudiciais à saúde humana. Abandonar o carvão é um processo que costuma levar décadas (Tabela 1), principalmente para países emergentes que

investiram fortemente nos últimos anos em geração termoelétrica baseada em carvão. O Reino Unido precisou de 46 anos para reduzir o consumo de carvão em 90% desde o pico de consumo registrado nos anos 1970. Em outros países, o uso do carvão diminuiu apenas 2,3% ao ano no período 1971–2017. Nesse ritmo, seriam necessários 43 anos para eliminar por completo o uso do carvão, a contar do ano do pico de consumo. (FMI – Fundo Monetário Internacional, 2019).

Tabela 1 - Eliminação gradual do Carvão Mineral

País	Ano	Redução em cinco anos (pontos percentuais)	Participação inicial (porcentagem)	Substituído principalmente por
Reino Unido	2018	-12,4	17,0	Gás natural
Israel	2018	-9,4	29,8	Gás natural
Grécia	2018	-8,9	29,9	Gás natural
Cazaquistão	2016	-8,1	51,3	Gás natural
Espanha	2010	-6,8	12,8	Vários
Austrália	2014	-6,5	39,7	Gás natural
Portugal	2010	-6,3	13,5	Gás natural
China	2017	-6,2	69,7	Vários
Dinamarca	2018	-5,9	15,7	Biocombustível
Ucrânia	2017	-5,8	35,8	Nuclear
Estados Unidos	2018	-5,3	19,6	Gás natural

Fonte: IEA - Agência Internacional de Energia, 2019

Acredita-se que o mundo caminha para um crescimento no uso de fontes renováveis de energia. Esta expectativa pode ser observada nos três cenários possíveis que compõem a versão 2020 do *BP Energy Outlook: Rapid, Net Zero e BAU*, que refletem uma queda no uso de fontes fósseis. A ideia não é interpretá-los como uma previsão do que provavelmente acontecerá, e sim uma representação de como a humanidade poderá caminhar nos próximos trinta anos, com relação à transição energética. As diferenças entre os cenários são motivadas por uma combinação de diferentes suposições sobre políticas econômicas, energéticas e conscientização social.

A Figura 5 ilustra a redução gradual das emissões de CO₂ em cada cenário:

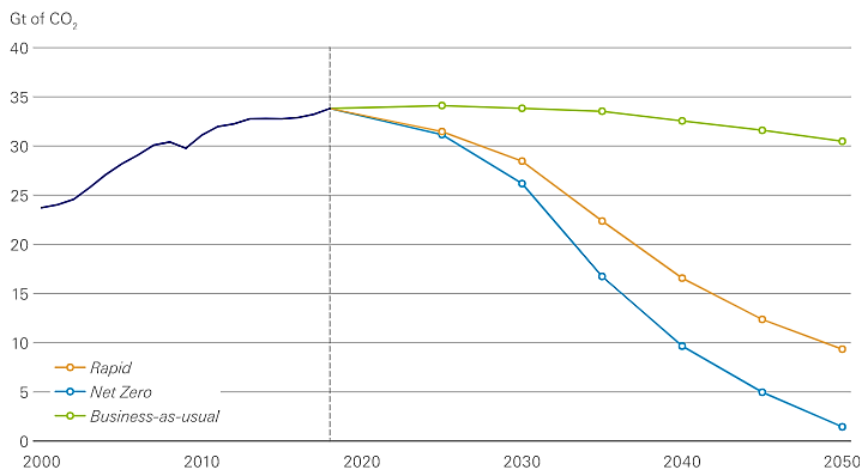


Figura 5 - Emissões de CO₂ nos três cenários (BP, 2020)

O Cenário de Transição Rápida (*Rapid*) postula uma série de medidas políticas, lideradas por um aumento significativo nos preços do carbono e apoiadas por medidas específicas do setor mais direcionadas, que fazem com que as emissões de carbono no uso de energia caiam cerca de 70% até 2050.

O Cenário Net Zero (*Net Zero*) é o mais agressivo e otimista, pois assume que as medidas de política incorporadas no *Rapid* são complementadas e reforçadas por mudanças significativas no comportamento e preferências da sociedade, que aceleram ainda mais a redução das emissões de carbono. As emissões globais de carbono no uso de energia caem mais de 95% até 2050.

O Cenário *Business-as-usual* (*BAU*) é o mais conservador, assumindo que as políticas governamentais, tecnologias e preferências sociais continuam a evoluir de maneira e velocidade vistas num passado recente. A continuação desse progresso, embora relativamente lento, significa que as emissões de carbono atinjam o pico em meados da década de 2020. Apesar desse pico, pouco avanço é feito em termos de redução das emissões de carbono do uso de energia, com emissões em 2050 menos de 10% abaixo dos níveis de 2018. (*BP Statistical Review, 2020*)

O grande desafio está sendo encontrar a viabilidade econômica em fontes de energia renováveis num período da humanidade em que a demanda de energia só tende a aumentar. A humanidade está cada vez mais dependente de um estilo de vida tecnológico que requer cada vez mais energia (GAUTO, M., 2021), enquanto é observado que o processo de produção

dessas energias também requer cada vez mais energia. Uma pesquisa recente constatou que 15,5% da energia produzida a partir do petróleo em todo o mundo já é necessária para manter a produção de todo o petróleo (DELANNOY, 2021). A perspectiva é de que este percentual aumente, podendo chegar a 25% até 2024 (EPBR, 2021).

2.2 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

No século XX, ocorreu no Brasil um intenso desenvolvimento econômico, que resultou na crescente demanda por energia para diversos setores da economia. O processo de industrialização acelerado, a instalação das primeiras usinas hidroelétricas de grande porte, o crescimento populacional e o aumento na taxa de urbanização propiciaram o desenvolvimento da sociedade. Durante todo esse período, ficou constatado que a demanda no setor energético caminhava junto com o crescimento econômico. Em meados dos anos 70, o consumo de energia era em torno de 70 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep). No início dos anos 2000, a demanda por energia quase triplicou, 190 milhões de tep, com crescimento demográfico em torno dos 170 milhões de pessoas. Atualmente, levando em consideração os 213,3 milhões de habitantes (GIVISIEZ e OLIVEIRA, 2018), a matriz energética brasileira está descrita na Figura 6 da seguinte forma:

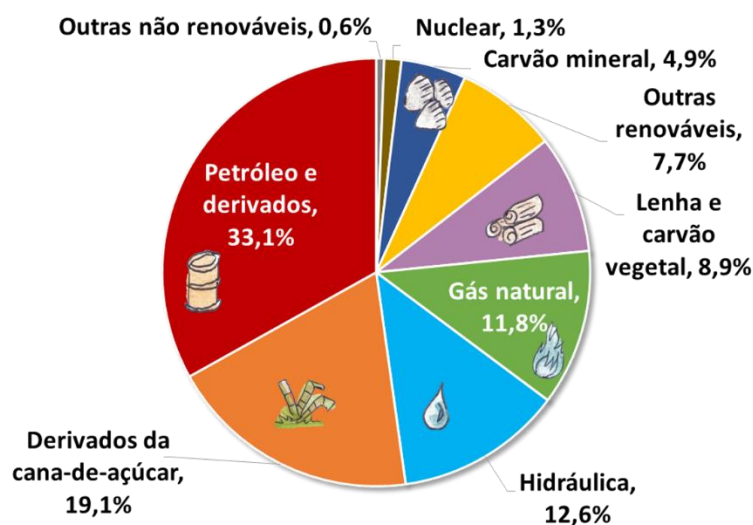


Figura 6 - Matriz Energética Brasileira 2019 (BEN, 2021)

Desde a década de 70 o Brasil vem investindo consistentemente em geração de energia elétrica a partir de fontes hidráulicas. Tal esforço lhe rendeu uma das matrizes energéticas e elétricas mais limpas do planeta. Enquanto o mundo tem, em média, 84% de energia primária gerada por fontes fósseis, o Brasil tem 48,4% do seu mix energético gerado por fontes renováveis. Em plena era de grande movimento pelo controle das emissões de GEE, a experiência brasileira com os biocombustíveis e com a coordenação do suprimento de energia a partir de diversas fontes, priorizando as de menor custo no momento, merece ser difundida e monetizada em benefício do país (*BP Statistical Review, 2020*).

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica, Figura 7, de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 65,2% da oferta interna. As fontes renováveis representam 84,8% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações. (BEN, 2021).

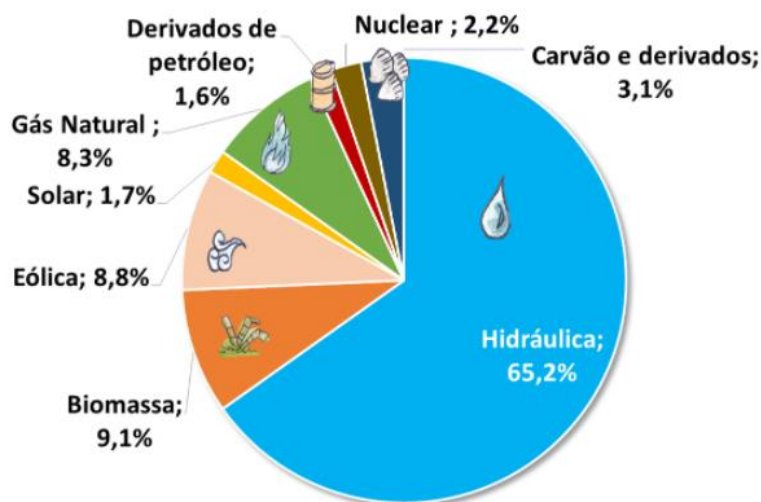


Figura 7 - Matriz Elétrica Brasileira 2020 (BEN, 2021)

A geração de energia elétrica no Brasil em centrais de serviço público e autoprodutores atingiu 621,2 TWh em 2020, resultado 0,8% inferior ao de 2019. É importante destacar, também, a evolução do gás natural (Figura 8, índice azul) que, ao longo dos últimos dez anos ao deslocar o óleo combustível e o diesel, contribuiu para minimizar as emissões provenientes da geração de eletricidade a partir de fontes não renováveis (BEN, 2021).

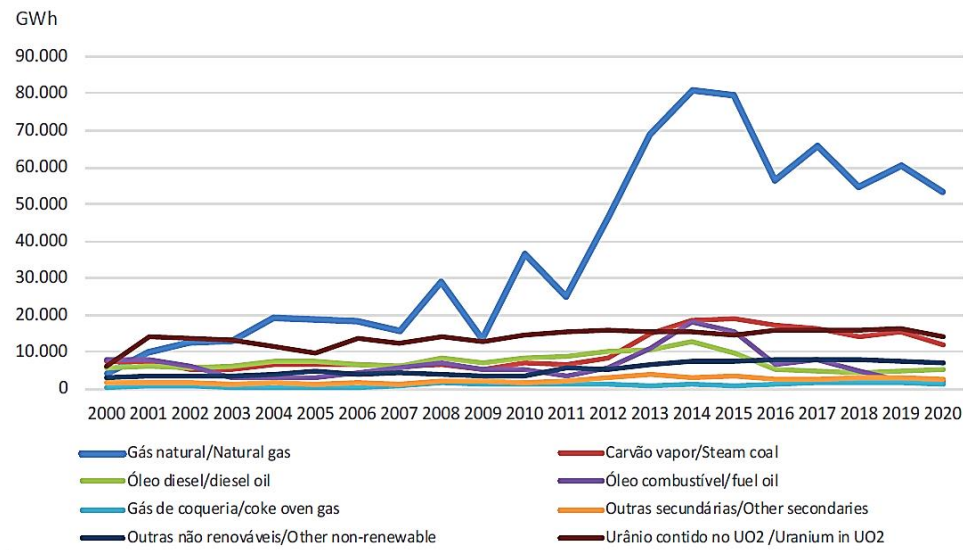


Figura 8 - Geração de Energia Elétrica: Fontes não renováveis 2000-2020 (BEN, 2021)

Em comparação com as potências mundiais, Figura 9, o Brasil também tem seu lugar de destaque, devido principalmente pelas características geográficas do país. Observa-se, no gráfico central, as vantagens comparativas da participação de 48,4% das fontes renováveis na matriz energética brasileira, contra apenas 12,1% nos países da OCDE (a maioria desenvolvidos), e de 14,9%, na média mundial. De 2019 para 2020, aumentaram a participação nas renováveis: etanol e bagaço 0,5 ponto percentual; biodiesel 0,2; solar 0,3 e “Outros” 0,3. Hidráulica recuou 0,8 ponto percentual e lenha/carvão vegetal recuou 0,5. (MME, 2020).

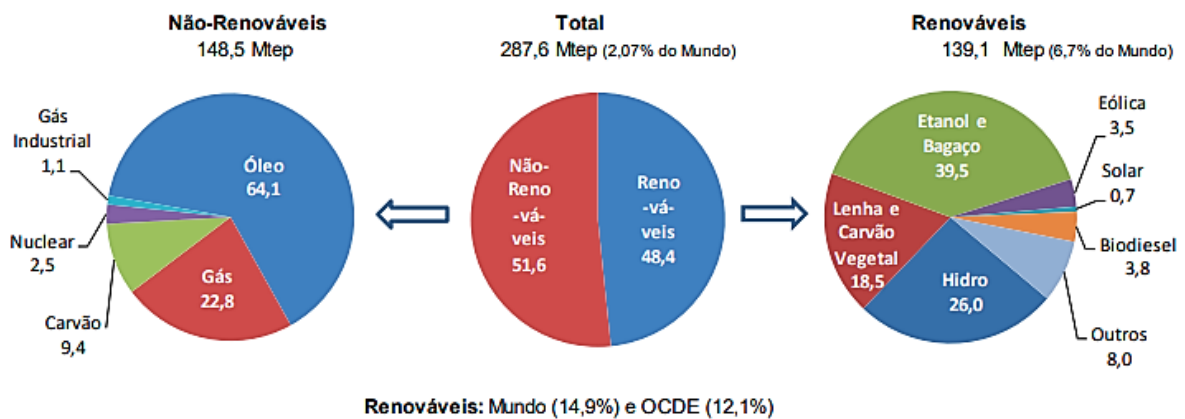


Figura 9 - Oferta Interna de Energia no Brasil (%) (Ministério de Minas e Energia – MME, 2020)

2.3 O SETOR DE TRANSPORTES NA MATRIZ ENERGÉTICA

De acordo com o *IPCC*, os meios de transportes geram quase um quarto de todas as emissões de gás de efeito estufa (ONU News, 2021). Este é um setor quase inteiramente dependente de combustíveis fósseis. A quantidade de emissões mais que dobrou desde a década de 70 e os veículos são responsáveis por cerca de 80% desse aumento dentro do setor de transportes (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – Pnuma, 2021).

Na COP 26, mais de 100 governos nacionais, incluindo o Brasil, cidades, estados e grandes empresas assinaram a declaração sobre Carros e Ônibus de Emissão Zero. O texto prevê encerrar a venda de motores de combustão interna até 2035 nos principais mercados e em 2040 em todo o mundo. Pelo menos 13 nações também se comprometeram a acabar com a venda de veículos pesados movidos a combustíveis fósseis até 2040 (ONU News, 2021). Já se observa atualmente uma grande procura por carros elétricos, pois dados revelam que as vendas desses veículos no continente europeu já representam 10% da fatia de mercado e, além disso, a Agência Internacional de Energia prevê que esta porcentagem poderá subir para 19% até 2025 (Comissão Econômica da ONU para a Europa – Unece, 2021).

Atualmente, o setor de transportes corresponde a 1/3 do consumo final de energia no Brasil. Além de sua relevância no consumo energético e dos diversos impactos ambientais associados, o setor de transportes tem ampla relevância e abrangência econômica e social, englobando aspectos como a mobilidade de pessoas, o escoamento da produção agrícola, a logística de exploração do pré-sal, o abastecimento de insumos para indústria em geral.

Historicamente, o transporte de carga e passageiros no Brasil tem sido primordialmente realizado pelo modo rodoviário, resultado de um modelo baseado no veículo individual (no caso de passageiros) e no caminhão (no caso de cargas). Como resultado, a evolução do consumo de energia no setor de transportes está fundamentalmente relacionada com as perspectivas de alteração da estrutura modal do transporte de cargas, os padrões da mobilidade urbana e a velocidade do processo de eletrificação da frota. (PNE, 2050).

A gasolina é o principal combustível, derivado de petróleo que é utilizada nos veículos leves. No Brasil, Figura 10, desde a instituição do Proálcool em 1975, o etanol vem sendo misturado à gasolina em percentuais crescentes e, no ano de 2020, em torno de 25%. Esse fato diferencia a gasolina brasileira da utilizada em outros países, especialmente quanto à

contribuição para redução da emissão dos GEE (AEA - Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, 2020).

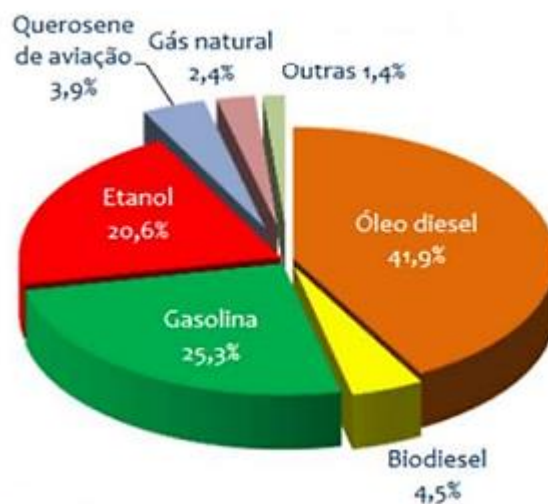


Figura 10 - Consumo de Energia nos Transportes no Brasil (BEN, 2021)

Nas últimas décadas, a evolução tecnológica dos motores, bem como seus combustíveis, tem sido orientada e acelerada por exigências cada vez maiores da sociedade para reduções dos impactos ambientais e aumento de eficiências, visando redução de poluição local, contenção do aquecimento global e conservação dos recursos naturais. Programas de controle da poluição do ar por veículos automotores vêm sendo adotados em vários países, com resultados bastante positivos ao longo dos anos. O Brasil está alinhado neste cenário mundial desde a implementação do PROCONVE (Programa de controle de emissões veiculares) em 1986. O programa prevê para os veículos leves: até 2022 a fase L7 (Figura 11), e até 2025 a fase L8. Somam-se ao PROCONVE os Programas de Governo ROTA 2030 (é uma remodelação do extinto programa de incentivo Inovar Auto) e RenovaBio, com o objetivo de aumento de eficiência e uso de combustíveis renováveis. Esses novos programas também estão orientando e estimulando o desenvolvimento tecnológico para o segmento automotivo, alinhado com os cenários, tendências e vocações do Brasil. (AEA - Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, 2020).

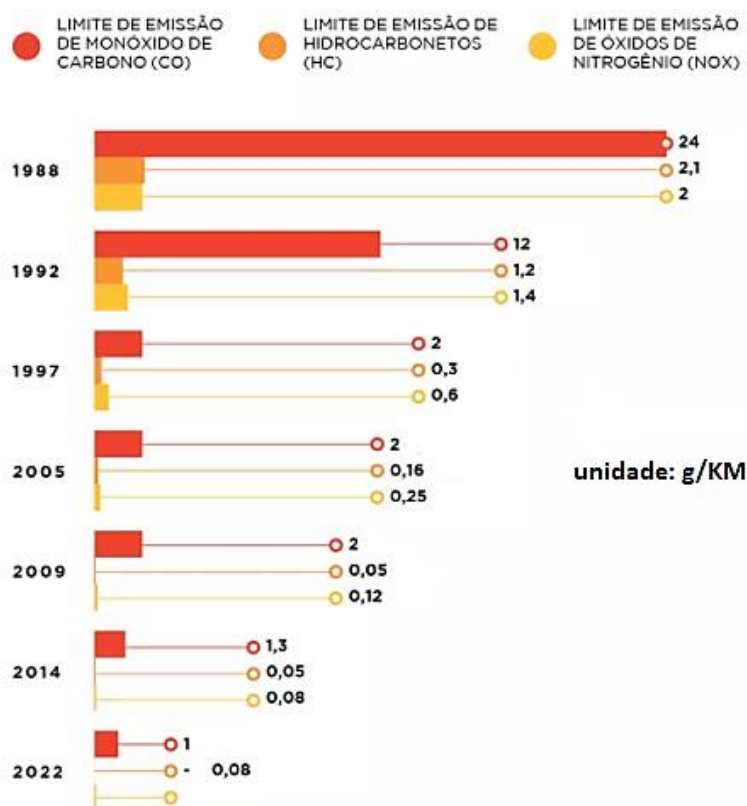


Figura 11 - Metas para diminuição das emissões de gases veiculares - PROCONVE (AEA, 2020)

Em relação aos avanços feitos e suas projeções, existe o destaque também na substituição do Diesel S500 pelo Diesel S10 que garantirá a redução efetiva de emissões gasosas, Figura 12, em especial do enxofre (S). O biodiesel, que já está implementado, vem cumprindo o papel de apoio na redução das emissões de carbono na matriz energética brasileira. O gás natural tem possibilidades de aplicação efetiva em função do aumento da disponibilidade nos próximos anos e pela já consolidada tecnologia para implementação em veículos. No entanto, ainda há restrições na distribuição deste combustível em função da falta de capilaridade na infraestrutura fora dos grandes centros, sendo considerado um combustível de transição para um transporte de baixo carbono. O Biogás, em especial o Biometano, tem grande disponibilidade em determinadas regiões, em função das atividades do agronegócio ou aterros sanitários, com infraestrutura de distribuição ainda muito pequena. Por fim, o Hidrogênio e *E-fuel* (combustíveis sintéticos) são rotas possíveis. No entanto, a necessidade de investimentos para viabilizar a aplicação em larga escala coloca esses combustíveis no cenário de longo prazo no Brasil. (AEA - Associação Brasileira de Engenharia Automotiva,

2020).

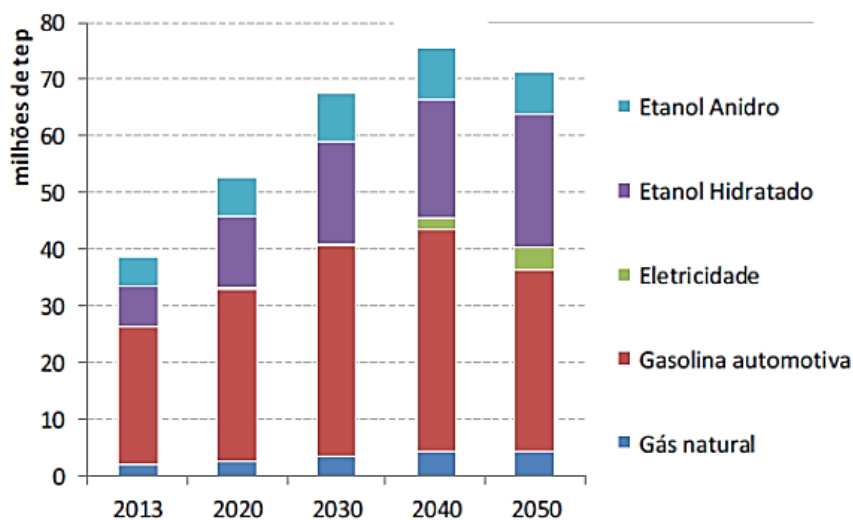


Figura 12 - Projeção da evolução de demanda por combustíveis no Brasil (AEA, 2020)

A utilização do H₂ pode ser realizada em diversos modais de transporte como veículos rodoviários leves e pesados, além de aplicações aéreas, ferroviárias e marítimas. No Brasil, existe viabilidade técnica para uso do H₂ inclusive com potencial de geração a partir da reforma do etanol como fonte de energia renovável, gerando assim o hidrogênio verde. O PROCaC foi o primeiro programa do Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) para o hidrogênio, em 2002, sendo atualmente denominado ProH₂ - Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio. Segundo estudo realizado pelo LabH₂, da Coppe/UFRJ em 2019, a introdução do hidrogênio na matriz energética brasileira, pode contribuir com 8% da energia total em 2050. (AEA - Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, 2020)

Os combustíveis sintéticos, *E-fuels*, são produzidos basicamente a partir do uso de energias renováveis como a solar ou a eólica, de CO₂ e de água em processos de conversão química para a geração de hidrocarbonetos líquidos que se caracterizam por possuírem as mesmas composições dos seus correspondentes de base fóssil. Eles possuem o potencial de se tornarem neutros em emissões de CO₂, criando um ciclo fechado com a captura do CO₂ emitido durante a sua combustão para ser reutilizado na produção de outros combustíveis sintéticos. No Brasil, a produção de combustíveis sintéticos é ainda incipiente e em escala de

laboratório, com algumas poucas iniciativas como o Projeto ProQR, em desenvolvimento por meio de uma cooperação entre o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), a Agência Nacional do Petróleo (ANP) e a *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), da Alemanha, para produção de bioquerosene de aviação (bioQAV). O objetivo é construir uma planta piloto de bioQAV no Centro de Pesquisas e Análises Tecnológicas da ANP (CPT/ANP), para produção e certificação do produto (AEA - Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, 2020).

2.4. O SETOR DE TRANSPORTES VERSUS EMISSÃO DE CO₂

As emissões do setor de transportes são uma das contribuidoras para as mudanças climáticas, Figura 13. Quanto ao tipo de transporte, 72% das emissões globais desse setor são provenientes de veículos rodoviários, os responsáveis por 80% do aumento das emissões entre 1970 e 2010 dentro desse setor. As emissões também aumentaram em outros meios, como aviação internacional, aviação doméstica e transporte marítimo internacional e costeiro. A principal exceção são as ferrovias: em grande parte alimentadas por eletricidade, as emissões ferroviárias realmente diminuíram. (IPCC, 2019).

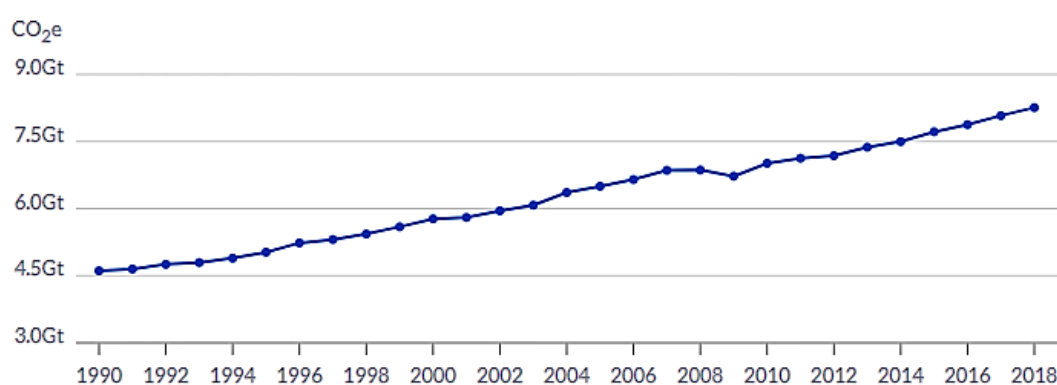


Figura 13 - Emissões mundiais no setor de transporte de 1990 a 2018 (IPCC, 2019)

Em termos geográficos, as emissões de transporte provêm principalmente de países de renda média alta e alta, Figura 14. Os 10 países com mais emissões de transporte em 2019 em ordem decrescente, são: Estados Unidos, China, Índia, Rússia, Japão, Canadá, Brasil,

Alemanha, México e Indonésia. Juntos, contribuíram com 53% das emissões globais nesse setor (IPCC, 2019).

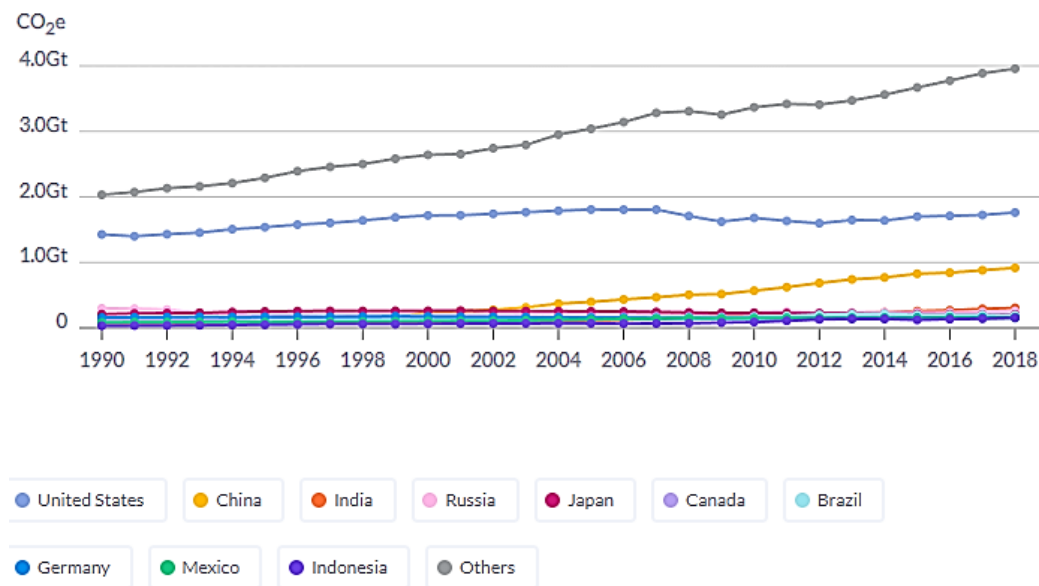


Figura 14 - Principais emissores mundiais no setor de Transporte (IPCC, 2019)

Estimativas da Agência Internacional de Energia indicam que o mundo reduziu as emissões de CO₂ em cerca de 2 bilhões de toneladas em 2020, devido à diminuição da demanda. As emissões totais recuaram de 33,4 bilhões de CO₂ em 2019 para algo próximo de 31,4 em 2020, uma baixa próxima de 6%, sendo que, os Estados Unidos e a China são responsáveis por pouco mais de 40% dessas emissões.

No Brasil, 58% das emissões de GEE são provenientes de queimadas e desmatamento, como indicado na Figura 15. (Ministério de Minas e Energia – MME, 2020)

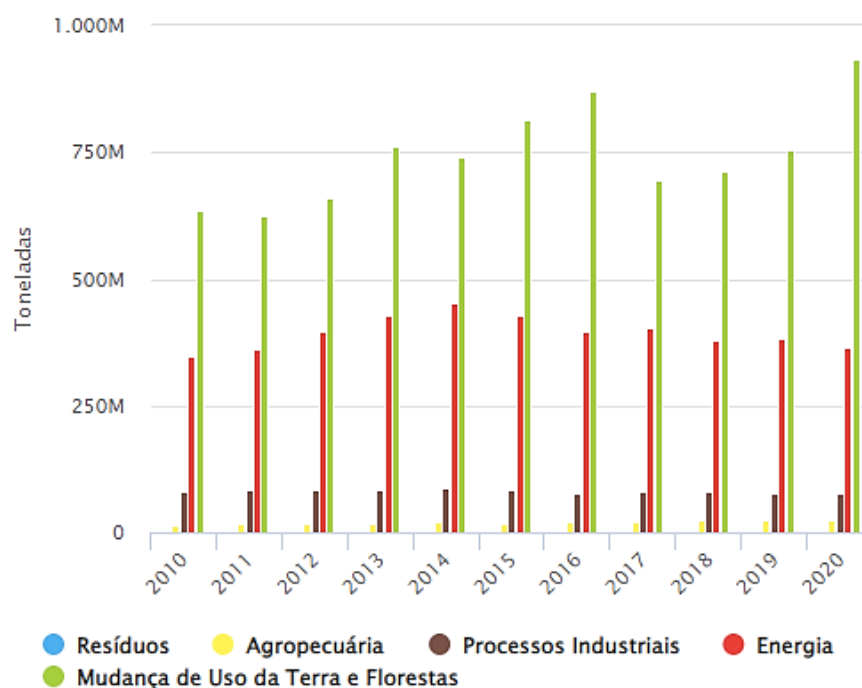


Figura 15 - Emissão bruta de CO₂ por setor no Brasil (SEEG, 2022)

Na contramão do mundo, que apresentou redução de 7% na média global de emissões de gases poluentes em 2020, o Brasil teve um aumento de 9,5% em plena pandemia de covid-19, segundo dados do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Houve a diminuição de emissões nos transportes de passageiros, além do consumo de combustível na aviação que caiu pela metade entre esses anos. Destaca-se que a demanda por gasolina e etanol também diminuiu de maneira relevante.

De acordo com as consequências advindas da pandemia da Covid-19, é apresentado nas Figuras 16 e 17 a diferença das taxas de emissão de CO₂ entre os anos 2019 e 2020, por setor e fonte de energia, respectivamente.

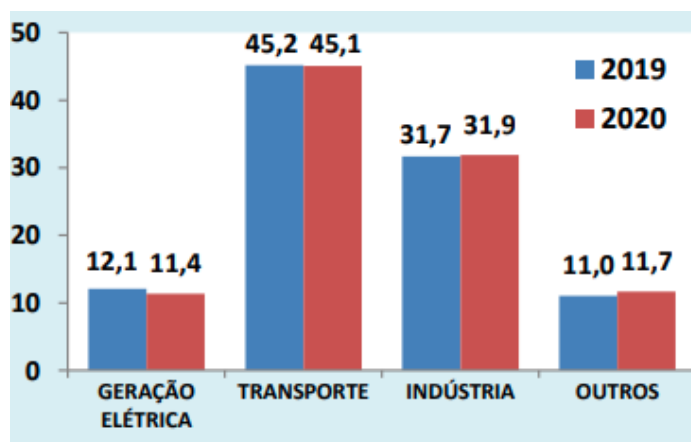


Figura 16 - Emissões de CO₂ por setor no Brasil (MME, 2020)

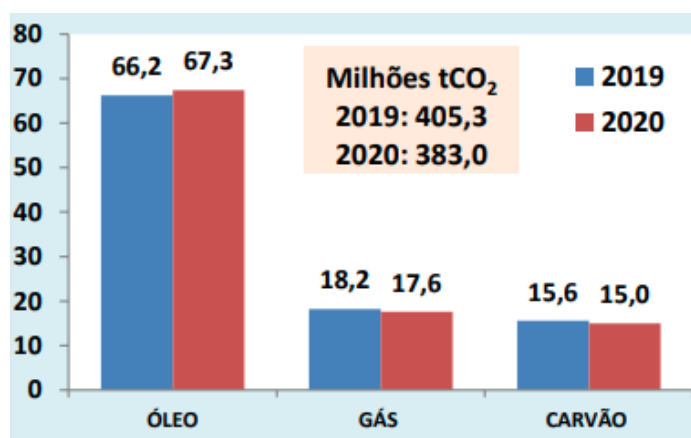


Figura 17 - Emissões de CO₂ por fonte de energia no Brasil (MME, 2020)

No âmbito dos combustíveis, o Brasil tem estabelecido diversas políticas de incentivo à produção e uso de biocombustíveis, como o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), o Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL), na década de 1970, e, mais recentemente, o RenovaBio. Desta forma, o país tem se colocado entre os maiores produtores e consumidores de biocombustíveis no mundo. Destaca-se que estas políticas foram impulsionadas por questões de segurança energética e ambientais relativas ao aquecimento global.

Abaixo, na Figura 18, é apresentada a emissão bruta de CO₂ pela queima de combustíveis no Brasil e como vem evoluindo desde 1990.

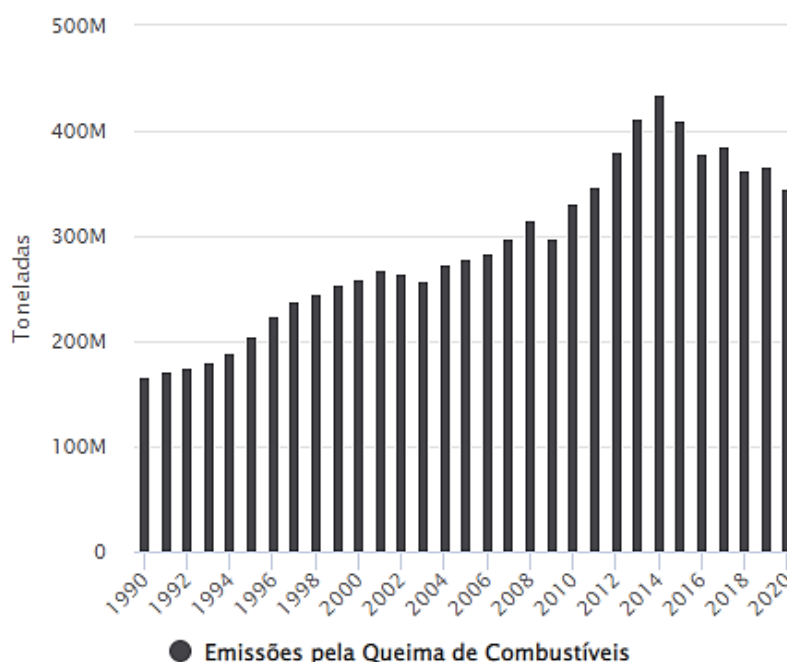


Figura 18 - Emissão bruta de CO₂ pela queima de combustíveis no Brasil (SEEG, 2022)

A demanda por transporte comercial e de passageiros aumenta fortemente no panorama da BP, com viagens rodoviárias e aéreas dobrando nos três cenários apresentados anteriormente. O crescimento da energia final necessária para abastecer esse aumento de viagens é compensado por ganhos significativos na eficiência dos veículos, especialmente em carros de passeio, caminhões e aviação.

Os ganhos em eficiência energética nos cenários, observados na Figura 19, são parcialmente mascarados por uma mudança na utilização do petróleo para o uso crescente de eletricidade e do hidrogênio nos transportes. A mudança para eletricidade e hidrogênio é mais evidenciada em *Rapid* e *Net Zero*, onde a energia primária geral aumenta cerca de 25% e 35%, respectivamente, até 2050. A energia primária no transporte aumenta quase 25% em *BAU*, com ganhos mais lentos em energia eficiência compensada por um deslocamento menor do petróleo. (*BP Statistical Review, 2020*).

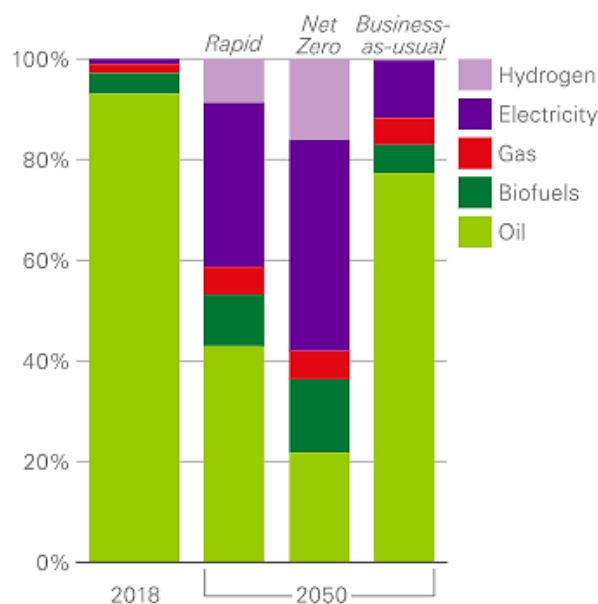


Figura 19 - Parcela do consumo final de energia no transporte por fonte de energia em diferentes cenários (BP Statistical Review, 2020)

A transição para o transporte de emissão zero é uma etapa crucial em direção a um futuro habitável. Para chegar lá, é necessário um conjunto abrangente de melhorias, que passam por combustíveis limpos, maior eficiência dos motores, a maneira como são construídas as cidades e como as pessoas e mercadorias são transportadas. A eletrificação é uma parte importante da solução para o desafio de reduzir as emissões do setor de transporte, pois elimina as emissões do escapamento e contribui para a oportunidade de descarbonizar a matriz elétrica. Até 2050, a participação da eletricidade no consumo de energia dos transportes precisa aumentar sete vezes em relação ao nível de 2011. No entanto, as emissões na geração e transmissão de eletricidade também devem ser levadas em consideração para decidir se a eletrificação faz sentido em um determinado local (IPCC, 2019).

2.5.O PAPEL DO HIDROGÊNIO NA MATRIZ ENERGÉTICA

A Agência Internacional de Energia (IEA, 2020a) prevê que a utilização do hidrogênio, limitada atualmente ao uso no refino de petróleo e como matéria-prima industrial, deve se multiplicar e ganhar novas aplicações, com destaque para a geração de energia, para o uso direto no setor de transportes e para a produção de combustíveis sintéticos e de amônia.

(EPE, 2022)

A utilização do hidrogênio como um vetor energético produzido a partir de biomassas e biocombustíveis (como o etanol) ou utilizando a energia elétrica produzida a partir de fontes renováveis, transformando eletricidade em energia transportável e armazenável, vem sendo avaliada como uma das formas mais eficientes e ambientalmente interessantes, principalmente quando associada à utilização de células de combustível para conversão do hidrogênio em energia elétrica. Esta característica do hidrogênio, que é a possibilidade de sua produção através de diversos insumos e processos, colocam-no como um elemento de integração entre diversas tecnologias. Com relação à utilização energética do hidrogênio, esta pode ocorrer em diversos sistemas e tecnologias, como observado abaixo na Figura 20. Há, atualmente, grande interesse nas aplicações veiculares e na geração distribuída de eletricidade (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE, 2010).

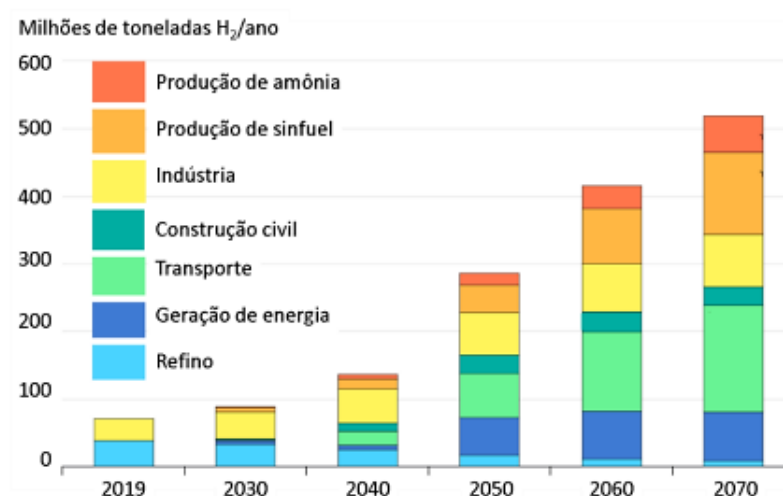


Figura 20 - Projeção da utilização do hidrogênio por uso até 2070 (EPE, 2022)

Notas: 1 - A produção de amônia refere-se à navegação marítima, enquanto para usos como matéria-prima está incorporada no segmento Indústria; 2 - Synfuel - combustível sintético. Fonte: Adaptado de IEA (2020a).

Em 2018, a demanda mundial por hidrogênio foi de 115 Mt (Milhões de toneladas), sendo 73 Mt de hidrogênio puro. A produção de amônia para fertilizante e o refino do petróleo responderam por 96% da demanda de hidrogênio puro. Já a demanda por hidrogênio

em misturas com outros gases foi de 42 Mt, sendo que a produção de metanol respondeu por 29%, a redução direta na indústria do aço respondeu por 7%, e o restante em outros usos diversos (IEA - Agência Internacional de Energia, 2019).

A Figura 21, mostra a evolução da demanda de hidrogênio puro e em mistura com outros gases, por aplicação.

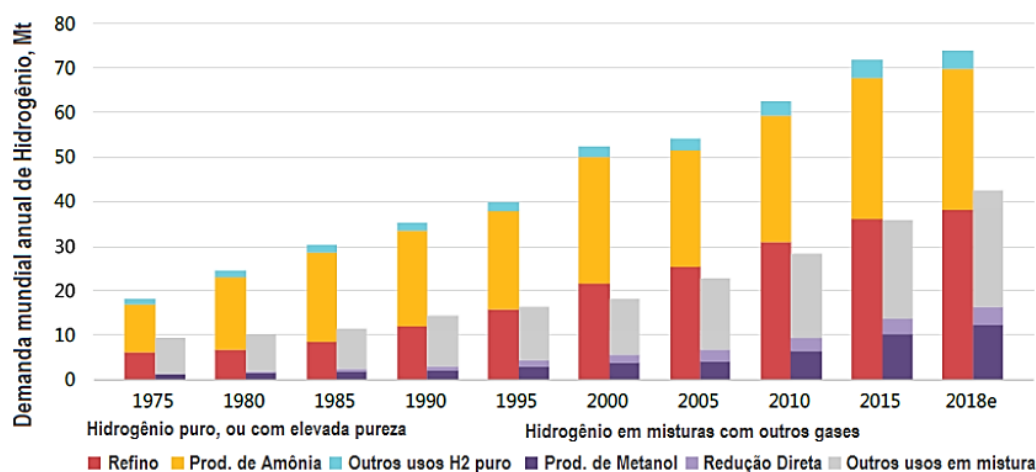


Figura 21 - Evolução da demanda Mundial de Hidrogênio (IEA, 2019)

No refino, o hidrogênio é utilizado tanto no hidrocrackeamento de correntes de petróleo para a obtenção de maiores rendimentos em derivados mais nobres (leves e médios), quanto no hidrotratamento para a especificação de combustíveis (particularmente na remoção de enxofre). A demanda de hidrogênio nas refinarias cresceu nas últimas décadas à medida em que houve a diminuição da produção de óleo combustível nas refinarias (perda de mercado para o gás natural) e o aumento na utilização dos derivados leves e médios (maior crescimento dos mercados de gasolina, óleo diesel e QAV – querosene de aviação). Somado com as regulações ambientais mais severas para poluentes locais (SOx, NOx, metais, etc.), as refinarias se sentiram obrigadas a aumentar a qualidade dos derivados de petróleo, removendo contaminantes para enquadrar os combustíveis nas normas de especificação (EPE, 2021).

A maior parte da produção de hidrogênio até 2050 será uma combinação de hidrogênio verde e azul. O hidrogênio verde é feito por eletrólise usando energia renovável; o hidrogênio azul é extraído do gás natural (ou carvão) e o carbono deslocado é capturado e armazenado (CCUS).

A capacidade de muitos países de produzir hidrogênio verde ou azul, combinada com custos de transporte relativamente altos, significa que a maior parte do hidrogênio será produzida relativamente localmente, com uma mistura de hidrogênio azul e verde dependendo das condições locais. Em 2050, mais de 95% do hidrogênio em *Rapid* e *Net Zero* será de hidrogênio verde e azul em quantidades praticamente iguais. O restante virá de instalações herdadas que produzem hidrogênio usando gás natural ou carvão sem CCUS (o chamado hidrogênio cinza) (BP Statistical Review, 2020).

Cada país apresenta um determinado ponto de partida para implementar seu mercado de hidrogênio. Ao longo dos anos vários programas foram lançados com o objetivo de consolidar as redes de pesquisa e desenvolvimento em energia do hidrogênio, e promover estudos sobre o potencial do hidrogênio como vetor energético. O Ministério das Minas e Energias do Brasil lançou em 2021 o PNH₂ para definir um conjunto de ações que facilite o desenvolvimento conjunto de três pilares fundamentais para o sucesso do desenvolvimento de uma economia do hidrogênio: políticas públicas, tecnologia e mercado (MME, 2021).

A Figura 22 apresenta uma linha do tempo com a evolução e o lançamento das estratégias de cada país para a estruturação da economia do hidrogênio nos setores de transporte, indústria, petroquímica e elétrico (Nota Técnica Hidrogênio Turquesa, 2022).

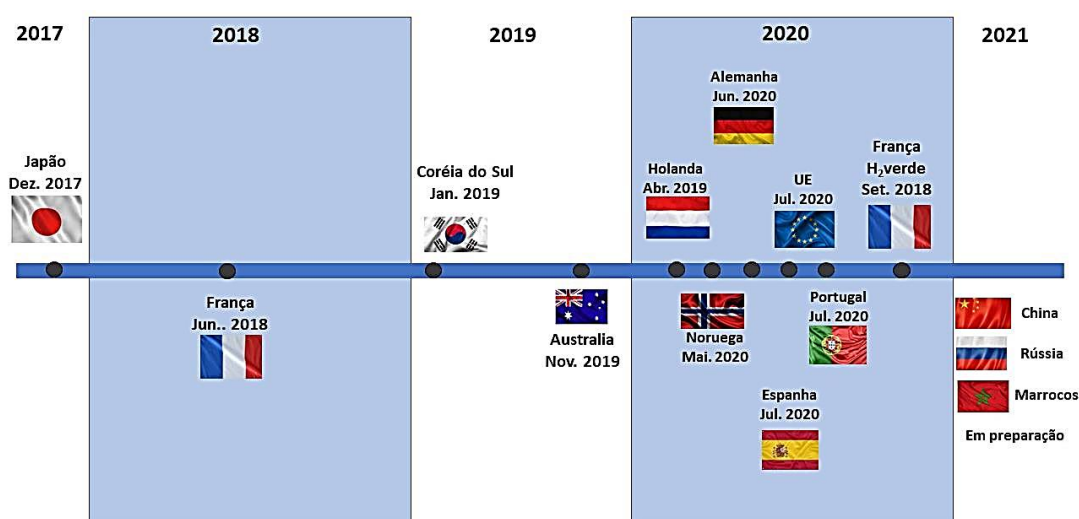


Figura 22 - Linha do tempo das publicações das estratégias de vários países em relação à política do hidrogênio (Adaptado de CASTRO et al., 2021)

No que se refere ao Brasil, políticas públicas voltadas ao desenvolvimento da

Economia do Hidrogênio vêm sendo desenhadas desde 1975, como observado na Figura 23.

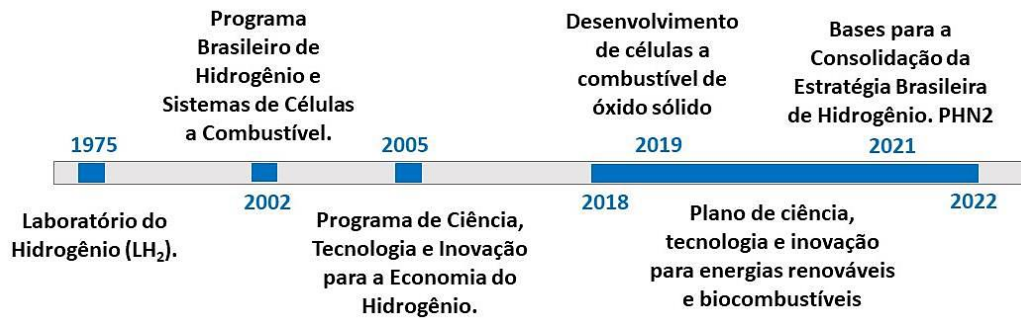


Figura 23 - Linha do tempo das iniciativas brasileiras para produção de hidrogênio (Nota Técnica Hidrogênio Turquesa, 2022)

A expectativa é de crescimento significativo do mercado mundial de hidrogênio, podendo atingir valores de até US\$ 200 bilhões nos próximos anos, impulsionado pela perspectiva de uso do hidrogênio como vetor necessário para viabilizar a descarbonização profunda da economia mundial, requerida para a execução das metas do Acordo de Paris no horizonte 2050 (EPE, 2021).

2.6 OBTENÇÃO DO HIDROGÊNIO

O elemento químico Hidrogênio, cuja sigla é H, está posicionado na família IA da Tabela Periódica. Suas propriedades físicas foram estudadas pela primeira vez no ano de 1766 pelo químico e físico inglês Henry Cavendish, depois que o químico Robert Boyle produziu um gás inflamável a partir de reações com metais no ano de 1670. Em 1773, o químico francês Antoine Lavoisier realizou experimentos semelhantes aos de Cavendish e forneceu o nome Hidrogênio a esse elemento.

Em relação as suas características podem-se destacar:

- Número Atômico (Z): 1;
- Massa Molecular: 2,0158 g/mol;
- Estado Físico encontrado na natureza: Gasoso (T = 298K);
- Ponto de Fusão (PF): 14,025 K;
- Ponto de Ebulição (PE): 20,268 K.

Além disso, apresenta pequena capacidade de dissociação quando está na sua forma molecular, sendo quase insolúvel em água. Em condições normais, é pouco reativo, além de ser um forte agente redutor (Rifkin, 2003).

O hidrogênio é o elemento mais abundante do universo; entretanto, raramente é encontrado em sua forma elementar na Terra, onde deve ser produzido a partir de uma matéria-prima contendo-o, mediante o consumo de energia (EPE, 2021).

A obtenção de hidrogênio pode se dar a partir de diversas matérias-primas, de ocorrências naturais (H_2 geológico) a processos físico-químicos ou bioquímicos, de modo que os processos produtivos para a sua obtenção podem ser divididos em 3 classes, cujos principais pontos de destaque podem ser observados na Figura 24: produção através de decomposição da água; produção a partir de fontes renováveis; e produção a partir de combustíveis fósseis.

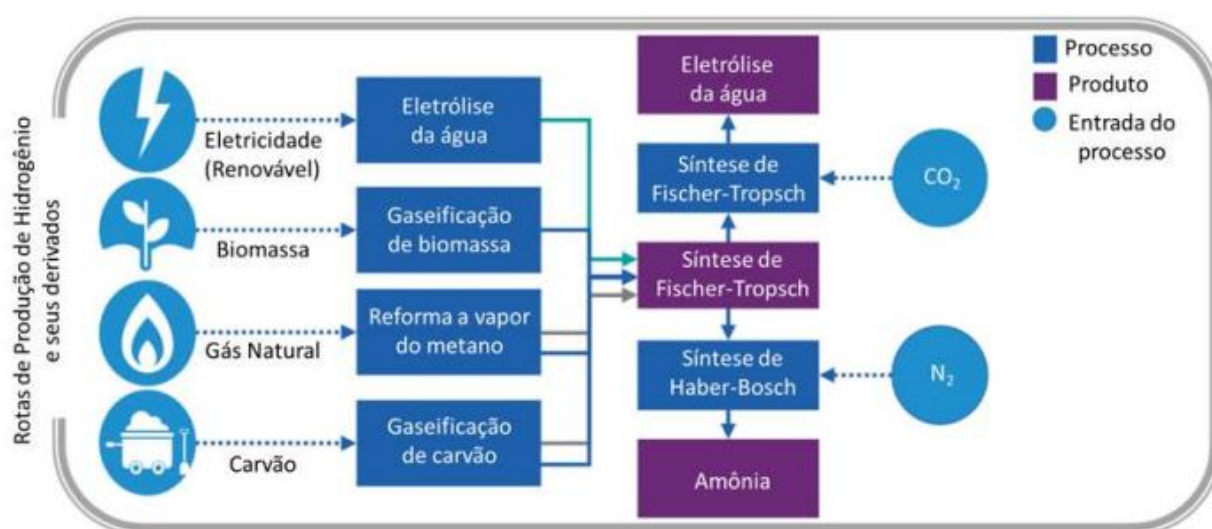


Figura 24 - Rotas tecnológicas possíveis para a produção de hidrogênio como matéria-prima de amônia ou combustível fóssil (Adaptado de KPMG (2021); U.S. DOE (2020); SOUZA (2018))

A produção de hidrogênio através de combustíveis fósseis apresenta-se como o principal processo para obtenção deste energético atualmente. O gás natural é a principal fonte utilizada, respondendo por aproximadamente 75% da produção mundial de hidrogênio, sendo seguido pelo carvão, o qual responde por uma participação de 23%. Por fim, a produção de hidrogênio restante (aproximadamente 2%) é produzida por utilização de óleo, eletricidade e, em menor grau, biomassa (IEA, 2019; SOUZA, 2018).

Tanto a utilização de combustíveis fósseis quanto de biomassa para a produção de hidrogênio acaba por gerar emissões de dióxido de carbono (CO_2). No entanto, nos processos a partir de biomassa, esse CO_2 gerado é capturado pelas plantas para seu crescimento e produção desta matéria-prima, tornando o processo neutro em carbono, diferentemente dos processos utilizando combustíveis fósseis (SOUZA, 2018). Outra possibilidade para neutralização do CO_2 gerado é sua captura e armazenamento, o que no caso da biomassa possibilitaria que o processo fosse, inclusive, negativo em carbono, ou seja, captura de CO_2 maior do que a geração ao longo do ciclo de vida (Nota Técnica Hidrogênio Cinza – EPE, 2022)

A produção de hidrogênio a partir da água engloba uma série de tecnologias disponíveis, sendo a eletrólise da água a mais comum e de utilização mais difundida. Já a produção a partir de biomassa se refere à obtenção de hidrogênio a partir de processos nos quais são utilizados sistemas biológicos, ou processos nos quais são empregados, como matéria-prima, qualquer tipo de matéria orgânica renovável de origem vegetal, animal ou procedente da transformação natural ou artificial dela. Os processos biológicos envolvem a utilização de microrganismos capazes de produzir o H_2 durante seus processos metabólicos. Já os processos que se utilizam da biomassa como matéria-prima envolvem transformações químicas e/ou termoquímicas deste material carbonáceo, produzindo H_2 além de diversos outros produtos: CO , carbono sólido (C), CO_2 , dentre outros (SOUZA, 2018).

A Figura 25 ilustra as principais vias de produção de hidrogênio com seus balanços energéticos, consumo de água e quantidades de produtos gerados. Esta figura foi elaborada (traduzida e modificada) a partir de GTM, 2021 (Nota Técnica Hidrogênio Turquesa, 2022)

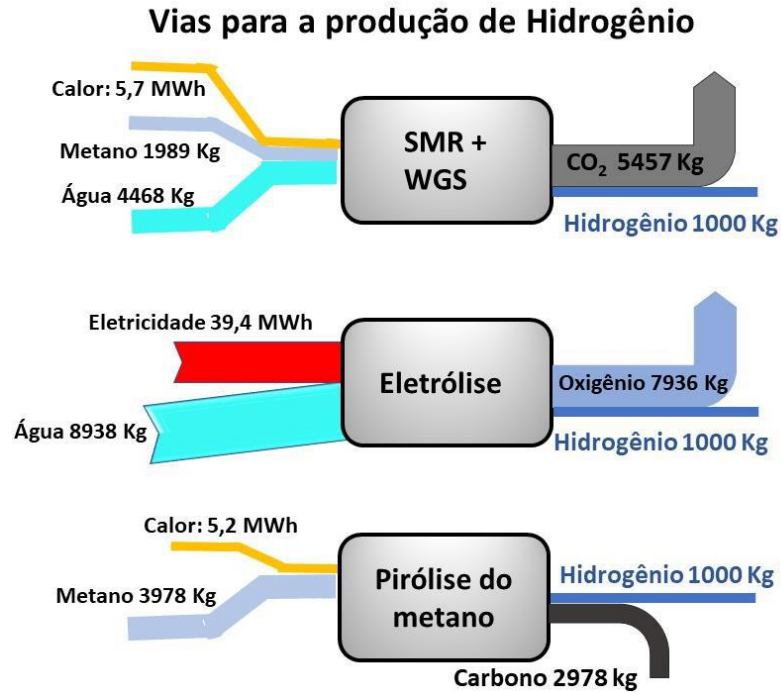


Figura 25 - Principais vias de produção de hidrogênio com seus balanços energéticos e quantidades de produtos (GTM, 2021)

Nota: Reforma a vapor do metano (SMR, em inglês)

A Figura 26, abaixo, indica as diferenças percentuais de eficiência típica de conversão para cada processo de produção de hidrogênio.

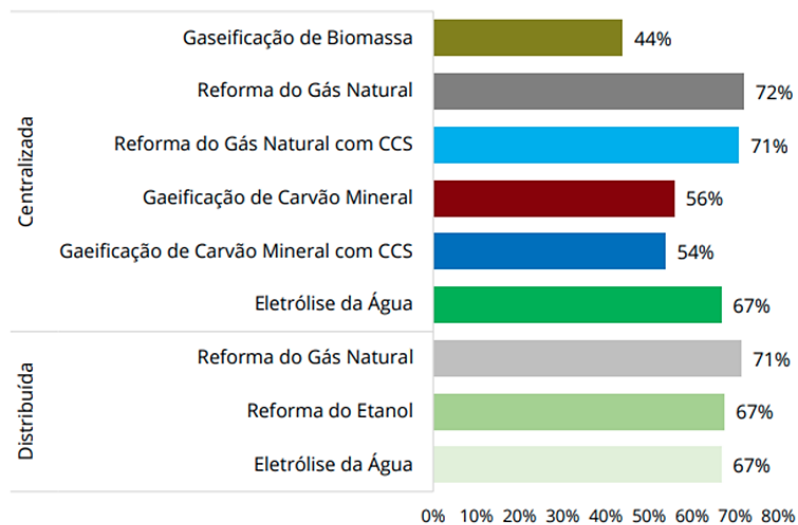


Figura 26 - Eficiências típicas de conversão em processos de produção de hidrogênio (PNNL, 2020)

A separação do hidrogênio a partir da sua forma natural para ser utilizado como combustível, necessita de um processo que utiliza grande quantidade de energia. Dentre as possibilidades de processos, observa-se na Figura 27 que se diferenciam pela sua origem e são classificados da seguinte forma:

Cor	Resumo do processo de produção do hidrogênio
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito ¹) sem CCUS ²
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha ³) sem CCUS
Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
Turquesa	Pirólise do metano ⁴ sem gerar CO ₂
Verde	Eletrólise da água com energia de fontes renováveis (eólica/solar)
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis com ou sem CCUS
Rosa	Fonte de energia nuclear
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes
Branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico

Notas: 1 - Dos tipos menos ricos para os mais ricos em carbono: turfa, linhito, hulha e antracito, este último possui mais de 86% de carbono 2 - CCUS - *Carbon Capture, Utilization and Storage*. 3 - A hulha possui entre 69 e 86% de carbono 4 - Entende-se pirólise de metano como pirólise de gás natural, visto que este é o principal componente do gás natural.

Figura 27 - Classificação de hidrogênio em escala de cores (EPE, 2022)

Um estudo da IRENA em 2019, aponta a expectativa de que hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis possa se tornar competitivo, em relação ao hidrogênio de origem fóssil com CCUS, antes de 2025, para os melhores casos. Em relação aos valores médios mundiais, a competitividade seria alcançada entre 2030 e 2040. As curvas de projeção da evolução de custos são mostradas na Figura 28.

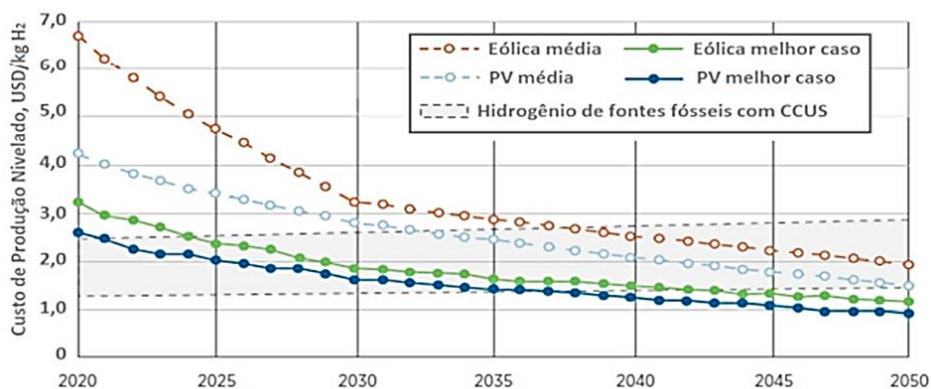


Figura 28 - Projeção da evolução de custos de produção de hidrogênio (IRENA, 2019)

2.6.1 Processos de Obtenção do Hidrogênio

2.6.1.1 Eletrólise da água e o hidrogênio verde

A eletrólise da água é um processo relativamente simples para obtenção de hidrogênio, com pureza de até 99,99% em volume a depender da secagem e eliminação de impurezas do gás. Esse processo consiste na separação de suas moléculas nos gases hidrogênio e oxigênio pela passagem de corrente elétrica contínua. A corrente flui entre dois eletrodos separados e imersos em um eletrólito, o qual tem a função de aumentar a condutividade iônica do meio. Um diafragma ou separador deve ser utilizado para evitar a mistura dos gases gerados nos eletrodos, Figura 29.

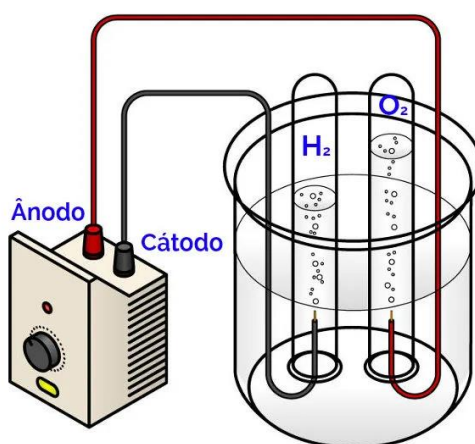
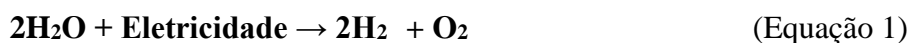


Figura 29 - Desenho esquemático para eletrólise da água e obtenção do gás hidrogênio e oxigênio (SANTOS JÚNIOR, 2004)

Os eletrodos devem ser resistentes à corrosão, apresentar boa condutividade elétrica, boas propriedades catalíticas e integridade estrutural. O eletrólito não pode se modificar durante o processo e nem deve reagir com os eletrodos. O diafragma serve também para evitar o curto-circuito entre os eletrodos, deve possuir uma alta condutividade iônica e estabilidade física e química.

De acordo com a estequiometria da reação que ocorre através deste processo:



No eletrodo negativo o hidrogênio é formado através da reação:



No eletrodo positivo o oxigênio é formado através da reação:



Os gases obtidos deste processo são o hidrogênio e o oxigênio, e de acordo com a lei de Faraday, são proporcionais à sua massa molar no eletrólito (Baird, 2011).

O hidrogênio verde é aquele produzido com eletricidade oriunda de fontes de energia limpas e renováveis, como as de matriz hidrelétrica, eólica, solar e provenientes de biomassa e do biogás. Ou seja, ele é carbono zero: obtido sem emissão de CO₂. Assim, o hidrogênio pode assumir um papel integrador entre a geração de energia elétrica e outros usos e aplicações, como o energético e o químico (Aliança Brasil-Alemanha, 2022).

As tecnologias PtX (*Power-to-X*) podem ser usadas para produzir hidrogênio para veículos movidos a célula de combustível, ou querosene para aeronaves com baixo impacto climático e ambiental, por exemplo. O termo “*Power*” refere-se ao excedente temporário de energia elétrica renovável acima da demanda e o termo “*X*” significa a forma de energia ou o uso pretendido. Por isso, o hidrogênio verde e suas tecnologias PtX são considerados fundamentais para a transição energética que está na agenda dos países comprometidos com o combate às mudanças climáticas (Aliança Brasil-Alemanha, 2022).

Neste momento, políticas globais estão sendo implementadas para diminuir os custos de produção, distribuição e aplicação do hidrogênio verde. A Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, em inglês), no ano de 2021, mostra que o custo atual do hidrogênio verde pode cair de cerca de US\$ 6 por quilo para US\$ 1 a US\$ 2 por quilo na década de 2030. Além disso, a necessidade de cumprir as metas de descarbonização pode tornar os eletrolisadores aproximadamente 40% mais baratos até 2030. (IRENA, 2022).

2.6.1.2 Reforma do gás natural e o hidrogênio cinza, o azul e o turquesa.

A produção de H₂ a partir de gás natural é realizada majoritariamente a partir de reforma a vapor, sendo este também o processo de produção de H₂ mais utilizado mundialmente. A reforma a vapor é um processo bastante maduro, caracterizando-se como uma das principais rotas tecnológicas de produção de hidrogênio no curto prazo (SOUZA, 2018; OLATEJU et al., 2017; SPEIGHT, 2020a; SPEIGHT, 2020b; U.S. DOE, 2021a). Este processo apresenta elevada eficiência térmica, em torno de 80% (calculado em relação às energias equivalentes do gás natural consumido e do H₂ produzido), e elevado rendimento na produção de H₂, de aproximadamente 74% (OLATEJU et al., 2017; SOUZA, 2018, VELAZQUEZ ABAD e DODDS, 2017).

A reforma a vapor é um processo contínuo de reação catalítica do gás natural com vapor d'água, formando H₂, além de CO, CO₂ e, de forma indesejada, C, na forma de fuligem. Este processo pode ser representado, de forma geral, a partir das seguintes reações químicas catalisadas (SOUZA, 2018; OLATEJU et al., 2017; SPEIGHT, 2020a, SPEIGHT, 2020b; U.S. DOE, 2021a; BASILE et al., 2015a; BASILE et al., 2015b; COSTAMAGNA et al., 2020; SHREVE e BRINK, 1977; MOKHEIMER et al., 2015; VELAZQUEZ ABAD e DODDS, 2017):



Na reforma a vapor do gás natural, utiliza-se este combustível tanto como matéria-prima para a produção de H₂ quanto para a fornecimento de energia para o processo, de forma

a manter elevadas as temperaturas, conforme necessárias para a reforma. Assim, um montante entre 30% e 40% do gás natural utilizado é destinado à queima como combustível, sendo o restante utilizado como matéria-prima (SOUZA, 2018). Incluindo a queima, a reforma a vapor de gás natural emite entre 0,35 e 0,42 m³ de CO₂ para cada m³ de H₂ produzido (SOUZA, 2018).

Tal informação se mostra relevante de modo que se pode considerar pouco provável que a obtenção de H₂ por esta rota, sem CCUS, ainda tenha espaço relevante no longo prazo, em um futuro de baixo carbono (VELAZQUEZ ABAD E DODDS, 2017). No entanto, a possibilidade de produção via reforma a vapor do gás natural, associada à captura, estocagem e utilização de CO₂, pode permitir o uso desta tecnologia por mais tempo. Na Figura 30, pode-se observar a representação da reforma a vapor utilizando gás natural:

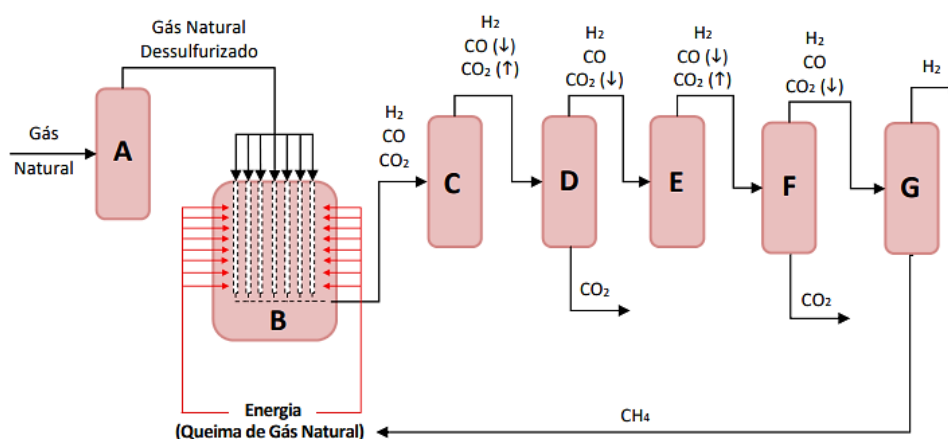


Figura 30 - Representação da reforma a vapor com remoção de CO₂ por solventes (Adaptado de SOUZA (2018) e VELAZQUEZ ABAD e DODDS (2017))

Notas: (A): Dessulfurizador; (B): Reformador; (C): Conversor de *shift* (primeiro estágio); (D): Absorvedor de CO₂ (primeiro estágio); (E): Conversor de *shift* (segundo estágio); (F): Absorvedor de CO₂ (segundo estágio); (G): Metanador (↓): Redução da concentração; (↑): Aumento da concentração

O hidrogênio cinza é um termo que se refere ao hidrogênio obtido a partir da reforma de combustíveis fósseis, principalmente gás natural. De modo geral, a conversão de gás natural em hidrogênio ocorre em um processo chamado de reforma a vapor, ou *Steam Methane Reforming* (SMR). A reforma a vapor é responsável por liberar grandes quantidades de dióxido de carbono na atmosfera, gás que intensifica o aquecimento global e, conseqüentemente, as mudanças climáticas (EPBR, 2021).

O hidrogênio azul é um termo utilizado para se referir ao hidrogênio obtido a partir da reforma de combustíveis fósseis, como gás natural e carvão mineral, seguida da captura e do armazenamento de carbono emitido no processo. Conhecido como gás descarbonizado ou gás de baixo carbono, o hidrogênio azul é considerado uma fonte de energia limpa. (EPBR, 2021).

O hidrogênio Turquesa, produzido pela pirólise do gás natural, com carbono sólido como produto colateral que pode ser vendido como subproduto. Este tipo de produção de hidrogênio está ainda em estágio inicial de desenvolvimento, mas possui potencial para se tornar atrativo economicamente (União Europeia, 2020).

2.6.1.3 Reforma a vapor de etanol e o hidrogênio musgo

A produção de hidrogênio a partir do etanol segue as seguintes reações:



Neste processo, Figura 31, o etanol reage com o vapor de água em alta temperatura gerando hidrogênio e monóxido de carbono. Este monóxido pode reagir com mais vapor de água também em alta temperatura em uma reação de simples-troca, denominada *shift*, fazendo com que aumente ainda mais o rendimento do processo (LOPES, 2009).

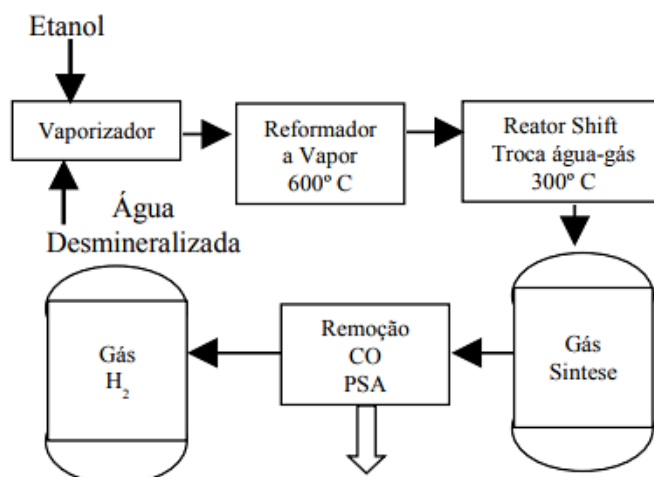


Figura 31 - Desenho esquemático para Reforma do etanol e produção de hidrogênio (TORRES, 2009)

O hidrogênio musgo é aquele produzido a partir das reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica, e principalmente, da reforma do vapor de etanol. Como o Brasil tem uma cadeia de produção, distribuição e armazenamento de etanol bem-estabelecida, é preciso considerar que essa indústria também busque oportunidades no mercado de hidrogênio. Embora os veículos de passageiros, no longo prazo, devam ser eletrificados, os veículos pesados, como ônibus e caminhões, provavelmente recorrerão às células de combustível de hidrogênio para sua descarbonização (EPE, 2022).

Levando em consideração que o motor *flex* à combustão ainda domina o mercado, e uma premissa de preços do etanol de aproximadamente 70% do preço da gasolina, a competitividade do H₂ musgo distribuído seria limitada. No entanto, especialmente em regiões de alto volume de produção de etanol, essa solução poderia compor de forma significativa a matriz energética, com a reforma distribuída do etanol para produção de hidrogênio nos postos de combustível (EPE, 2022).

2.6.1.4 Gaseificação do carvão e o hidrogênio preto e marrom.

A gaseificação é um processo de conversão termoquímica de um combustível (sólido ou líquido) realizada a altas temperaturas, na faixa de 850°C - 1500°C. É uma combinação dos processos térmicos: combustão, pirólise e gaseificação ocorrendo ou não simultaneamente dentro de um gaseificador. O produto principal é um gás combustível composto de CO, CO₂, H₂, CH₄, traços de hidrocarbonetos pesados, água, nitrogênio e várias outras substâncias, como pequenas partículas de coque, cinza, alcatrão, ácidos e óleos, que são consideradas contaminantes. A composição desse gás de síntese varia em função do tipo de biomassa e do processo de gaseificação (BAIN, 2002).

A Figura 32, mostra a representação de uma planta integrada de gaseificação do carvão com ciclo combinado (IGCC).

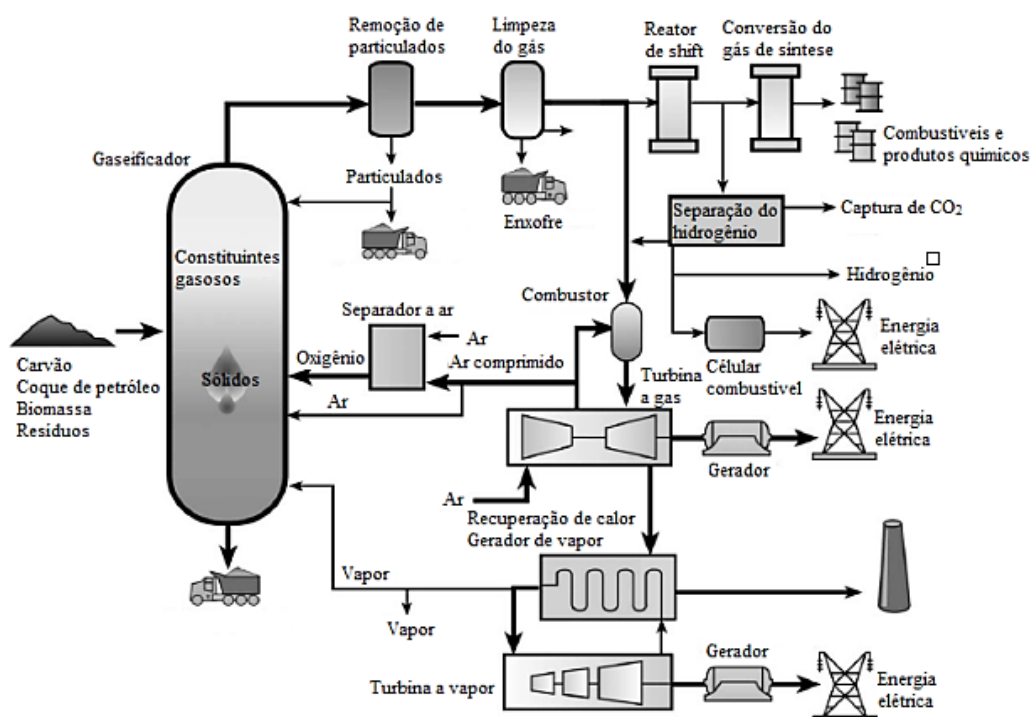


Figura 32 - Planta Integrada de Gaseificação de Carvão por ciclo combinado (STIEGEL e RAMENZAN, 2006)

Diversos combustíveis podem ser utilizados como fonte primária de energia para alimentar o reator. No gaseificador, a presença de vapor de água e oxigênio além de elevadas temperaturas e pressões moderadas, convertem estes combustíveis para gás de síntese (COLLOT, 2006).

Os principais componentes do produto são o H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , traços de enxofre, além de outros hidrocarbonetos leves e impurezas. A composição final do gás dependerá, entre outros fatores, do combustível utilizado, do tipo de reator e das condições de operação. Na saída do gaseificador, o gás de síntese passa por um processo de limpeza, para remoção de particulados, enxofre e outras impurezas. Com o gás de síntese é possível produzir combustíveis sintéticos, hidrogênio ou energia elétrica. Para aumentar a produção de hidrogênio, o gás de síntese é encaminhado para o reator de *shift*, onde o gás CO reage com o vapor de água, na presença de um catalisador, para produzir H_2 e CO_2 adicionais. O H_2 e CO_2 são, então, separados, sendo o hidrogênio usado em turbinas a gás, células combustíveis de alta eficiência ou distribuído para a utilização como combustível no setor dos transportes, enquanto o CO_2 pode ser sequestrado. A reação de *shift* gás-água altera a razão $H_2:CO$ na

mistura final, mas não afeta o poder calorífico do gás de síntese de forma significativa (STIEGEL e RAMEZAN, 2006).

O hidrogênio preto é um termo que se refere ao hidrogênio obtido a partir da gaseificação do carvão mineral (antracito, carvão mineral mais rico em carbono) e, o hidrogênio marrom, é o obtido a partir da gaseificação do hulha (carvão mineral menos rico em carbono). Ambos os processos emitem grandes quantidades de GEE.

2.6.1.5 Gaseificação da biomassa

A Figura 33 ilustra o fluxograma de operação do sistema integrado de gaseificação de biomassa.

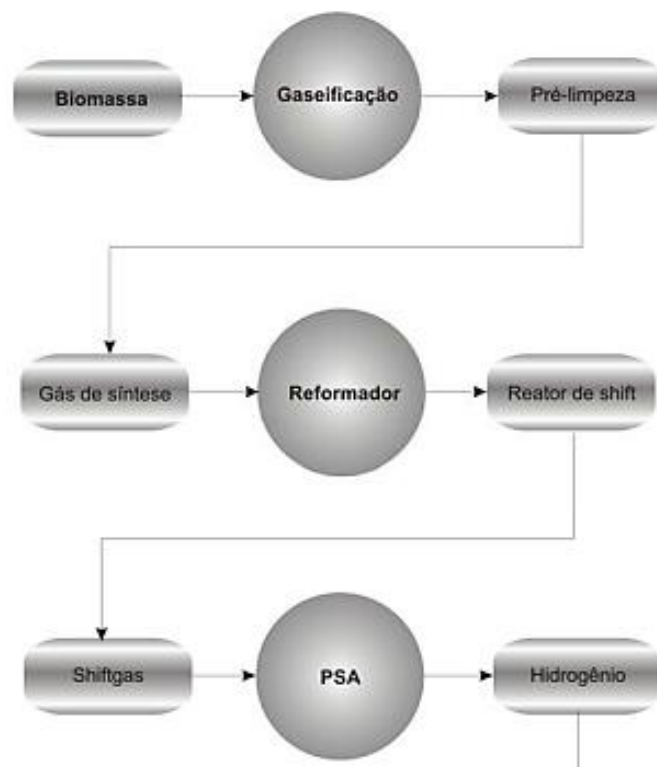


Figura 33 - Fluxograma gaseificação de biomassa (MYERS, 2002)

O primeiro bloco é da tecnologia de gaseificação e pré-limpeza do gás de síntese. As variáveis importantes compreendem o tipo de biomassa; o processo de gaseificação que pode utilizar ar, oxigênio e vapor. O sistema pode trabalhar à pressão atmosférica ou pressurizado. As características de projeto e operação influenciarão na composição do gás de síntese, bem

como na eficiência da gaseificação e do sistema de geração como um todo.

O bloco seguinte é a tecnologia de conversão dos gases metano, CH₄ e CO, para H₂. O reator de reforma de metano opera a temperaturas entre 800 e 900°C e necessita de vapor para reagir com metano na presença de um catalisador. O gás resultante da reação de reforma terá maior quantidade de hidrogênio e monóxido de carbono. Este é convertido para hidrogênio no reator de *shift*, o qual opera a temperaturas entre 500 e 250°C. O monóxido de carbono é convertido em hidrogênio pela reação de catalítica de *shift*. Ao sair do reator de *shift*, o “shiftgas” contém uma maior quantidade de hidrogênio, juntamente com os gases inertes, principalmente CO₂ e N₂ e em menor quantidade, hidrocarbonetos. Essa mistura gasosa deve ser comprimida e resfriada para passar por um sistema de purificação, uma PSA (*pressure swing adsorption*). No leito da PSA as espécies químicas, CO₂ e N₂ e CO não convertido no reator de *shift*, são adsorvidas em peneiras moleculares, as zeólitas. O gás à saída da PSA é hidrogênio com 99,999% de pureza. Do total da vazão mássica de hidrogênio que entra na PSA, aproximadamente 80% são recuperadas na saída da PSA (MYERS, 2002).

2.7 TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO DO HIDROGÊNIO

2.7.1 Transporte do Hidrogênio

A necessidade de reduzir mundialmente a emissão dos GEE é uma pauta que tem ficado cada vez mais urgente e necessária de metas palpáveis. Embora haja diversos pontos positivos na implementação do hidrogênio como combustível, o armazenamento e transporte são pontos-chave para a consolidação de um mercado global e representam relevância no estudo da viabilidade.

O transporte do hidrogênio, por sua vez, é dependente do seu modo de armazenagem e apresenta diversas opções de modais que serão mais ou menos aderentes de acordo com o contexto específico e o volume a ser transportado. O avanço das pesquisas em armazenagem e transporte seguirão sendo ponto central para a confirmação do hidrogênio como alternativa global e/ou local para a transição a uma economia descarbonizada.

O meio mais econômico para o transporte depende principalmente da quantidade transportada e a distância entre fonte e consumidor. Caso seja gerado na mesma planta onde

será utilizado (correspondente a 85% do mercado atual no mundo), esses custos ficam muito próximos de serem nulos. Entretanto, se houver uma distância considerável do consumidor final, o valor do transporte torna-se o triplo do custo de produção do H₂. (IEA, 2019).

2.7.1.1 Transporte do hidrogênio gasoso em tubulações

Existem alguns quilômetros de tubulações dedicadas ao hidrogênio gasoso pelo mundo: EUA, 2.600 km; Bélgica, 615 km; França, 300 km; Países Baixos, 237 km; Canadá, 147 km. Mesmo operando de maneira bastante segura, deve-se levar em consideração que elas são, basicamente, para fins industriais (refinarias de petróleo e indústrias químicas), possuem comprimentos relativamente curtos, pequenos diâmetros e operam a pressões baixas e constantes (*Hydrogen Analysis Resource Center*, 2016).

A construção de novas tubulações para o transporte do hidrogênio, atualmente, precisa ser analisada de forma bastante crítica. Alguns pontos que podem interferir em novos projetos são: o elevado custo de investimento inicial, as questões legais para concessão de permissão para instalação em todo o percurso planejado, os materiais mais adequados para operação com o hidrogênio puro (que geralmente necessitam de tratamento térmico e químico antes da sua utilização) e os materiais que possuem maior complexidade para instalação em comparação com os materiais convencionais. Para que este investimento seja viável, grandes volumes devem ser transportados diariamente. (IEA, 2019).

No caso da injeção do hidrogênio nas redes existentes de gás natural, as questões da fragilização por hidrogênio e corrosão nas soldas dos tubos de aço carbono, precisam ser levadas em consideração. Se faz necessário um estudo de caso para verificar a compatibilidade de todos os acessórios da linha, principalmente os elastômeros utilizados para a vedação, a fim de evitar vazamentos, válvulas de controle, sistemas de medição, e os sensores para detecção de vazamentos também precisam ser analisados. Além disso, até mesmo a forma em que o terreno foi compactado deve ser observada a fim de evitar o máximo de vibrações na linha, já que na presença do H₂ a resistência à fadiga é bastante reduzida e cargas cíclicas podem causar danos à estrutura (IEA, 2019).

A quantidade máxima de hidrogênio que as redes de gás natural suportam ainda não é um consenso e depende dos equipamentos conectado a ela, pois o componente com a menor

resistência definirá o limiar da rede geral. (IEA, 2019).

Os tubos de polietileno têm sido citados como mais adequados do que os metálicos para transportar hidrogênio em baixas pressões (DODDS e DEMOULLIN, 2013). Em determinados casos, as soluções incluem o uso de dutos de polímero reforçado com fibra (*fiber reinforced polymer pipeline* – duto de FRP), cujos custos de instalação podem ser até 20% menores do que os dutos de aço, uma vez que o duto de FRP pode ser fabricado em seções de 800m de comprimento, diminuindo a quantidade de soldas (U.S. DOE, 2021b).

2.7.1.2 Transporte do hidrogênio gasoso via *tube-trailers*

Para pequenas quantidades de hidrogênio e distâncias curtas, entre o ponto de produção e armazenamento e/ou para consumidores finais, em que não seja economicamente viável a construção de um gasoduto dedicado, o H₂ gasoso pode ser transportado por caminhão em cilindros de gás comprimido. Se o consumo mensal estiver entre 5. 10³ e 25. 10³ m³, os *tube-trailers* (Figura 34) são os mais indicados.



Figura 34 - *Tube-trailer* para H₂ (200 bar, capacidade aprox.: 22 m³) (Linde, 2022)

A vantagem é que os *tube-trailers* podem ser usados para preencher reservatórios distribuídos nos locais de demanda ou para serem utilizados, provisoriamente, como reservatórios estacionários. A perda de gás é reduzida e o custo de compressão nos postos de

abastecimento (dos *tube-trailers*) é baixo e pode ser menos de 60% do custo de liquefação do hidrogênio (MORADI e GROTH, 2019).

Os *tube-trailers* mais comuns possuem nove tubos agrupados em uma estrutura metálica, com um volume de 2.000 litros cada e podem transportar com pressões de 200 a 250 bar aproximadamente, um conteúdo total de 500 a 620 kg de hidrogênio (*Shell Deutschland Oil*, 2017).

2.7.1.3 Transporte do hidrogênio líquido via *cryogenic-trailers*

Este método é considerado econômico para altas demandas, ou seja, acima de 500 kg de H₂ por dia, e distâncias acima de 2.000 km. Em certos casos, a alternativa passa a ser viável para distâncias acima de 300 km quando a demanda é maior que 100 kg de H₂ por dia, sendo o método utilizado para 90% do mercado de hidrogênio nos EUA (JALLAIS, 2018).

O transporte de H₂ na forma líquida, pode ser feito em caminhões (*cryogenic-trailers*, Figura 35) que diferentemente dos *tube-trailers* (comprimido), podem transportar uma maior quantidade, como até 10 vezes mais (*Shell Deutschland Oil*, 2017).



Figura 35 – Cryogenic-trailer para H₂ (Praxair, 2014)

Esses caminhões podem transportar cerca de 3.500 kg de H₂ líquido, ou quase 40.000

m³, podem ser transportados com um volume de carga de 50 m³ (*Shell Deutschland Oil*, 2017).

2.7.2 Armazenamento do Hidrogênio

O armazenamento de hidrogênio na forma molecular pura pode ser obtido na fase gasosa ou líquida. Esses são os únicos tipos de armazenamento de hidrogênio atualmente empregados em escala significativa. O armazenamento de hidrogênio líquido na indústria espacial e os grandes depósitos de sal no Texas, EUA, e Teeside, Reino Unido, são exemplos notáveis (ANDERSSON & GRONKVIST, 2019).

A baixa densidade de hidrogênio envolve grandes volumes de armazenamento e custos elevados, e por este motivo os custos unitários de armazenamento são geralmente mais altos para opções acima do solo, com menor capacidade (ANDERSSON & GRONKVIST, 2019). Abaixo na Tabela 2, estão listadas algumas instalações de armazenamento de hidrogênio existentes com as suas principais características:

Tabela 2 - Exemplos de sítios de estocagem subterrânea de hidrogênio

Localização	Tipo	% H ₂	Pressão (bar); Temperatura (°C)	Profundidade média (m)
Bad Lauchstadt, Alemanha	CS	-	150; -	800
Kiel, Alemanha	CS	60-65	80; 100	1300
Teeside, Reino Unido	CS	95	50; -	400
Texas (Air Liquid), EUA	CS	95	-	-
Texas (Conoco Philips), EUA	CS	95	-	800
Beynes, França	A	50	-	400
Ketzin, Alemanha	A	62	-	200-250
Lobodice, República Tcheca	A	50	90; 30	400
Diadema, Argentina	CD	10	10; 50	600

Fonte: Nota Técnica Hidrogênio Cinza, 2022. Adaptado de PANFILOV (2015)

Notas: A (aquífero); CD (campo depletado); CS (caverna salina)

Devido à variedade de opções possíveis de armazenamento de hidrogênio, faz sentido organizá-las em categorias, sendo as três principais tecnologias de armazenamento de hidrogênio:

- Armazenado como gás ou líquido em forma molecular pura, sem qualquer ligação física ou química significativa com outros materiais;
- Na forma molecular podendo ser adsorvido em um material, mantido por ligações físicas de *Van der Waals* relativamente fracas; e,
- O hidrogênio atômico podendo ser quimicamente ligado (absorvido), em duas subcategorias, os hidretos metálicos e os hidretos químicos.

Essa divisão faz sentido devido às propriedades de armazenamento de hidrogênio fundamentalmente diferentes. Como implícito pela sua designação, os hidretos metálicos contêm átomos metálicos. O hidrogênio pode estar diretamente ligado ao átomo metálico (hidretos metálicos elementares e hidretos intermetálicos) ou fazer parte de algum íon complexo que está ligado a um átomo metálico (hidretos metálicos complexos). Em contraste, os hidretos químicos consistem apenas em elementos não metálicos, geralmente alguma combinação de carbono, nitrogênio, boro, oxigênio e hidrogênio (Anderson & Grönkvist, 2019).

Quando o hidrogênio está em forma de gás, é necessário um sistema de armazenamento de grande volume e pressão, e quando está no estado líquido, precisa que o seu armazenamento utilize sistemas criogênicos, ou seja, em baixíssima temperatura (-253°C).

Abaixo, na Figura 36, são apresentados métodos de combinação do hidrogênio com hidretos metálicos, através de aditivos ou com hidretos químicos, através de um catalisador.

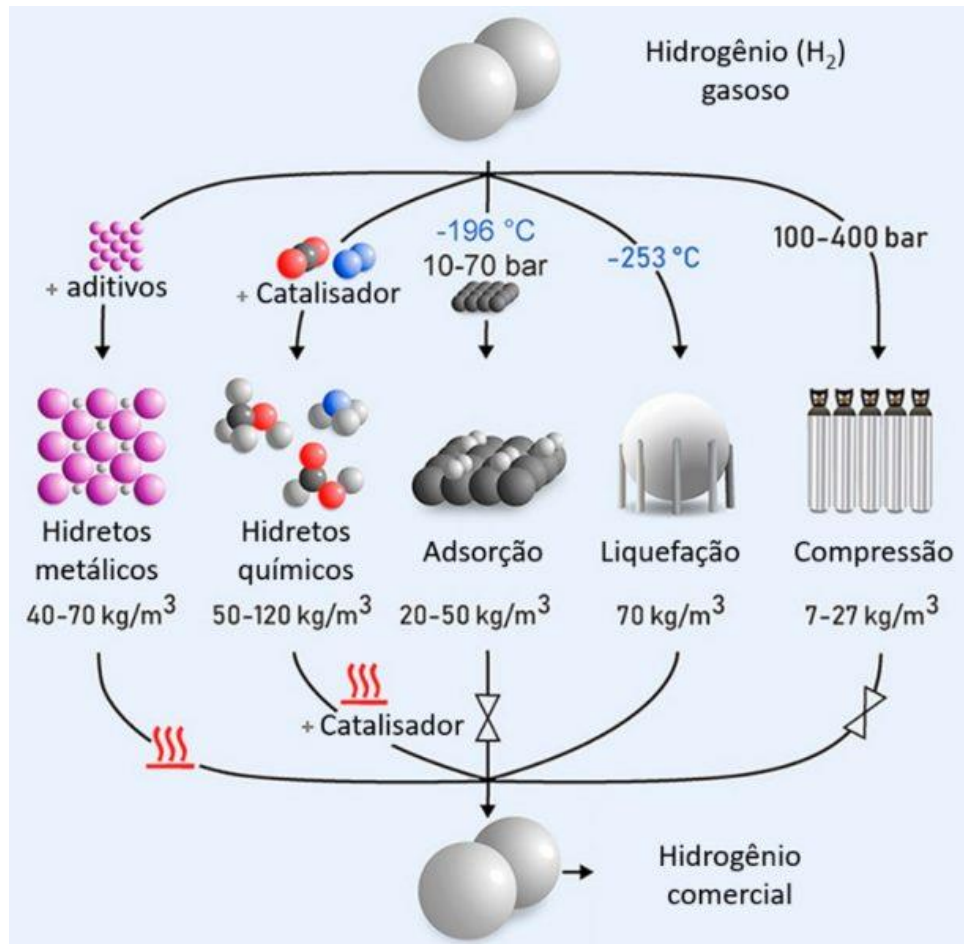


Figura 36 - Métodos de armazenagem de hidrogênio comercial (Anderson & Grönkvist, 2019)

Em relação à logística, a decisão entre produção centralizada ou distribuída do hidrogênio pode contornar a inexistência de uma rede de transporte e de distribuição. Eletrolisadores ou reformadores podem ser instalados próximos ao local de consumo. Entretanto, o modelo de negócio deve ser decidido pelo mercado (Nota Técnica Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio, 2021)

2.7.2.1 Armazenamento de gás hidrogênio comprimido

Dentre os sistemas de armazenamento de hidrogênio, o mais desenvolvido e comum é o por gás em alta pressão. A maioria dos veículos movidos por células de combustível utilizam esta forma de armazenamento feito em cilindros, de forma similar aos utilizados com gás natural comprimido.

À temperatura ambiente e pressão atmosférica, 1 kg de hidrogênio ocupa um volume de 11 m³, o que significa que seria necessário um grande espaço para armazená-lo. Portanto, o hidrogênio gasoso deve ser comprimido para aumentar a sua densidade. Um sistema de armazenamento de gás hidrogênio comprimido tem dois componentes principais: o compartimento de armazenamento e os compressores necessários para atingir a pressão de armazenamento.

Por razões de propriedades do material e custos operacionais, grandes quantidades de hidrogênio gasoso geralmente são armazenadas em pressões inferiores a 100 bar em vasos acima do solo e 200 bar em armazenamentos subterrâneos. A baixa densidade de hidrogênio leva a grandes volumes específicos de armazenamento e, portanto, altos custos de investimento. No entanto, uma pressão de armazenamento menor demanda menos trabalho de compressão e, portanto, custos operacionais mais baixos.

Os primeiros veículos com células de combustível (FCVs, em inglês) a serem disponibilizados comercialmente utilizaram uma pressão de armazenamento a bordo de 700 bar, mas são considerados inviáveis economicamente para grandes aplicações estacionárias, já que esses tanques capazes de armazenar hidrogênio em tais pressões são caros, devido à necessidade de materiais avançados, como fibra de carbono.

Com relação ao armazenamento em vasos metálicos, apesar de ser uma prática relativamente comum para o gás natural, ainda há pouca experiência para o armazenamento do hidrogênio em larga escala.

Devido à maior pressão de armazenamento e, portanto, menor volume ocupado, a opção mais promissora em larga escala é o armazenamento de hidrogênio em tubos. Os tubos têm sido aplicados para o armazenamento de gás natural desde a década de 1980, principalmente para gerenciar picos de demanda para instalações de armazenamento com acesso limitado a uma rede de gás natural. No entanto, a construção de gasodutos de hidrogênio é mais cara do que a de gás natural, principalmente devido ao fenômeno conhecido como fragilização por hidrogênio, já citado anteriormente, que afeta negativamente as propriedades mecânicas dos materiais de aço ao longo do tempo, necessitando de maiores margens de segurança (Anderson & Grönkvist, 2019)

2.7.2.2 Armazenamento de hidrogênio líquido

Assim como o hidrogênio em forma de gás necessita de um sistema de armazenamento de grande volume e pressão, quando está no estado líquido também há uma particularidade: é preciso que o seu armazenamento utilize sistemas criogênicos. Além da compressão, a densidade do hidrogênio puro também pode ser aumentada por meio de sua liquefação (condensação).

A principal preocupação para este tipo de armazenamento, é pelo processo de liquefação requerer um gasto substancial de energia devido ao seu ponto de ebulição extremamente baixo (-253 °C a 1 bar). Após o hidrogênio ter sido liquefeito, é essencial que ele possa ser armazenado para que a evaporação seja minimizada (Anderson & Grönkvist, 2019). Há duas maneiras de reduzir a taxa de evaporação: minimizar a relação superfície e volume dos tanques, optando por uma geometria esférica e através de isolamento avançado nas paredes do tanque.

2.7.2.3 Armazenamento via adsorção de hidrogênio

O armazenamento de hidrogênio via adsorção explora a ligação física de van der Waals entre o hidrogênio molecular e um material com uma grande área superficial específica. Devido à fraqueza da ligação de van der Waals, temperaturas baixas e pressões elevadas normalmente devem ser aplicadas para atingir densidades significativas de armazenamento de hidrogênio usando adsorção.

Em contraste com o armazenamento de hidrogênio comprimido gasoso ou líquido, há relativamente pouca experiência com a aplicação de armazenamento de hidrogênio à base de adsorvente, pois os recipientes existentes para armazenamento via adsorção mais desenvolvidos ainda estão apenas em escala de laboratório (Anderson & Grönkvist, 2019).

2.7.2.4 Hidretos metálicos

Os sistemas de armazenamento de hidrogênio através de hidretos metálicos são baseados no princípio de que alguns metais absorvem o hidrogênio gasoso sob condições de

alta pressão e temperatura moderada para formá-los. Assim como quando aquecidos em altas temperaturas e baixas pressões, liberam o gás hidrogênio. Essas ligações são muito mais fortes do que as ligações físicas envolvidas na adsorção de hidrogênio e, conseqüentemente, mais energia é necessária para liberar o hidrogênio quimicamente ligado. Por outro lado, a ligação mais forte permite que o hidrogênio seja armazenado em alta densidade mesmo em condições ambientais.

A liberação de hidrogênio a partir de hidretos metálicos pode ser obtida de duas maneiras principais: por aquecimento (termólise) ou reação com água (hidrólise). A alternativa de hidretos metálicos consiste em armazenar o hidrogênio no estado sólido, tecnologia que foi inicialmente desenvolvida nos Estados Unidos. Esta rota incentivou o desenvolvimento de baterias em que o hidrogênio é absorvido em uma liga, como as baterias de níquel-hidretos metálicos, que são utilizadas em eletrônicos como celulares e câmeras digitais (Lacerda, Naylil, 2021).

2.7.2.5 Hidretos Químicos

As propriedades dos hidretos químicos são extremamente diferentes das dos hidretos metálicos, sendo a principal que, em casos de condições normais, os hidretos químicos se encontram em estado líquido. A associação do hidrogênio aos hidretos químicos também se encontra em estado líquido, o que simplifica o seu transporte e a sua armazenagem. Portanto, os hidretos químicos sugeridos para a armazenagem de hidrogênio são produtos químicos frequentemente sintetizados a partir do gás natural, como o metanol e a amônia (Lacerda, Naylil, 2021). O fato de já existir uma infraestrutura contribui na viabilização da produção e utilização desses produtos químicos para este sistema de armazenagem.

2.8 USO DO HIDROGÊNIO EM VEÍCULOS

2.8.1 O Motor a Combustão Interna

Motores são máquinas que têm como objetivo converter qualquer tipo de energia (elétrica, térmica, hidráulica etc.) em energia mecânica. Estes motores podem ser divididos

em dois grupos: os motores a combustão interna e motores a combustão externa (RAHDE, 1997).

Atualmente, pode-se notar que a grande maioria dos veículos leves modernos utilizam motores de combustão interna de ignição por centelha, cujo ciclo de combustão possui quatro tempos (Figura 37), convertendo a energia química dos combustíveis como gasolina, etanol ou gás natural, em energia mecânica. Esse processo foi batizado de Ciclo Otto, em referência ao seu inventor, Nikolaus Otto.

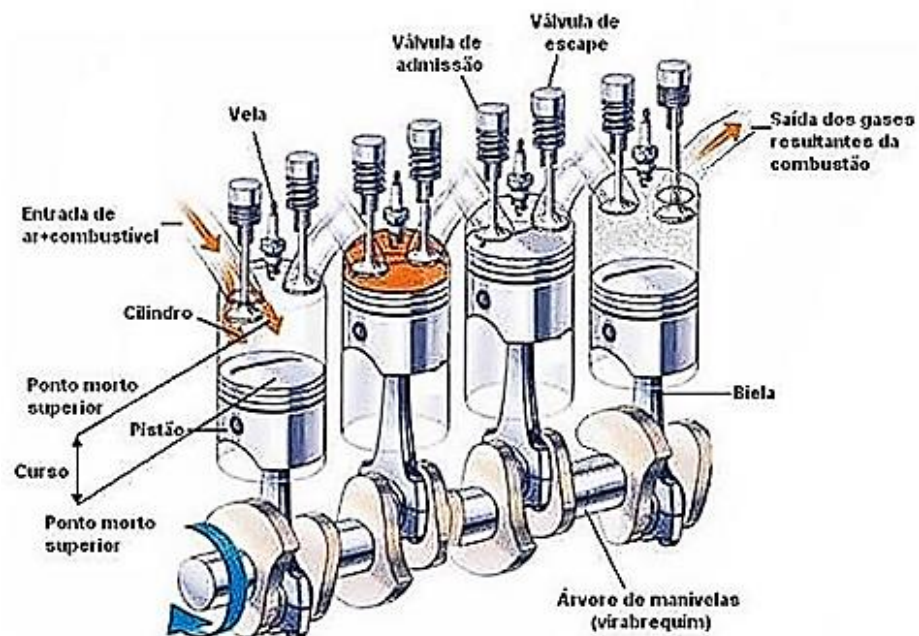


Figura 37 - Estrutura de um motor de combustão interna de 4 tempos (WOLLMANN, 2013)

Os motores de combustão interna que possuem como modelo de funcionamento o Ciclo Otto, Figura 38, apresentam quatro tempos, que são divididos em: admissão, compressão, expansão ou combustão e exaustão de gases (MACHADO, 2014).

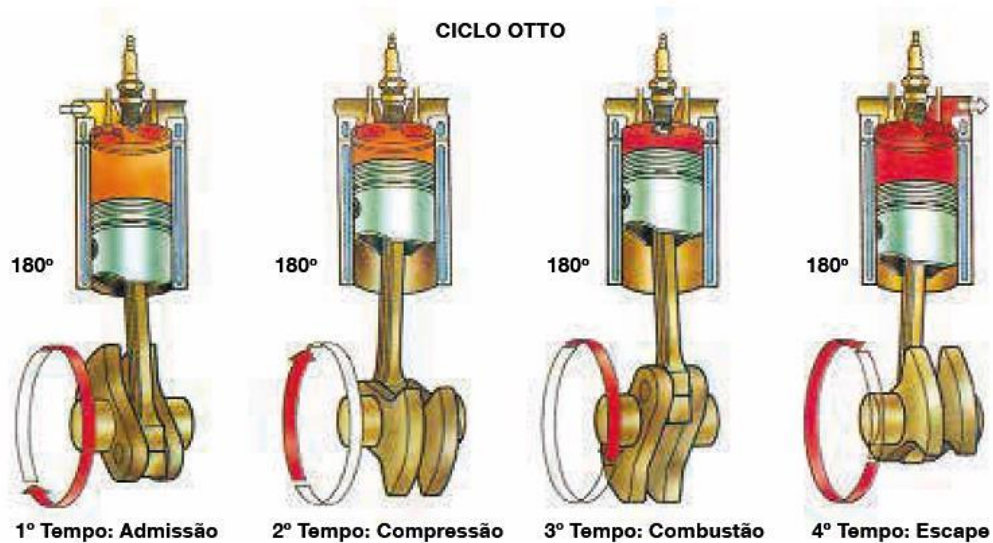


Figura 38 - Ciclo Otto 4 tempos (MAHLE, 2019)

As diferentes formas de funcionamento dos tipos de motores criam características distintas que obedecem ao ciclo proposto por Otto e Diesel e, de certa forma, direcionam as suas aplicações (BRUNETTI, 2012).

A combustão nos motores Diesel ocorre através da autoignição, a partir do contato do combustível líquido injetado por alta pressão na câmara e ligeiramente antes do tempo desejado para a combustão, com o ar aquecido pela compressão provocada pelo pistão, causando a vaporização do combustível, que entrará em combustão devido a temperatura e pressão do ar estarem acima do seu ponto de ignição. Fatores como a qualidade do combustível, temperatura e pressão do ar de admissão e turbulência na câmara influenciam diretamente no processo de autoignição no ciclo Diesel (BRUNETTI, 2012a).

2.8.2 O Uso do Hidrogênio no Motor a Combustão Interna

As características que o hidrogênio pode agregar ao motor de combustão interna são relacionadas à eficiência no processo. Levando em consideração o seu elevado poder calorífico e a rápida combustão. (PEREIRA, 2017).

Alguns estudos mostram que o hidrogênio apresenta uma excelente adaptação nos motores de combustão interna, tendo como característica marcante a alta velocidade de rotação. Por possuir um baixo limite de ignição, a combustão do hidrogênio pode ser

facilmente iniciada mesmo em misturas pobres (excesso de ar em relação a mistura ideal), facilitando seu uso em motores de combustão interna operando no ciclo Otto (ESTEVÃO, 2008).

O motor a combustão interna que utiliza o hidrogênio como combustível na queima direta, opera com excesso de ar e assegura uma combustão mais completa da mistura, melhorando a eficiência e diminuindo os picos de temperatura, o que auxilia na redução das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx). A outra vantagem é que ainda pode-se considerar o aumento da vida útil dos motores, pelo fato da não utilização dos combustíveis fósseis convencionais, pois evitará a deposição de resíduos no motor, válvulas, coletores e até sistema de escape (SILVA, 2016).

Nos motores de combustão interna, a temperatura interna no cilindro também pode ser reduzida pela alimentação de parte dos gases de escape resfriados de volta à câmara, conhecida como Recirculação de Gás de Escape, uma estratégia aplicada em alguns dos motores diesel modernos para também reduzir NOx.

A potencial formação de NOx como subproduto da combustão do hidrogênio raramente é discutida, quando se fala do seu uso como um futuro combustível sustentável.

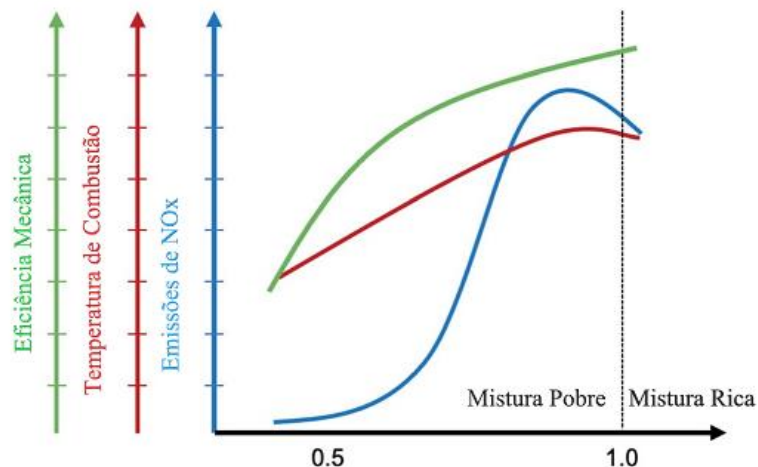


Figura 39 - Gráfico da Razão de Equivalência para o Hidrogênio no motor a combustão interna (Alastair C. Lewis, 2021)

A razão de equivalência para o hidrogênio, Figura 39, é uma medida da quantidade de combustível em relação à quantidade de ar e as emissões de NOx. O valor “1” seria a situação

ideal onde a quantidade de oxigênio fornecida pelo ar corresponde exatamente à quantidade de hidrogênio combustível disponível para toda a queima sem excesso. A “mistura pobre” significa que há mais oxigênio disponível do que hidrogênio para queima e a “mistura rica” seria mais hidrogênio do que oxigênio disponível para a queima. As emissões de NOx acabam sendo diretamente proporcionais à temperatura de combustão, visto que abaixo de 750 °C ele não é formado.

A combustão do hidrogênio ocorre na presença de ar. Quando o hidrogênio é queimado, a mistura envolvida é mais precisamente uma combinação de $H_2 + O_2 + N_2$. O hidrogênio queima com uma chama muito quente e as temperaturas geradas nessa reação podem ser suficientemente altas para dividir moléculas normalmente estáveis.

A combustão em motor a combustão interna não é a única maneira pela qual o hidrogênio pode ser usado como combustível. Pode ser fornecido a células de combustível eletroquímicas para gerar eletricidade diretamente, esta abordagem não gera NOx como subproduto residual.

Em princípio, a energia fornecida por um conjunto de células de combustível é maior do que uma combustão interna por motor adaptado. Sem dúvida, as células de combustível formarão um componente importante de qualquer futura economia de hidrogênio, e seus impactos no ponto de uso na qualidade do ar são inequivocamente positivos, pois não produz NOx como subproduto.

No entanto, as tecnologias de células de combustível têm um histórico de aplicação mais limitado do que a combustão e requerem maior transformação tecnológica do que a modificação de abordagens de combustão para acomodar o hidrogênio. (Alastair C. Lewis, 2021).

A primeira tentativa do desenvolvimento de um motor de combustão interna movido a hidrogênio foi relatada pelo reverendo W. Cecil em 1820. O motor operava com o princípio de vácuo, onde a pressão atmosférica conduz o pistão de volta contra o vácuo a fim de produzir energia. O vácuo é criado pela queima de uma mistura de ar e hidrogênio, permitindo que se tenha a expansão e, em seguida, arrefecimento. Após alguns anos, durante um trabalho com motores a combustão em 1870, Nikolaus August Otto teria utilizado um gás contendo teor de hidrogênio superior a 50% como combustível. Entretanto, desde o desenvolvimento do carburador, a gasolina tem se sobressaído entre os combustíveis disponíveis para serem

utilizados em motores a combustão interna, à medida que o hidrogênio tem predominado na escolha de combustíveis utilizados em motores de foguetes e lançadores de veículos espaciais.

As propriedades do hidrogênio que desempenham um papel importante no processo de combustão, influenciando diretamente nas taxas de emissões, são:

- ampla gama de inflamabilidade,
- baixa energia de ignição,
- alta temperatura de autoignição,
- distância de extinção pequena,
- alta difusividade,
- baixa densidade e,
- alta velocidade de chama. (LÉON, 2008).

Em contrapartida, é preciso salientar as desvantagens do uso do hidrogênio para esta aplicação.

- Se utilizado de maneira indevida, é relevante o risco de ocorrer possíveis explosões, já que o hidrogênio é inflamável (além de possuir chama invisível);
- Devido à ação da corrente elétrica na água, pode-se ocorrer outro efeito além da eletrolise, a ebulição. Esse efeito provocará a entrada de vapor d'água na admissão, possibilitando alguns problemas adversos na eficiência do sistema;
- O sistema é limitado pela quantidade de energia elétrica disponível no veículo. Se esta energia estivesse disponível, seria necessário um gerador de hidrogênio com uma área relativamente maior, sendo necessário um espaço maior para seu armazenamento;
- Segundo estudos, é observado que o volume de hidrogênio que o gerador produz não apresenta nenhuma economia de combustível ao veículo automotivo; (SILVA, 2016); Braz. J. of Develop. (2018).
- A velocidade da chama é maior do que dos outros combustíveis e sua baixa densidade volumétrica pode limitar a autonomia do veículo;
- A rápida combustão do hidrogênio pode causar combustão anormal nos motores em geral, como Detonação (*knock*), Pré-ignição e Combustão contrária em altas cargas o que não garante uma operação segura e limita a potência do motor (Kondo et al., 1997). Além disto, um aumento significativo da velocidade de combustão do hidrogênio conduz a uma

diminuição da eficiência térmica comparada com outros combustíveis gasosos, devido ao aumento de perdas de calor por detonação, também conhecido como *knock* (famosa “batida de pino”).

2.9 A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL

Desenvolvida em 1839 pelo físico inglês William Grove as células de combustível são consideradas equipamentos semelhantes às pilhas convencionais, no entanto, elas não armazenam a energia. A eletricidade pode ser gerada enquanto a célula estiver sendo alimentada por um combustível. A célula é alimentada com hidrogênio do lado do ânodo, e o catalisador estimula a formação dos íons de hidrogênio. Os elétrons viajam para o cátodo, gerando a corrente elétrica, que será aproveitada antes de chegar ao cátodo. Ao mesmo tempo, os prótons de hidrogênio atravessam a membrana e alcançam o cátodo, reagindo com oxigênio do ar e formando vapor d’água (AZEVEDO, 2016).

Inicialmente, a célula de combustível recebe de um lado o gás hidrogênio em direção ao terminal negativo, Figura 40. Essa região é porosa e por isso o gás é induzido a percorrer os canais até o catalisador.

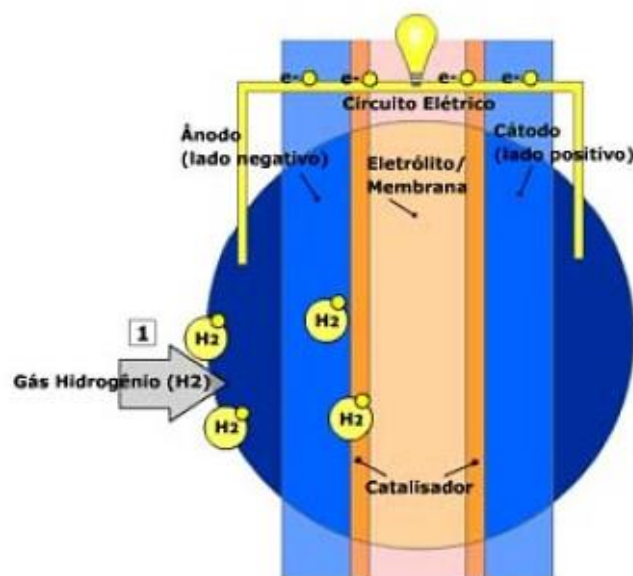


Figura 40 - Entrada do gás hidrogênio no ânodo (NETO, 2005)

Ao entrar em contato com o catalisador, a molécula de hidrogênio é dividida em dois íons de hidrogênio (H^+) e dois elétrons, Figura 41:

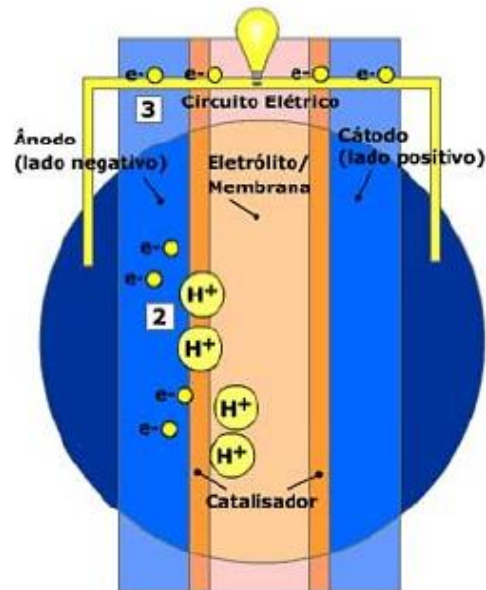


Figura 41 - Separação do gás hidrogênio (NETO, 2005)

Na entrada oposta ocorre a entrada do gás oxigênio, proveniente do ar atmosférico, em direção ao terminal positivo, Cátodo. Semelhante ao que ocorre com o hidrogênio, as moléculas de oxigênio (O_2) são divididas em dois íons negativos (O^-), que irão atrair os íons positivos de hidrogênio (Figura 42).

Os elétrons não conseguem penetrar no eletrólito, sendo induzidos pelo sistema a chegar ao circuito elétrico, ocorre o fluxo de elétrons em direção ao lado positivo, Cátodo. A corrente elétrica produzida pelo fluxo de elétrons é responsável por gerar energia elétrica, que alimenta a bateria de um veículo elétrico.

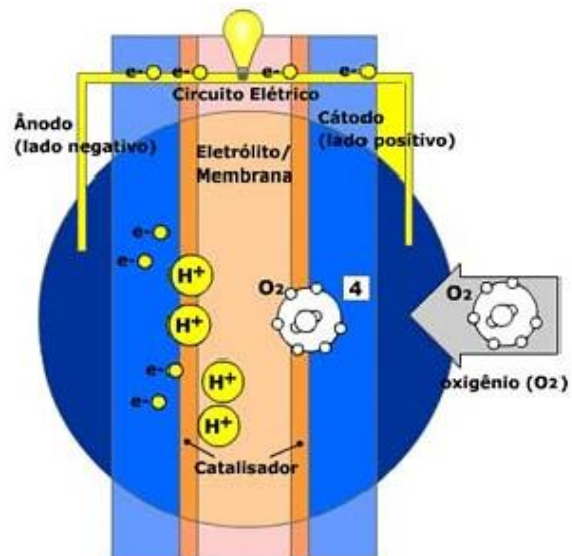


Figura 42 - Entrada do gás oxigênio no Cátodo (NETO, 2005)

No catalisador, do lado positivo, ocorre a combinação dos átomos de oxigênio com os íons H^+ que penetram pelo eletrólito. A partir dessa combinação, há a formação da molécula de água e liberação de calor (Figura 43).

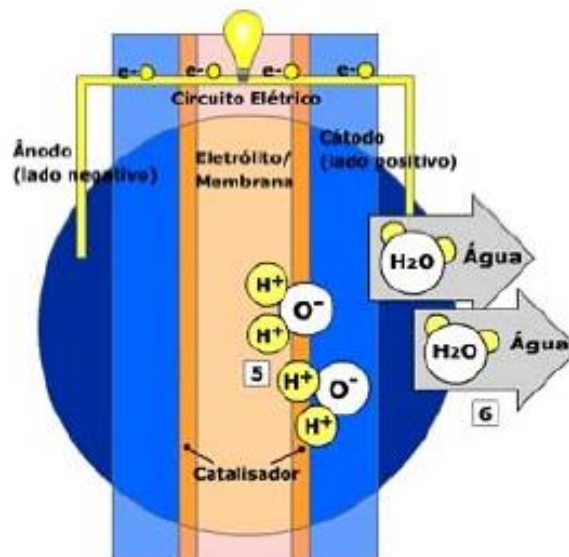


Figura 43 - Produto do processo (NETO, 2005)

Desde 1970 o interesse para uso de células de combustíveis em veículos elétricos

está crescendo e, desde 2007 eles são comercializados (A. Kirubakaran, 2009). A Figura 44 mostra o desenvolvimento histórico das células de combustível.

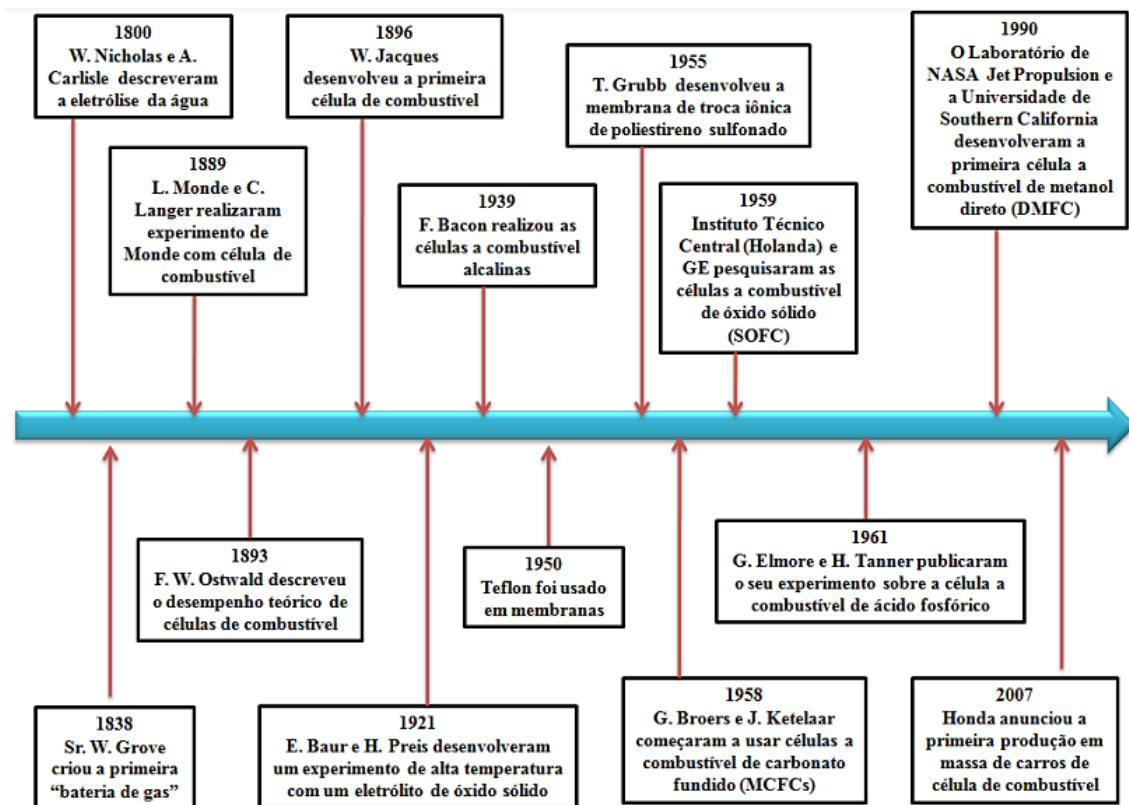


Figura 44 - Revisão histórica das células de combustível (Ahmed Mohamed Elshekh, 2014; J.M. Andújar, 2009)

As células de combustível são similares às baterias, visto ambos os dispositivos apresentarem eletrodos positivos e negativos, membrana ou eletrólito para o deslocamento dos íons produzidos e ambos produzirem corrente elétrica em um circuito externo ao equipamento (Nota Técnica Hidrogênio Cinza, 2022).

Diferem, no entanto, pelo fato de que as células de combustível geram energia de forma contínua, enquanto forem alimentadas com combustível e oxidante, enquanto as baterias são reservatórios de eletricidade, apresentando quantidade limitada de energia química para ser convertida em eletricidade, produzindo eletricidade até o esgotamento dos materiais e necessitando de substituição ou recarga (U.S. DOE, 2020; SOUZA, 2018).

As células de combustível apresentam uma série de outras vantagens, cabendo destacar as seguintes (SOUZA, 2018; U.S. DOE, 2011; U.S. DOE, 2020):

- Silenciosas, por não apresentarem partes móveis, geram energia sem produção de ruído ou vibração;
- Modularidade para instalação;
- Confiabilidade e segurança;
- Baixa necessidade de manutenção devido à ausência de partes móveis;
- Não poluentes quando alimentadas com H₂;
- Possibilidade de aproveitamento do calor para cogeração, principalmente nas células a combustível a altas temperaturas;
- Redução dos gases do efeito estufa (principalmente quando H₂ por fontes renováveis ou quando produzida por fonte fóssil associado a CCUS);
- Redução do consumo de petróleo e derivados;
- Redução da poluição do ar; e
- Flexibilidade de combustível e aplicações.

2.9.1 Célula de Combustível do tipo Membrana de Troca de Prótons (PEMFC)

Dentre as células que utilizam o hidrogênio como combustível, o tipo mais promissor é a PEMFC devido a sua elevada densidade de energia e a possibilidade de trabalhar em baixas temperaturas, ou até em temperatura ambiente (MATOS, B.R., 2008). A PEMFC é adotada, principalmente, em automóveis, por sua partida rápida (CHEN B., 2016).

As células PEMFC, Figura 45, têm características versáteis, apresentando-se viáveis, tanto para geração estacionária de baixa potência, quanto em aplicações portáteis e automotivas. Além disso, apresentam vantagens importantes como alta eficiência, com baixa ou nenhuma emissão de poluentes. Atualmente, o fator mais determinante para a sua entrada no mercado, apesar do grande número de pesquisas, é ainda o seu custo. Para um melhor desenvolvimento da tecnologia deste novo dispositivo energético, faz-se necessário o aprimoramento de cada componente presente nesse tipo de célula (Linardi, M., 2010).



Figura 45 - Célula de combustível do tipo PEMFC estacionária (BALLARD, 2013)

O principal constituinte da célula é o conjunto eletrodo-membrana-eletrodo (MEA - *Membrane Electrodes Assembly*, em inglês). Em sua forma mais simples o MEA apresenta três componentes: uma membrana trocadora de prótons (eletrólito da célula) e dois eletrodos (ânodo e cátodo), chamados de eletrodos de difusão de gás (EDG). Entretanto, a tecnologia existente na fabricação do MEA envolve muitos aspectos que vão além do simples empilhamento dessas camadas, já que qualquer modificação estrutural, física ou química, em uma dessas partes afeta diretamente as características do conjunto e, por consequência, o desempenho geral da célula. (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2012).

Em relação à operação, a célula à membrana possui ótimo rendimento a baixas temperaturas (aproximadamente 140 °C, no máximo), facilidade de montagem em módulos (modularidade) e custo menos elevado de investimento para unidades de pequena potência. Uma célula deste tipo operando com os gases hidrogênio e oxigênio tem como subprodutos apenas água e calor (Figura 46) e, portanto, é livre de poluentes e resíduos (ROBALINHO, 2009; ANTONIASSI, 2017).

As fontes de energia à base de células de combustível PEM também estão sendo desenvolvidas para uso de energia elétrica residencial (3-7 kW) e de aplicações estacionárias (50 kW) e aplicações de aquecimento de água (A. Kirubakaran, 2009).

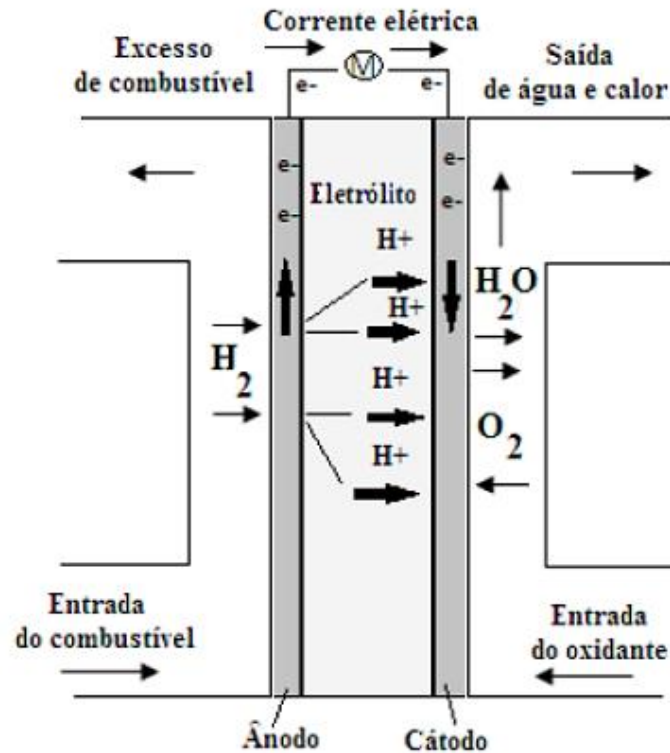


Figura 46 - Diagrama simplificado de operação de uma PEMFC (TRINDADE, L. G., 2015)

No ânodo, eletrodo negativo, ocorre a oxidação do H_2 (combustível), em elétrons e prótons, gerando a corrente elétrica pelo fluxo externo dos elétrons até o cátodo, eletrodo positivo.

2.9.2 Célula de Combustível do tipo Óxido Sólido (SOFC)

Esse tipo de célula, funciona em altas temperaturas, entre 600 e 1000 °C. A vantagem em operar em altíssima temperatura é a possibilidade de empregar materiais mais baratos em sua fabricação, como o níquel (em substituição da platina), na estrutura dos catalisadores. Além disso, a temperatura elevada acelera as reações químicas, sendo desnecessário um catalisador nobre como a platina. Entretanto, devido também a temperatura elevada, esse tipo de célula é pouco usada comercialmente ainda, apesar de estar sendo ampliado recentemente seu uso em projetos de veículos leves. Elas podem ser alimentadas com combustíveis convencionais como o gás natural e o etanol.

Como uma SOFC gera eletricidade a partir do movimento de íons de oxigênio dentro de um eletrólito (Figura 47), é possível gerar eletricidade a partir de qualquer combustível que reaja com oxigênio. Além disso, esta tecnologia torna possível projetar sistemas SOFC integrados compactos. Junto com o etanol, uma ampla gama de outros combustíveis, como o gás natural, pode ser uma fonte de combustível. (Nissan, 2022)

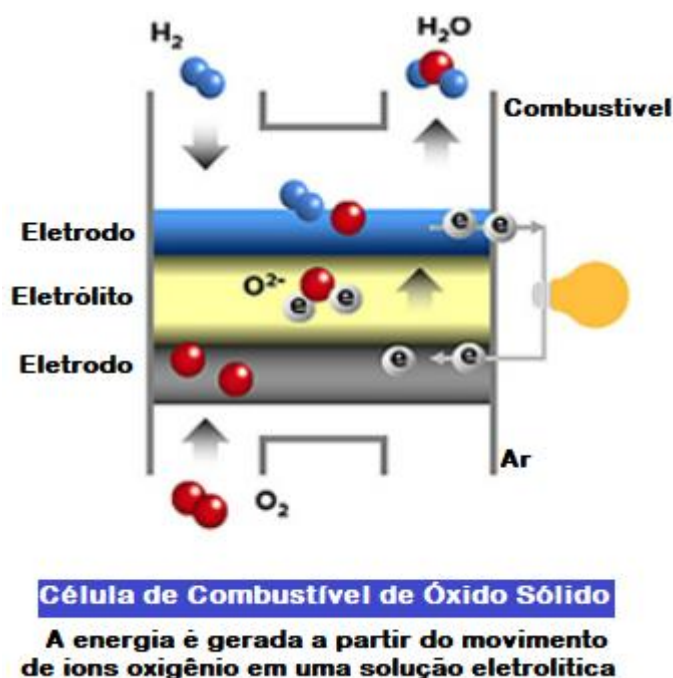


Figura 47 - Mecanismo do sistema da Célula de Combustível de Óxido Sólido (Adaptado de Nissan, 2022)

2.9.3 Célula de Combustível do tipo Etanol Direto (DEFC)

Indo em direção contrária aos tipos de célula anteriores, essa célula é abastecida única e exclusivamente por etanol (que possui hidrogênio em sua composição), não se fazendo necessário que o combustível seja reformado previamente. Levando em consideração a sua baixa eficiência, em comparação as células abastecidas por hidrogênio puro, os avanços dos estudos possibilitarão que ela seja a principal célula combustível brasileira, devido a toda infraestrutura já existente para a produção, transporte, armazenamento e fornecimento de etanol nos postos combustíveis.

A célula DEFC, tem basicamente o mesmo princípio de funcionamento de uma

DMFC (citada abaixo). Nesta célula, uma solução aquosa de etanol é alimentada diretamente no ânodo, no qual é oxidado por um eletrocatalisador produzindo prótons e elétrons. Conforme ilustrado na Figura 48, os prótons (H^+) são transportados ao cátodo através de eletrólito polimérico e os elétrons fluem através do circuito externo até o cátodo onde há a produção dos íons oxigênio e consequente formação de água.

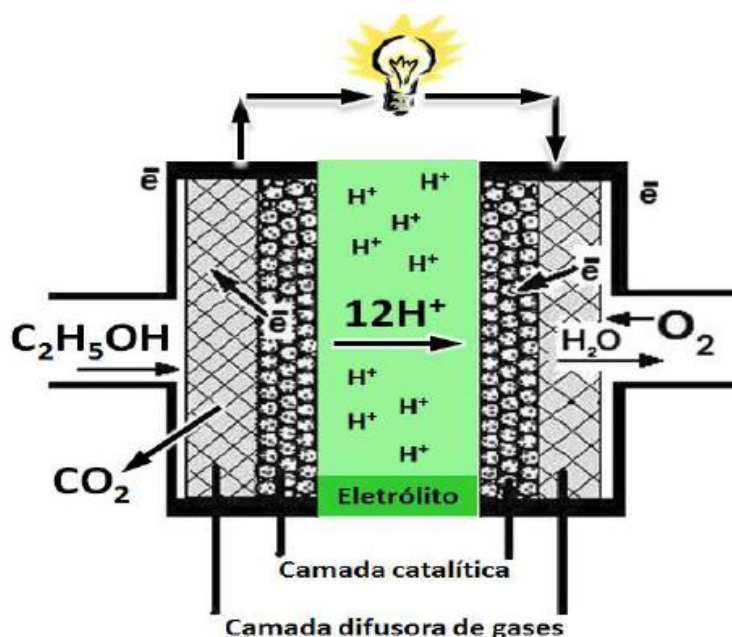


Figura 48 - Esquema do princípio de operação de uma DEFC (Marczynski, E.S., 2013)

O combustível etanol apresenta vantagem em relação ao metanol por ser menos tóxico e por possuir menor ponto de ebulição ($82\text{ }^\circ\text{C}$). Apesar das vantagens do uso do etanol, sua oxidação direta apresenta uma série de dificuldades, relacionadas à sua reação lenta e aos intermediários da reação que interferem na conversão completa do etanol. No entanto, uma das principais vantagens da utilização do etanol é sua densidade energética ser maior que a do hidrogênio, a qual corresponde a 12 elétrons por molécula em sua oxidação total, gerando um potencial padrão igual a 1,145 V. (Marczynski, E. S., 2013).

2.9.4 Célula de Combustível do tipo Metanol Direto (DMFC)

Essa célula é bastante similar à Célula de Combustível de Membrana de Troca de

Prótons, sendo que a tecnologia se diferencia pelo uso do metanol (CH_3OH) diluído em água como combustível ao invés de hidrogênio puro. Além disso, a temperatura de funcionamento fica entre 50 e 200° C.

Essa tecnologia não é viável para uso em veículos, pelo fato de ocorrer a formação de dióxido de carbono (CO_2) como impureza ao final da reação. Ela é a substituta ideal para as baterias de equipamentos portáteis, como celulares, laptops e câmeras digitais, pois o seu descarte não causa impactos ecológicos na mesma proporção das baterias recarregáveis convencionais. O metanol utilizado fica armazenado em cartuchos que podem ser trocados ou reabastecidos com este combustível diluído em água.

2.9.5 Célula de Combustível do tipo Carbonato Fundido (MCFC)

Esse tipo de célula funciona em altas temperaturas, entre 600 e 800 °C, descartando a necessidade do uso de catalisador e reformuladores. O eletrólito é formado por carbonato fundido, que são sais como o carbonato de sódio, lítio ou potássio, que se fundem em altas temperaturas. Ela pode ser alimentada com gás natural, biogás e etanol, além de apresentar eficiência de 85%.

O foco do desenvolvimento da MCFC tem sido em aplicações estacionárias e marítimas, onde o grande tamanho, massa da célula e o tempo da partida lenta não são importantes. As MCFC estão em desenvolvimento para o uso com uma grande variedade de combustíveis convencionais e renováveis.

2.9.6 Célula de Combustível Alcalina (AFC)

Esse tipo de célula utiliza uma solução alcalina e aquosa de hidróxido de potássio (KOH), sendo a tecnologia mais utilizada pela NASA em aplicações espaciais (o hidrogênio é usado desde a propulsão dos foguetes até em dispositivos portáteis, via célula AFC, além da água que é um produto da reação ser utilizada pelos astronautas).

Anteriormente, a AFC também foi chamada de “célula a combustível de Bacon” devido ao seu inventor britânico. Ela opera em baixa temperatura, aproximadamente 100°C, como a célula de combustível PEM e pode chegar a 60-70% de eficiência. Ela usa uma

solução básica de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH) como eletrólito e transporta íons carregados negativos (OH^-) do cátodo ao ânodo, liberando água como subproduto. Esta célula de combustível tem uma rápida partida, o que é uma de suas vantagens.

Comparado com meio ácido, a natureza menos corrosiva de um ambiente alcalino garante menos problemas de degradação e maior vida útil da célula. A cinética da reação de redução de oxigênio (ORR) é mais fácil em meio alcalino do que em ácido tal como H_2SO_4 (E. Antolini; E. Gonzalez, 2012).

A AFC possui uma grande vantagem por ser produzida com materiais de baixo custo. Entretanto, apresenta grande ponto negativo que é a utilização do hidrogênio e oxigênio extremamente puros. A presença de impurezas (como o CO) junto do hidróxido de potássio ajuda na formação de carbonatos (sais insolúveis em água), dificultando a locomoção dos íons pelo eletrólito.

2.9.7 Célula de Combustível do tipo Ácido Fosfórico (PAFC)

A substância utilizada como eletrólito da célula é o ácido fosfórico (H_3PO_4) líquido. Essa é a tecnologia mais usada para a geração de energia estacionária, sendo aplicada em hospitais, aeroportos, centros comerciais e estações de tratamento de esgoto. Ela possui em sua estrutura um reformador capaz de extrair hidrogênio de diferentes combustíveis e um purificador capaz de eliminar as impurezas. Podendo ser abastecida por diferentes combustíveis, como o gás natural.

2.9.8 Comparativo entre as Células de Combustível

Dentre os diversos tipos de células as mais promissoras e estudadas atualmente são as PEMFC para uso em aplicação móvel e a SOFC para uso em aplicações estacionárias (Marczynski, E. S., 2013).

Na tentativa de viabilizar o uso de células de combustível, nos últimos anos uma série de trabalhos científicos tem sido dedicados a experimentos com a alimentação da célula sendo feita por etanol. A célula DEFC tem basicamente o mesmo princípio de funcionamento

de uma DMFC (Marczynski, E. S., 2013).

Abaixo, na Tabela 3, consegue-se analisar as principais vantagens e desvantagens das células de combustível.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos principais tipos de célula de combustível

Tipo	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
AFC	Alta eficiência	Sensibilidade a CO ₂ Gases ultrapuros	Espaçonaves Aplicações militares
PEMFC	Alta densidade de potência; Fabricação simples Flexibilidade de operação Sem problemas de corrosão	Envenenamento por CO Custo da membrana Problemas de hidratação da membrana	Veículos Automotores Aplicações móveis (celulares, laptops) Unidades estacionárias
DMFC	Combustível líquido	Passagem do metanol pela membrana (<i>cross-over</i>) Oxidação lenta do metanol Menor densidade de potência	Aplicações portáteis
PAFC	Maior desenvolvimento tecnológico	Envenenamento por CO Controle de porosidade do eletrodo Eficiência limitada pela corrosão	Unidades estacionárias (100 kW a alguns MW) Cogeração eletricidade/calor
MCFC	Flexibilidade de combustíveis Eletrodos a base de níquel (não nobres)	Necessidade de reciclo de CO ₂ Problemas materiais Interface trifásica de difícil controle	Unidades estacionárias (algumas centenas de kW) Cogeração de eletricidade/calor
SOFC	Flexibilidade de combustíveis Cinética favorável	Problemas de materiais Expansão térmica diferenciada entre os componentes da célula	Unidades estacionárias (10- centenas de kW) Cogeração de eletricidade/calor

Fonte: Nota Técnica Hidrogênio Cinza, adaptado de SOUZA (2018).

Nota: Célula de Combustível: Alcalina (AFC), Membrana de troca de prótons (PEMFC), Metanol Direta (DMFC), Ácido Fosfórico (PAFC), Carbonato Fundido (MCFC) e, Óxido Sólido (SOFC).

A SOFC tem uma alta eficiência (cinética favorável) e vantagem também em relação ao custo dos materiais pois, por trabalhar com altas temperaturas, não são necessários materiais nobres, além de ser possível gerar eletricidade a partir de hidrogênio de baixa pureza. O desafio da utilização deste tipo de célula é sua ampla aplicação em âmbito comercial, devido à elevada temperatura de trabalho, apesar de existirem algumas exceções, como a Nissan ter desenvolvido um protótipo de veículo movido a essa célula, que está sendo detalhado no tópico abaixo.

As vantagens da PEMFC são a sua densidade de potência alta e rápida inicialização para veículos automotores, além de alta eficiência de conversão de energia química em elétrica, baixa emissão de poluentes e possibilidade de ser leve e compacta. A temperatura

baixa de operação faz com que seja uma tecnologia competitiva em transportes e aplicações comerciais (A. Kirubakaran, 2009). As suas maiores desvantagens são o custo da membrana e do catalisador, além da sua intolerância ao monóxido de carbono (A. Kirubakaran, 2009).

Já nas DEFCs, uma vantagem é o uso de etanol líquido, o que significa não precisar de reformador de combustível e uma facilidade em seu transporte e armazenamento, além de necessitar de um manuseio mais simples. Uma desvantagem encontrada nesta aplicação é a alta difusividade do etanol nas membranas perfluorsulfonadas, atualmente utilizadas em PMFC. O efeito *crossover* é o decaimento da densidade de potência da célula devido ao aumento da permeabilidade do etanol através do Nafion® (membrana), sendo este um fator importante e um dos pontos críticos no desempenho de uma DEFC, pois diminui seu desempenho global. (Marczynski, E.S., 2013). Para o Brasil, essa tecnologia seria muito promissora pelo seu potencial em fontes renováveis, especialmente com a produção de etanol a partir da cana de açúcar a preços relativamente baixos. Além disso, estudos indicam que utilizar o etanol em célula de combustível direto é mais eficiente e menos caro do que o uso de metanol (Ahmed Mohamed Elshekh, 2014).

As reações eletroquímicas da AFC acontecem, ao contrário da PEMFC (meio ácido), em meio alcalino, vide Figura 49, e tem como vantagem uma alta eficiência, porém como desvantagens a sensibilidade a CO₂ e necessidade de remoção de água e gases ultrapuros.

A PAFC opera em uma faixa de temperatura que é o dobro da temperatura da PEMFC, utilizando um ácido fosfórico como eletrólito líquido, que tem condutividade iônica baixa e por isso necessita temperaturas mais altas para o funcionamento (Ahmed Mohamed Elshekh, 2014). Suas desvantagens são eficiência limitada pela corrosão e sensibilidade a CO.

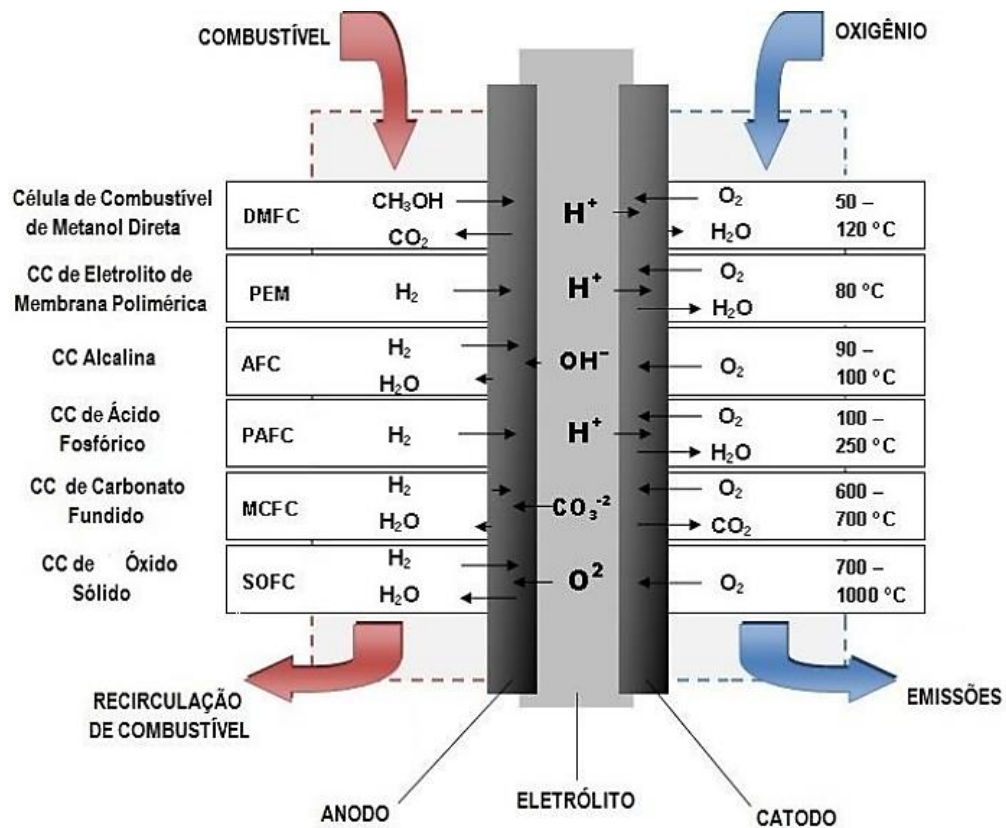


Figura 49 - Os mecanismos das reações e as espécies ativas das células de combustível diferentes (André Luís Lenz, por Automóveis Elétricos Blog, 2013)

2.10 O USO DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL EM APLICAÇÕES AUTOMOBILÍSTICAS

As células de combustível e as baterias compartilham várias semelhanças: ambas são baseadas na utilização de ânodo-cátodo, princípio de transferência eletrônica e conversão de energia química em energia elétrica; ambos requerem um eletrólito e carga externa para realizar um trabalho útil e gerar baixa CC (corrente contínua).

As células de combustível também podem ser empilhadas de forma semelhante às baterias. Ao combinar muitas células em série, uma grande potência e saída de tensão é alcançada. A principal diferença entre células de combustível e baterias é a natureza de seus eletrodos. As baterias utilizam ânodos metálicos (lítio ou zinco) e cátodos (geralmente óxidos metálicos).

Durante o uso, as baterias acabam consumindo o ânodo e o cátodo, que então

precisarão de recarga ou substituição. Em contraste, as células de combustível operam com reagentes fornecidos externamente que irão ser consumidos durante o processo. Portanto, as células de combustível não precisam de recarga e podem continuar operando enquanto o reagente for fornecido. O carregamento repetido e a descarga resultaram na diminuição do tempo de vida das baterias em comparação às células de combustível (Olabi AG, Wilberforce T, Abdelkareem MA, 2020).

Uma única célula de combustível é capaz de produzir uma tensão de 1,16 volts em média, não sendo suficiente para colocar em funcionamento equipamentos que demandam altas tensões, como o motor elétrico de um carro que funcionam em tensões de aproximadamente 300 volts. Assim, a solução é conectar várias células a combustível em sequência, formando a chamada pilha ou bateria a combustível, Figura 50. A conexão das células é realizada por um tipo de placa especial, a “placa bipolar”, servindo tanto para transportar hidrogênio quanto o oxigênio (FERRACIN & BIAGGIO, 2000).

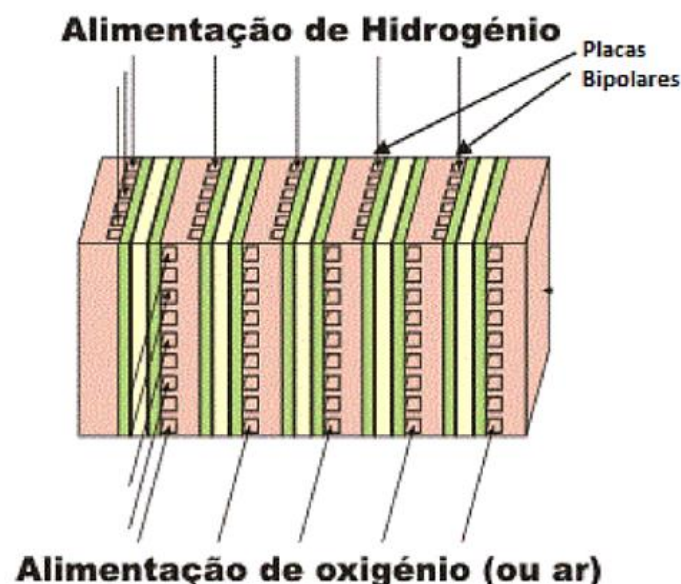


Figura 50 - Representação de uma Pilha a Combustível (FERRACIN & BIAGGIO, 2000)

A eficiência das células de combustível é sempre mais elevada em comparação com outros sistemas de geração de energia e ainda oferecem mais vantagens, como, uma ampla faixa de potência, emissão quase zero, modularidade, escalabilidade porque podem ser ligadas em série para multiplicar a densidade de potência, instalação rápida e dá boas oportunidades

para operações de cogeração. Os sistemas veiculares quando as utilizam, têm eficiências entre 40% e 60%, mais do que o dobro em relação a motores a combustão (15% a 25%) (Nota Técnica Hidrogênio Cinza, 2022).

A partir dos avanços tecnológicos em pesquisas para a utilização das células de combustível, principalmente em meio automobilístico, iniciou-se uma “corrida verde” pelas principais montadoras mundiais em busca do desenvolvimento de carros a hidrogênio, além dos carros a bateria.

Esses veículos contam com um motor elétrico alimentado pela energia elétrica proveniente das células, não sendo necessário ser recarregado em tomadas e sim abastecido por hidrogênio. Ao pisar no acelerador, a energia elétrica, resultante das células de combustível, é enviada ao motor, transformando-se em energia mecânica e movimento do carro (SILVA FILHO, 2016). A Figura 51 representa as etapas de funcionamento de um carro movido à hidrogênio.

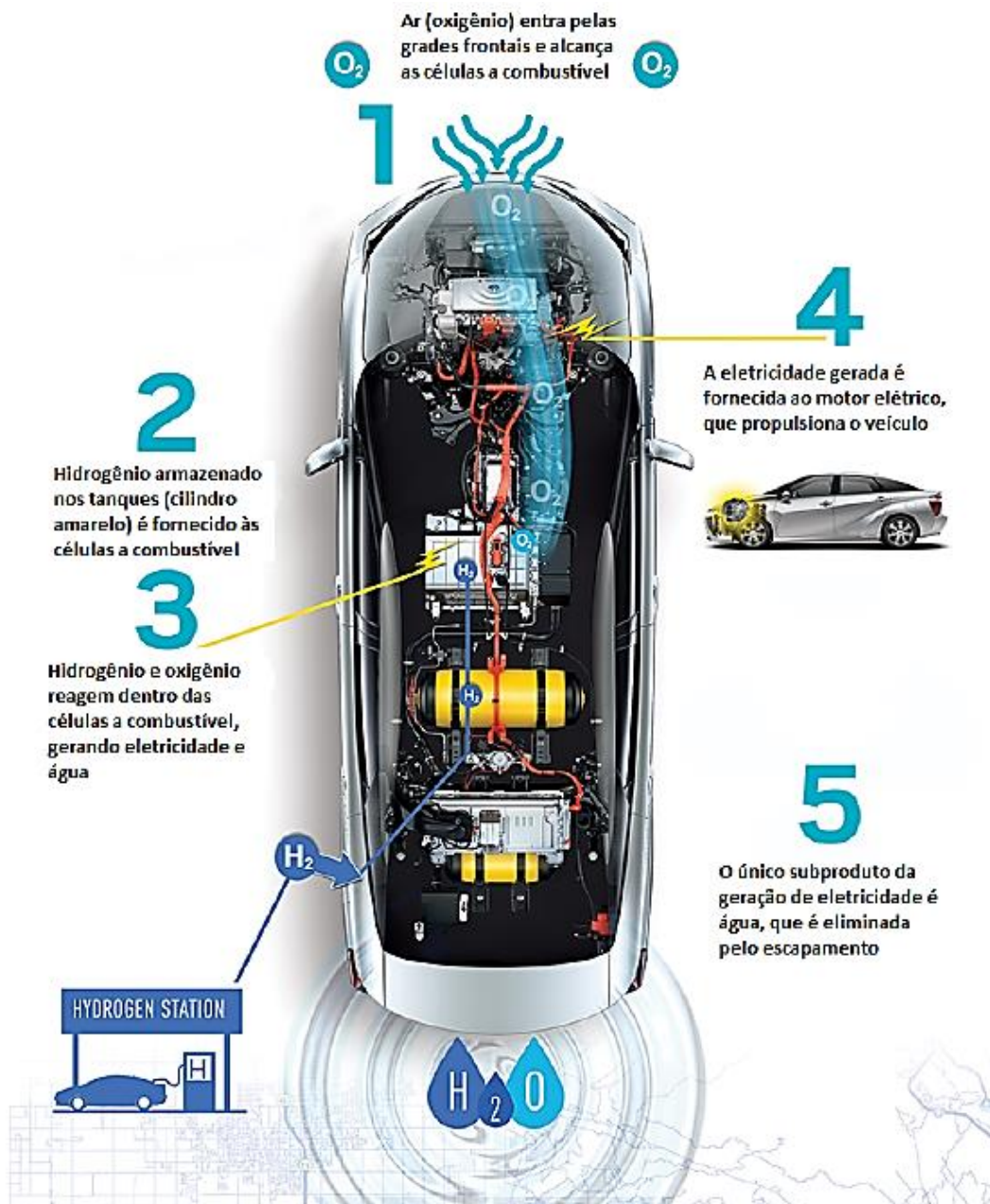


Figura 51 - Etapas de funcionamento de um protótipo à hidrogênio (KENSKI, 2016)

Atualmente, todas as principais montadoras de carros do mundo já possuem modelos movidos a célula de combustível, além de já existirem cerca de 1000 estações de abastecimento pelo mundo. O mercado asiático analisa de forma audaciosa o desenvolvimento de carros ecológicos devido à problemas ambientais atuais. Sendo assim, a China planeja ter 50.000 veículos movidos a célula de combustível até 2025 e 1 milhão até 2030. Já o Japão, que possui a maior infraestrutura de suporte aos carros movidos a

hidrogênio, mais de 200 postos de abastecimento, estima que tenha 200.000 veículos até 2025 e 800.000 até 2030. (*HIDROGEN COUNCIL*, 2018).

Outro destaque no setor de carros movidos a hidrogênio, é o estado da Califórnia nos EUA. O governo local concede uma série de benefícios para os usuários, além de proporcionar uma das mais completas infraestruturas da tecnologia no mundo. Ao todo, são 32 postos de abastecimento no estado, dos 35 existentes em todo país. A expectativa é que até 2025 o estado tenha 200 estações de hidrogênio. (*HIDROGEN COUNCIL*, 2018).

O primeiro automóvel movido a célula de combustível comercializado em escala comercial foi o Toyota Mirai (Figuras 52 e 53). Lançado em 2014, o veículo já está presente no Japão, EUA e países europeus. O modelo possui aceleração de 0 a 100 Km/h em cerca de 9 segundos, levando cinco minutos para o total abastecimento a uma pressão de 700 bar, além de autonomia de cerca de 550 km com os dois tanques de 60 e 62,4 litros completamente abastecido (*HIDROGEN COUNCIL*, 2018).



Figura 52 - Toyota Mirai (Toyota, 2022)

Carro a hidrogênio

Os principais componentes do Mirai, da Toyota, que é movido a hidrogênio

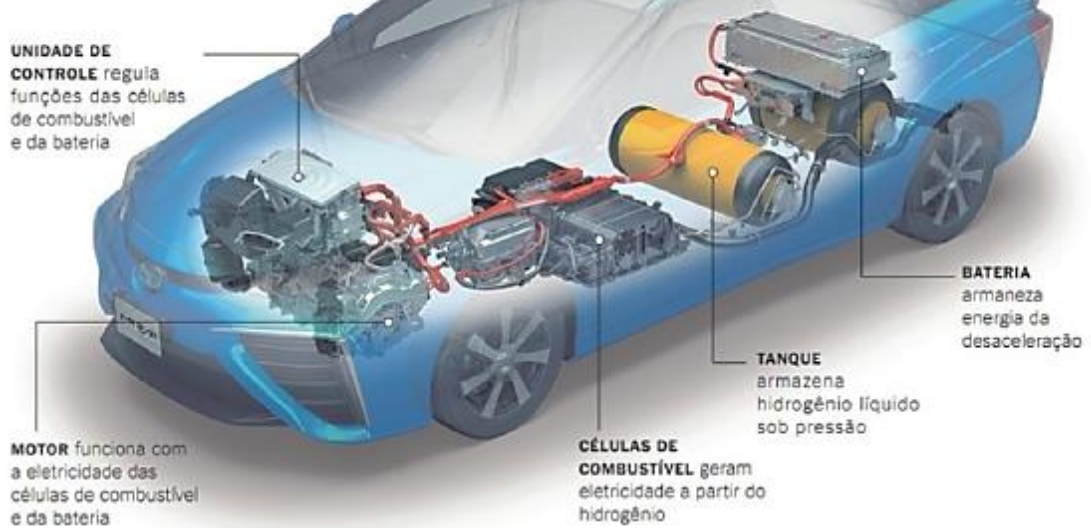


Figura 53 - Principais componentes do Toyota Mirai (Toyota, 2015)

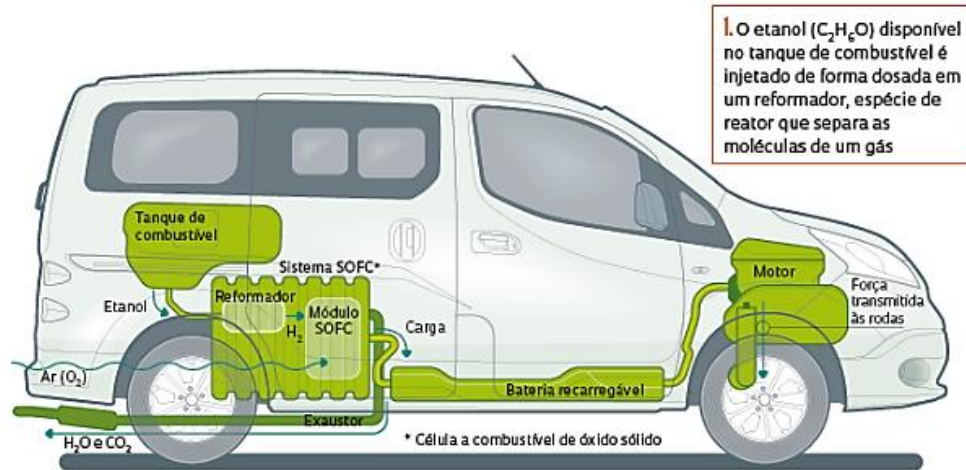
Em 2016, a Nissan apresentou ao governo brasileiro, durante o lançamento do programa Renova Bio 2030, o primeiro protótipo de veículo em todo mundo a ser movido por uma Célula de Combustível de Óxido Sólido (SOFC), alimentada por bioetanol, Figura 54.



Figura 54 - Nissan e-NV200, (Nissan, 2016)

Atualmente, a Nissan renovou o convênio com o Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares (IPEN) para prosseguir no desenvolvimento de uma célula de combustível alimentada com etanol. Assim, será possível desenvolver carros elétricos em território nacional, permitindo desenvolvimento desse mercado no Brasil, com a diferença que o carro brasileiro trocaria a tomada pelo etanol associado à célula de combustível (IPEN, 2022).

A célula de combustível a etanol projetada pela Nissan e pelo IPEN aproveita o hidrogênio contido no etanol (C_2H_6O) para gerar energia. O processo, ocorre quando um reformador, composto por óxido de cério (CeO_2) e outros metais nobres, quebra as moléculas de etanol, separando o hidrogênio contido nelas. Em seguida, o gás hidrogênio atravessa a célula, iniciando um processo parecido com uma pilha. Os elétrons livres circulam do polo negativo para o positivo, gerando corrente contínua que irá alimentar um motor elétrico. Na Figura 55, é possível ver o funcionamento do sistema:



2. Nesse dispositivo, sob alta temperatura, o etanol é transformado em um gás rico em hidrogênio (H_2)

3. O hidrogênio e o oxigênio (O_2) do ar são injetados em uma célula a combustível de óxido sólido (SOFC). O CO_2 gerado no reformador é eliminado pelo escapamento

4. O princípio de funcionamento de uma célula a combustível é parecido ao de uma pilha comum. O O_2 do ar recebe os elétrons no cátodo (polo positivo) e se torna um íon de oxigênio, que migra pelo eletrólito e reage com o H_2 no ânodo (polo negativo)

5. O resultado é a geração de energia elétrica que abastecerá a bateria recarregável do veículo e moverá seu motor

6. O vapor d'água resultante do processo é eliminado pelo cano de escape. O processo também gera calor, que é reutilizado para aquecer o reformador

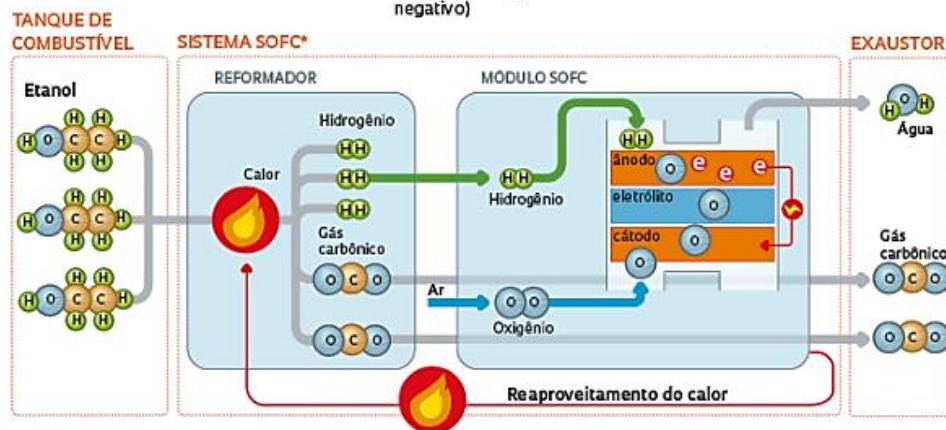


Figura 55 - Sistema Alternativo Nissan e-NV200 (Nissan e IPEN, 2016)

A SOFC pode suportar etanol puro e variações, com um percentual de até 50% de água. Com o etanol hidratado dos postos brasileiros, que tem uma graduação alcoólica de 93%, a expectativa é que de um tanque de 30 litros de combustível vegetal consiga garantir autonomia de 600 km. (IPEN, 2022).

A vantagem do novo sistema utilizado nessa célula é que ele não demanda hidrogênio puro, como ocorre no modelo tradicional, e está apto a trabalhar com etanol, que no processo

se decompõe em moléculas de hidrogênio e dióxido de carbono, a última liberada pelo escape. O processo não é isento de emissões de gases de efeito estufa, mas a emissão é neutralizada pelo plantio da cana-de-açúcar. (IPEN, 2022).

3 DISCUSSÃO

3.1 O MERCADO ATUAL DO HIDROGÊNIO

Num âmbito mundial, o hidrogênio se tornou prioridade na estratégia de fontes alternativas de energia de diversos países, sobretudo, por prover uma alternativa para setores de difícil abatimento de emissões de carbono e por se constituir também em um vetor de energia, possibilitando o armazenamento de energia e favorecendo o acoplamento do setor de energia aos setores de indústria e transporte. Mesmo nos transportes leves, o hidrogênio pode ter papel importante, trazendo mais uma alternativa tecnológica para o processo de eletrificação de veículos (diretamente, por meio células de combustível ou, indiretamente, por meio de combustíveis sintéticos – *E-fuels*) (PNH2, 2021).

Há 4 regras para definir a melhor fonte de energia:

- Ter alta densidade de energia por peso e volume;
- Ser fácil de armazenar sem precisar de alta pressão, ser de toxicidade baixa e manipulação segura;
- Apresentar boa integração na infraestrutura de energia;
- Ter baixo impacto ao ambiente, tanto no uso como na produção.

Considerando a quarta regra, o hidrogênio é a melhor fonte de energia porque não tem qualquer emissão desfavorável, entretanto infelizmente sua produção (na maior parte dos casos), armazenamento e transporte não são os mais simples ou baratos. Por outro lado, os outros combustíveis líquidos alcançam grande potencial a respeito das três primeiras regras. (Elshekh, A. M., 2014).

Desde 2003, 18 países (Figura 56), incluindo o Brasil, e a Comissão Europeia formam a *Partnership for the Hydrogen Economy* (Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio - IPHE) (IPHE, 2017).



Figura 56 - Membros da Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio (IPHE Website, 2017)

O objetivo desses países é acelerar o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e de células de combustível, em busca de um melhor aproveitamento energético, reduzindo os impactos ambientais e aumentando a segurança econômica de cada país. A integração tecnológica entre esses países e o incentivo para a criação de políticas públicas nacionais e regionais sobre energia do hidrogênio, é necessária para buscar a viabilidade de uma infraestrutura internacional capaz de produzir, armazenar, exportar, distribuir e utilizar o hidrogênio como fonte energética limpa (*International Energy Agency – IEA, 2015*).

A relevância dessa parceria está no fato de os países membros serem os principais consumidores energéticos e poluidores do mundo:

- Mais de 3/4 do consumo mundial de energia elétrica;
- Mais de 2/3 do consumo global de energia;
- Mais de 2/3 das emissões de CO₂.

Em 2017, foi formado o *Hydrogen Council* (Conselho do Hidrogênio), um grupo formado por 39 empresas do setor de energia, transporte e indústria (Figura 57), dispostas a promover cooperativamente o desenvolvimento do hidrogênio como a fonte chave para um fortalecimento energético mundial limpo (*Hydrogen Council, 2018*).

Hydrogen Council



Figura 57 - Membros do Conselho do Hidrogênio (Hydrogen Council, 2018)

O relatório da IEA, divulgado em outubro de 2021 indica que, se todos os projetos em desenvolvimento para produção de hidrogênio a partir da eletrólise se concretizarem, o suprimento global alcançará 8 milhões de toneladas em 2030. Ou seja, a tendência é de uma escalada na demanda, especialmente com empresas e países apostando na aplicação de hidrogênio no setor de transportes, tanto pesado (exemplo da produção de amônia para navegação), quanto individual (célula de combustível) (EPBR, 2021)

Segundo uma pesquisa da *PricewaterhouseCoopers* (PwC) sobre o mercado global de hidrogênio em 2021, foi identificado que as atenções estão fortemente concentradas no fornecimento, ignorando o papel dos usuários, o que aumenta o desafio para desenvolver esta economia. E, de acordo com a análise, os países entendem o potencial papel do hidrogênio na transição energética de formas diferentes e as divergências entre estratégias nacionais são significativas.

A Ásia mostra um maior foco no hidrogênio como combustível líquido na forma de amônia e como combustível para transporte marítimo e rodoviário. O Japão tem ativamente buscado estabelecer cadeias de suprimentos internacionais, enquanto a Coreia se concentra em novas tecnologias como veículos a célula de combustível de hidrogênio. Em contraste, a Europa está mais focada no uso de hidrogênio para descarbonizar os setores da indústria e do transporte (serviço pesado – por exemplo, ônibus e caminhões) de difíceis redução. As Américas (Norte e Sul) estão considerando a produção para consumo próprio e exportação (Conselho Mundial de Energia, 2021). Abaixo, a Tabela 4 detalha a prioridade desses países:

Tabela 4 - Visão Geral das Estratégias Nacionais de Hidrogênio por Setores Prioritários

Transporte		Veículo de passageiros	Carga média e pesada	Ônibus	Ferrovias	Marítimo	Aviação
OCEANIA E ÁSIA	Austrália	Baixa	Imediata	Imediata	Baixa	Longo prazo	Baixa
	Japão	Imediata	Longo prazo	Longo prazo	Baixa	Baixa	Baixa
	Coréia do Sul	Imediata	Imediata	Imediata	Baixa	Baixa	ND
EUROPA	UE	Baixa	Imediata	Imediata	Imediata	Longo prazo	Longo prazo
	França	Baixa	Imediata	Imediata	Imediata	Baixa	Imediata
	Alemanha	Baixa	Imediata	Imediata	Imediata	Longo prazo	Longo prazo
	Hungria	Longo prazo	Imediata	Imediata	Baixa	Baixa	ND
	Países Baixos	Imediata	Imediata	Imediata	Imediata	Baixa	Baixa
	Noruega	Baixa	Baixa	Baixa	ND	Imediata	Baixa
	Portugal	Baixa	Imediata	Imediata	Imediata	Longo prazo	Longo prazo
	Espanha	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
AMÉRICA LATINA	Chile	Longo prazo	Imediata	Imediata	ND	Longo prazo	Longo prazo
AMÉRICA DO NORTE	Canadá	Imediata	Imediata	Imediata	Longo prazo	Longo prazo	Longo prazo

Fonte: Adaptado de Conselho Mundial de Energia, 2021

Nota: Não declarado (ND); União Europeia (UE).

A Ásia e a Europa atualmente parecem mais focadas no lado da demanda, enquanto o Oriente Médio e o Norte da África se concentram na oferta.

O Brasil é beneficiado com a consolidação da Economia do Hidrogênio por possuir uma matriz energética bem diversificada, podendo ser mais bem aproveitados com a implementação desse mercado. O país ocupa um lugar de destaque desde a década de 1970, com o Pró-Álcool para veículos leves. Um dos compromissos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris em 2016, para redução de emissões de gases estufa, é aumentar o uso de biocombustíveis até 2030 e, a projeção é sair de 30 para 54 bilhões de litros de etanol anuais até lá. Com as primeiras usinas de etanol de milho e etanol de segunda geração (obtido a partir de bagaço celulósico), associadas ao etanol de cana-de-açúcar, parece bastante factível que o país atinja

as metas estabelecidas (GAUTO, M., 2019).

Pela perspectiva da sociedade, estudos indicam que os motoristas já estão propensos a adotar tecnologias sustentáveis no seu dia a dia. Por exemplo, em pesquisa divulgada em 2018 pela montadora de automóveis Nissan, oito em cada dez pessoas que dirigem na América do Sul conhecem e estão dispostas a comprar carros elétricos, alegando motivos econômicos e ambientais. Sendo assim, é necessária uma conscientização coletiva para que os agentes públicos e privados entendam que os altos investimentos de agora resultarão em benefícios duradouros no futuro.

Com relação aos investimentos, percebe-se que a falta deles é um grande obstáculo à popularização do hidrogênio, devido ao custo elevado para a execução do processo. Esse é, inclusive, o grande desafio atual para a consolidação da tecnologia. Os cientistas e pesquisadores envolvidos buscam formas de baratear a produção e distribuição do hidrogênio, pois é necessário, por exemplo, uma infraestrutura específica para o abastecimento de veículos movidos a célula de combustível.

Segundo a IEA, a lacuna de custo entre o hidrogênio de combustíveis fósseis e o de baixo carbono é uma barreira que precisa de estímulos de políticas públicas para ser superada. Dependendo dos preços regionais do gás, o custo nivelado da produção de hidrogênio cinza (a partir do gás natural) varia de US\$ 0,5 a US\$ 1,7 por kg. No caso do hidrogênio azul (gás natural com uso de tecnologias de captura, armazenamento e uso de carbono — CCUS), o custo aumenta para cerca de US\$ 1 a US\$ 2 por kg. O uso de eletricidade renovável para produzir hidrogênio verde eleva o custo para US\$ 3 a US\$ 8 por kg, também devido ao custo dos eletrocatalisadores, que é alto.

A EPE destaca que pelo menos 12 países consideram a utilização do hidrogênio cinza em suas estratégias nacionais até 2030. Apesar da grande variabilidade, a rota tecnológica de hidrogênio cinza tem menores custos quando comparada às outras opções, e deve satisfazer a demanda de hidrogênio de curto prazo, até que rotas tecnológicas alternativas de baixo ou zero carbono tornem-se economicamente competitivas (EPE, 2022).

A utilização do hidrogênio cinza para substituir o gás natural como fonte de energia, não será vantajoso economicamente futuramente (EPE, 2022). O hidrogênio tem maior custo e menor densidade energética que o gás natural, e um eventual benefício ambiental seria limitado, uma vez que são liberadas grandes quantidades de CO₂ durante a etapa de reforma

do gás. Por outro lado, a rota azul que faz a reforma a vapor de metano com CCUS, poderia resultar em emissões muito menores e o custo mais elevado do processo poderia ser remunerado pela precificação do carbono (EPBR, 2022). A empresa defende que ao se precificar o carbono mitigado e/ou retirado da atmosfera, a receita do projeto de H₂ poderia ser aumentada, reduzindo o preço final ao consumidor.

Com relação ao hidrogênio verde, a IEA indicou em um relatório de outubro de 2021 que, se todos os projetos em desenvolvimento para produção de hidrogênio a partir da eletrólise se concretizarem, o suprimento global alcançará 8 milhões de toneladas em 2030.

3.2 ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA VEÍCULOS LEVES

Em função das competências já existentes no Brasil, a tendência é que os estudos sejam concentrados nas células PEMFC, SOFC e, principalmente, nos sistemas reformadores de etanol. Primeiramente, em virtude da infraestrutura já existente para produzir e distribuir esse combustível e, por ser um dos maiores produtores de etanol do mundo. Assim, é natural que as principais pesquisas nacionais para o aproveitamento do potencial energético do hidrogênio envolvam o desenvolvimento de células de combustível com reformadores, a serem abastecidas com etanol. Ainda que o subproduto da utilização em células seja o CO₂, isso não chega a ser um grande impacto, visto que a maioria do CO₂ é capturado na fase de plantio da cana (LORENZI, 2012).

O etanol apresenta grandes vantagens em relação ao gás hidrogênio também quando a aplicação envolve transporte e armazenagem do combustível, devido aos desafios envolvidos nessa etapa da implementação. Por isso o sistema das células de combustível de álcool direto é preferido às células a combustível PEM nestas áreas, por utilizar o etanol, apesar da potência produzida nas PEMFCs ser maior.

Além das células a etanol, existem também os *E-fuel*, que podem ser adotados ainda em pequena escala nas próximas décadas. No entanto, pelo processo de produção do *E-fuel* requerer a integração de diversas tecnologias mais complexas, tais como captura de CO₂, geração renovável de eletricidade, eletrólise e redução do CO₂ de síntese do combustível, o custo ainda é muito elevado, não sendo uma rota provável para as próximas décadas no Brasil (em larga escala) (Roadmap Tecnológico Automotivo Brasileiro, AEA, 2020).

Com relação aos veículos elétricos a baterias, pode-se dizer que o mercado já é uma realidade e está ganhando espaço na sociedade, atraindo cada vez mais adeptos que acreditam ser a melhor alternativa para a descarbonização da matriz energética. No entanto, esta transição gera incertezas nos setores industriais e de energia, principalmente pela necessidade de introdução de infraestrutura diferente da disponível atualmente (Roadmap Tecnológico Automotivo Brasileiro, AEA, 2020). Além disso, o lítio utilizado nas atuais baterias dos veículos elétricos é um mineral, cujo extrativismo também é bastante questionado. Queima-se petróleo e carvão para produzir as baterias em larga escala e, pode-se dizer que ainda não existe uma tecnologia verdadeiramente disruptiva dos fósseis. (GAUTO, M., 2019)

Além da questão ambiental, existem outras características vantajosas dos carros movidos a célula de combustível em relação aos puramente elétricos com baterias, que são: maior autonomia e abastecimento mais rápido. A Tabela 5 abaixo, identifica as semelhanças e diferenças entre elas:

Tabela 5 - Comparação entre as células de combustível e as baterias

Semelhanças	Diferenças
Se conectarmos várias células a combustível umas às outras nós aumentamos a potência. Da mesma forma como ocorre nas baterias.	Na célula a combustível, o ânodo e o cátodo são feitos basicamente de carbono e platina, e não são consumidos. Apenas os combustíveis hidrogênio e oxigênio/ar o são, logo, enquanto existir hidrogênio e oxigênio, a célula a combustível irá funcionar. Quando terminar o combustível, basta recarregar e imediatamente a célula recomeça a funcionar.
Ambas as tecnologias consistem de eletrodos - um ânodo e um cátodo - em contato com um eletrólito e produzem energia elétrica através de uma reação eletroquímica.	Já durante as reações químicas na bateria, o ânodo e o cátodo são consumidos até acabarem. Depois, devem ser substituídos ou recarregados.
As reações químicas ocorrem no ânodo e no cátodo, com a transferência de elétrons sendo feita por um circuito elétrico externo, para que ocorra a reação completa.	Se compararmos a quantidade de energia por peso, veremos que as células a combustível apresentam vantagens, ou seja, são mais leves.

Fonte: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE (2018)

Já em comparação ao uso do hidrogênio e os combustíveis fósseis, é possível estabelecer algumas diferenças, como mostra a Tabela 6 abaixo. Enquanto o primeiro

alimenta motores elétricos, o segundo é fonte de energia para motores a combustão. De maneira geral, o motor elétrico apresenta claras vantagens sobre o motor a combustão, como pode ser observado no quadro comparativo a seguir:

Tabela 6 - Comparação entre os motores elétrico e a combustão

Motor Elétrico	Motor a Combustão
Silencioso	Barulhento
Praticamente não usa óleo lubrificante	Necessita de óleo lubrificante, um grande agente poluidor
Manutenção simples	Manutenção cara e complexa
Freio regenerativo, capaz de transformar energia mecânica em elétrica	Sem possibilidade de freio regenerativo
Economia de espaço, em virtude da simplicidade dos processos	Motor de grandes proporções, necessitando de espaço considerável
A partir do hidrogênio, tem água como subproduto	A partir dos combustíveis fósseis, tem gases poluentes como subproduto
Eficiência de até 95%	Eficiência máxima de 40%

Fonte: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE (2018)

3.3 PERSPECTIVAS FUTURAS PARA CONSOLIDAÇÃO DO HIDROGÊNIO NO BRASIL

Nos últimos anos, depois de um longo período de estagnação, o Brasil intensificou os esforços pelo desenvolvimento da tecnologia do hidrogênio. Em 2018, foi criada a Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2) e, posteriormente, também o Comitê Técnico do Combustível do Futuro (CT-CF), que será composto por quinze órgãos e coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) (MME, 2021) Além da ABH2 e o CT-CF, houve a criação do Núcleo de Pesquisa de Hidrogênio junto da hidrelétrica Itaipu (NUPHI). O superintendente de energias renováveis da Itaipu Binacional, Paulo Afonso Schmidt, afirma que a “NUPHI já domina a produção de Hidrogênio, que perpassa todo o ciclo de obtenção do gás até seu armazenamento para posterior uso em pilhas de combustível”. Sendo Itaipu a

segunda maior hidrelétrica do mundo, observa-se a relevância da produção de hidrogênio a partir da matriz hidrelétrica brasileira (Conferência Mundial de Energia do Hidrogênio, 2018).

O professor Maurício Tolmasquim, um dos maiores especialistas brasileiros em energia renovável, afirmou que “o Brasil possui alto potencial de se tornar importante produtor mundial de hidrogênio. Isso porque a posição geográfica privilegiada permite um grande aproveitamento energético de fontes renováveis”. Quando observada a energia solar, por exemplo, pesquisas recentes da Agência Internacional de Energias Renováveis apontam que o Brasil possui o dobro de radiação solar que a Alemanha, país europeu líder mundial em energia solar, ou seja, um mesmo painel solar produziria o dobro de energia se localizado em solo brasileiro. Semelhante ao potencial solar, o professor aponta o potencial do país para as energias eólica e hidrelétrica, a última já amplamente consolidada na matriz energética nacional. (*INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY*, 2018).

Abaixo, é possível observar na Tabela 7 as recomendações dadas pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) do Ministério da Ciência e Tecnologia, em relação ao desenvolvimento do mercado de hidrogênio no Brasil:

Tabela 7 - Recomendações de incentivo aos sistemas de utilização do hidrogênio

RECOMENDAÇÕES	PRIORIDADE	CURTO PRAZO (0 A 5 ANOS)	MÉDIO PRAZO (5 A 10 ANOS)	LONGO PRAZO (10 A 15 ANOS)	INSTITUIÇÕES
ROTEIRO TECNOLÓGICO					
Financiamento do desenvolvimento de células a combustível tipo PEM	MA	X			CNPq, FAPs, MCT
Financiamento do desenvolvimento de células a combustível tipo Etanol Direto	MA	X	X	X	CNPq, FAPs, MCT
Financiamento do desenvolvimento de células a combustível tipo Óxido Sólido	M	X	X	X	CNPq, FAPs, MCT
ROTEIRO POLÍTICO-INSTITUCIONAL					
Abertura de linhas de financiamento para empresas de pequeno e médio porte para aquisição de equipamentos e infraestrutura	MA	X	X		FAPs, FINEP, BNDES

Fonte: CGEE, 2010

Nota: Muito Alta (MA)

Do ponto de vista econômico, um estudo de pesquisadoras da Universidade de São Paulo (USP) publicado no *International Journal of Hydrogen Energy*, aponta que vender hidrogênio verde para setores como transporte ou indústria é mais lucrativo do que transformá-lo novamente em energia elétrica, para aplicações estacionárias. O processo completo, que envolve a produção, armazenamento e, por fim, a transformação do hidrogênio verde de volta em energia não é o mais lucrativo por essa última etapa implicar na adoção de sistemas a célula de combustível, o que encarece o processo. A outra opção é exportar o produto, já que, segundo Drielli Peyerl (coautora do estudo), países da Europa estão atentos quanto ao potencial em fontes renováveis que os países do hemisfério Sul têm, como o Brasil e África do Sul. Nesse sentido, acredita-se que o Brasil pode ocupar uma posição de protagonismo mundial ao fechar parcerias para fornecer hidrogênio verde a outras nações.

No Brasil, alguns empreendimentos já se adiantaram na solicitação de licenças ambientais para produzir hidrogênio. Só que, mesmo com toda essa movimentação, o setor carece de regulamentação, o que gera incertezas e algum grau de insegurança aos projetos. A maior parte está localizada em portos, e miram a oferta de energia eólica offshore com a eletrólise da água para produção de hidrogênio verde. (EPBR, 2022)

A viabilidade econômica para a produção do hidrogênio verde no Brasil divide opiniões, pelo alto custo da eletrólise. Segundo Marina Domingues, diretora de mercado e regulação da ABH2, a eletrólise é um processo extremamente caro e requer investimentos muito altos, por isso, acredita que o setor não está disposto a pagar. Entretanto, Marina concorda que o debate avançou recentemente. E, pela perspectiva de Ricardo Gedra, gerente de análise e informações ao mercado na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), toda tecnologia nova é cara e acredita que o custo diminua nos próximos anos, pelo fato de haver muito investimento em pesquisa pelo mundo. Um exemplo de busca de solução é a “Aliança Brasil-Alemanha para o Hidrogênio”, que lançou um programa de inovação para startups, instituições sem fins lucrativos e empreendedores que buscam alavancar o desenvolvimento do hidrogênio verde no país. (Valor Globo, 2022)

Diferentemente de outros países, como Chile, Uruguai e Colômbia, que privilegiam o hidrogênio verde (produzido a partir de fontes renováveis), no Brasil, o PNH2 aposta nas múltiplas rotas de fabricação de hidrogênio, incluindo fontes fósseis, como gás e carvão. Essa estratégia é conhecida como hidrogênio arco-íris (EPBR, 2022).

Além disso, foram descobertas reservas de hidrogênio natural em quatro estados: Ceará, Roraima, Tocantins e Minas Gerais. O geólogo Alain Prinzhofer, responsável pelo estudo, destacou a importância da descoberta, pois o hidrogênio natural é mais barato que o industrializado e só há um único caso de produção industrial de hidrogênio natural no mundo, em Mali, o que coloca o Brasil em um elevado patamar de competitividade. Por fim, o caso de Mali é um exemplo de sucesso, visto que essa experiência é responsável por criar 100% de energia limpa em um vilarejo pobre que não tinha acesso à eletricidade (Conferência Mundial de Energia do Hidrogênio, 2018).

Com relação ao etanol, segundo Edmundo Barbosa, presidente do Sindicato da Indústria de Fabricação do Alcool do Estado da Paraíba (Sindalcool), o país é detentor de uma tecnologia única para a conversão de etanol em hidrogênio. Barbosa acredita que há uma ação agressiva de países europeus em promover a produção de hidrogênio a partir da eletrólise, mas que o interesse do Brasil deveria ser a produção de hidrogênio a partir do etanol. Ele também expõe que embora a célula de combustível ainda esbarre em dificuldades tecnológicas quando o assunto é transformar o etanol em hidrogênio no veículo, a tecnologia que faz essa conversão, o reformador, já está madura para instalação em postos de abastecimento. A vantagem de ter um reformador de etanol em postos é mitigar os pontos negativos do transporte do hidrogênio, já que ele é 100 vezes mais volátil que a gasolina. Portanto, o etanol seria uma espécie de hidrogênio líquido e não exigiria mudanças na infraestrutura de distribuição (EPBR, 2021).

Seguindo com essa mesma ideia, o CEO da Volkswagen América Latina Pablo Di Si, defende que o Brasil deve ser um exportador de tecnologias de etanol, como a célula de combustível, tanto para países vizinhos como para o continente europeu e potências emergentes como China e Índia. Pablo Di Si acredita na vantagem do etanol em relação aos carros a bateria e da necessidade de o Brasil apostar em soluções mais apropriadas à realidade nacional quando o assunto é transição energética. (EPBR, 2021)

4 CONCLUSÃO

A possibilidade técnica para a implementação do hidrogênio na matriz energética brasileira, especialmente na substituição dos combustíveis fósseis convencionais, se deu a partir de análises do mercado. Foi observado que vários países vêm estudando as aplicações do hidrogênio por diversos motivos, sendo em maior parte por questões ambientais, com o objetivo de exercer as responsabilidades estabelecidas em tratados e a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias, para assegurar independência energética por evidências geopolíticas.

Analisando-se as diferentes aplicações do hidrogênio em sistemas para veículos leves, foi observado que das emissões de GEE, grande parte é proveniente do setor de transporte e, foi verificado que a utilização de combustíveis como o etanol e o próprio hidrogênio mitigariam uma parcela desse problema. Em relação a sua obtenção, existem barreiras técnicas como a falta de legislações preestabelecidas, armazenamento, transporte, alto custo e as barreiras tecnológicas para a produção do hidrogênio.

Atualmente, a forma de obtenção mais utilizada é a partir dos combustíveis fósseis, denominado hidrogênio cinza, que já demonstrou não ser uma alternativa interessante devido as consideráveis emissões de GEE durante o processo. Também há estudos declarando não existir relevantes vantagens econômicas na substituição do gás natural pelo hidrogênio cinza, além dos benefícios ambientais serem bem limitados.

Sendo assim, os esforços e as pesquisas buscam desenvolver uma forma de obtenção de hidrogênio que emita cada vez menos GEE, utilizando as fontes renováveis. O hidrogênio verde, apesar da necessidade de diminuir o preço para sua viabilidade econômica, ainda assim é considerado uma alternativa muito promissora para cenários futuros. Essa é uma dúvida que divide muitas opiniões, mas apesar da maioria dos investimentos estarem ainda em fase inicial, especialistas acreditam que não irá demorar muito para o custo de produção do hidrogênio verde baixar, principalmente dos eletrocatalisadores.

Assim, a hipótese investigada neste trabalho de que o hidrogênio pode ser um substituto dos combustíveis fósseis foi confirmada, demonstrando possuir grande potencial tecnológico. Pode-se até dizer que a sua utilização através de células de combustível em veículos leves, a nível comercial é esperada a médio prazo.

A célula de combustível de etanol direto ainda enfrenta desafios tecnológicos para ser difundida, por isso, muitos projetos de veículos leves utilizam células de combustível do tipo troca de membrana de prótons. Atualmente, a PEMFC é o modelo mais comercializado no mundo, possuindo aplicações estacionárias e automotivas, e mesmo assim, não detém um valor baixo de mercado devido à falta de pesquisas e seu desenvolvimento. Sendo assim, o custo dos veículos com motores a combustão interna ainda é mais atrativo do que os movidos por célula de combustível, não sendo possível definir economicamente as vantagens, apenas comparativos entre as eficiências.

Apesar do uso do hidrogênio para fins energéticos ser um assunto debatido desde a década de 70, ainda não houve expressivo investimento dos países para sua utilização em larga escala, além da necessidade existente do desenvolvimento de arcabouços institucionais, legais e regulatórios. Até hoje, o que foi exposto sobre os custos de produção, dos equipamentos para uso energético do hidrogênio (inclusive aspectos relacionados à segurança) e a dificuldade de transporte e armazenamento são as questões que retardam sua aplicação, por ainda estarem em fase de estudo e definição.

Atualmente no Brasil, diversos memorandos de entendimento foram assinados entre grandes empresas e os governos do Ceará, Pernambuco, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, entre outros, sem falar no interesse que outras já demonstraram em desenvolver esse mercado. O objetivo dos memorandos já assinados é estudar a viabilidade de implantação de projetos bilionários para produção do H₂V, sobretudo, para a exportação. Entretanto, ainda se aguarda um plano de trabalho que o Comitê Técnico PNH₂ deverá aprovar, periodicamente, incluindo as ações, responsáveis e prazos, e que busque sinergia com outros programas e políticas públicas.

A curto prazo, acredita-se que o melhor caminho particularmente para o uso do hidrogênio em veículos leves, seria a alternativa do etanol, visto que eliminaríamos os desafios do armazenamento e transporte do hidrogênio, dado que o domínio dos riscos ainda é bastante limitado. E, por já ser um combustível economicamente viável e com a malha de distribuição estruturada, diferentemente das células que utilizam hidrogênio puro e ainda sofrem pelo alto custo e falta de maturação dos projetos.

Para o futuro, acredita-se que o hidrogênio será utilizado como uma forma secundária para o estoque de energia proveniente de fontes renováveis. O Brasil, por possuir uma matriz

elétrica majoritariamente limpa, terá grande potencial para a difusão dessa tecnologia. Levando-se em consideração que o país é um grande produtor de etanol, observa-se a partir das pesquisas desenvolvidas em relação as células de SOFC e DEFC que poderá ser pioneiro no desenvolvimento desse combustível a nível mundial.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **4 GRÁFICOS PARA ENTENDER AS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR PAÍS E POR SETOR.** Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/blog/2020/02/quatro-graficos-explicam-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-por-pais-e-por-setor>, Acesso em: 13, janeiro de 2022.
- [2] **A TRANSIÇÃO PARA ALTERNATIVAS AO CARVÃO É O COMEÇO DE UM FUTURO MAIS VERDE,** <https://www.imf.org/pt/News/Articles/2020/12/08/blog-a-greener-future-begins-with-a-shift-to-coal-alternatives>. Acesso em: 06, fevereiro de 2022.
- [3] A. Kirubakaran; S Jain; R. Nema. **A REVIEW ON FUEL CELL TECHNOLOGIES AND POWER ELECTRONIC INTERFACE. RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS**, V.13, pp.2430–2440, 2009.
- [4] AGÊNCIA EUROPEIA DO AMBIENTE. **ENERGIA.** Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/pt/themes/energy/intro>. Acesso em: 12 jan. 2022.
- [5] AGÊNCIA EUROPEIA DO AMBIENTE. **AGENCY, E. NET ZERO BY 2050: A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR NET ZERO BY 2050**, Paris, v. 1, n 2021, p. 1-224, out/2021. Disponível em: www.eea.europa.eu. Acesso em: 3 jan. 2022.
- [6] AGÊNCIA EUROPEIA DO AMBIENTE. **AGENCY, E. THE FUTURE OF HYDROGEN: SEIZING TODAY'S OPPORTUNITIES. THE FUTURE — OF HYDROGEN** Japão v 1, n 2019 p 1-203 jun/2019. Disponível em — <https://www.eea.europa.eu>. Acesso em: 7 mar. 2022.
- [7] AGÊNCIA EUROPEIA DO AMBIENTE. **AGENCY, INTERNATIONAL ENERGY, HYDROGEN IN NORTH-WESTERN EUROPE: A VISION TOWARDS 2030. HYDROGEN IN NORTH-WESTERN EUROPE**, Paris, v 1, n 2020, p. 1-90, fev/2020. Disponível em: www.eea.europa.eu. Acesso em: 1 mar. 2022.
- [8] AMARAL, M. M. D. **AVALIAÇÃO TÉCNICA DO TRANSPORTE E DO ARMAZENAMENTO DE HIDROGÉNIO VISANDO A DESCARBONIZAÇÃO DO SISTEMA ENERGÉTICO NACIONAL: DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS.** UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA, Lisboa, v. 1, n 2021, p. 1-107, mar/2021.
- [9] ANDERSSON, Joakim; GRÖNKVIST, Stefan. **LARGE-SCALE STORAGE OF HYDROGEN. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY**, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919310195>. Acesso em: 24, abril de 2022.

[10] AMBIENTEBRASIL. **ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO**, Emilio Hoffmann GomesNeto.https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula_combustivel/armazenamento_de_hidrogenio.html Acesso em: 11, maio de 2022.

[11] AEA, **ROADMAP TECNOLÓGICO AUTOMOTIVO BRASILEIRO: ENERGÉTICOS, EMISSÕES GASOSAS, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, SEGURANÇA VEICULAR E CONECTIVIDADE VEÍCULOS DE PASSAGEIROS & COMERCIAIS — ROADMAP TECNOLÓGICO AUTOMOTIVO BRASILEIRO**, São Paulo, v 1, n 2020, p 1-76, jan/2022. Disponível em: <https://aea.org.br/inicio/>. Acesso em: 11 jan. 2022.

[12] BARRETIRI, Thiago Renato, HAUS, Tiago Luis. **ANÁLISE DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO EM MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA**. Programa de Apoio à Iniciação Científica, FAE Centro Universitário, v. 1, n. 2012, p. 1-20, jul/2013.

[13] Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 5, n. 12, p.29041-29069 dec 2019. Centro Universitário do Sul de Minas. **O USO DO HIDROGÊNIO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**. Acessado em: 28, junho de 2022.

[14] C. H. F. da Silva, A. J. V. Madureira, E. S. Tôrres, A. M. Carvalho. **PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ATRAVÉS DE REFORMA DE ETANOL. IN: V CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA (V CITENEL)**, Belém, 22 de junho de 2009.

[15] CHEN, B. **MITIGATION STUDIES OF CARBON CORROSION BY OPTIMIZING THE OPENING SIZE OF THE CATHODE OUTLET IN A PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL WITH DEAD-ENDED ANODE. ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT**, n 119, p. 60-66, 2016.

[16] CIÊNCIA, MINISTÉRO DA; INOVAÇÕES, TECNOLOGIA E. **ESTIMATIVAS ANUAIS: DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL ESTIMATIVAS ANUAIS**, Brasília, v. 5, nº 2020, p. 1-108, fev/2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br>. Acesso em: 25 jan. 2022.

[17] CLIMATEWATCH DATA. **CLIMATEWATCH**. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org>. Acesso em: 15, fevereiro de 2022.

[18] **COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS A HYDROGEN STRATEGY FOR A CLIMATE-NEUTRAL EUROPE**, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>. Acesso em: 10, março de 2022.

[19] **COMO UMA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL E O HIDROGÊNIO**

FUNCIONAM? Disponível em: <http://automoveiseletricos.blogspot.com/2013/06/como-uma-celula-combustivel-e-o.html> Acessado em: 01, maio de 2022.

[20] **COP26: OS PRINCIPAIS FRACASSOS E VITÓRIAS DO ACORDO FINAL DA CÚPULA SOBRE MUDANÇA CLIMÁTICA**, Disponível em:

<https://www.bbc.com/portugueses/internacional-59274397>. Acesso em: 18, fevereiro de 2022.

[21] **COP26: TRANSPORTE LIVRE DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E PROPOSTAS PARA TEXTO FINAL**, <https://news.un.org/pt/story/2021/11/1770042>, Acesso em: 18, fevereiro de 2022.

[22] DAMASCENA, P. J. V. GOÉS, V. Z. D. **VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO PRODUZIDO "IN SITU" EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA. VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO PRODUZIDO "IN SITU" EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**, Vitória, v. 2013, n. 1, p. 1-69, jul/2013.

[23] E. Antolini; E. Gonzalez. **ALKALINE DIRECT ALCOHOL FUEL CELLS**. *JOURNAL OF POWER SOURCES*, V.195, pp. 3431–3450, 2010. *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 37, pp. 4915-4935, 2012.

[24] **EMISSÕES RELATIVAS DE POLUENTES DO TRANSPORTE URBANO.**

Disponível em:

http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5574/1/BRU_n05_emissões.pdf, Acesso em: 14, janeiro de 2022.

[25] **ENERGÉTICA, BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2020: BRAZILIAN ENERGY BALANCE. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2020**, Rio de Janeiro, v. 1, n 1, p. 1-268, mar/2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pi/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 12 jan. 2022.

[26] **ENERGÉTICA, BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2021: BRAZILIAN ENERGY BALANCE. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2021**, Rio de Janeiro, v. 1, n 1, p. 1-268, mar/2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pi/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 12 jan. 2022.

[27] **ENERGÉTICA, E - E D P BASES PARA A CONSOLIDAÇÃO DA ESTRATÉGIA BRASILEIRA DO HIDROGÊNIO: BASES PARA A CONSOLIDAÇÃO DA ESTRATÉGIA BRASILEIRA DO HIDROGÊNIO**. Nota Técnica, Rio de Janeiro, v 1, n 2021, p. 1-36, fev/2021. Disponível em: <https://www.gov.br/imm/pt-br>. Acesso em: 13 jan. 2022.

[28] **ENERGÉTICA, E. - E D. P. HIDROGÊNIO AZUL: PRODUÇÃO A PARTIR DA REFORMA A VAPOR DO GÁS NATURAL COM CCUS. HIDROGÊNIO AZUL, BRASÍLIA**, v. 1, n 2022, p. 1-88, jan/2022. Disponível em.: <https://www.epe.gov.br/pt>. Acesso em: 19 abr. 2022.

[29] **ENERGÉTICA, E. - E D. P. HIDROGÊNIO CINZA: PRODUÇÃO A PARTIR DA REFORMA A VAPOR DO GÁS NATURAL. HIDROGÊNIO CINZA, BRASÍLIA**, v. 1, n 2022, p. 1-61, jan/2022. Disponível em.: <https://www.epe.gov.br/pt>. Acesso em: 19 abr. 2022.

[30] **ENERGÉTICA, E. - E D. P. HIDROGÊNIO TURQUESA: PRODUÇÃO A PARTIR DA PIRÓLISE DO GÁS NATURAL. HIDROGÊNIO TURQUESA, BRASÍLIA**, v. 1, n 2022, p. 1-63, jan/2022. Disponível em.: <https://www.epe.gov.br/pt>. Acesso em: 19 abr. 2022.

[31] **ENERGIA, M. - M D M. E PROGRAMA NACIONAL DO HIDROGÊNIO: PROPOSTAS E DIRETRIZES. PROGRAMA NACIONAL DO HIDROGÊNIO, Brasília**, v. 1, n 2021, p 1-24, jul/2021. Disponível em: <https://Avww.gov.brimme/pt-br>. Acesso em: 15 fev. 2022.

[32] **EPE PUBLICA AS NOTAS TÉCNICAS DEDICADAS AO HIDROGÊNIO CINZA E AO HIDROGÊNIO AZUL**, Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-as-notas-tecnicas-dedicadas-ao-hidrogenio-cinza-e-ao-hidrogenio-azul>. Acesso em: 24, fevereiro de 2022.

[33] **ESTRATÉGICOS, C. - C. D. G. E. E. HIDROGÊNIO ENERGÉTICO NO BRASIL: SUBSÍDIOS PARA POLÍTICAS DE COMPETITIVIDADE: 2010-2025. HIDROGÊNIO ENERGÉTICO NO BRASIL**, Brasília, v. 2010, n. 07, p. 1-72, out/2010. Disponível em: <https://Avww.cgee.org.br>. Acesso em: 19 jan. 2022.

[34] FERREIRA, Monique Cristina. **ESTUDO DA COMBUSTÃO COM ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO EM MOTOR A DIESEL TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**, Pato Branco, v. 1, n° 2017, p. 1-73, jul/2017.

[35] **GUIA PARA A COP26: O QUE É PRECISO SABER SOBRE O MAIOR EVENTO CLIMÁTICO DO MUNDO**, Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/156377-guia-para-cop26-o-que-e-preciso-saber-sobre-o-maior-evento-climatico-do-mundo>. Acesso em: 15, fevereiro de 2022.

[36] **HIDROGÊNIO NO HORIZONTE: PRONTO, QUASE LÁ, VAI?** – World Energy Council, Disponível em: https://worldenergy.org/assets/downloads/POR_-_Innovation_Insights_Briefing_-_Hydrogen_on_the_Horizon_-_Ready%2C_almost_set%2C_go.pdf. Acesso em: 21, julho de 2022.

[37] **HIDROGÊNIO PRECISA VENCER VELHO DILEMA DA INDÚSTRIA DE GÁS, APONTA PESQUISA**, Disponível em: <https://epbr.com.br/hidrogenio-precisa-vencer-velho-dilema-da-industria-de-gas-aponta-pesquisa/>. Acesso em: 19, julho de 2022.

[38] **HYDROGEN ANALYSIS RESOURCE CENTER (HyARC)**, Disponível em: <https://h2tools.org/hyarc>. Acesso em: 02, maio de 2022.

[39] **HYDROGEN**, Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/careers/professionals/career-areas/hydrogen.html>. Acesso em: 10, janeiro de 2022.

[40] J.M. ANDÚJAR; F. SEGURA. **FUEL CELLS: HISTORY AND UPDATING. A WALK ALONG TWO CENTURIES. RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS**, V. 13, PP. 2309-2322, 2009.

[41] MAHLE. **CURSO MAHLE METAL LEVE: MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA CURSO MAHLE METAL LEVE**, São Paulo, v 1, nº 2020, p 1-228, fev/2020 disponível em: <https://www.br.mahle.com/pt/>. Acesso em: 5 abr. 2022.

[42] MATOS, B.R.; **PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ELETRÓLITOS COMPÓSITOS NAFION – TiO₂ PARA APLICAÇÃO EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA DE TROCA PROTÔNICA. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO. INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**. Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2008, p 1-112.

[43] MIRANDA, P E. D; SARRUF, Bernardo. **22ND WORLD HYDROGEN ENERGY CONFERENCE WHEC 2018 22ND WORLD HYDROGEN ENERGY CONFERENCE**, Rio de Janeiro, v 1, n 2018, p. 1-7, jul/2018.

[44] M. Kamarudin; S.Kamarudin; M. Masdar; W. Daud. **REVIEW: DIRECT ETHANOL FUEL CELLS. INTERATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY**, V.38, n.22, pp. 9438-9453, 2013.

[45] MME, **M D M E E - PLANO NACIONAL DE ENERGIA: PNE 2050. PLANO NACIONAL DE ENERGIA**, Brasília, v 1, n 2020, p. 1-243, fev/2020. Disponível em <https://www.gov.br/mme/pt-br> Acesso em: 18 jan. 2022.

[46] **NOTA TÉCNICA BASES PARA A CONSOLIDAÇÃO DA ESTRATÉGIA BRASILEIRA DO HIDROGÊNIO**, Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/> Acesso em: 04, maio de 2022.

[47] **O CANIBALISMO ENERGÉTICO E A RECESSÃO**, Disponível em: <https://epbr.com.br/o-canibalismo-energetico-e-a-recessao/>, Acesso em: 21, janeiro de 2022.

- [48] **O QUE É HIDROGÊNIO VERDE**, Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/o-que-e-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 10, março de 2022.
- [49] **OS DESAFIOS DA ARMAZENAGEM E TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO EM LARGA ESCALA**, Disponível em: <https://gasenergy.com.br/os-desafios-da-armazenagem-e-transporte-de-hidrogenio-em-larga-escala/>. Acesso em: 15, março de 2022.
- [50] PETROLEUM, British" **ENERGY OUTLOOK: 2020 EDITION. ENERGY OUTLOOK**, Reino Unido, v. 1, n 1, p. 1-81, fev/2020. Disponível em: <https://www.bp.com>. Acesso em: 22 fev. 2022.
- [51] **PREÇO E EMISSÕES TIRAM COMPETITIVIDADE DE HIDROGÊNIO CINZA; AZUL PRECISA DE MERCADO DE CARBONO, MOSTRA EPE**, Disponível em: <https://epbr.com.br/preco-e-emissoes-tiram-competitividade-de-hidrogenio-cinza-azul-precisa-de-mercado-de-carbono-mostra-epe/>. Acesso em: 19. julho de 2022.
- [52] **PROTOCOLO DE KYOTO**, Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/protocolo-de-kyoto>, Acesso em: 13, janeiro de 2022.
- [53] **QUAIS AS PRINCIPAIS MATRIZES ENERGÉTICAS DO BRASIL?** Disponível em: <https://www.gnpw.com.br/matriz-energetica/quais-as-principais-matrizes-energeticas-do-brasil/>, Acesso em: 14, janeiro de 2022.
- [54] **SEEG BRASIL**, Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission#. Acesso em: 19, fevereiro de 2022.
- [55] SEEG. **ANÁLISE DAS EMISSÕES BRASILEIRAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA: E SUAS IMPLICAÇÕES PARA AS METAS DE CLIMA DO BRASIL 1970-2019. ANÁLISE DAS EMISSÕES BRASILEIRAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA**, São Paulo, v. 1, n. 2020, p. 1-41, fev/2020. Disponível em: <https://seeg.eco.br>. Acesso em: 7 fev. 2022.
- [56] SEEG. **ANÁLISE DAS EMISSÕES BRASILEIRAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA: E SUAS IMPLICAÇÕES PARA AS METAS DE CLIMA DO BRASIL 1970-2020. ANÁLISE DAS EMISSÕES BRASILEIRAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA**, São Paulo, v. 1, n. 2021, p. 1-55, fev/2021. Disponível em: <https://seeg.eco.br>. Acesso em: 7 fev. 2022.
- [57] **SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E INSUSTENTABILIDADE**. Disponível em http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252008000300011 Acesso em: 13 jan. 2022.

[58] TRINDADE, L. G.; **MEMBRANAS POLIMÉRICAS PARA CÉLULAS A COMBUSTÍVEL: ESTUDO DE RESINAS TROCADORAS DE ÍONS COMBINADAS A LÍQUIDOS IÔNICOS**. Dissertação de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2015, p 1-140.

[59] WOLLMANN, Fábio Leandro. **ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE GÁS HIDROGÊNIO EM VEÍCULOS AUTOMOTORES**, Panambi, v. 1, n. 2013, p. 1-74, jul/2013.