



Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia de Energia

# O Papel do Hidrogênio na Descarbonização do Transporte Coletivo Público do Distrito Federal

Autor: Samara Cristina Silva dos Santos  
Orientador: Rudi Henri van Els

Brasília, DF  
2022



Samara Cristina Silva dos Santos

# **O Papel do Hidrogênio na Descarbonização do Transporte Coletivo Público do Distrito Federal**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Rudi Henri van Els

Brasília, DF

2022

---

Samara Cristina Silva dos Santos

O Papel do Hidrogênio na Descarbonização do Transporte Coletivo Público do Distrito Federal/ Samara Cristina Silva dos Santos. – Brasília, DF, 2022-52 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Rudi Henri van Els

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. Hidrogênio. 2. Transporte. I. Rudi Henri van Els. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. O Papel do Hidrogênio na Descarbonização do Transporte Coletivo Público do Distrito Federal

---

Samara Cristina Silva dos Santos

## **O Papel do Hidrogênio na Descarbonização do Transporte Coletivo Público do Distrito Federal**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

---

**Rudi Henri van Els**

Orientador

---

**Prof. Dr. Fábio Lisboa**

Convidado 1

---

**Dr. Ricardo Junqueira Fujii**

Convidado 2

Brasília, DF

2022

*Dedico este trabalho a todos aqueles que estão dispostos a aprender com o passado, se desenvolver no presente e se dedicar pelo futuro, mesmo que ele não lhe pertença.*

# Agradecimentos

*Agradeço aos meus pais Ivanildo e Lirismar, por me proporcionarem condições, espaço e apoio durante a graduação sem cobranças, mas com confiança e a cada um dos meus irmãos Guilherme, Gustavo e Heitor, com quem aprendi a ser paciente e leal.*

*Agradeço ao meu orientador Rudi Henri van Els por aceitar como bolsista no projeto Tecnomobele, o qual me abriu as portas para a Engenharia de Energia de uma forma que em 4 anos de universidade não havia conhecido, sem o sim para o projeto hoje este trabalho não poderia estar sendo desenvolvido.*

*Agradeço às minhas amigas Stéfane e Adriana, por compartilharem ao meu lado os medos, angústias, alegrias e conquistas em torno da graduação, que juntas possamos continuar em busca do momento mais bonito da vida.*

*"Tire suas mãos daquilo que você não pode controlar,  
e ponha suas mãos naquilo que você pode mudar."  
(Min Yoongi, Dear Class 2020)*

# Resumo

O hidrogênio é um vetor energético com potencial para atuar na descarbonização de setores como, indústria e transporte, da perspectiva de sua produção por meio de fontes renováveis. O hidrogênio como combustível de veículos elétricos a célula a combustível pode ser introduzido na matriz energética como alternativa para auxiliar na redução emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) causadas por combustíveis fósseis. Este trabalho realiza uma revisão bibliográfica do hidrogênio ao longo da história, seus métodos de produção, tecnologias de uso considerando que veículos elétricos a célula a combustível de hidrogênio irão compor parte da frota de veículos do transporte público coletivo do Distrito Federal e avalia que a contribuição do uso do hidrogênio como combustível na redução de emissões no transporte coletivo público do Distrito Federal é possível por meio da inserção de 10 ônibus a célula a combustível de hidrogênio na frota de frota anual até 2032 considerando o cenário de produção de hidrogênio ( $H_2$ ) por meio da eletrólise da água e se beneficiando do potencial solar fotovoltaico da região para produção local.

**Palavras-chaves:** hidrogênio, descarbonização, fontes renováveis, transporte, veículos elétricos, Distrito Federal.



# Abstract

Hydrogen is energy vector with potential to act in the decarbonisation of sectors such as industry and transport, due the production through renewable sources. Hydrogen as fuel for full cell electric vehicles can be introduced into the energy matrix as an alternative to help in the reduce of CO<sub>2</sub> emissions caused by fossil fuels. This project carries out a bibliographical review of hydrogen throughout history, its production methods, technologies for use considering that hydrogen fuel cell electric vehicles will compose part of the fleet of public transport vehicles in the Federal District and evaluates that the contribution of the use of hydrogen as fuel in the reduction of emissions in public transport in the Federal District is possible through the insertion of ten hydrogen fuel cell buses in the annual fleet by 2032, considering the production scenario of hydrogen ( $H_2$ ) through of water electrolysis and benefiting from the region's solar photovoltaic potential for local production.

**Key-words:** hydrogen, decarbonization, renewable sources, transport, electric vehicles, Federal District.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Demanda de Hidrogênio por Setor, 2000-2020 . . . . .	19
Figura 2 – Combustíveis de Hidrogênio por Setor - 2050 . . . . .	20
Figura 3 – Fontes de produção de hidrogênio, 2020 . . . . .	21
Figura 4 – Esquemático da Reforma a Vapor do Metano . . . . .	22
Figura 5 – Representação Básica da Eletrólise da Água . . . . .	24
Figura 6 – Representação do Eletrolisador . . . . .	24
Figura 7 – Representação Simples do Eletrolisador PEM . . . . .	25
Figura 8 – Representação Simples do Eletrolisador Alcalino . . . . .	26
Figura 9 – Representação Simples do Eletrolisador de Óxido Sólido . . . . .	26
Figura 10 – Representação de uma Célula a Combustível . . . . .	29
Figura 11 – Funcionamento de uma célula a combustível (1) . . . . .	30
Figura 12 – Funcionamento de uma célula a combustível (2) . . . . .	30
Figura 13 – Ônibus movido a hidrogênio . . . . .	32
Figura 14 – Eixos temáticos do PNH2 . . . . .	34
Figura 15 – Matriz Elétrica Brasileira . . . . .	35
Figura 16 – Corte de um veículo a célula combustível - Carro . . . . .	38
Figura 17 – Corte de um veículo a célula combustível - Ônibus . . . . .	39
Figura 18 – Porcentagem de Veículos a Célula Combustível e Estações de Reabastecimento de Hidrogênio por Países . . . . .	40
Figura 19 – Mapa do Distrito Federal . . . . .	41
Figura 20 – Cenário 1 . . . . .	42
Figura 21 – Cenário 2 . . . . .	42
Figura 22 – Cenário 1 - Emissões de $CO_2$ em toneladas equivalentes para 10 anos . . . . .	44
Figura 23 – Cenário 2 - Emissões em ( $tCO_2eq$ ) Diesel vs Diesel + Hidrogênio para 10 anos . . . . .	45
Figura 24 – Produção anual de $H_2$ no Brasil . . . . .	46
Figura 25 – Estimativa do potencial técnico de produção de hidrogênio a partir do saldo de recursos energéticos até 2050 . . . . .	47

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Tipos de Células a Combustível . . . . .	29
Tabela 2 – Operação dos Ônibus de Transporte Público Coletivo no DF. . . . .	41
Tabela 3 – Crescimento da frota de veículos de 2022 a 2032 para o Cenário 1 . . . .	43
Tabela 4 – Crescimento da frota de veículos de 2022 a 2032 para o Cenário 2 . . . .	45
Tabela 5 – Caso simulado de produção de $H_2$ por geração eólica . . . . .	47

# Lista de abreviaturas e siglas

CCS	Captura e Armazenamento de Carbono
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
EMTU/SP	Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo
FCEV	Veículo Elétrico a Célula a Combustível
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GEF	Global Environmental Facility
IEA	Agência Internacional de Energia
IRENA	Agência Internacional Para Energias Renováveis
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MME	Ministério de Minas e Energia
NASA	Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica
ONU	Organização das Nações Unidas
PEM	Membrana Polimérica
ProH2	Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PROCac	Programa Nacional de Células a Combustível
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SEMOB	Secretária de Transporte e Mobilidade do DF
SOE	Óxido Sólido
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

# Lista de símbolos

$NH_3$	Amônia
$CO_2$	Dióxido de Carbono
$^{\circ}C$	Graus Celsius
$H_2$	Hidrogênio
$kW$	Quilowatt-hora
$Mt$	Milhões de Toneladas
$N_2$	Nitrogênio
$\%$	Porcentagem
$tCO_2eq$	Tonelada de Dióxido de Carbono Equivalente

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>16</b>
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
<b>1.2</b>	<b>Metodologia</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>HIDROGÊNIO</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Histórico</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Demanda e Aplicações</b>	<b>19</b>
2.2.1	Síntese da Amônia	19
<b>2.3</b>	<b>Métodos de Produção</b>	<b>20</b>
2.3.1	Reforma a Vapor	21
2.3.1.1	Captura, Uso e Armazenamento de Carbono	23
2.3.2	Eletrólise da Água	23
2.3.2.1	Eletrolisador de Membrana Polimérica	25
2.3.2.2	Eletrolisador Alcalino	25
2.3.2.3	Eletrolisador de Óxido Sólido	26
2.3.3	Uso da água	27
<b>2.4</b>	<b>Célula a Combustível</b>	<b>27</b>
2.4.1	Características da célula a combustível	28
2.4.2	Funcionamento da célula a combustível	29
<b>3</b>	<b>O BRASIL E O HIDROGÊNIO</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Desafios do Hidrogênio no Brasil e no Mundo</b>	<b>34</b>
3.1.1	Custo de Produção	34
3.1.2	Transporte e Armazenamento	35
<b>4</b>	<b>HIDROGÊNIO NO SETOR DE TRANSPORTES</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Veículos Elétricos a Célula a Combustível</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>CENÁRIOS DO TRANSPORTE PÚBLICO DO DISTRITO FEDERAL</b>	<b>41</b>
5.0.1	Cenários prospectivos	42
5.0.2	Cenário 1	43
5.0.3	Cenário 2	44
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>48</b>

<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>49</b>
--------------------	-----------

# 1 Introdução

O Acordo de Paris, assinado em 2015 durante a 21<sup>a</sup> Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, estabeleceu para os países como principal meta manter o aumento da temperatura global bem abaixo dos 2°C (MEIRELES, 2020). A partir desta meta a União Européia e alguns países como China, Japão, França e Estados Unidos se dedicaram a buscar dentro de suas possibilidades combustíveis-chaves para auxiliar na descarbonização de setores, dessa forma introduzindo o hidrogênio nas pautas energéticas (IRENA, 2020b). O Brasil desde meados de 2000 (CHUM, 2002) também instaurou políticas e programas para o hidrogênio no país, na época tendo a capacidade de geração hidrelétrica e de produção de etanol como pilares para uma cadeia de  $H_2$  no país, atualmente o Brasil é visto como um potencial produtor e exportador de hidrogênio pelo seu potencial e oferta de geração elétrica ligados as fontes eólica e solar.

O hidrogênio possui baixa densidade e alta capacidade de armazenamento de energia, o que contribui para que seja especulado como um combustível do futuro e utilizado nos transportes por meio da célula a combustível. A reação química produzida na célula a combustível de hidrogênio forma uma corrente elétrica que alimenta o motor de *Full Cell Electric Vehicles* (FCEVs) ou Veículos Elétricos a Célula a Combustível. Estes veículos podem se tornar peças fundamentais para que cidades consigam reduzir suas emissões de  $CO_2$  por parte do aumento da frota de veículos nos próximos anos, uma vez que os produtos da reação química são água e calor.

De acordo com Agência Internacional de Energia (IEA), o setor de transportes foi responsável por 24% das emissões diretas de  $CO_2$  oriundas da queima de combustíveis em 2020. Ao mesmo tempo em que houve um crescimento de 40% na compra e venda desses veículos de acordo com IEA (2021a), impulsionado pela busca por transportes cada vez mais limpos, algo que pode ser estimulado principalmente pelo uso desses veículos atrelados ao transporte público.

O Distrito Federal busca inserir na sua frota de veículos do transporte público coletivo unidades totalmente elétricas e que utilizam biocombustíveis, porém a região também poderia se beneficiar da inserção de ônibus a hidrogênio a longo prazo, por ser beneficiada pelo potencial de geração solar fotovoltaica, e já registrar a redução de emissões de  $CO_2$  nos últimos anos em cerca de 20% apenas pelo uso de etanol e biodiesel em parte da sua frota, segundo dados registrados em 2018 (SEMA, 2021).



## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o impacto do hidrogênio na descarbonização do setor de transportes do Distrito Federal por meio da prospecção de cenários do transporte público no horizonte 2030, com a introdução de veículos elétricos a célula a combustível na frota de veículos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Descrever as particularidades que tornam o hidrogênio uma das principais opções de combustível para auxiliar nas metas de descarbonização para manter a temperatura global bem abaixo dos 2°C.
- Apresentar como o funcionamento de veículos elétricos a célula a combustível de hidrogênio podem auxiliar na redução de emissões de  $CO_2$  nas cidades.
- Apresentar como o Brasil se posiciona em termos de políticas públicas sobre o uso e produção do hidrogênio.
- Estabelecer cenários prospectivos por meio da estimativa de crescimento da frota de ônibus elétricos a célula a combustível no Distrito Federal, e seu impacto sobre a redução de emissões de  $CO_2$ .

## 1.2 Metodologia

Para este trabalho foi realizada a revisão bibliográfica para mapear a origem do hidrogênio como elemento químico presente em laboratórios até seu uso como combustível em veículos abordando suas principais aplicações ao longo da história, métodos de produção, tecnologias de uso e incentivos em pesquisa e desenvolvimento por parte de políticas públicas no Brasil, estabelecendo cenários de prospecção tendo como objeto de estudo o transporte público no Distrito Federal sendo composto por veículos elétricos a célula a combustível. Com as projeções desses cenários espera-se avaliar a contribuição do uso do hidrogênio como combustível de veículos elétricos a célula a combustível na redução de emissões de  $CO_2$  no Distrito Federal.

## 2 Hidrogênio

O hidrogênio ( $H_2$ ) é o elemento número 1 da tabela periódica, estima-se que esteja presente em cerca de 75% da massa do Universo, e em 90% das moléculas conhecidas. Júlio Verne, em seu livro *A Ilha Misteriosa*, descreveu em uma de suas passagens que a água um dia seria empregada como combustível, que seria o carvão do futuro, explicando que o hidrogênio e oxigênio seriam fontes de calor e luz superiores.

### 2.1 Histórico

O hidrogênio foi descoberto em 1776 pelo cientista britânico Henry Cavendish, que o apresentou a sociedade científica por meio de estudo publicado na Real Sociedade de Londres, onde nomeava o hidrogênio como "ar inflamável" (RIFKIN, 2003). Foi Antoine Lavoisier, químico francês, em 1785 que nomeou o "ar inflamável" como hidrogênio, ao reproduzir a experiência de Cavendish e conseguir gerar uma centelha elétrica (RIFKIN, 2003).

Os primeiros usos do hidrogênio datam de 1793, onde o gás hidrogênio foi utilizado pelos franceses em balões de reconhecimento durante a guerra (RIFKIN, 2003), antecipando como o gás seria utilizado no final do século XIX e início do século XX, após isso o hidrogênio passou a ser utilizado em algumas experiências como combustível. De acordo com Miranda (2019), o primeiro automóvel alimentado por um motor de combustão interna desenhado e apresentado por François Isaac de Rivaz, em 1806, tinha hidrogênio como combustível.

O hidrogênio foi popularizado como combustível por meio de seu uso em dirigíveis, durante o final do XIX e início do século XX. Em 1923, o cientista John Burden Sanderson Haldane durante uma palestra na Universidade Cambridge por meio de um tratado científico destacou como a energia do hidrogênio seria o combustível do futuro, mostrando como carvão e derivados do petróleo não poderiam mais suprir a sociedade britânica em alguns anos, e que o hidrogênio se mostraria não apenas mais energético, como também ambientalmente mais benéfico (RIFKIN, 2003).

O hidrogênio é mais leve que o ar, como também durante as primeiras décadas do século XX mais barato que o hélio. Apesar disso, segundo Neto (2005) não foi sempre bem aceito, após o incidente que causou a explosão do dirigível Hindenburg em 1937, pouco antes de pousar em Nova Jersey – EUA, se criou o receio na população ao uso do elemento, pois por anos atribuiu-se a tragédia ao combustível, considerando o hidrogênio perigoso pela sua alta inflamabilidade. O autor aponta que a tinta utilizada para colorir

a parte externa do balão, possuía alta volatilidade, ou seja, mesmo que o combustível do balão fosse hélio, ainda sim a explosão aconteceria.

O baixo interesse por hidrogênio em transportes após o acidente do Hindenburg e os seus altos custos para utilização neste setor deu espaço para combustíveis fósseis como gasolina e diesel passarem a impulsionar linhas de produção em massa de veículos, parte do impacto dos modelos de fordismo e taylorismo que permearam a produção das grandes indústrias a partir da segunda revolução industrial. Estes combustíveis eram mais baratos em termos de custos de produção e transporte, além de que sua tecnologia já estava preparada para estimular o mercado mundial ao contrário das tecnologias do hidrogênio.

O reflexo do uso desses combustíveis fósseis pode ser sentido pela primeira vez durante a Conferência de Estocolmo de 1972, convocada pela Organização Nacional das Nações Unidas (ONU). Foi o primeiro alerta de que o meio ambiente e a forma como as atividades utilizavam os recursos dos territórios passaram a ameaçar o futuro, principalmente pelas grandes potências que após a Segunda Guerra Mundial buscavam recuperar suas economias quebradas investindo em desenvolvimento industrial sem mensurar os impactos resultantes de um crescimento acelerado e sem coordenação (GURSKI; GONZAGA; TENDOLINI, 2012).

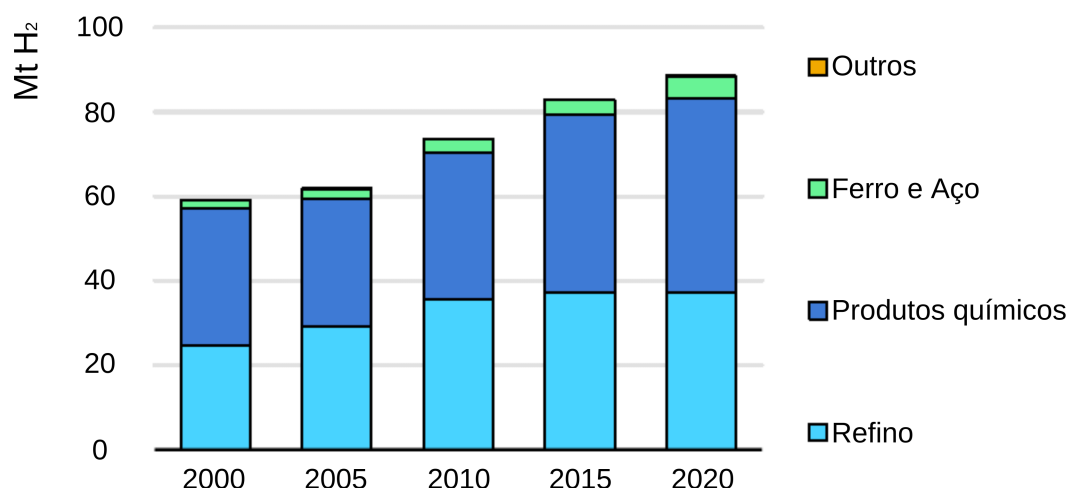
Em 1973, a Crise do Petróleo mostrou a fragilidade dos países diante de um comércio do petróleo que potencialmente era controlado apenas por companhias ocidentais, e abriu espaço para que se retomassem as discussões sobre outras formas de energia que pudessem participar ativamente de diversos sistemas tal como o petróleo (NUNES, 2016), o que trouxe o hidrogênio novamente para pautas fazendo com que os Estados Unidos e União Soviética passassem a destinar recursos para pesquisa em hidrogênio. Nos anos subsequentes ao final do século XX foi possível mapear projetos com uso de hidrogênio como combustível na aviação e transporte público em países da Europa e Ásia. (RIFKIN, 2003)

Assim, a descarbonização faz-se imprescindível, desde que se refere a redução de gases que são lançados a atmosfera, especialmente o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), por meio de medidas que influenciam o uso de fontes renováveis, sistemas de compensação de carbono e outras ferramentas para atingir esse objetivo. O hidrogênio é hoje visto no cenário mundial como uma das principais opções para descarbonização, em conjunto com a eletrificação, por ser um vetor energético que tem seu uso aproveitado na indústria, transporte e no estímulo ao uso de fontes renováveis por meio dos seus métodos de produção.

## 2.2 Demanda e Aplicações

Em 2020 a demanda global de hidrogênio foi de 90 milhões de toneladas (Mt), o que representa um crescimento de 50% desde a virada do milênio (IEA, 2021b) com quase toda demanda (Fig.1) concentrada nos usos industriais, principalmente na fabricação de produtos químicos e processos de refino do petróleo.

Figura 1 – Demanda de Hidrogênio por Setor, 2000-2020



Fonte: Traduzido do Global Hydrogen Review 2021 (IEA, 2021b).

Dos 45 Mt de  $H_2$  utilizados em produtos químicos  $\frac{3}{4}$  são destinados a produção de amônia, principal matéria-prima de fertilizantes nitrogenados e  $\frac{1}{4}$  a produção de metanol (IEA, 2021b), usado largamente como matéria-prima para produção de formol e solventes.

A indústria do refino consome cerca de 40 Mt de  $H_2$  para o tratamento de frações do petróleo por meio dos processos de hidrotreatamento e hidrocrackeamento. No primeiro o hidrogênio é utilizado para auxiliar a redução de teores de enxofre e o no segundo, reduz teores de enxofre, nitrogênio e metais, enquanto se utilizado por meio do processo que faz maior uso de energia, produz derivados mais leves a partir de gasóleos de vácuos e resíduos. O restante do uso do hidrogênio está ligado a indústria siderúrgica e pequenos volumes em outras aplicações industriais, transportes e geração de eletricidade.

### 2.2.1 Síntese da Amônia

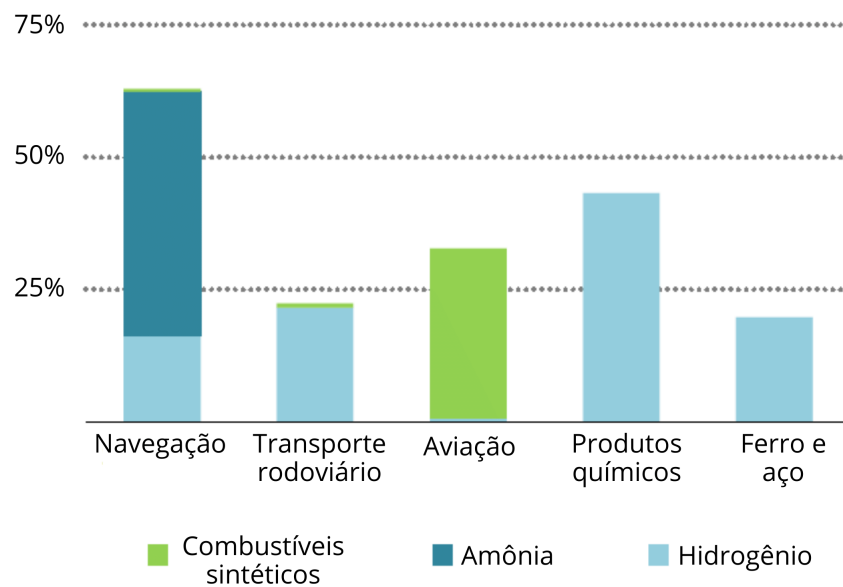
A síntese da amônia (2.1) descreve a reação catalítica de nitrogênio e hidrogênio em altas temperaturas de 400°C a 600°C com pressões entre 200 a 400 atm (MIRANDA, 2019).



O transporte de amônia é conhecido, o que dá ao hidrogênio uma alternativa de transporte que não exige ganhos tecnológicos em pouco tempo. Como é o caso do transporte direto do hidrogênio em forma de gás ou líquido.

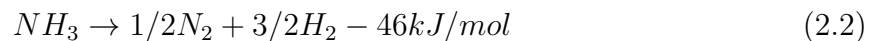
A própria amônia é vista como um produto de hidrogênio com potencial energético (Fig 2) para geração de eletricidade e para cumprir a demanda global de combustíveis marítimos (BOUCKAERT et al., 2021).

Figura 2 – Combustíveis de Hidrogênio por Setor - 2050



Fonte: Traduzido do Net Zero by 2050: A Roadmap For The Global Energy Sector (BOUCKAERT et al., 2021).

O processo para obter o hidrogênio a partir da amônia é a chamada decomposição, a reação inversa da síntese (2.2) com característica endotérmica. Considerando que o  $H_2$  seja transportado dessa forma é necessário que a instalação que tenha interesse no gás possa promover a separação dos componentes da amônia, processo que resultará em um alto gasto de energia, em razão das altas temperaturas.

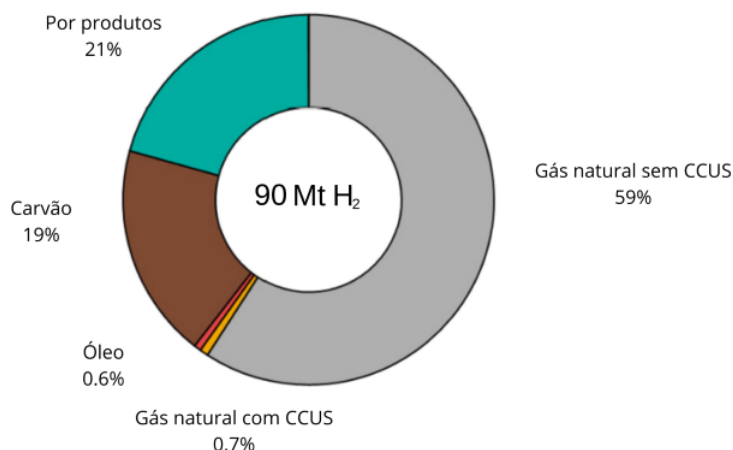


## 2.3 Métodos de Produção

O hidrogênio pode ser produzido a partir de diversos processos como reforma a vapor e a eletrólise da água, os quais este trabalho irá focar, além de gaseificação do carvão mineral, que tende a perder força pela descontinuidade de financiamento a usinas termoelétricas a carvão e de projetos com elevado índice de emissões, e a pirólise do metano, um processo ainda em fase laboratorial (IRENA, 2020b).

Quase toda produção de hidrogênio no mundo tem origem fóssil (Fig.3) e de acordo com a IEA, essa produção foi responsável por quase 900 Mt de emissões de  $CO_2$  em 2020, cerca de 2.5% de emissões de  $CO_2$  dos setores de energia e indústria (IEA, 2021b).

Figura 3 – Fontes de produção de hidrogênio, 2020



Fonte: Traduzido do Global Hydrogen Review 2021 (IEA, 2021b).

O alto índice de emissões de  $CO_2$  pelos atuais processos de produção do hidrogênio é um dos desafios para esse vetor energético ser explorado dentro do setor de transporte. Entretanto, ele se difere de outros elementos porque pode ser produzido por meio de fontes renováveis e dessa forma ser introduzido no setor para fins da descarbonização.

É importante salientar que o hidrogênio não é tóxico, radioativo ou corrosivo e que sua decomposição não gera produtos perigosos (NETO, 2005), dessa forma a produção de hidrogênio, independente do método não altera a molécula, o que permite que o hidrogênio produzido por fontes renováveis substitua o hidrogênio produzido por fontes fósseis nos mais diversos processos.

### 2.3.1 Reforma a Vapor

O princípio da reforma a vapor é a separação dos átomos de hidrogênio presentes em hidrocarbonetos em moléculas de hidrogênio, ao mesmo tempo que se produz dióxido de carbono na presença de catalisadores, principalmente a base de níquel (MIRANDA, 2019). O tipo de hidrogênio produzido a partir desse processo e da gaseificação do carvão mineral foi classificado pela International Renewable Energy Agency (IRENA) como hidrogênio cinza, uma vez que ambos os processos se tornam extremamente poluentes em razão dos seus sub-produtos, monóxido e dióxido de carbono.

O processo de reforma é altamente endotérmico (ALVES, 2005) acontecendo em temperaturas entre 800°C a 1100°C. A reforma a vapor do metano tem duas principais reações que acontecem simultaneamente.

A reação 2.3 descreve a mistura de metano e vapor d'água, a alimentação do reformador, que possui uma fase anterior ao início do processo chamada de dessulfurização (Fig.4), processo o qual os contaminantes comuns do metano como o enxofre, são hidrotratados e convertidos por meio de catalisadores suportados em alumina e posteriormente adsorvidos nos reatores (VILLAÇA, 2018). O resultado desta reação é o gás de síntese, uma mistura rica em hidrogênio e monóxido de carbono.

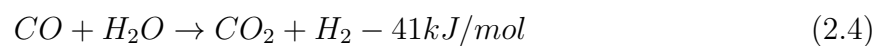
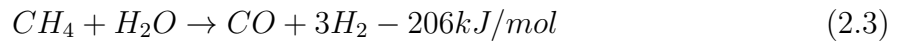
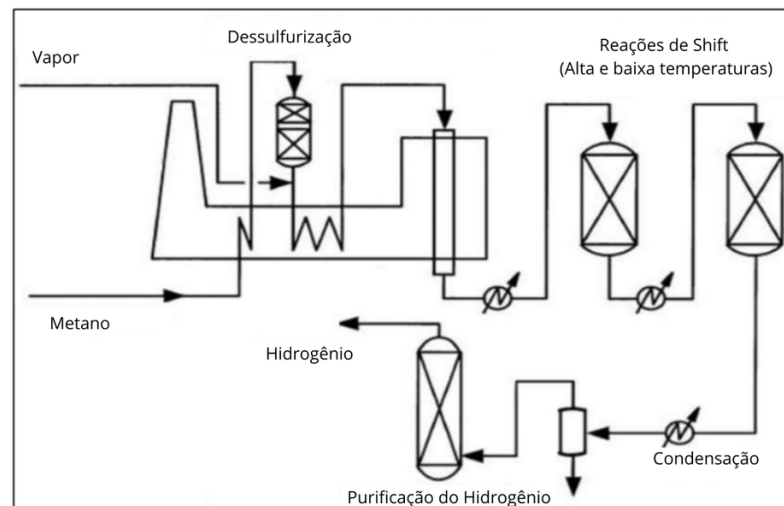


Figura 4 – Esquemático da Reforma a Vapor do Metano

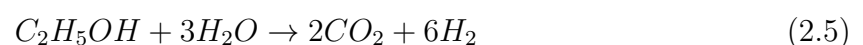


Fonte: Adaptado de Proposta e Simulação de Processo de Reforma a Vapor de Glicerol para Obtenção de Hidrogênio (VILLAÇA, 2018).

O hidrogênio produzido em 2.3 é retirado do reformador e o monóxido de carbono retorna ao processo para passar pela chamada reação de shift (2.5), uma reação de deslocamento de gás-água onde a mistura de monóxido de carbono com vapor de água ao reagir gera hidrogênio e dióxido de carbono (VILLAÇA, 2018).

A reação de shift é submetida a altas e baixas temperaturas por meio do equilíbrio térmico para provocar a redução da concentração de monóxido de carbono, favorecendo que o processo de purificação do hidrogênio, o qual o  $CO_2$  é submetido a absorção química, gere como produto final um hidrogênio de alta pureza (VILLAÇA, 2018).

Quando a reforma a vapor é realizada utilizando etanol, uma das possíveis rotas a serem exploradas no Brasil, grande parte das reações se mantém no processo e a reação global é:



Uma das opções para tratar a presença de dióxido de carbono na reforma a vapor e evitar a fuga para atmosfera é a chamada: Captura, Uso e Armazenamento de Carbono.

### 2.3.1.1 Captura, Uso e Armazenamento de Carbono

As tecnologias de Captura, Uso e Armazenamento de Carbono, conhecidas como CCUS, ainda no início das discussões sobre como lidar com  $CO_2$  emitido na atmosfera, se mostravam uma incerteza. Defensores da reforma a vapor do gás natural afirmavam que o  $CO_2$  gerado durante o processo de reforma poderia ser isolado e levado a depósitos subterrâneos, por exemplo, campos esgotados de petróleo e gás natural ou jazidas carboníferas profundas (RIFKIN, 2003).

Segundo Faria (2018) estudiosos afirmam que essas tecnologias não contribuem e nem estimulam a redução de emissões, porém a eles foi atribuído mais um processo, referente a utilização desse carbono em produtos de alto valor agregado, como combustíveis e outros materiais, conhecido como Carbon capture, Utilization and Storage (CCUS).

O CCUS atrelado a reforma a vapor do gás natural gera um hidrogênio denominado pela IRENA como azul. Atualmente apenas 0.7% do hidrogênio produzido globalmente conta em algum ponto com essas tecnologias (Fig.3). Ao todo são sete plantas em operação no mundo funcionando com produção de hidrogênio com CCUS, e no cenário 2050 espera-se que 1.8 Gigatoneladas (Gt) de  $CO_2$  possam ser capturados por esse método (BOUCKAERT et al., 2021).

O hidrogênio azul pode ser visto como um caminho de transição para a produção de hidrogênio, principalmente para aproveitar as plantas atuais e impulsionar a produção por outras fontes, mas é necessária atenção visto que espera-se uma eficiência em torno de 85% a 95% na captura, o que significa que de 5% a 15% do  $CO_2$  dos processos ainda estariam sendo lançados na atmosfera (IRENA, 2019).

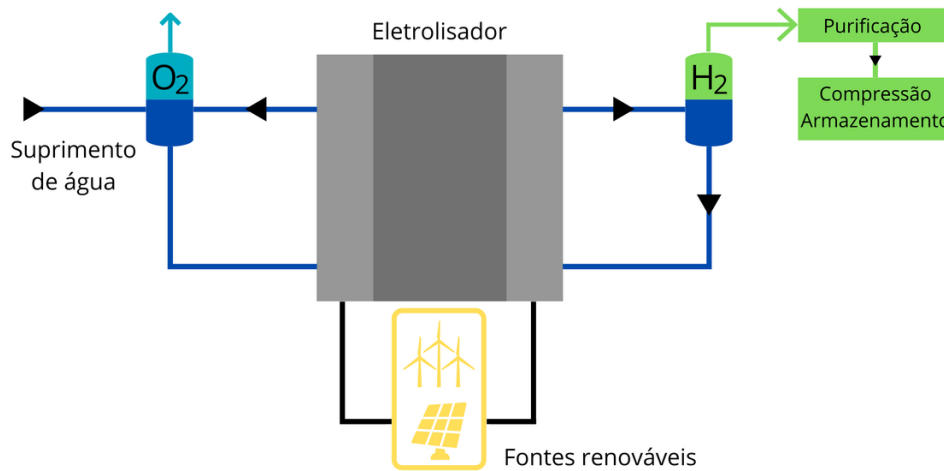
### 2.3.2 Eletrólise da Água

A eletrólise da água é uma tecnologia estabelecida para produção de hidrogênio na indústria química e em processos industriais (MIRANDA, 2019), mas como pode ser observado a produção de  $H_2$  ainda é majoritariamente realizada por meio da reforma a vapor do metano porque fatores como custo da eletricidade e a própria proporção de eletrolisadores não a tornam, ainda, competitiva.

O processo de eletrólise é definido como uma reação química desencadeada a partir de uma fonte de energia externa ao sistema da reação (NETO; MOREIRA, 2007). Durante o processo de eletrólise da água (Fig.5) a molécula da água é separada em hidrogênio e oxigênio por meio da passagem de corrente elétrica (PALHARES et al., 2016).



Figura 5 – Representação Básica da Eletrólise da Água

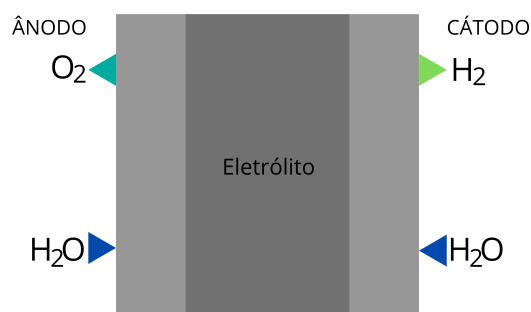


Fonte: Adaptado de IRENA (2020b).

O eletrolisador é o principal componente do processo de produção de hidrogênio por meio a eletrólise da água a nível industrial. A formação básica (Fig.6) desse equipamento possui:

- Eletrodo de Oxigênio (Ânodo);
- Eletrodo de Hidrogênio (Cátodo);
- Eletrólito.

Figura 6 – Representação do Eletrolisador



Fonte: Adaptado de IRENA (2020b).

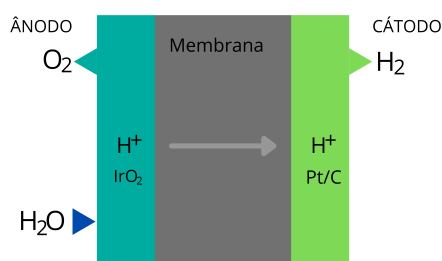
São três os principais tipos de eletrolisadores (PALHARES et al., 2016) para fazer a separação da molécula da água, que se distinguem por meio da escolha do eletrólito, uma solução que permite a passagem dos íons durante a reação, fazendo com que o gás oxigênio e o gás hidrogênio sejam conduzidos aos eletrodos correspondentes (MIRANDA, 2019)

### 2.3.2.1 Eletrolisador de Membrana Polimérica

Os eletrolisadores de membrana polimérica (Polymer Electrolyte Membrane) ou PEM (Fig.7), utilizam uma fina membrana como eletrólito, cerca de 0,2 mm, e uma arquitetura avançada de eletrodos (IRENA, 2020b) que garantem que o processo de obtenção de hidrogênio possua uma eficiência global de 80% a 90% (BACH, 2013), operando em temperaturas entre 50°C a 80°C.

Os principais materiais utilizados neste tipo de equipamento são o nafion para membrana (BACH, 2013), já para os eletrodos destacam-se o óxido de irídio ( $IrO_2$ ), como catalisador para o de oxigênio e para o hidrogênio é utilizada a platina (Pt), materiais que influenciam diretamente no custo desse eletrolisador (IRENA, 2020b).

Figura 7 – Representação Simples do Eletrolisador PEM



Fonte: Adaptado de Miranda (2019).

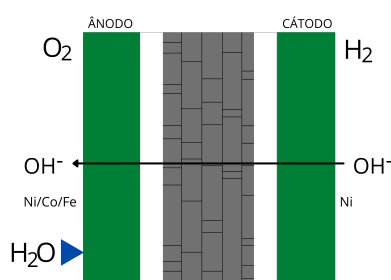
### 2.3.2.2 Eletrolisador Alcalino

Neste tipo de eletrolisador (Fig.8), o eletrólito responsável por transportar os ânions de  $OH^-$  é uma solução altamente concentrada de hidróxido de potássio (KOH). (IRENA, 2020b), em concentrações mássicas de 25-30% (BACH, 2013), a uma temperatura usual de 80°C a 90°C (MIRANDA, 2019).

Em geral os catalisadores utilizados neste tipo de eletrolisador são de aço inoxidável revestido em níquel (Ni) (IRENA, 2020b), que possuem um custo mais baixo em comparação aos metais utilizados pelo eletrolisador PEM. Atualmente alguns eletrolisadores alcalinos são limitados pela densidade de corrente, que está na casa dos 400 mA/cm<sup>2</sup>, e algumas companhias usam por volta de 200 mA/cm<sup>2</sup>, números que limitam a variação de

potência do equipamento (MIRANDA, 2019), uma vez que se espera que os eletrolisadores sejam acoplados a fontes de energia como por exemplo, a eólica, para conseguirem suprir a demanda por hidrogênio verde no futuro. O que conseqüentemente resulta na necessidade de maior capacidade dos eletrolisadores, o que pode levar ao aumento do custo.

Figura 8 – Representação Simples do Eletrolisador Alcalino



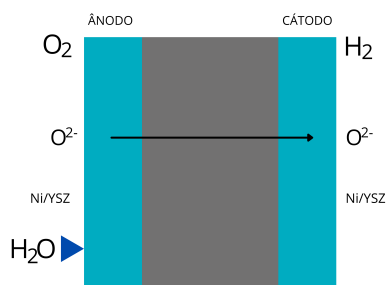
Fonte: Adaptado de Miranda (2019).

### 2.3.2.3 Eletrolisador de Óxido Sólido

Os eletrolisadores de óxido sólido conhecidos como SOE (Fig.9), já se diferenciam pela sua temperatura de trabalho que fica em torno de 700°C a 850°C, o que pode reduzir o uso de eletricidade porque parte da energia utilizada no processo vem do calor. (IRENA, 2020b).

Atualmente esse tipo de eletrolisador pode ser encontrado funcionando em uma escala de kW, mesmo que em alguns projetos existam potenciais de 1 MW (IRENA, 2020b), em termos de eficiência este tipo de eletrolisador é apontando como a frente dos de PEM e Alcalino porque as temperaturas de operação favorecem as taxas da reação eletroquímica (PALHARES et al., 2016). Entre os catalisadores utilizados em eletrolisadores SOE estão o pó de zircônia com óxido de níquel para o eletrodo do hidrogênio, e óxidos do tipo perovskita para o eletrodo do oxigênio.

Figura 9 – Representação Simples do Eletrolisador de Óxido Sólido



Fonte: Adaptado de Miranda (2019).

### 2.3.3 Uso da água

Em termos de estequiometria cerca de 1 kg de hidrogênio poderia ser produzido a partir de 9 kg de água, mas considerando que a água que alimenta eletrolisador necessita de tratamentos, como por exemplo a desmineralização, esse valor pode chegar entre 18 a 24 kg para produção de 1 kg de  $H_2$  (IRENA, 2020b).

A eletrólise da água independente do tipo de eletrolisador escolhido para produção de hidrogênio necessita de grandes suprimentos de água combinados com a oferta de fontes renováveis como eólica e solar. No início do século XXI ainda se especulava que a produção por esse meio poderia acontecer com energia e suprimentos vindo de hidrelétricas (NETO, 2005), mais especificamente utilizando excesso de água nos reservatórios, porém com a redução das estações de chuvas e o incentivos a outras fontes de energias renováveis outras opções passaram a ser analisadas.

Países como o Brasil que possuem uma matriz energética, de acordo com Ministério de Minas e Energia, composta por mais de 50% de renováveis e uma vasta disponibilidade de água, mesmo que a distribuição deste recurso não seja homogênea, poderiam criar condições do uso da água para produção de hidrogênio combinadas ao crescimento da matriz elétrica, onde a energia eólica atualmente já representa 10,4% do total e a energia solar fotovoltaica centralizada 2% (ABSOLAR, 2021). Em contrapartida a IRENA não considera que a água pode ser algo que impacte a produção de hidrogênio em outros locais porque a opção dessalinização da água do mar pode ser utilizada.

É importante salientar que o uso esperado de água doce no horizonte 2050 para produção de cerca de 160 megatoneladas de hidrogênio verde é de 3 bilhões de  $m^3$  por ano, enquanto no horizonte 2030 o consumo de água por usinas termoelétricas nos Estados Unidos seria de 5.8 bilhões de  $m^3$  (IRENA, 2020b).

## 2.4 Célula a Combustível

O princípio básico do funcionamento de uma célula a combustível é a oxidação de hidrogênio pelo oxigênio na presença de um catalisador. Transformando a energia química da reação em energia elétrica por meio de um dispositivo altamente eficiente em um processo de baixo impacto ambiental (SANTOS, 2018).

Em 1839, William Groove fez a primeira publicação relacionada a uma célula combustível. Sabendo que eletricidade combinada com água poderia produzir hidrogênio e oxigênio, ele se propôs a fazer o caminho inverso usando os gases para produzir eletricidade e água, na época o cientista atribuiu o nome ao experimento de "bateria a gás"(NETO, 2005).

Cinquenta anos depois, em 1889, Ludwing Mond e Charles Langer recriam o experimento de Groove, aumentando a área das células e utilizando eletrodos envoltos em platina, o que representou um aumento de 50% de eficiência com relação ao experimento de 1839 (SILVA, 2017). Nesta ocasião, os estudiosos atribuíram o nome de célula a combustível a montagem do experimento (NETO, 2005).

Wilhelm Ostward, em 1893, experimentou utilizar diferentes materiais e componentes para a célula a combustível (MIRANDA, 2019) e em 1896, e William Jacques criou uma célula a combustível que utilizava carvão como principal combustível e fazia uso de um eletrólito de hidróxido de sódio, a célula apresentava até então a maior potência já registrada para tal dispositivo cerca de 1,5 kilowatts (kW)(SILVA, 2017).

Durante a década de 1930 (MIRANDA, 2019) as células a combustível voltaram a chamar atenção, na época Francis Bacon exemplificou um sistema de células alcalinas de alto poder elétrico, com um potencial até 5 kW, que vieram a substituir os antigos modelos que utilizam metais nobres como eletrodos por um eletrodo de níquel (SILVA, 2017).

O grande ponto de virada para a célula a combustível aconteceu em 1960 quando a NASA anunciou por meio do seu programa espacial que o hidrogênio estaria sendo estudado como combustível de foguetes, e que as células fariam parte das missões do programa Apollo (SILVA, 2017). Nos anos seguintes diversas pesquisas foram desenvolvidas em busca de se mapear os melhores combustíveis, eletrodos e componentes para esse dispositivo, O.K.Davtyan dentro de seus diversos trabalhos com células a combustível, foi responsável por identificar que a célula a combustível, em condições de temperatura ambiente em solução alcalina necessitam de hidrogênio e oxigênio em altíssima pureza.(SILVA, 2017).

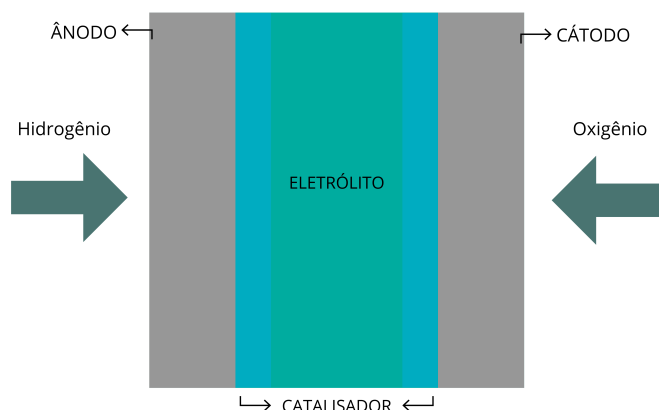
### 2.4.1 Características da célula a combustível

As células a combustível realizam a conversão direta da energia química, portanto não obedecem ao ciclo de Carnot, o que proporciona a esse dispositivo uma eficiência de até 83% (SANTOS, 2018), superando o limite de Carnot mesmo em baixas temperaturas, como 80°C (NETO, 2005).

De forma unitária, as células não possuem muitas aplicações, portanto para produzir maiores tensões são conectadas em série por meio de empilhamentos (VARGAS et al., 2006). Uma célula a combustível (Fig.10) é constituída por 3 partes principais:

- Eletrodos
- Catalisador
- Eletrólito

Figura 10 – Representação de uma Célula a Combustível



Fonte: Adaptado de Neto (2005).

A Tabela 1 apresenta os principais tipos de células combustíveis que possuem aplicações comerciais atualmente.

Tabela 1 – Tipos de Células a Combustível

<b>Tipo</b>	<b>Eletrólito</b>	<b>Eficiência em Pack (%)</b>
Membrana polimérica (PEM)	Membrana	50-70
Óxido sólido	Condutor cerâmico iônico	60-65
Alcalina	Solução aquosa alcalina	60-75

Fonte: Adaptado de Miranda (2019).

## 2.4.2 Funcionamento da célula a combustível

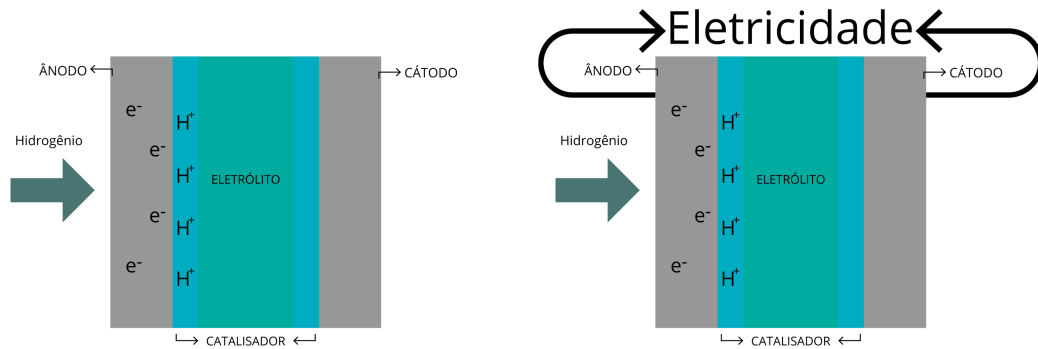
O gás hidrogênio é pressurizado e bombeado para o eletrodo até atingir o catalisador, dentro do catalisador os íons de hidrogênio são separados dos elétrons, que por sua vez são conduzidos ao circuito externo, formando o fluxo de elétrons - corrente elétrica (Fig. 11) -no sentido positivo da célula (NETO, 2005), a reação química deste processo está descrita pela reação 2.6.



Pode ser que durante o processo de quebra da molécula do hidrogênio pelos catalisadores, algumas não sejam quebradas. Essas moléculas não conseguem passar pelo eletrólito, mas podem ser recuperadas e realimentar a célula(NETO, 2005).

O oxigênio ou ar, é bombeado pelo terminal positivo e se dispersa dentro do catalisador, que separa a molécula do oxigênio em dois átomos, que atraem os íons de hidrogênio que foram levados pelo eletrólito e se combinam para formar a molécula de água (reação 2.7), durante essa reação uma certa quantidade de calor é liberada (VARGAS et al., 2006),

Figura 11 – Funcionamento de uma célula a combustível (1)

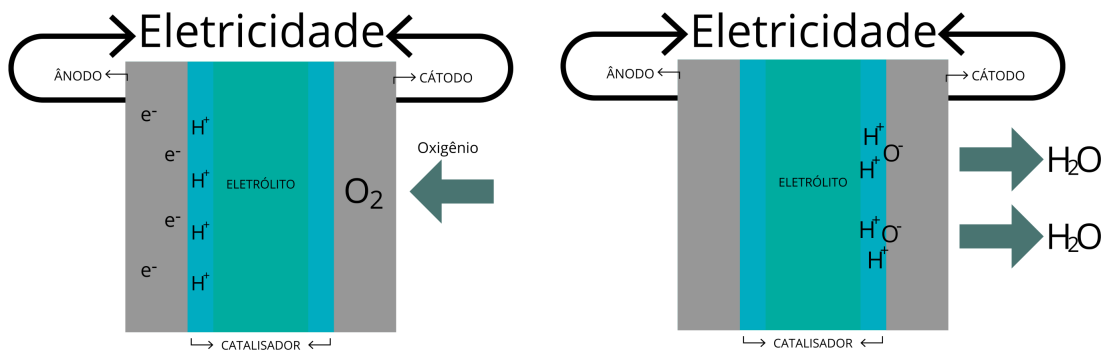


Fonte: Adaptado de Neto (2005).

o chamado vapor da água, produto do funcionamento da célula a combustível quando os gases  $H_2$  e  $O_2$  apresentam elevado grau de pureza.



Figura 12 – Funcionamento de uma célula a combustível (2)



Fonte: Adaptado de Neto (2005).

Teoricamente combustíveis com alto teor de hidrocarbonetos não poderiam ser utilizados junto a células a combustível sem uma tecnologia de reforma acoplada. Em razão disso, algumas pesquisas buscam utilizar etanol ou metanol diretamente nas células, assim como hidrogênio (MIRANDA, 2019).

Entretanto, o uso de outros combustíveis nas células pode implicar no aumento do custo por partes dos catalisadores e da própria manutenção do dispositivo. Com o propósito de produzir combustíveis sustentáveis e reduzir as emissões de  $CO_2$  é interessante que o metanol não seja estimulado e que o etanol possa servir como uma das fontes de obtenção de hidrogênio.

### 3 O Brasil e o Hidrogênio

A crise do petróleo em 1973 foi o estopim para que os países passassem a buscar segurança energética para criar uma certa independência do petróleo dentro de seus próprios territórios e o Brasil não foi diferente. O Programa Nacional do Álcool (Proálcool) foi criado em 1975 e visava pesquisa e desenvolvimento da produção de álcool etílico no país (ANDRADE; CARVALHO; SOUZA, 2009). Pode-se considerar que o programa foi um sucesso e ainda hoje o etanol é um dos principais combustíveis do país tanto em termos de consumo, como de produção.

Com uma elevada produção de etanol no Brasil, começou-se a especular outros possíveis usos desse combustível e foi assim que em 1998 durante o IV Encontro do Fórum Permanente de Energias Renováveis, que se realizou a 1ª Conferência Brasileira Sobre o Hidrogênio. Na ocasião, foi apresentada a proposta de criação para centro nacional de referência ao hidrogênio, cujo objetivo era reunir e divulgar informações relacionadas a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao uso energético do hidrogênio com a produção baseada na reforma a vapor do etanol (LORENZI, 2012).

Em 2002, foi apresentado o Programa Nacional de Células a Combustível (PRO-Cac) que tinha como objetivos principais criar condições para o desenvolvimento de uma tecnologia nacional, estabelecer condições para uma indústria nacional e instalar sistemas energéticos que usassem as células a combustível (CHUM, 2002). O programa contou com cinco redes de pesquisa e desenvolvimento (MATOS; NEVES; PIMENTA, 2008):

- Rede de células a combustível tipo PEM
- Rede de células a combustível de óxido sólido
- Rede de combustíveis e hidrogênio
- Rede de integração e sistemas
- Rede de usuários

O PROCac tinha dois focos estratégicos principais, produzir hidrogênio, preferencialmente por meio do etanol, eletrólise da água e outras possíveis fontes renováveis e utilizar células para geração estacionária de energia abastecidas por hidrogênio ou etanol direto (MATOS; NEVES; PIMENTA, 2008), uma vez que a energia do hidrogênio é uma possibilidade de geração de energia além do seu uso como combustível.

Na época o programa não apresentou atividades pelo período de dois anos, que fossem relativamente efetivas, por isso em 2005 o PROCac se tornou o Programa de



Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH<sub>2</sub>). Como uma forma de ampliar a intenção do programa e enfatizar que principal meta era focar na produção de H<sub>2</sub> por meio de fontes renováveis (MATOS; NEVES; PIMENTA, 2008), mas ainda sim mantendo as mesmas redes estabelecidas em 2002.

Dando seguimento as atividades ligadas a essa iniciativa o governo brasileiro lançou também em 2005, o Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil, que se baseava na experiência prévia com biodiesel no Programa de Introdução e Uso do Biodiesel (ANDRADE; LORENZI, 2015).

Outro ponto marcante nas iniciativas com hidrogênio no Brasil foram os projetos de ônibus a célula a combustível. A Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU/SP), juntamente ao Ministério de Minas e Energia (MME), o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), o Global Environmental Facility (GEF) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) deram início ao Projeto PNUD BRA/99/G32 - Ônibus a Célula a Combustível de Hidrogênio para Transporte Urbano no Brasil (Fig. 13). Características principais do ônibus a célula a combustível de hidrogênio:

- Emissão zero de poluentes;
- Baixo nível de ruído;
- Tração elétrica híbrida (célula + bateria);
- Ar-condicionado;
- Consumo de hidrogênio: 15kg/100km;
- Autonomia: 300 km;
- Potência: 230 kw.

Figura 13 – Ônibus movido a hidrogênio



Fonte: Ônibus Brasileiro a Hidrogênio: Tecnologias Renováveis para o Transporte Urbano no Brasil (EMTU/SP, 2015).

O projeto consistia na aquisição de quatro ônibus a célula a combustível, na construção de uma estação de produção de hidrogênio por eletrólise e todo o acompanhamento e manutenção ligados a essa infraestrutura (REGINA; LOPES, 2013). A Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), especificamente o Laboratório de Hidrogênio da Coppe, desenvolveu também, mas junto a Fetranspor e as Secretárias Municipais do Estado, um projeto parecido com a intenção de que os modelos pudessem ser utilizados durante a Copa do Mundo de 2014, e durante as Olimpíadas de 2016 (FINEP, 2021).

De acordo com (ANDRADE; LORENZI, 2015) até 2007 cerca de 290 projetos que envolviam células a combustível e hidrogênio com financiamento público foram executados, mas ao contrário do esperado, as iniciativas dos programas e dos projetos não se tornaram populares no país, em parte pela descoberta e incentivos que se voltaram ao pré-sal. Em 2015 as discussões sobre como o hidrogênio poderia ser inserido nas matrizes energéticas dos países ganharam força novamente em razão da meta global para limitar o aumento da temperatura do planeta em 1.5°C até 2050. De acordo com o cenário da IRENA, hidrogênio e seus derivados irão representar 12% do uso final de energia no mundo até lá (IRENA, 2021).

Considerando a movimentação do cenário internacional, as perspectivas de desenvolvimento e o contínuo crescimento das fontes renováveis no país a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), publicou em fevereiro de 2021 a nota técnica *Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio*, para dar visibilidade as oportunidades atuais de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio, buscando consolidar e formalizar a estratégia nacional que se iniciou em 2002 com o PROCac (EPE, 2021).

Com base nessa nota técnica o Ministério de Minas e Energia (MME), junto aos Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e do Desenvolvimento Regional (MDR) promoveram a cooperação entre os stakeholders do programa definindo um conjunto de ações para facilitar os chamados três pilares fundamentais para o desenvolvimento do hidrogênio: políticas públicas, tecnologia e mercado (MME, 2021).

Os seis eixos temáticos (Fig.14) apresentados na proposta do programa se fundamentam nos princípios já estabelecidos nos primeiros documentos produzidos sobre o  $H_2$  no país, com uma preocupação e atenção maior aos eixos 3 e 4 que serão responsáveis por promover por meio de planejamento e regulação a inserção do vetor na matriz energética, estimulando os eixos 1 e 2 voltados a pesquisa, desenvolvimento e capacitação (MME, 2021).

Figura 14 – Eixos temáticos do PNH2



Fonte: Proposta de Diretrizes: Programa Nacional do Hidrogênio (MME, 2021).

Os eixos 5 e 6 tratam do Brasil propriamente um player de hidrogênio capaz estimular as tecnologias de seu uso dentro das cadeias produtivas enquanto o trabalho junto a atores internacionais fortalece e estimula um possível mercado interno. Entre a publicação das bases de consolidação e a proposta de diretrizes para o novo plano nacional, foram assinados pelo governo do Ceará, memorandos de interesse com investimentos para produção de hidrogênio verde estimados em mais de 20 bilhões de reais englobando em conjunto o investimento nas fontes renováveis, somente pelo Hub de Hidrogênio no Ceará (HERCULANO, 2021).

## 3.1 Desafios do Hidrogênio no Brasil e no Mundo

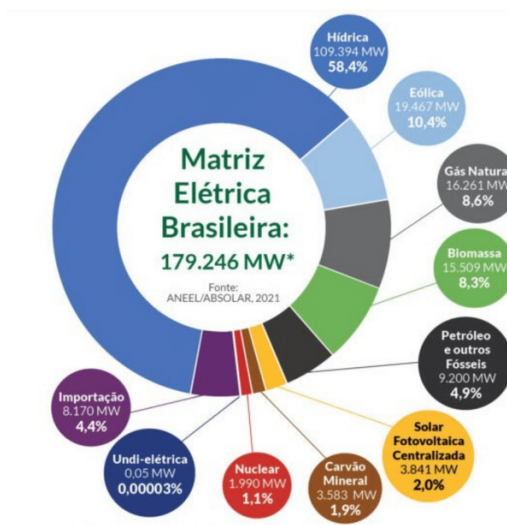
O hidrogênio oferece muitas possibilidades para descarbonização até 2030, mas grande parte de suas aplicações voltadas para redução das emissões de  $CO_2$  são limitadas pelo custo de produção do hidrogênio por meio de fontes renováveis e pela atual infraestrutura de transporte e armazenamento.

### 3.1.1 Custo de Produção

O maior desafio para os próximos anos é conseguir equiparar o preço da produção por meio da eletrólise da água com a reforma a vapor, considerando que esse método depende diretamente dos custos de geração das fontes renováveis como eólica e solar.

A fonte eólica representa 10,4% da matriz elétrica brasileira (Fig.15) atrás apenas da fonte hídrica que há alguns chegou a ser cogitada como fonte primária para eletrólise da água (NETO, 2005). A fonte solar representa cerca de 2% e de acordo com informações do Ministério de Minas e Energia, deve fechar 2021 representando 3% da matriz.

Figura 15 – Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: ANEEL (ANEEL, 2021).

Ao custo da produção também se aplica a tecnologia dos eletrolisadores, em média o investimento por quilowatt-hora (kWh) em um eletrolisador do tipo alcalino em 2020 custou entre 750-800 dólares (IRENA, 2020a).

Eletrolisadores podem ser limitados em razão dos seus catalisadores, a platina utilizada nos de tipo PEM é um material que durante sua produção emite cerca de 12,5 toneladas de dióxido de carbono ( $tCO_2eq$ ) por quilo de metal (IRENA, 2020b). A maior parte de sua produção, 70%, tem origem em territórios da África do Sul.

Os eletrolisadores de óxido sólido que podem atingir altas eficiências, tem uma dependência direta da China, responsável pela produção 95% dos materiais críticos para o funcionamento do equipamento (IRENA, 2020b). Já entende-se que para atender a demanda de hidrogênio a partir da eletrólise da água os dispositivos dependerão de pesquisa e desenvolvimento de novos tipos de catalisadores como forma de reduzir o custo final e o ritmo de mineração em territórios comprometidos.

### 3.1.2 Transporte e Armazenamento

Por ser um elemento de baixa densidade uma das maiores preocupações para o uso do hidrogênio como combustível ou geração de energia está ligado a forma como ele pode ser armazenado e transportado com segurança (NETO, 2005), alguns testes mapearam que foi possível transportar hidrogênio líquido por uma distância de 600 km mantendo a pressão abaixo de 0,1 MPa armazenado em um contêiner duplo com isolamento térmico a vácuo para evitar a evaporação (MIRANDA, 2019).

Caso seja armazenado em forma de gás, o hidrogênio precisa ser comprimido em altas pressões e armazenado em tanques que em geral são feitos de materiais plásticos e fibra de carbono (NETO, 2005), tanques de veículos elétricos utilizam esses materiais atualmente (MIRANDA, 2019). A importância do armazenamento e transporte se reflete na diminuição de energia, estima-se que de 10% a 12% da energia do hidrogênio é perdida durante o transporte (IRENA, 2020a), muito do esforço em pesquisa e desenvolvimento precisará se concentrar no estudo de materiais para os tanques.

Uma outra opção de transporte para o hidrogênio é semelhante ao atual processo de distribuição do gás natural, ou seja, por gasodutos. Atualmente existem cerca de 5000 km de gasodutos de hidrogênio em todo mundo (IRENA, 2020a), suficientes para os atuais usos de hidrogênio, mas que não se encaixam em um cenário onde esse gás está inserido na cadeia de combustíveis sendo assim um desafio também de infraestrutura que reflete diretamente nos possíveis postos de distribuição de hidrogênio pelas cidades, nesse segmento a preferência pela produção do hidrogênio próximo das localidades de seu uso pode reduzir os custos altos do transporte em longas distâncias. Como forma de mitigar as altas pressões, os elevados preços de tanques e até mesmo facilitar o transporte do hidrogênio entre continentes realizar essa ação por meio do hidrogênio combinado a outro produto conhecido será uma das principais rotas. A amônia ( $NH_3$ ), uma das principais aplicações de hidrogênio atualmente, poderá se tornar um dos principais transportes de  $H_2$ .

## 4 Hidrogênio no setor de transportes

O Hidrogênio passou a ser utilizado como combustível apenas alguns anos após sua descoberta. As primeiras experiências com o hidrogênio neste sentido foram realizadas por Jacques Alexandre César Charles por meio de um balão que voou por Paris em 1783 (FORTIER, 2004), para tal experimento Charles já conseguia produzir hidrogênio de forma substancial.

O primeiro motor a combustão interna alimentado por meio de hidrogênio foi desenvolvido por Francois Isaac de Rivaz em 1806 (MIRANDA, 2019). Etienne Lenoir, em 1860, patenteou o primeiro motor de combustão interna que utilizava eletrólise da água para produzir hidrogênio e promover o funcionamento do dispositivo (SCOTT, 2004). Na época, cerca de 400 motores a gás foram vendidos para uso em bombas e máquinas de impressão, este motor também podia ser alimentado com o gás natural.

O hidrogênio nos motores de combustão interna deu espaço para o uso de outros tipos de combustíveis, oriundos do petróleo e comercialmente mais baratos. Dessa forma o hidrogênio passou a ser explorado como combustível na aviação, principalmente por engenheiros alemães em dirigíveis durante o final do século XIX e as primeiras três décadas do século XX (RIFKIN, 2003). Durante os anos 30 e 40 o hidrogênio ainda era utilizado em forma de experimento em automóveis, caminhões, locomotivas até mesmo em submarinos e torpedos por Alemanha e Inglaterra (RIFKIN, 2003), mas sem incentivos suficientes para competir veículos a combustão interna dependentes de gasolina e diesel.

Montadoras como Hyundai, General Motors, Honda já se antecipavam para o que seria o futuro dos transportes, eletrificação e a hibridização veicular. Para o caso da Hyundai, o que se iniciou como um projeto de pesquisa sobre veículos elétricos a célula a combustível em 1998 por meio do Projeto Mercúrio, hoje se reflete no modelo Hyundai Nexo, um veículo elétrico a célula a combustível que pode percorrer cerca de 512 quilômetros (km) com apenas um abastecimento de hidrogênio (HYUNDAI, 2021).

Durante o final do século XX e início do século XXI foi possível mapear projetos ligados ao transporte público fazendo uso do hidrogênio como combustível por meio de células a combustível em países como o Japão, EUA, China, Austrália e Islândia (NETO, 2005).

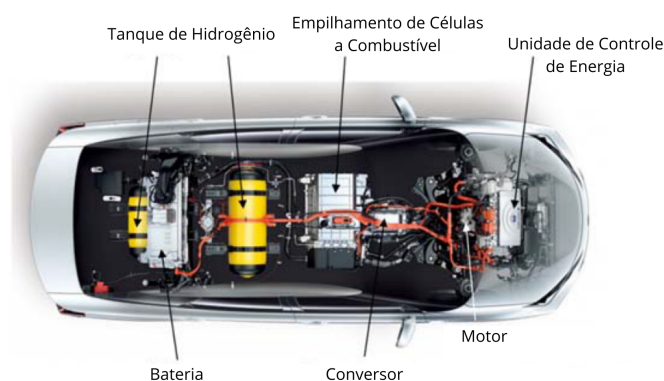
## 4.1 Veículos Elétricos a Célula a Combustível

Um veículo elétrico a célula a combustível é um automóvel que utiliza a eletricidade produzida pela energia química gerada a partir do combustível por meio da célula (MIRANDA, 2019). De acordo com Goulart (2019) estes veículos necessitam para seu funcionamento pleno de:

- Empilhamento: A conexão em série das células a combustível para se atingir a tensão e potência de trabalho necessárias.
- Preparação do combustível: Sabe-se que quanto maior a pureza do hidrogênio, melhor é o funcionamento da célula.
- Controle térmico e de água: Sistemas necessários para acompanhar a temperatura do empilhamento e para garantir que a tanto a geração de água pela célula combustível, como a utilizada para umedecer a membrana estejam balanceadas.
- Equipamento de condicionamento de energia elétrica: Para o tratamento na tensão de saída das células a combustível.

Automovéis tem sua disposição das células e de outros componentes, semelhantes a um veículo de combustão interna (Fig.16). Enquanto um ônibus a célula a combustível possui uma configuração diferente porque o empilhamento dos cilindros de hidrogênio, que fazem o papel de tanque, é feito na parte superior do veículo (Fig.17).

Figura 16 – Corte de um veículo a célula combustível - Carro



Fonte: Traduzido de Science and engineering of hydrogen-based energy technologies (MIRANDA, 2019).

Figura 17 – Corte de um veículo a célula combustível - Ônibus



Fonte: Adaptado de Ônibus híbrido a hidrogênio (COPPE, 2021).

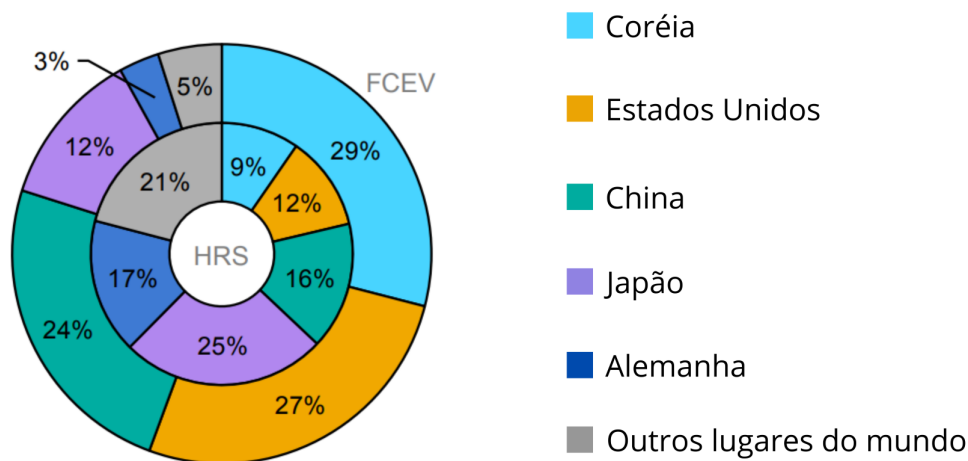
Entre algumas características dos veículos a célula a combustível estão:

- Exaustão limpa: considerando que durante seu funcionamento a célula combustível tem como produto apenas o vapor da água como pode ser visto em 2.4.2, emissões de  $CO_2$  e outros gases potencialmente poluentes não são liberadas durante o funcionamento do veículo.
- Alta eficiência: um dos desafios para os veículos elétricos é se equiparar a potência dos motores a combustão, porém as células a combustíveis combinadas ao motor elétrico apresentam eficiência duas vezes maior do que veículos a gasolina (MIRANDA, 2019).
- Rápido abastecimento e sem ruídos: O tanque de um veículo a célula combustível leva cerca de 5 minutos para ser abastecido. Em maio de 2021 o Toyota Mirai bateu o recorde de distância percorrida com apenas um tanque de hidrogênio com 1003 km percorridos, na ocasião como parte da demonstração o tanque levou menos de 5 minutos para ser preenchido a uma pressão de 700 bar na estação de recarga (TOYOTA, 2021). É um tempo mínimo e pode ser comparado ao tempo de abastecimento de carros a gasolina, como motor é elétrico esses veículos são praticamente silenciosos (MIRANDA, 2019).

A maior parte da frota de veículos elétricos a célula a combustível está concentrada entre Coréia, Estados Unidos e China (Fig. 18). Um reflexo dos incentivos ao uso do hidrogênio como combustível oriundos dos programas criados por esses países no início dos anos 2000.



Figura 18 – Porcentagem de Veículos a Célula Combustível e Estações de Reabastecimento de Hidrogênio por Países



Fonte: Traduzido do Global EV Outlook 2021 (IEA, 2021a).

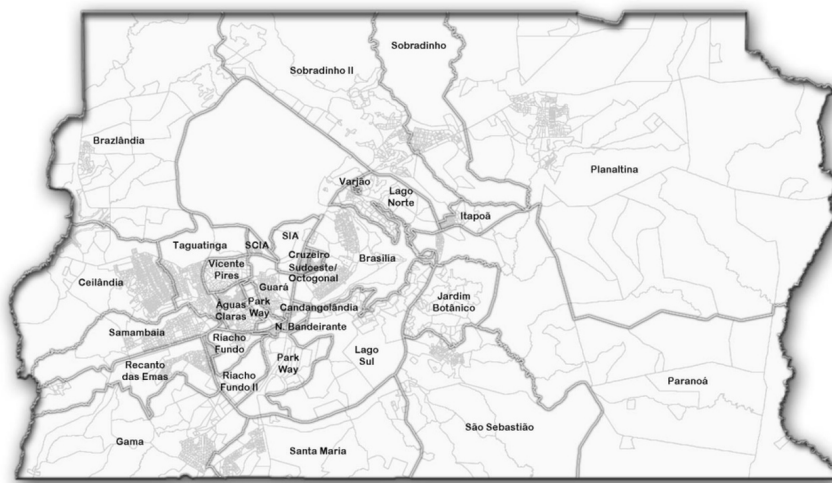
Apesar da célula a combustível ser uma grande opção para a indústria dos transportes, esses veículos podem apresentar algumas desvantagens aos usuários de motor a combustão como uma unidade de potência pesada, maior tempo de arranque e baixa potência de saída em baixa velocidade (GOULART, 2019) por isso é comum que a célula a combustível seja combinada com uma bateria a célula a combustível é a fonte primária de energia e fonte secundária auxilia em momentos específicos, como em picos de potência (GOULART, 2019).

Espera-se que em 2030 cerca de 60% dos carros a venda sejam elétricos e que pelos 30% correspondam a caminhões leves a célula a combustível ou totalmente elétricos (BOUCKAERT et al., 2021), desde que o hidrogênio e os combustíveis sintéticos sejam beneficiados pelo desenvolvimento de tecnologias, pela redução do custo das baterias e pela própria redução do custo do hidrogênio por meio de fontes renováveis.

## 5 Cenários do transporte público do Distrito Federal

O Distrito Federal (DF) é composto por 33 regiões administrativas (RAs) (Fig. 19) que são dispostas pelo território do Planalto Central, centro-oeste do Brasil, em uma área de 5.779 km<sup>2</sup>, segundo dados disponibilizados pelo governo do DF.

Figura 19 – Mapa do Distrito Federal



Fonte: Codeplan (Companhia de Planejamento do Distrito Federal) (CODEPLAN, 2012).

Para que a população do DF estimada em 3.094.325 pessoas, pelo IBGE, transite entre as RAs são disponibilizadas cerca de 800 linhas de ônibus para o transporte público coletivo rodoviário que se dividem entre 5 bacias (Tab. 2), termo utilizado para denominar a região de atuação de empresas e cooperativas.

Tabela 2 – Operação dos Ônibus de Transporte Público Coletivo no DF.

Bacia	Empresa	Regiões
1	Viação Piracicabana	Brasília, Cruzeiro, Lago Norte, Varjão, Sobradinho e Planaltina
2	Viação Pioneira	Paranoá, Itapoã, São Sebastião, Jardim Botânico, Gama, Santa Maria, Park Way (Epia) e Candangolândia
3	Viação HP-ITA (Urbi)	Núcleo Bandeirante, Riacho Fundo I e II, Recanto das Emas e Samambaia
4	Viação Marechal	Guará, Park Way (Arniqueiras), Águas Claras, Taguatinga (ao sul da Hélio Prates) e Ceilândia
5	Expresso São José	SAI, SAAN, SOF Norte, Estrutural, Vicente Pires, Taguatinga (ao norte da Hélio Prates – M Norte), Ceilândia Norte e Brazlândia

Fonte: Adaptado de Secretária de Transporte e Mobilidade do DF.

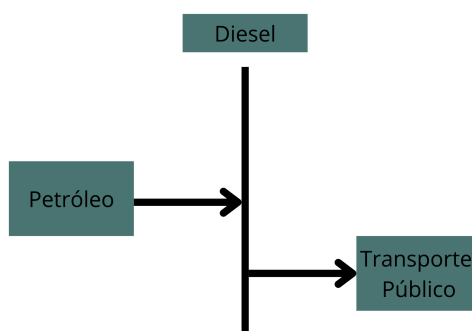
Estas 800 linhas de ônibus são distribuídas entre 2800 veículos, de acordo com os dados disponibilizados pela Secretária de Transporte e Mobilidade do DF (SEMOB) referentes a março de 2022, majoritariamente abastecidos com óleo diesel com cerca de duas unidades elétricas, que se restringem a trajetos curtos no centro de Brasília.

### 5.0.1 Cenários prospectivos

Como forma de analisar como o transporte público coletivo do DF se comportaria nos próximos 10 anos com a inserção de ônibus a célula a combustível de hidrogênio em relação as emissões de  $CO_2$  são propostos dois cenários para fins de comparação:

- Cenário 1: Onde o óleo diesel oriundo do refino do petróleo (Fig. 20) é o único combustível utilizado para abastecer o transporte público coletivo do DF;

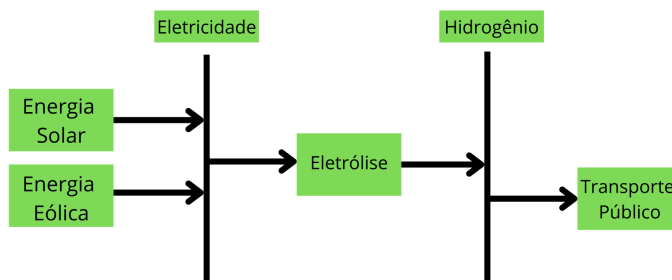
Figura 20 – Cenário 1



Fonte: Autória Própria.

- Cenário 2: Onde o hidrogênio produzido a partir das fontes eólica e solar por meio da eletrólise da água (Fig. 21) é inserido na matriz de combustível do transporte público coletivo do DF.

Figura 21 – Cenário 2



Fonte: Autória Própria.

Para ambos os cenários em média o transporte público no Distrito Federal faz 886 mil quilômetros por dia, referentes a média de 22 mil viagens, como aponta Leal (2017), incluindo o transporte rodoviário e metroviário da região, sendo assim 873 mil quilômetros são percorridos pelos ônibus do transporte público.

## 5.0.2 Cenário 1

O óleo diesel, de acordo com a Petrobras, é o principal combustível comercializado no Brasil. Um dos seus principais usos é destinado ao transporte de passageiros. A lei vigente no país compete as distribuidoras de combustível adicionarem a ele concentrações de biodiesel, dessa forma podem ser encontrados óleo diesel A e óleo diesel B (com adição de biodiesel). A mistura obrigatória de biodiesel ao óleo diesel é de 10% estabelecida pelo Resolução N°16 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) em 6 de setembro de 2021.

Tomando que a atual frota de ônibus do DF cresça a uma média de 3% ao ano até 2032 (Tab. 3), chegaríamos ao patamar de uma frota constituída por 3763 veículos circulando pelas RAs com o consumo de óleo diesel A, tipo de óleo a ser considerado neste cenário. Em média um ônibus consome 1 litro de óleo diesel a cada 2,5 km percorridos (GONÇALVES; QUEIROZ, 2016). O fator de emissão, indicador utilizado para mensurar as emissões de gases de efeito estufa de determinada matéria-prima, do óleo diesel é de 3,41 kg de  $CO_2$  por litro.

Tabela 3 – Crescimento da frota de veículos de 2022 a 2032 para o Cenário 1

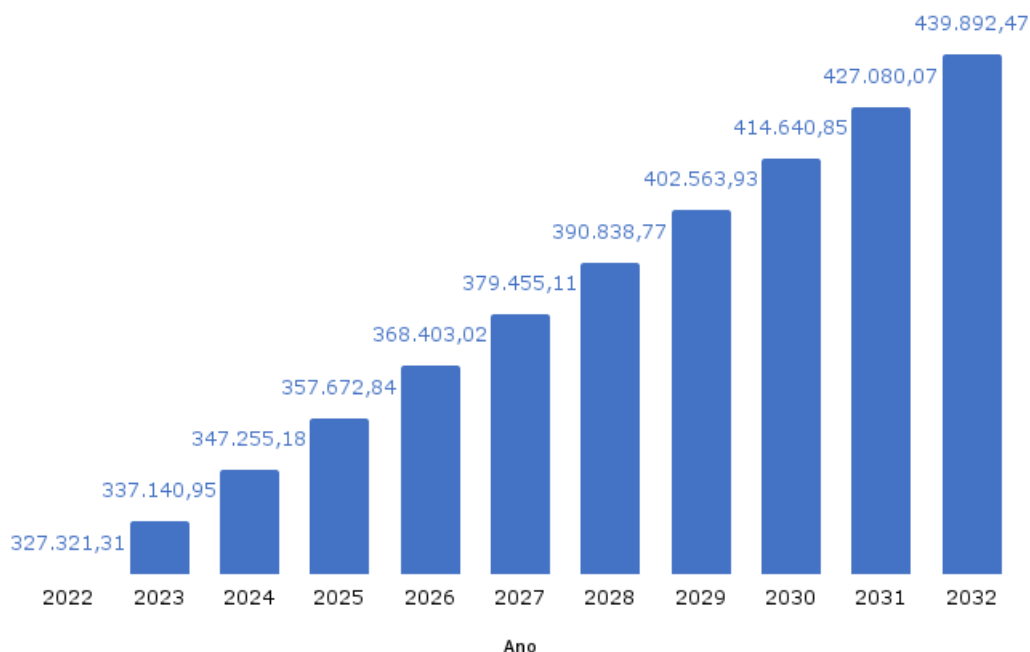
Ano	Veículos
2022	2800
2023	2884
2024	2971
2025	3060
2026	3151
2027	3246
2028	3343
2029	3444
2030	3547
2031	3653
2032	3763

Fonte: Autoria Própria.

Considerando o total de 873 mil km percorridos por dia nas estradas do Distrito Federal, cada ônibus faz em média 312 km o que implica no total de 425,6 kg de  $CO_2$  emitidos por cada um dos 2800 ônibus no território. O valor litro de diesel na bomba no DF registrado pela Petrobras no início de abril de 2022 foi de R\$6,92.

Em um cenário de 10 anos, as emissões no DF originadas pelo uso de óleo diesel poderiam representar quase 440 mil  $tCO_2eq$  (Fig. 22) jogadas na atmosfera, se for mantida como combustível para o transporte público coletivo somente esta opção.

Figura 22 – Cenário 1 - Emissões de  $CO_2$  em toneladas equivalentes para 10 anos



Fonte: Autória Própria.

Este cenário foge do ideal quando relacionado as metas obrigatórias de redução de gases de efeito estufa que foram assumidas pelo Brasil junto a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) de 2009, e junto a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) de 2017, como aborda o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). É importante salientar que fora do cenário 1, as reduções de emissões registradas no setor de transporte não estão necessariamente ligadas as soluções sustentáveis para o transporte e mobilidade, mas sim a recessão econômica e menos distâncias percorridas por falta de produção e relacionados (CLIMA, 2020).

### 5.0.3 Cenário 2

Como foi apontado no capítulo 2, o hidrogênio é colocado como um combustível para o transporte rodoviário no horizonte de 2050 tendo também combustíveis derivados, mas atualmente já pode ser visto em alguns modelos testes como os projetos de ônibus que foram desenvolvidos no Brasil. Para este cenário 2 mantendo o crescimento apresentado na tabela 3, mas considerando que obrigatoriamente 10 ônibus do total para cada ano são a célula a combustível de hidrogênio, chegaremos em 2032 com 100 ônibus abastecidos com  $H_2$  na frota do DF (Tab. 4).

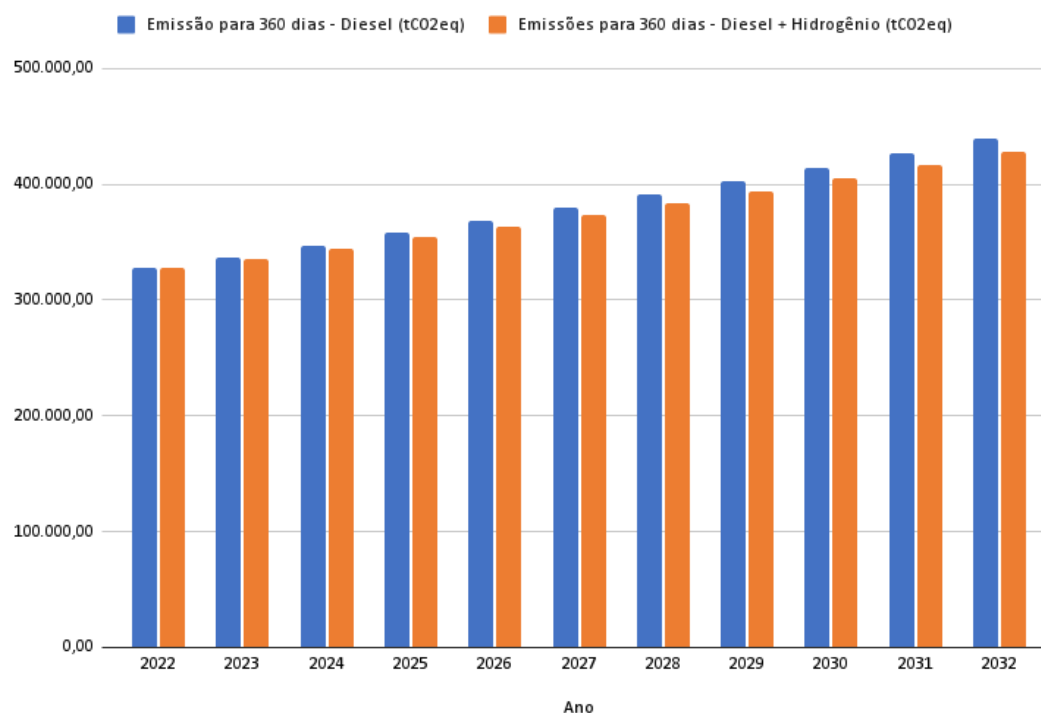
Tabela 4 – Crescimento da frota de veículos de 2022 a 2032 para o Cenário 2

Ano	Ônibus a Diesel	Ônibus a Hidrogênio
2022	2800	-
2023	2874	10
2024	2951	20
2025	3030	30
2026	3111	40
2027	3196	50
2028	3283	60
2029	3374	70
2030	3467	80
2031	3563	90
2032	3663	100

Fonte: Autoria Própria.

A adição desses ônibus faria com que quase 12 mil  $tCO_2eq$  em 2032 fossem evitadas pelo transporte público coletivo do DF (Fig. 23). Um ônibus a hidrogênio pode circular por 100 km utilizando 15 kg de  $H_2$ , que corresponde a 0,15 kg por quilômetro percorrido sem emissões de  $CO_2$  porque o sistema de célula a combustível, como demonstrado anteriormente, funciona por meio de um processo eletroquímico que tem como produtos água e calor.

Figura 23 – Cenário 2 - Emissões em ( $tCO_2eq$ ) Diesel vs Diesel + Hidrogênio para 10 anos

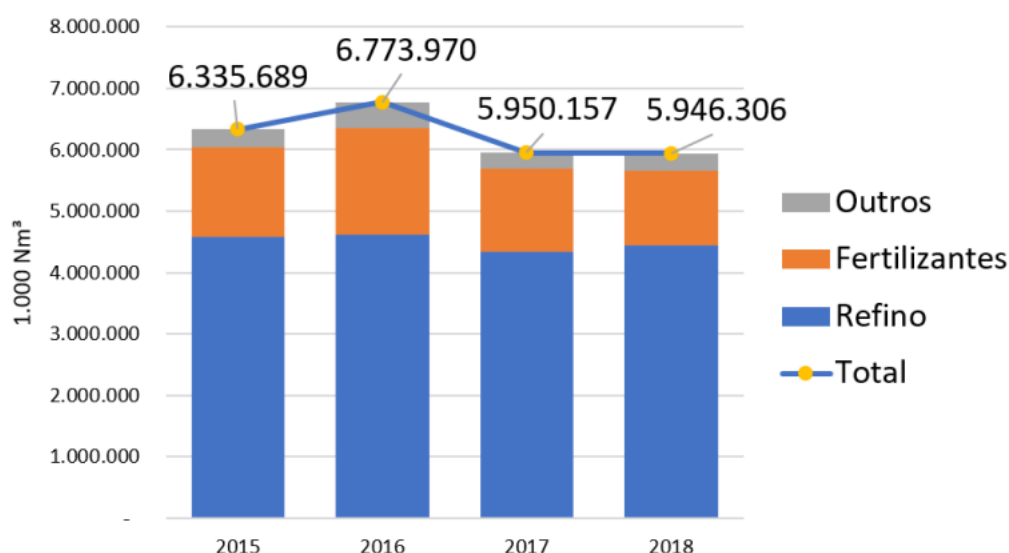


Fonte: Autoria Própria.

Para que o cenário 2 fosse possível seria necessário criar uma estrutura para formar a cadeia de hidrogênio no setor transportes incluindo a produção do  $H_2$  até o destino final na estação de abastecimento. No Brasil, mais da metade da produção de hidrogênio (Fig. 24) é oriunda da síntese de produtos e de processos como o refino de petróleo, e tem por finalidade abastecer a cadeia desses próprios processos ou ser utilizado para produção de gases industriais (BRASIL-ALEMANHA, 2021), e a principal forma de produção é a reforma a vapor do metano, porém o uso do hidrogênio no setor de transportes é condicionado para produção do  $H_2$  a partir de fontes renováveis, ou seja, com o mínimo possível de emissão de  $CO_2$ .

Os investimentos para formar uma cadeia de hidrogênio no Brasil, hoje, se concentram nos projetos localizados no Porto de Pecém, localizado no Ceará, que até dezembro de 2021 já possuía 14 memorandos de entendimento assinados pelo governo do estado para estudo e desenvolvimento de hidrogênio verde, e também na Bahia, que tem por finalidade desenvolver uma economia sustentável no estado. A oportunidade de produzir hidrogênio na região é impulsionada em razão da Bahia ser o maior operador eólico e solar do país, característica apontada por um dos responsáveis da Enel Green Power Brasil, uma das empresas que assinou um memorando junto ao governo do estado para P&D de hidrogênio verde. As energias eólica e solar são as principais fontes apontadas para produção do hidrogênio verde, produzido a partir da eletrólise da água, processo apresentado no capítulo 2 deste trabalho.

Figura 24 – Produção anual de  $H_2$  no Brasil



Fonte: Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde (BRASIL-ALEMANHA, 2021).

O Plano Decenal de Energia 2031 (PDE 2031), aponta que o potencial de produção anual de  $H_2$  com relação ao saldo de recursos energéticos no Brasil até 2050 é de 1.850 Mt/ano (Fig. 25). Destacando o potencial de produção como 79% concentrado na participação de solar fotovoltaica e eólica.

Figura 25 – Estimativa do potencial técnico de produção de hidrogênio a partir do saldo de recursos energéticos até 2050

Recurso Energético Renovável Offshore	Potencial de Hidrogênio Mt/ano
Eólica offshore - 10 km dist.	11,2
Eólica offshore - 50 km (exc. 10 km dist)	39,8
Eólica offshore - 100 km (exc. 50 km dist)	50,2
Eólica offshore - ZEE (exc. 100 km dist)	249,2
Oceânica	8,8
PV Offshore	1.356,1
<b>Total</b>	<b>1.715,3</b>

Fonte: Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (MME/EPE, 2021).

No caso simulado pelo PDE 2031 a produção de  $H_2$  (Tab. 5) a partir de eletricidade adquirida de uma usina de geração eólica, próximo ao Porto de Pecém, tem o custo por quilo de hidrogênio de US\$3.73, consumindo 793.087 MWh/ano com o total da produção estimado em 15.277 t/ano.

Tabela 5 – Caso simulado de produção de  $H_2$  por geração eólica

<b>Potência Instalada de produção de eletricidade (MW)</b>	339
<b>Produção de eletricidade (MWh/ano)</b>	1.120.751
<b>Consumo de eletricidade para produção de H2 (MWh/ano)</b>	793.087
<b>Produção de hidrogênio (t/ano)</b>	15.277
<b>Custo de Eletricidade (US\$/kWh)</b>	0,031

Fonte: Adaptado do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (MME/EPE, 2021).

Se considerarmos que a frota de 100 ônibus a hidrogênio no DF em 2032 tenha características de armazenamento como o exemplo da Fig. 13, o consumo diário seria de 4500 kg  $H_2$ /dia, promovendo uma autonomia de 300 km para cada veículo, percurso médio total para cada ônibus que roda no Distrito Federal, portanto o consumo médio, considerando que o ano para este trabalho é de 360 dias, será de 1.6 toneladas de  $H_2$  por ano, em 2032, que poderiam ser supridas pelo caso simulado pelo PDE 2031.

A média de investimento neste caso seria de 6 milhões de dólares somente para produção, sendo o maior custo previsto para os próprios ônibus que atualmente custam em torno de 1 milhão a 1,5 milhão de reais, valor médio estipulado no projeto da Coppe no Rio de Janeiro, enquanto um ônibus tradicional da marca Mercedes Benz pode ser adquirido por em média 500 mil reais. Com a retomada dos projetos pilotos de ônibus a célula combustível no Brasil, e os investimentos para produção de  $H_2$  no território brasileiro este valor pode ser equiparado até 2030, tornando estes veículos opções viáveis para frota do DF.



## 6 Considerações finais

Como combustível o hidrogênio será responsável por reduzir significativamente as emissões de  $CO_2$  no Distrito Federal porque a própria tecnologia da célula a combustível junto aos veículos propicia esse cenário. Entretanto seu uso só será estimulado por meio de políticas públicas de incentivo ao desenvolvimento e uso desses veículos baseados em programas semelhantes ao VEM DF, da Secretária de Ciência, Tecnologia e Inovação do DF (SECTI/DF), que estimula a eletromobilidade no Distrito Federal por meio de uma frota compartilhada de veículos 100% elétricos pelos servidores do GDF.

O Distrito Federal ainda não é considerado uma rota para a atual produção e consumo de hidrogênio no Brasil, entretanto é notável que a região apresenta-se como um polo de pesquisa e desenvolvimento pois é beneficiada pelo potencial de geração solar fotovoltaica com uma irradiação média anual de  $5,8 \text{ kWh/m}^2$ , como aponta do estudo do WWF-Brasil (2016). O estudo ainda aborda considerando a área total do DF de  $5.779 \text{ km}^2$ , que se apenas  $24 \text{ km}^2$  fossem ocupados por módulos fotovoltaicos a demanda de eletricidade da região seria suprida. O que pode sugerir, para o caso do  $H_2$ , que a expansão dessa geração pode ser direcionada para produção do combustível na região, sendo um estímulo a mais para que os ônibus a célula a combustível sejam inseridos na frota de transporte público coletivo do DF.

Não devemos classificar o hidrogênio como um combustível a ser considerado substituto ou competidor diante aos biocombustíveis. Contudo, pode e deve ser inserido como uma possibilidade de complemento a matriz de combustíveis, fomentando a sua cadeia de pesquisa e desenvolvimento de fontes renováveis; tal qual o desenvolvimento de soluções e materiais menos poluidores e dependentes do extrativismo, como os catalisadores dos eletrolisadores. Sendo assim, é primordial, a análise e elaboração de novos estudos sobre o hidrogênio, para oferecer o embasamento e possibilidades aos demais setores, como a indústria e a própria geração de energia que podem ser beneficiados pelo seu uso.

# Referências

- ABSOLAR. Energia solar fotovoltaica no brasil: Infográfico absolar. 2021. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Citado na página 27.
- ALVES, S. d. C. Reforma a vapor do metano para produção de hidrogênio: estudo termodinâmico e protótipo de modelo matemático de reator com membrana. 2005. Citado na página 21.
- ANDRADE, E. T. de; CARVALHO, S. R. G. de; SOUZA, L. F. de. Programa do proálcool e o etanol no brasil. *Engevista*, 2009. Citado na página 31.
- ANDRADE, T. N. d.; LORENZI, B. R. Política energética e agentes científicos: o caso das pesquisas em células a combustível no brasil. *Sociedade e estado*, SciELO Brasil, v. 30, p. 727–747, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- ANEEL. Matriz elétrica brasileira. 2021. Disponível em: <[encurtador.com.br/kDJKZ](http://encurtador.com.br/kDJKZ)>. Citado na página 35.
- BACH, V. R. Dimensionamento da capacidade de produção de hidrogênio a partir da energia vertida turbinável de itaipu e sua utilização em veículos automotivos. 2013. Citado na página 25.
- BOUCKAERT, S. et al. Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 20, 23 e 40.
- BRASIL-ALEMANHA, C. de Comércio e I. Mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro: Panorama atual e potenciais para o hidrogênio verde. 2021. Citado na página 46.
- CHUM, H. Programa brasileiro de células a combustível proposta. *Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Ciência, Tecnologia e Inovação*. Retrieved from <https://finep.gov.br/images/a-finep/fontes-de-orcamento/fundos-setoriais/ctenerg/programa-brasileiro-de-celulas-a-combustivel.pdf>, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 31.
- CLIMA, O. do. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do brasil 1970-2019. *Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)*, 2020. Citado na página 44.
- CODEPLAN. Delimitações das regiões administrativas pdad df - nota metodologica. 2012. Citado na página 41.
- COPPE. Ônibus híbrido a hidrogênio. 2021. Disponível em: <<https://www.coppe.ufrj.br/pt-br/a-coppe/coppe-produtos/onibus-hibrido-a-hidrogenio>>. Citado na página 39.
- EMTU/SP. Ônibus brasileiro a hidrogênio: Brazilian fuel cell bus: Tecnologias renováveis para o transporte urbano no brasil. 2015. Citado na página 32.
- EPE. Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio. 2021. Citado na página 33.

FARIA, D. G. Captura, armazenamento e utilização de dióxido de carbono na indústria de cimento. 2018. Citado na página 23.

FINEP. Ônibus a hidrogênio. 2021. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/a-finep-externo/aqui-tem-finep/onibus-a-hidrogenio>>. Citado na página 33.

FORTIER, R. The balloon era. *Ottawa: Canada Aviation Museum*, Citeseer, p. 28, 2004. Citado na página 37.

GONÇALVES, D. N. S.; QUEIROZ, R. C. d. Comparativo de consumo de combustível entre ônibus equipados com aparelhos de ar condicionado e ônibus convencionais. 2016. Citado na página 43.

GOULART, R. M. de A. *SIMULAÇÃO DE UM VEÍCULO À CÉLULA A COMBUSTÍVEL: HYUNDAI NEXO*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 40.

GURSKI, B.; GONZAGA, R.; TENDOLINI, P. Conferência de estocolmo: um marco na questão ambiental. *Administração de Empresas em Revista*, v. 1, n. 7, p. 65–79, 2012. Citado na página 18.

HERCULANO, D. Governo do ceará e neoenergia assinam memorando para estudos de viabilidade para projeto de transporte público movido a hidrogênio verde. 2021. Disponível em: <<https://encurtador.com.br/eiFNQ>>. Citado na página 34.

HYUNDAI. A history of hyundai and fuel cell technology. 2021. Disponível em: <<https://www.hyundai.com/en-us/releases/3049>>. Citado na página 37.

IEA. Global ev outlook 2021. *International Energy Agency: Paris, France*, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 40.

IEA. *Global Hydrogen Review 2021*. [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 21.

IRENA, I. A. *Hydrogen: A renewable energy perspective*. International Renewable Energy Agency (IRENA), 2019. ISBN 9789292602079. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>>. Citado na página 23.

IRENA, I. A. *Green Hydrogen: A guide to policy making*. International Renewable Energy Agency (IRENA), 2020. ISBN 9789292602864. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>>. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

IRENA, I. A. *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*. International Renewable Energy Agency (IRENA), 2020. ISBN 9789292602956. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>>. Citado 7 vezes nas páginas 15, 20, 24, 25, 26, 27 e 35.

IRENA, I. A. *Decarbonising end-use sectors: Practical insights on green hydrogen*. International Renewable Energy Agency (IRENA), 2021. ISBN 9789292603465. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2021/May/Decarbonising-end-use-sectors-green-hydrogen>>. Citado na página 33.

- LEAL, C. C. M. Plano diretor de transportes e mobilidade do distrito federal (pdtu/df): Instrumento de mobilidade urbana. 2017. Citado na página 43.
- LORENZI, B. R. Em busca de alternativas energéticas: estudo sobre as pesquisas em células combustíveis no Brasil. Universidade Federal de São Carlos, 2012. Citado na página 31.
- MATOS, M. B. d.; NEVES, J.; PIMENTA, N. The Brazilian strategy for the hydrogen economy; a estratégia brasileira para economia do hidrogênio. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- MEIRELES, T. Acordo de Paris completa cinco anos com lições aprendidas. 2020. Citado na página 15.
- MIRANDA, P. E. V. de. *Science and engineering of hydrogen-based energy technologies*. [S.l.]: Elsevier, 2019. Citado 14 vezes nas páginas 17, 19, 21, 23, 25, 26, 28, 29, 30, 35, 36, 37, 38 e 39.
- MME. Proposta de diretrizes: Programa nacional do hidrogênio. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- MME/EPE. Plano decenal de expansão de energia 2031. 2021. Citado na página 47.
- NETO, E. H. G. *Hidrogênio: evoluir sem poluir; a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível*. [S.l.]: Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005. Citado 9 vezes nas páginas 17, 21, 27, 28, 29, 30, 35, 36 e 37.
- NETO, R. L.; MOREIRA, J. R. S. Geração e combustão do hidrogênio obtido através do processo de eletrólise da água. *Portal de química. Leis da Eletrólise*, 2007. Citado na página 23.
- NUNES, A. O choque do petróleo de 1973: Estados Unidos, OPAEP e a segurança energética. *Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro*, p. 126, 2016. Citado na página 18.
- PALHARES, D. D. et al. Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar. Universidade Federal de Uberlândia, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 23, 25 e 26.
- REGINA, I. C.; LOPES, M. C. Ônibus a célula a combustível hidrogênio para transporte urbano no Brasil. 2013. Citado na página 33.
- RIFKIN, J. *A economia do hidrogênio*. [S.l.]: M. Books São Paulo, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 17, 18, 23 e 37.
- SANTOS, L. O. Propriedades estruturais e texturais de catalisadores anódicos alternativos para célula a combustível de óxido sólido (SOFC). 2018. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- SCOTT, D. S. Fuel cells: chip of the future? *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 29, n. 11, p. 1089–1093, 2004. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319904001259>>. Citado na página 37.

- SEMA. Inventário do distrito federal de emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de gases de efeito estufa 2005-2018. 2021. Citado na página 15.
- SILVA, P. d. M. A história, desenvolvimento e trajetória das células a combustível. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2017. Citado na página 28.
- TOYOTA. Toyota mirai breaks world record for distance driven with one fill of hydrogen. 2021. Disponível em: <<https://newsroom.toyota.eu/toyota-mirai-breaks-world-record-for-distance-driven-with-one-fill-of-hydrogen/>>. Citado na página 39.
- VARGAS, R. A. et al. Uma visão da tecnologia de células a combustível. 2006. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- VILLAÇA, J. M. A. Proposta e simulação de processo de reforma a vapor de glicerol para obtenção de hidrogênio. 2018. Citado na página 22.
- WWF-BRASIL. Potencial da energia solar fotovoltaica de Brasília. 2016. Citado na página 48.