

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS - *CAMPUS* BETIM  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

João Victor de Moura Silva

**CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL PARA APLICAÇÃO AUTOMOTIVA:  
TECNOLOGIAS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS**

Betim  
2026

João Victor de Moura Silva

**CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL PARA APLICAÇÃO AUTOMOTIVA:  
TECNOLOGIAS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Bruno de Souza  
Baptista

Betim  
2026

## FICHA CATALOGRÁFICA

S586c Silva, João Victor de Moura

Células de combustível para aplicação automotiva: tecnologia, desafios e perspectivas / João Victor de Moura Silva. – 2026.

55 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Me. Bruno de Souza Baptista

1. Automóveis. 2. Células de combustível. 3. Hidrogênio. 4. Etanol. 5. Engenharia Mecânica. I. Silva, João Victor de Moura. II. Título.

CDU: 629.33



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS**

**Campus Betim**  
**Diretoria de Ensino**  
**Docentes Mecânica**

Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG  
3135976360 - www.ifmg.edu.br

## **ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Aos 21 dias do mês de fevereiro do ano de 2026, às dezoito horas, nas dependências do IFMG - *Campus Betim*, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Bruno de Souza Baptista e demais membros, Felipe Augusto Rocha da Silva e Flávio Magno de Carvalho Fonseca. Nesta ocasião o discente João Victor de Moura Silva do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com registro acadêmico de número 0055551 d o IFMG - *Campus Betim*, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado "CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL PARA APLICAÇÃO AUTOMOTIVA: TECNOLOGIAS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS" e foi APROVADO, com 85 (OITENTA E CINCO) pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o conseqüente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 30 dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e conseqüente reprovação.

A sessão foi encerrada às dezenove horas e trinta minutos. Para constar, eu, Bruno de Souza Baptista, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora.

Betim, 16 de março de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Bruno de Souza Baptista, Professor**, em 16/03/2026, às 18:41, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Augusto Rocha da Silva, Usuário Externo**, em 17/03/2026, às 07:15, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Flavio Magno de Carvalho Fonseca**, **Coordenador(a) do Curso de Engenharia Mecânica - Campus Betim**, em 18/03/2026, às 18:58, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2653927** e o código CRC **F86642F1**.

23792.000253/2026-57

2653927v1

*Dedico este trabalho a Deus, à minha  
família e aos meus amigos. Pois sem eles,  
eu não teria chegado até aqui.*

## RESUMO

Nos últimos anos, impulsionada pela necessidade de transição energética, houve uma crescente busca global por reduzir a dependência do uso de combustíveis fósseis e pelo desenvolvimento de tecnologias que utilizem recursos renováveis para geração de energia. Nesse contexto, as células de combustível surgem como uma solução tecnológica promissora para a propulsão de veículos, convertendo a energia química de combustíveis como o hidrogênio e o etanol em energia elétrica com alta eficiência e baixas ou nulas emissões de poluentes. A implementação e o desenvolvimento desses veículos representam um avanço significativo para a consolidação de um transporte mais sustentável, reduzindo o impacto ambiental e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Este trabalho visa investigar a tecnologia das células de combustível em veículos, abordando seus princípios de funcionamento, vantagens, e desafios, além de analisar a literatura existente sobre suas características, avanços recentes, benefícios ambientais e econômicos, e os principais obstáculos para à sua adoção ampla.

**Palavras-chave:** Células de combustível. Automóvel. Hidrogênio. Etanol. Sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

In recent years, driven by the need for energy transition, there has been a growing global search to reduce the dependence on fossil fuels and the development of technologies that uses renewable resources to generate energy. In this context fuel cells appear as a promising solution for vehicle propulsion, converting the chemical energy of fuels such as hydrogen and ethanol into electrical energy with high efficiency and low or zero pollutant emissions. The implementation and development of these vehicles represent a significant advance for the consolidation of a more sustainable transport, reducing environmental impact and contributing to the mitigation of climate change. This work aims to investigate fuel cell technology in vehicles, addressing its operating principles, advantages, and challenges, while analyzing existing literature on its characteristics, recent advances, environmental and economic benefits, and the main obstacles to its widespread adoption.

**Keywords:** Fuel cells. Automobile. Hydrogen. Ethanol. Sustainability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Consumo global de energia primária .....	13
Figura 2 - Modelos de FCEVs já comercializados (a) Toyota Mirai e (b) Hyundai Nexo .....	14
Figura 3 - Metodologia para Desenvolvimento do TCC.....	16
Figura 4 - Célula de Combustível PEMFC.....	17
Figura 5 - Stack de células de combustível.....	18
Figura 6 - AFC projetada pela Pratt & Whitney e utilizada no voo da Apollo à Lua...	19
Figura 7 - (a) Ônibus da Ballard apresentado em 1993 e (b) Protótipo NECAR 1 de 1994.....	20
Figura 8 - Princípio de funcionamento PEMFC .....	21
Figura 9 - Princípio de funcionamento SOFC.....	22
Figura 10 - Toyota Mirai powertrain.....	26
Figura 11 - Nissan e-Bio Fuel-Cell .....	27
Figura 12 - Honda Clarity FC.....	28
Figura 13 - Honda CR-V e: FCEV .....	29
Figura 14 - Unidade do Hyundai Nexo em testes na USP .....	30
Figura 15 - BMW iX5 Hydrogen.....	31
Figura 16 - Mercedes-Benz GenH2 Truck.....	34
Figura 17 - Mercedes-Benz eCitaro fuel cell .....	34
Figura 18 - Hyundai XCIENT Fuel Cell.....	35
Figura 19 - Sistema <i>Mid-Power Plug-in Hydrogen Fuel Cell</i> utilizado pela Stellantis	36
Figura 20 - Renault Master Van H2-TECH.....	37
Figura 21 - Platina e suporte de carbono na célula PEMFC .....	39
Figura 22 - Vista interna de um Mirai, exibindo os tanques de hidrogênio .....	40
Figura 23 - Posto de abastecimento de hidrogênio na Alemanha .....	42
Figura 24 - Tanque de H <sub>2</sub> em teste de incêndio .....	42
Figura 25 - Estação de abastecimento de hidrogênio localizada na USP .....	45
Figura 26 - Centro de Células a Combustível e Hidrogênio do IPEN .....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre os tipos de células de combustível e suas características.....	25
Tabela 2 - Comparação entre modelos FCEV e seus equivalentes da mesma montadora.....	32

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

AFC - *Alkaline Fuel Cell*

BEV - *Battery Electric Vehicle*

CONFEA - Conselho Federal de Engenharia e Agronomia

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

FC - *Fuel Cell*

FCEV - *Fuel Cell Electric Vehicle*

GE - *General Electric*

GEE - Gases de Efeito Estufa

GTR - *Global Technical Regulation*

HEV - *Hybrid Electric Vehicle*

ICE - *Internal Combustion Engine*

ICEV - *Internal Combustion Engine Vehicle*

IEA - *International Energy Agency*

IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

IRA - *Inflation Reduction Act*

MHEV - *Mild Hybrid Electric Vehicle*

MCFC - *Molten Carbonate Fuel Cell*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

PAFC - *Phosphoric Acid Fuel Cell*

PEMFC - *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*

PFSA - *Polímero Perfluorado Sulfonado*

PHEV - *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*

SOFC - *Solid Oxide Fuel Cell*

SUV - *Sport Utility Vehicle*

UNECE - *United Nations Economic Commission for Europe*

USP - Universidade de São Paulo

WLTP - *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure*

YSZ - *Yttria Stabilized Zirconia*

## LISTA DE SÍMBOLOS

H <sub>2</sub> O	Água
cv	Cavalo-vapor
US\$	Dólar americano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
°C	Graus Celsius
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
CO	Monóxido de carbono
Ni	Níquel
Nm	Newton-metro
MPa	Megapascal
O <sub>2</sub>	Oxigênio
Pt	Platina
kg	Quilograma
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
V	Volts

## SUMÁRIO

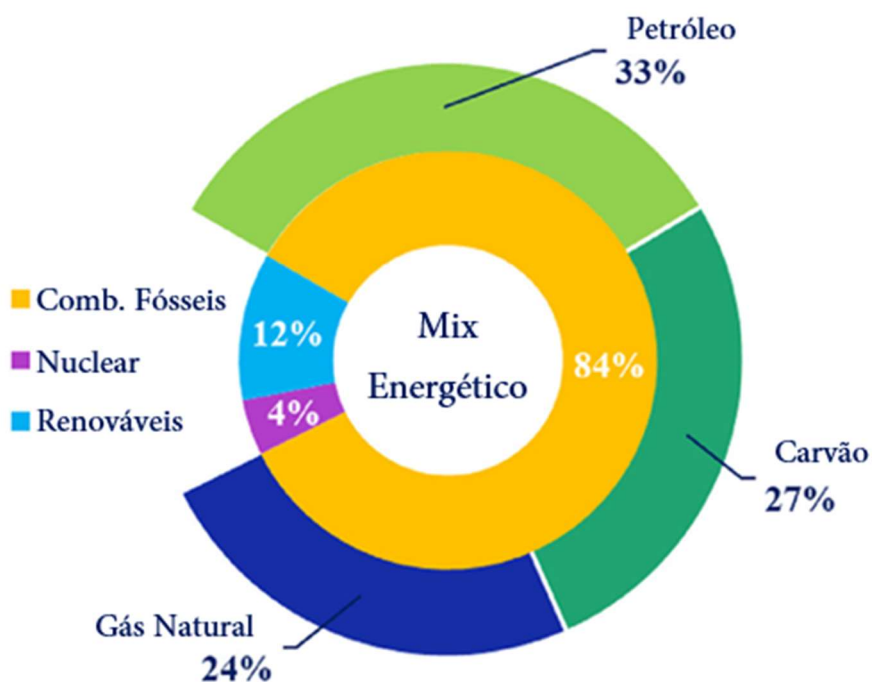
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Histórico e desenvolvimento.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2</b>	<b>Tipos de células de combustível.....</b>	<b>20</b>
3.2.1	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC).....	20
3.2.2	Solid Oxide Fuel Cell (SOFC).....	22
3.2.3	Alcaline Fuel Cell (AFC) .....	23
3.2.4	Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC).....	23
3.2.5	Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) .....	23
<b>4</b>	<b>APLICAÇÕES E PRINCIPAIS VEÍCULOS.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1</b>	<b>Toyota Motor Corporation .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2</b>	<b>Nissan Motor Corporation .....</b>	<b>27</b>
<b>4.3</b>	<b>Honda Motor Company .....</b>	<b>28</b>
<b>4.4</b>	<b>Hyundai Motor Company .....</b>	<b>29</b>
<b>4.5</b>	<b>BMW Group.....</b>	<b>30</b>
<b>4.6</b>	<b>Transporte comercial e de cargas .....</b>	<b>33</b>
4.6.1	Daimler Truck .....	33
4.6.2	Hyundai Motor Company .....	35
4.6.3	Stellantis.....	35
4.6.4	Renault Group - HYVIA .....	36
<b>5</b>	<b>DESAFIOS TÉCNICOS E DE INFRAESTRUTURA .....</b>	<b>38</b>
<b>5.1</b>	<b>Catalisadores .....</b>	<b>38</b>
<b>5.3</b>	<b>Armazenamento e segurança.....</b>	<b>39</b>
<b>5.4</b>	<b>Produção de hidrogênio .....</b>	<b>40</b>
<b>5.5</b>	<b>Infraestrutura de abastecimento de hidrogênio .....</b>	<b>41</b>
<b>5.6</b>	<b>Legislação e homologação.....</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>PERSPECTIVAS E O CENÁRIO BRASILEIRO .....</b>	<b>44</b>
<b>6.1</b>	<b>Rede de distribuição de etanol.....</b>	<b>44</b>
<b>6.2</b>	<b>Produção de hidrogênio a partir do etanol .....</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>47</b>

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>48</b>
-------------------------	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

A matriz energética global, predominantemente baseada em combustíveis fósseis, enfrenta uma pressão crescente devido à segurança energética e o impacto nas mudanças climáticas. O setor de transportes é um dos principais responsáveis por esse cenário, consumindo cerca de 65% do total de combustíveis derivados de petróleo produzidos e contribuindo com aproximadamente um quarto das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no mundo (AMINUDIN et al., 2022; HALDER et al., 2023). A transição para uma mobilidade de baixo carbono é fundamental para mitigar os impactos ambientais e atender às metas climáticas globais e nacionais. Uma vez que, os motores de combustão interna (ICEs - *Internal Combustion Engine*), apesar de sua hegemonia histórica devido ao baixo custo de fabricação, manutenção e reabastecimento rápido, operam com baixa eficiência energética (≈30%) e são fontes diretas de poluentes atmosféricos (AMINUDIN et al., 2022).

Figura 1 - Consumo global de energia primária



Fonte: HALDER et al., 2023 (Adaptado)

Dessa maneira, os veículos elétricos são considerados os sucessores mais adequados aos ICEs por conta da alta eficiência (≈90%) e zero emissão (AMINUDIN et al., 2022). Contudo, a maneira de fornecer energia a esses veículos ainda é discutida. Embora as baterias embarcadas nos BEVs (*Battery Electric Vehicles*) e

outros híbridos como os PHEVs (*Plug-in Hybrid Electric Vehicles*) sejam uma das principais opções consideradas para a descarbonização dos transportes, elas enfrentam dificuldades com o peso excessivo, a baixa autonomia e o longo tempo de recarga (BETHOUX, 2020; CULLEN et al., 2021).

Nesse contexto, os veículos elétricos a célula de combustível (**FCEVs - Fuel-Cell Electric Vehicles**) surgem como uma alternativa promissora. As células de combustível embarcadas nesses veículos são dispositivos eletroquímicos capazes de converter diretamente a energia química de um combustível, como o hidrogênio (H<sub>2</sub>), em energia elétrica, emitindo apenas vapor de água como subproduto, eliminando as emissões de poluentes locais e gases de efeito estufa (GEE) (HALDER et al., 2024; BETHOUX, 2020). Comparadas às baterias, as células de combustível possuem menor peso, menor tempo de abastecimento e maior autonomia, fatores ideais para a viabilidade em aplicações de longas distâncias e uso intensivo (CULLEN et al., 2021).

Alguns modelos de FCEVs já são comercializados globalmente, demonstrando o amadurecimento dessa tecnologia. O Toyota Mirai, lançado em 2014 e atualmente em sua segunda geração, é um dos exemplos mais consolidados no mercado, sendo comercializado principalmente nos Estados Unidos, Japão e países europeus. O Hyundai NEXO é outro modelo relevante, com foco na Europa e na Coreia do Sul, apresentando autonomia superior a 600 km e design voltado a aproveitar a popularidade do segmento de SUVs (BETHOUX, 2020; CULLEN et al., 2021). No âmbito nacional, há pesquisas direcionadas para aproveitar o potencial do uso de etanol como combustível para os FCEVs, através da produção de H<sub>2</sub> pelo processo químico de reforma a vapor.

**Figura 2 - Modelos de FCEVs já comercializados (a) Toyota Mirai e (b) Hyundai Nexa**



(a)



(b)

Fonte: TOYOTA, 2020; HYUNDAI, 2025

Quanto à regulamentação, a recente sanção no Brasil da Lei nº 14.948/2024 institui a Política Nacional do Hidrogênio e cria incentivos para a produção e o uso de hidrogênio com baixa emissão de carbono. Este marco legal dialoga diretamente com o panorama global, alinhando-se a iniciativas como as diretrizes de descarbonização da União Europeia, o programa de subsídios do *Inflation Reduction Act* (IRA) nos Estados Unidos e os padrões de segurança veicular do *Global Technical Regulation* (GTR) da ONU. Dessa maneira, a inserção dos FCEVs é amparada por uma crescente estrutura de políticas públicas e incentivos que visam viabilizar a transição energética no setor automotivo.

### **1.1 Justificativa**

A relevância dos FCEVs é impulsionada pela sua flexibilidade, já que o hidrogênio pode ser produzido a partir de diversas fontes, incluindo energias renováveis como solar e eólica, e até mesmo a partir de biomassa e biocombustíveis, como o etanol, que possui uma infraestrutura já consolidada no Brasil (OLIVEIRA, 2022). Portanto, o estudo aprofundado das células de combustível e sua aplicação em veículos é fundamental para avaliar sua viabilidade técnica, econômica e estratégica como pilar da mobilidade sustentável do futuro.

### **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo geral analisar o estado da arte das tecnologias de células de combustível para aplicação em veículos, abordando seus fundamentos, componentes críticos, principais modelos comerciais, desafios técnicos e econômicos, e as perspectivas de desenvolvimento, especialmente no cenário brasileiro. Dessa maneira, foram estabelecidos os objetivos específicos:

- Entender os princípios de funcionamento das células de combustível;
- Mapear a situação dos veículos com essa tecnologia disponíveis no mercado;
- Identificar os pontos favoráveis e as desvantagens em comparação com outras tecnologias;
- Mapear o estado atual da legislação e as perspectivas futuras.

## 2 METODOLOGIA

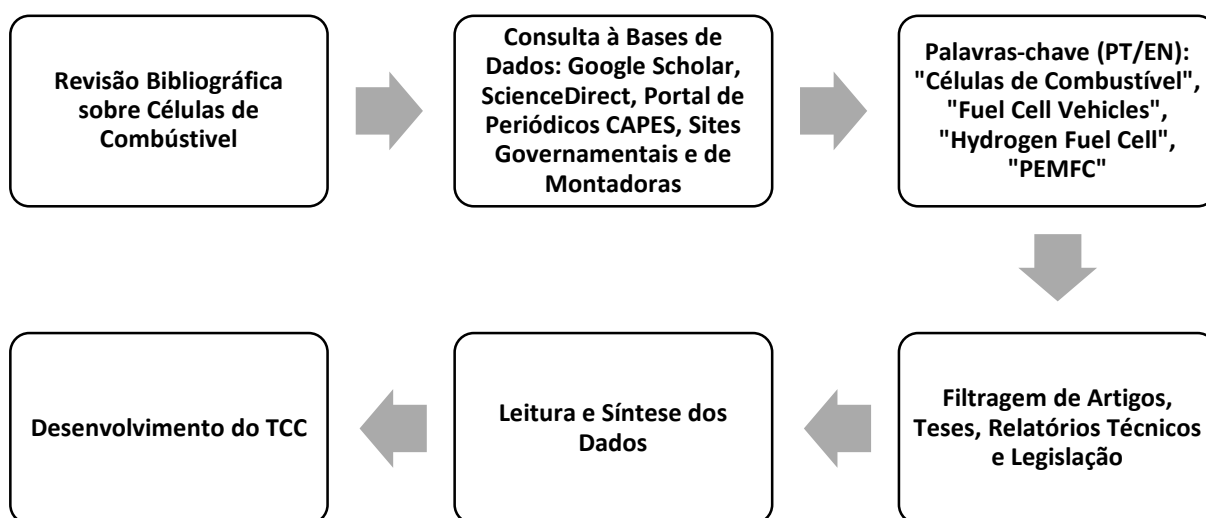
A pesquisa adotada neste trabalho é uma revisão bibliográfica de caráter exploratório. Realizada de maneira a reunir, analisar e sintetizar conhecimentos disponíveis sobre a tecnologia de células de combustível aplicada ao setor automotivo.

Para a coleta de dados, foram utilizadas bases de dados acadêmicas e repositórios científicos, principalmente o *Google Scholar*, *ScienceDirect* e Portal de periódicos Capes. A pesquisa abrangeu artigos científicos, livros, teses e dissertações. Foram utilizadas palavras-chave em português e inglês, majoritariamente: “Células de Combustível”, “Veículos a Hidrogênio”, “*Fuel Cell Vehicles*”, “*Hydrogen Fuel Cell*” e “PEMFC”.

Para os critérios de inclusão, selecionou-se estudos dos últimos 15 anos que abordassem diretamente a aplicação de células de combustível em veículos leves ou pesados, com foco para publicações dos últimos 5 anos por conterem dados de mercado e custo mais recentes. Foram priorizados os materiais com maior relevância na comunidade acadêmica medidos pela quantidade de citações. Além disso, foi feita a busca em organismos internacionais, sites governamentais e de montadoras por relatórios técnicos, publicações de fabricantes e legislação em vigor.

Após a seleção, os dados foram organizados em categorias temáticas e utilizados nos capítulos deste trabalho.

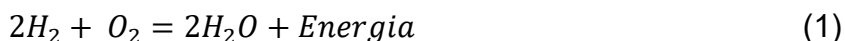
**Figura 3 - Metodologia para Desenvolvimento do TCC**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

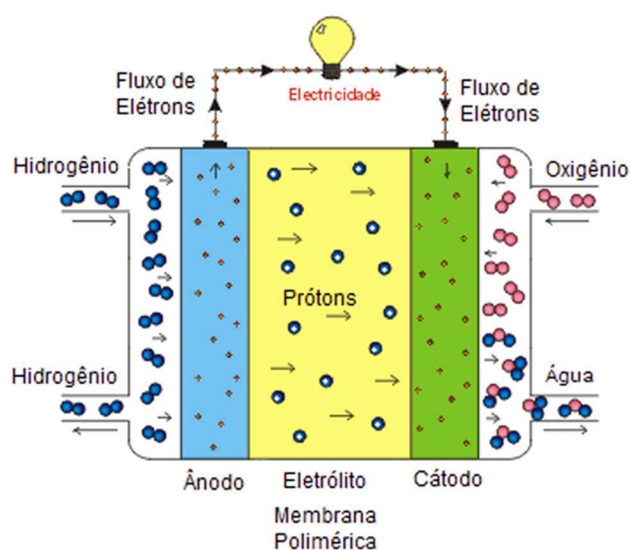
### 3 CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

Uma célula de combustível é um dispositivo eletroquímico capaz de converter a energia química da reação de oxidação de um combustível (hidrogênio) em energia elétrica e calor, gerando apenas água como subproduto (1) (AMINUDIN et al.; JUNIOR et al., 2022).



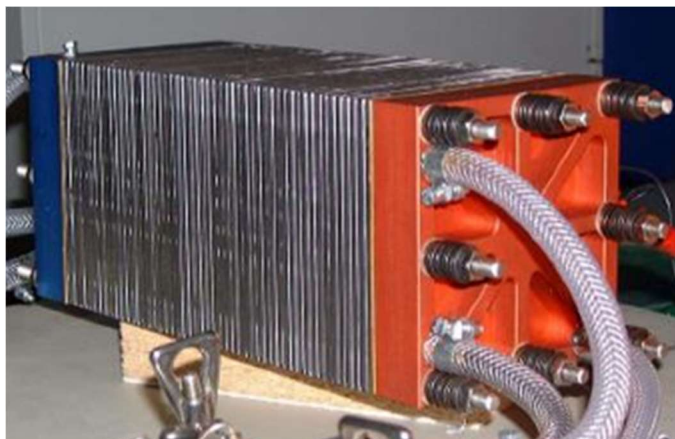
Ao se tratar do tema de células de combustível, o modelo geralmente utilizado é o do tipo Membrana de troca de prótons (PEMFC – *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*). Seu funcionamento envolve dois eletrodos: o ânodo (polo negativo) e o cátodo (polo positivo), separados por um eletrólito (substância que permite a passagem de íons). O gás hidrogênio (combustível) é alimentado no ânodo, onde é oxidado, ocorrendo a produção de cátions  $H^+$  e elétrons livres. Esses elétrons formarão a corrente elétrica utilizada para alimentar equipamentos acoplados à célula de combustível. Já os prótons são transportados pelo eletrólito até o cátodo, onde há a alimentação de oxigênio (comumente do ar). Logo, juntamente com os elétrons que retornam do circuito elétrico, os elementos reagem produzindo vapor de água (MIRANDA et al, 2013; JUNIOR et al., 2022).

Figura 4 - Célula de Combustível PEMFC



Ademais, uma célula de combustível unitária gera uma potência elétrica muito baixa, insuficiente para alimentar o *powertrain* de um veículo, por exemplo. Para isso, as células são agrupadas, formando um conjunto denominado *Stack* (BETHOUX, 2020; AMINUDIN et al., 2022).

**Figura 5 - Stack de células de combustível**

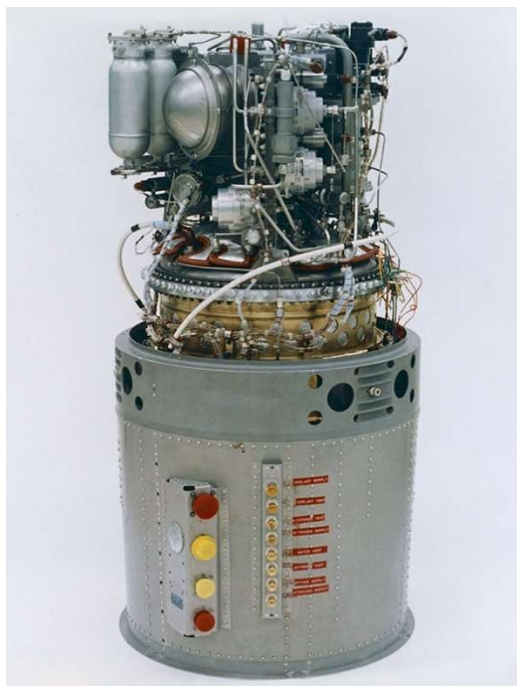


Fonte: BETHOUX, 2020

### **3.1 Histórico e desenvolvimento**

No século XIX, o cientista britânico William Grove desenvolveu o primeiro dispositivo que demonstrava a possibilidade de gerar eletricidade diretamente da reação química entre hidrogênio e oxigênio, sem a necessidade de combustão. O mecanismo utilizava eletrodos de platina imersos em ácido sulfúrico para converter a energia química em elétrica. Apesar de inovadora, a tecnologia não foi aproveitada na época por limitações de materiais e engenharia. Na década de 1930, o engenheiro Francis Thomas Bacon aprimorou o conceito e desenvolveu a célula a combustível alcalina (AFC - *Alcaline Fuel Cell*), que mais tarde seria utilizada pela NASA no programa espacial Apollo nos anos 60, fornecendo eletricidade e água potável para os astronautas. Paralelamente, a *General Electric* (GE) já havia desenvolvido células PEMFC para o programa Gemini, anterior ao Apollo, mas esta apresentava vida útil limitada na época (SILVA, 2017; JUNIOR et al., 2022; FANG et al, 2024; QASEM; ABDULRAHMAN, 2024).

Figura 6 - AFC projetada pela Pratt & Whitney e utilizada no voo da Apollo à Lua



Fonte: NASA

A crise do petróleo da década de 1970 e a crescente conscientização ambiental, impulsionaram a retomada das pesquisas em células de combustível para aplicações terrestres. No entanto, somente durante a década de 1980 que a tecnologia PEMFC superou importantes obstáculos técnicos. O desenvolvimento da membrana polimérica de *Nafion*<sup>1</sup> e os avanços na redução da carga de platina nos eletrodos foram fundamentais, aumentando a durabilidade e reduzindo o custo da célula. O que permitiu que essa se tornasse viável para aplicações automotivas, aliada a vantagens já existentes como a operação em temperaturas mais baixas, alta densidade de potência e resposta rápida às variações de esforço. (BRANCO, 2013; SILVA, 2017; FANG et al, 2024).

A partir da década de 1990, a tecnologia PEMFC iniciou uma nova competição na indústria automotiva. O desenvolvimento do primeiro ônibus movido a célula de combustível do mundo pela *Ballard Power Systems* em 1993 e a apresentação do protótipo NECAR 1 (*New Electric Car*) pela Daimler em 1994, confirmaram a

---

<sup>1</sup> Polímero perfluorado sulfonado (PFSA) desenvolvido pela empresa DuPont no final da década de 1960. Atua como um eletrólito sólido em células de combustível PEMFC com maior eficiência que as membranas anteriores baseadas em poliestireno.

viabilidade técnica do uso de FCs para propulsão de veículos (AMINUDIN et al., 2022; HALDER et al., 2024).

**Figura 7 - (a) Ônibus da Ballard apresentado em 1993 e (b) Protótipo NECAR 1 de 1994**



(a)

(b)

Fonte: *Ballard Power Systems e Mercedes-Benz Public Archive*

Dessa maneira, montadoras como Toyota, Honda e Hyundai passaram a investir no desenvolvimento de veículos movidos com essa tecnologia, culminando no lançamento de modelos comerciais como o Mirai e o Nexu no século XXI.

### 3.2 Tipos de células de combustível

Conforme Junior (2022), as células de combustível são classificadas com base no tipo de eletrólito utilizado, na temperatura de operação e nas aplicações específicas. Cada tipo possui características distintas que influenciam sua eficiência, durabilidade e adequação a diferentes usos. As PEMFCs são, majoritariamente, as mais pesquisadas atualmente para aplicações automotivas, enquanto as SOFCs ampliam suas possibilidades para esse setor a partir de avanços específicos.

#### 3.2.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

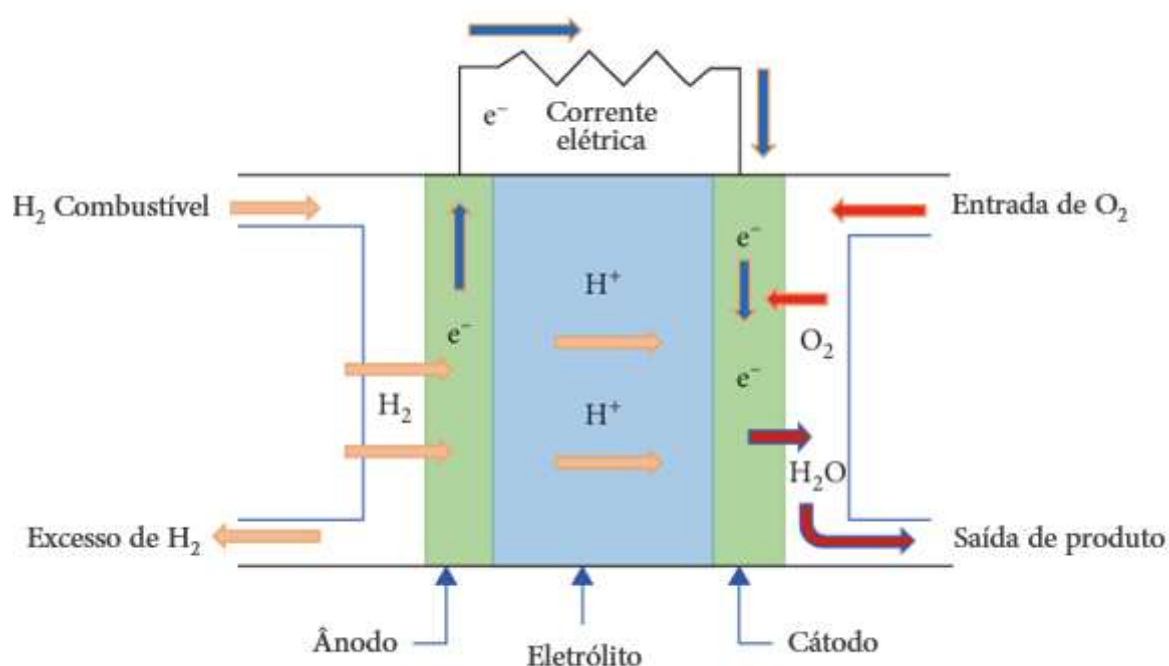
As PEMFCs são as células mais promissoras para aplicações automotivas devido à sua alta densidade de potência, operação em baixas temperaturas, tipicamente entre 60 e 90°C, e capacidade de partida rápida (SILVA, 2017; AMINUDIN et al., 2022).

Seu eletrólito é uma membrana polimérica sólida composta de Nafion e recoberta por uma fina camada de platina (Pt), que atua como catalisador e permite a passagem de prótons ( $H^+$ ). A reação no ânodo divide o hidrogênio ( $H_2$ ) em prótons ( $H^+$ ) e elétrons ( $e^-$ ). Os prótons ( $H^+$ ) atravessam a membrana, enquanto os elétrons

( $e^-$ ) seguem por um circuito externo, gerando corrente elétrica e alimentando o equipamento acoplado. No cátodo, o oxigênio do ar ( $O_2$ ), prótons ( $H^+$ ) e elétrons ( $e^-$ ) se combinam para formar água ( $H_2O$ ) (QASEM; ABDULRAHMAN, 2024; BETHOUX, 2020; BRANCO, 2013).

A ausência de eletrólito líquido reduz a corrosão e manutenção, e sua operação com ar atmosférico garante baixas emissões de poluentes, sem geração de óxidos de nitrogênio (JUNIOR et al., 2022).

Figura 8 - Princípio de funcionamento PEMFC



Fonte: QASEM; ABDULRAHMAN, 2024 (Adaptado)

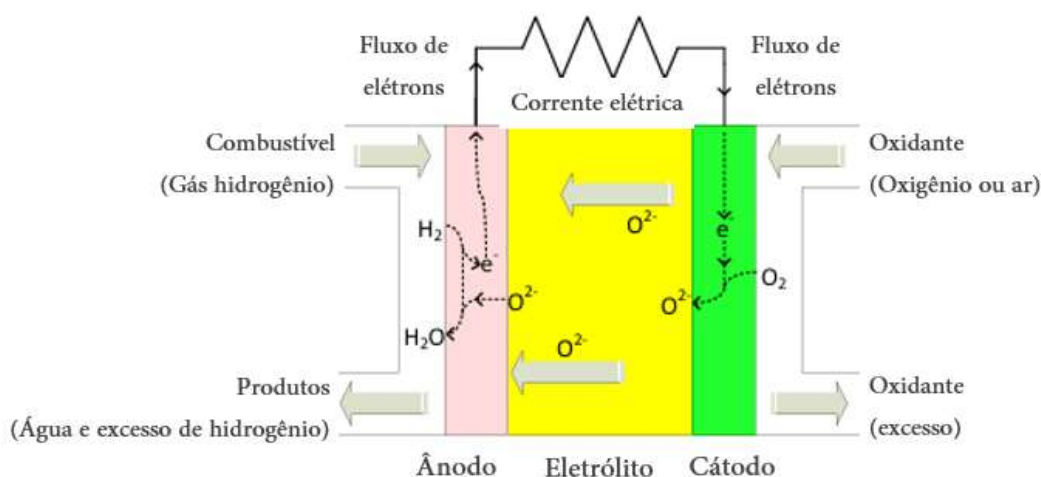
A principal desvantagem dessa tecnologia está no uso de catalisadores de platina (Pt). Além do custo elevado deste metal nobre, ele é suscetível ao “envenenamento” na presença de CO ou  $CO_2$ . Isso ocorre devido a essas moléculas possuírem uma afinidade química com a platina superior à do hidrogênio, aderindo à superfície do catalisador e bloqueando a reação de oxidação, tornando necessário o uso de hidrogênio de alta pureza. Além disso, a necessidade de hidratação constante do eletrólito sólido para permitir a condução iônica, impede o funcionamento eficiente da célula a temperaturas que passem os  $90\text{ }^\circ\text{C}$ , características que têm impulsionado

a busca por novos materiais e soluções tecnológicas (BETHOUX, 2020; AMINUDIN et al., 2022; JUNIOR et al., 2022).

### 3.2.2 Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

As células a combustível de óxido sólido (SOFC) operam em temperaturas elevadas (entre 600 °C e 1.000 °C) e utilizam um eletrólito cerâmico sólido, normalmente composto por zircônia estabilizada com ítria (YSZ - *Yttria Stabilized Zirconia*) e níquel, mistura denominada cermet. Diferentemente das células PEMFCs, onde o transporte iônico é realizado por prótons  $H^+$ , nas SOFCs o portador de carga é o íon oxigênio  $O^{2-}$  que migra do cátodo para o ânodo através da estrutura cerâmica (BOLDRIN; BRANDON, 2019; FANG et al., 2024).

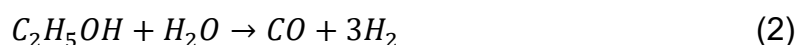
Figura 9 - Princípio de funcionamento SOFC



Fonte: FANG et al., 2024 (Adaptado)

Embora tradicionalmente consideradas inadequadas para veículos devido ao longo tempo de aquecimento e à fragilidade dos componentes cerâmicos, avanços recentes em células com suporte metálico (*Metal-Supported Solid Oxide Fuel Cells*) têm mitigado esses problemas. A boa condutividade térmica e a resistência mecânica do metal, permitem maior robustez contra vibrações e ciclos térmicos rápidos. Além disso, a alta temperatura favorece a cinética das reações e viabiliza o uso de outros combustíveis por meio da reforma interna. Nesse processo, combustíveis como gás natural ou etanol reagem com o vapor de água e calor no ânodo, sendo convertidos

em H<sub>2</sub> e CO (2). O monóxido de carbono resultante é convertido em mais hidrogênio através da reação de deslocamento gás-água (*Water-Gas Shift*) (3). Esse conceito fundamenta o projeto de pesquisa da Nissan no Brasil para o desenvolvimento de veículos elétricos movidos a bioetanol (BOLDRIN; BRANDON, 2019; FANG et al., 2024; NISSAN, 2021).



### 3.2.3 Alkaline Fuel Cell (AFC)

Como mencionado, as AFCs foram as primeiras células modernas desenvolvidas, com base nos estudos de Francis Bacon nos anos 1930, e aplicadas pela NASA nas missões Apollo na década de 1960. Utilizam hidróxido de potássio líquido (KOH) como eletrólito e operam em temperaturas entre 60 °C e 90 °C. Possuem boa eficiência elétrica, por volta de 60% e têm como vantagem o uso de catalisadores de menor custo, como o níquel, devido ao ambiente alcalino do eletrólito. Porém, esse mesmo fator as torna altamente sensíveis ao CO e CO<sub>2</sub>, que reagem com o KOH formando cristais de carbonato, que obstruem o eletrólito e degradam a condução iônica. Isso exige o uso de hidrogênio e oxigênio puros, o que encarece sua operação e limita sua aplicação automotiva (JUNIOR et al., 2022; FANG et al., 2024).

### 3.2.4 Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)

As células de combustível a ácido fosfórico (PAFC) foram desenvolvidas na década de 1960 e utilizam ácido fosfórico líquido (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) como eletrólito. Operam entre 150 °C e 220 °C, o que garante certa tolerância ao envenenamento por CO<sub>2</sub> e permite o uso de ar atmosférico ao invés de oxigênio puro. São consideradas confiáveis para aplicações estacionárias, com vida útil próxima dos 5 anos. Entretanto, o eletrólito é altamente corrosivo e a célula também faz uso de catalisador de platina, o que exige materiais mais robustos na construção, encarece seu custo e a inviabiliza para uso veicular (SILVA, 2017; JUNIOR et al., 2022; FANG et al., 2024).

### 3.2.5 Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

As células a combustível de carbonato fundido (MCFCs) utilizam uma mistura de sal de carbonatos fundidos (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) como eletrólito. Por operarem em altas

temperaturas, próximo aos 700°C, utilizam de catalisadores de menor custo como o níquel e podem operar diretamente com hidrocarbonetos como combustível através da reforma interna. O eletrólito altamente corrosivo reduz a vida útil da célula. Aliado a isso, o longo tempo para atingir a temperatura operacional, tornam esses dispositivos mais adequados para as aplicações estacionárias como em usinas de carvão e gás, onde possuem eficiência energética de até 85% em sistemas de cogeração, nos quais o calor residual da célula é aproveitado (SILVA, 2017; JUNIOR et al., 2022; FANG et al., 2024).

A tabela 1 apresenta uma comparação das células de combustível apresentadas e suas características.

Tabela 1 - Comparativo entre os tipos de células de combustível e suas características

TIPO DE CÉLULA	ELETRÓLITO	CATALISADOR	TEMPERATURA DE OPERAÇÃO	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	CAPACIDADE DE GERAÇÃO	APLICAÇÕES
<b>AFC</b>	Hidróxido de Potássio (KOH) Líquido	Níquel (Ni)	60 - 90 °C	50 – 60%	Até 100 kW	Espacial, submarinos e militar
<b>PEMFC</b>	Membrana Polimérica Sólida (Nafion)	Platina (Pt)	60 - 90 °C	40 - 60 %	Até 250 kW	Veículos leves, pesados e eletrônicos portáteis
<b>PAFC</b>	Ácido fosfórico (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ) Líquido	Platina (Pt)	150 - 220 °C	40 – 45%	Até 400 kW	Geração distribuída estacionária (Hospitais, prédios)
<b>MCFC</b>	Carbonato alcalino fundido	Níquel (Ni)	600 - 700 °C	45 – 55% (Até 85% em cogeração)	MW em grande escala	Grandes usinas de energia elétrica e industrial
<b>SOFC</b>	Cerâmico (YSZ)	Níquel e outras ligas de baixo custo	600 - 1000 °C	50 – 60% (Até 85% em cogeração)	MW em grande escala	Geração estacionária e recentemente veículos a etanol por meio da reforma interna

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de BOLDRIN, BRANDON, 2019; JUNIOR, 2022; FANG et al., 2024

## 4 APLICAÇÕES E PRINCIPAIS VEÍCULOS

Apesar dos desafios tecnológicos e práticos, que serão apresentados posteriormente, a tecnologia FCEV atingiu um nível de maturidade que permitiu o lançamento de veículos comerciais por grandes montadoras. O mercado ainda é de nicho, mas crescente, especialmente em países com políticas de incentivo e planos de infraestrutura, como Coreia do Sul, Estados Unidos, China, Japão e alguns países da Europa (IEA, 2023).

### 4.1 Toyota Motor Corporation

A Toyota consolidou-se como pioneira no segmento ao apostar na produção em massa de veículos de passeio. Seu principal produto é o Toyota Mirai, lançado comercialmente em 2014 como o primeiro FCEV de produção em série no mundo. Atualmente está em sua segunda geração, apresentada em 2020, com autonomia oficial de 650 km (ciclo WLTP - *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure*), e um motor elétrico com 137 kW (187 cv) de potência, alimentado por um stack de células PEMFC. O sistema de armazenamento foi otimizado para comportar 5,6 kg de hidrogênio distribuídos em três tanques de fibra de carbono pressurizados a 70 MPa, que podem ser reabastecidos em cinco minutos, uma das principais vantagens em relação aos BEVs (TOYOTA, 2020).

Figura 10 - Toyota Mirai powertrain



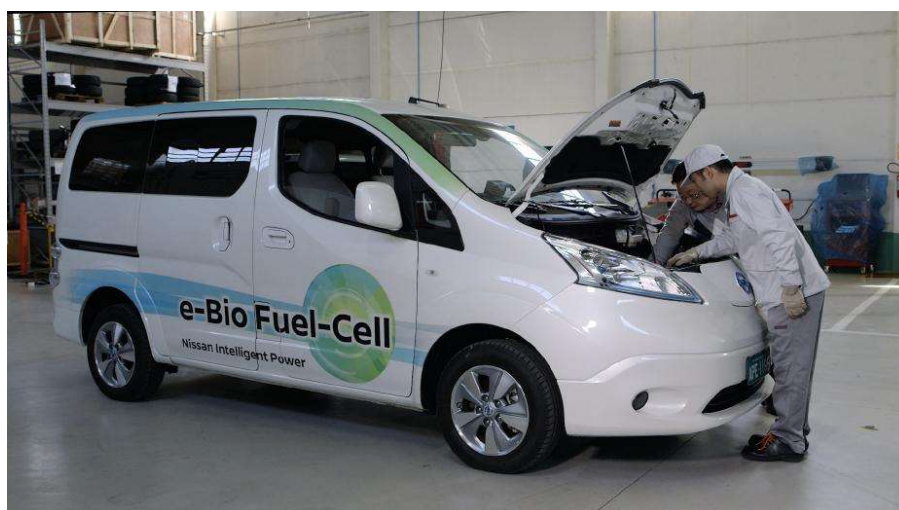
Fonte: Toyota, 2020

Em volume de mercado, o veículo superou a marca de 26.000 unidades vendidas globalmente desde o lançamento até 2023. Ele é vendido no Japão, Estados Unidos, e alguns países da Europa. No Brasil, estão sendo conduzidos testes com o Mirai utilizando hidrogênio produzido a partir da reforma do etanol em uma planta piloto na USP, projeto em parceria com a Shell, Raízen, Hytron e SENAI, buscando configurar uma cadeia de abastecimento nacional baseada em biocombustíveis (SNE,2022; TOYOTA, 2023).

#### 4.2 Nissan Motor Corporation

A estratégia da Nissan para a eletrificação via célula a combustível distingue-se pela busca de soluções que aproveitem a infraestrutura de distribuição de combustíveis líquidos já existente. Em 2016, a montadora escolheu o Brasil para apresentar globalmente seu protótipo de veículo comercial leve equipado com a tecnologia "e-Bio Fuel Cell". Diferentemente de FCEVs como o Mirai, que utilizam hidrogênio comprimido e células PEMFC, o protótipo da Nissan é movido a bioetanol. O sistema utiliza uma célula SOFC que realiza a reforma do etanol a bordo e converte o combustível em hidrogênio. Segundo a montadora, essa configuração oferece uma autonomia superior a 600 km. (FANG et al., 2024; NISSAN, 2021).

Figura 11 - Nissan e-Bio Fuel-Cell



Fonte: NISSAN, 2021

Desde 2021, a Nissan mantém um convênio de pesquisa e desenvolvimento com o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). O objetivo da parceria é nacionalizar componentes do sistema SOFC e validar a viabilidade técnica e

econômica do bioetanol como o vetor para a produção de hidrogênio. Como consequência, a montadora ampliou o escopo da pesquisa em 2024, iniciando testes com um sistema estacionário de geração de energia que utiliza a mesma tecnologia SOFC veicular. Essa etapa visa validar a eficiência e durabilidade dos componentes de reforma e geração elétrica em regime contínuo, consolidando a confiabilidade técnica necessária para a futura aplicação comercial nos veículos da marca (NISSAN, 2024).

### 4.3 Honda Motor Company

A trajetória da Honda no segmento se iniciou com o lançamento do Honda Clarity FC, em 2017. Equipado com motor elétrico de 130 kW (174 cv) e autonomia de 589 km. O sedã inovou ao alocar todo o *stack* de células PEMFC no cofre do motor, liberando espaço no habitáculo. Contudo, o modelo enfrentou muita dificuldade de penetração no mercado, com vendas inexpressíveis devido à precariedade da infraestrutura de abastecimento, concentrada na Califórnia (EUA), e a frequente indisponibilidade e escalada dos preços do hidrogênio em momentos de crise. A descontinuação, em 2021, também foi justificada como uma mudança de foco para o desenvolvimento de uma nova geração de FCEVs em parceria com a *General Motors* (GM) (HONDA, 2019; TANAKA et al.; 2020; AMINUDIN et al.; 2022).

Figura 12 - Honda Clarity FC



Fonte: Honda, 2019

Essa colaboração resultou no lançamento do Honda CR-V e:FCEV, em 2024, que compartilha a mesma plataforma de seu equivalente a combustão híbrido e entrega 130 kW (174cv) de potência. Porém, o novo modelo perde em espaço interno

para abrigar os tanques de hidrogênio e também em peso, sendo quase 270kg mais pesado. Um dos fatores para esse aumento é a adaptação da tecnologia *Plug-in*, que conta com uma bateria maior do que veículos híbridos convencionais, mas permite uma autonomia totalmente elétrica de 47km (FANG et al.; 2024; HONDA, 2025).

**Figura 13 - Honda CR-V e: FCEV**



Fonte: HONDA, 2025

#### **4.4 Hyundai Motor Company**

A Hyundai reafirmou seu compromisso com a mobilidade a hidrogênio ao lançar em 2018 o SUV Nexo. O modelo representa a segunda geração de FCEVs da marca, sucedendo o Tucson Fuel Cell e incorporando avanços em eficiência. O Nexo é equipado com um motor elétrico de 120 kW (163 cv) e oferece autonomia de até 666 km (ciclo WLTP), suportada por um sistema de armazenamento composto por três tanques que comportam 6,3 kg de hidrogênio a 70MPa e de reabastecimento rápido (AMINUDIN et al.; 2022, BETHOUX, 2020).

Segundo dados da consultoria SNE Research (2022), o Nexo registrou mais de 16.000 unidades vendidas entre 2020 e 2021, superando seus concorrentes diretos e sendo o FCEV mais vendido do mundo no período. Isso devido aos fortes incentivos governamentais na Coreia do Sul, o principal mercado, que reduzem em até 50% o preço final do veículo para o consumidor, equiparando-o ao modelo a combustão interna semelhante, o Hyundai Tucson. Em uma análise comparativa, apesar de o motor elétrico ser menos potente que o 1.6 turbo que entrega 132kw (177cv) o Nexo é superior em dirigibilidade urbana ao entregar um torque instantâneo de 395Nm

contra 265Nm de modo silencioso. Contudo, o *stack* de células PEMFC torna o veículo 200kg mais pesado (HYUNDAI, 2021; BETHOUX, 2020).

No cenário nacional, desde o começo de 2025 há uma unidade do Nexo operando em testes no campus da USP, em um projeto que busca avaliar a tecnologia de produção do hidrogênio a partir do etanol, semelhante ao que ocorre com o Mirai.

**Figura 14 - Unidade do Hyundai Nexo em testes na USP**



Fonte: Hyundai, 2025

#### 4.5 BMW Group

A BMW explora a ideia de células de combustível como complemento aos BEVs. O atual produto dessa tecnologia é o BMW iX5 Hydrogen, um SUV baseado na plataforma do modelo X5 convencional e que iniciou sua fase de testes em frota piloto em 2023. Resultado de uma colaboração com a Toyota, que fornece as células PEMFC individuais, enquanto a BMW monta o *stack* e o restante do *Powertrain* (BMW, 2025).

O veículo combina o *stack* de células de 125 kW (167cv) com uma bateria de alta potência. Essa arquitetura híbrida entrega uma potência combinada de 295 kW (401cv), permitindo um desempenho superior aos outros FCEVs. O armazenamento é feito em dois tanques de fibra de carbono que comportam 6 kg de hidrogênio a 70 MPa, conferindo uma autonomia de 504 km no ciclo WLTP. Em relação ao seu equivalente a combustão, o veículo atingiu níveis de performance competitivos graças a bateria de alta potência que atua em conjunto com a célula, mas é penalizado em peso, com cerca de 300 kg a mais. A montadora está se preparando para iniciar a produção em série do modelo em 2028 (BMW, 2025).

**Figura 15 - BMW iX5 Hydrogen**

Fonte: BMW, 2025

A seguir é apresentada uma tabela comparativa com os veículos FCEVs mencionados e seus modelos equivalentes da mesma montadora. No caso da Toyota, o modelo Camry é o mais adequado para comparação por ser um sedan grande, assim como o Mirai. Nota-se que nenhum dos correspondentes comparados é unicamente à combustão interna, pois já contam com tecnologia híbrida, seja leve (MHEV), no qual o motor elétrico apenas auxiliar o motor térmico, ou plena (HEV), no qual o motor elétrico é capaz de movimentar sozinho o veículo.

Tabela 2 - Comparação entre modelos FCEV e seus equivalentes da mesma montadora

	<b>TOYOTA MIRAI FCEV</b>	<b>TOYOTA CAMRY HÍBRIDO</b>	<b>HYUNDAI NEXO FCEV</b>	<b>HYUNDAI TUCSON HÍBRIDO</b>	<b>HONDA CR-V E:FCEV</b>	<b>HONDA CR-V E:HEV</b>	<b>BMW IX5 HYDROGEN</b>	<b>BMW X5</b>
<b>TECNOLOGIA</b>	PEMFC	HEV	PEMFC	HEV	PEMFC + Plug-in	HEV	PEMFC + Bateria	MHEV
<b>POTÊNCIA MÁXIMA</b>	136 kW (182 cv)	155 kW (208 cv)	120 kW (163 cv)	167 kW (226 cv)	130 kW (174 cv)	152 kW (204 cv)	295 kW (401 cv)	280 kW (381 cv)
<b>PESO (APROX.)</b>	1.930 kg	1.610 kg	1.870 kg	1.690 kg	2.023 kg	1.750 kg	2.460 kg	2.165 kg
<b>AUTONOMIA (APROX.)</b>	650 km	960 km	666 km	850 km	435 km	900 km	504 km	940 km
<b>PREÇO SUGERIDO (APROX.) *</b>	U\$ 52.000	U\$ 30.000	U\$ 62.000	U\$ 32.500	U\$ 50.000	U\$ 35.600	**	U\$ 68.300

Fonte: Elaborado pelo autor com base nas especificações das montadoras TOYOTA; HYUNDAI; HONDA e BMW.

\* Todos os valores são referentes a versões de entrada.

\*\* Protótipo indisponível para comercialização.

## 4.6 Transporte comercial e de cargas

O setor de transporte é uma das maiores fontes de emissão de gases de efeito estufa, com os caminhões e veículos pesados respondendo por aproximadamente 29,4% das emissões do transporte rodoviário (HALDER et al., 2024). Dessa maneira, a tecnologia de FCEVs é uma alternativa promissora para a descarbonização desse setor, devido às suas características de menor peso para longas distâncias, maior autonomia e tempo de reabastecimento rápido em comparação com outras tecnologias de emissão zero (CULLEN et al., 2021; PARDHI et al., 2022; BETHOUX, 2020).

Em uma comparação direta com os BEVs, que enfrentam desafios com o peso e volume das baterias necessárias para longas distâncias, os sistemas de célula de combustível são significativamente mais leves para fornecer uma autonomia equivalente, o que resulta em maior capacidade de carga útil (CULLEN et al., 2021; PARDHI et al., 2022; HALDER et al., 2024). Outro fator crítico para a eficiência logística é o tempo de reabastecimento, que pode ser de 5 a 10 minutos para veículos pesados, uma vantagem notável sobre os BEVs, que podem demandar horas para recarga completa (PARDHI et al., 2022; HALDER et al., 2023).

### 4.6.1 Daimler Truck

A tecnologia já ultrapassou a fase de pesquisa de laboratório e está em testes práticos com frotas comerciais. A Daimler Truck, responsável pelos caminhões e ônibus da marca Mercedes-Benz, concluiu o primeiro ano de testes com sua frota de caminhões GenH2 movidos a célula de combustível. O diferencial dessa aplicação é o uso de hidrogênio líquido, armazenado a 253°C negativos, que possui uma densidade energética volumétrica superior à do gás comprimido e possibilita o uso de tanques menores e mais leves de aço inox. Operando com clientes como a Amazon, Holcim e Air Products, os veículos completaram mais de 225.000 km, confirmando uma autonomia superior a 1.000 km e tempos de reabastecimento de 10 a 15 minutos (DAIMLER, 2023).

**Figura 16 - Mercedes-Benz GenH2 Truck**

Fonte: DAIMLER, 2023

Paralelamente, o ônibus Mercedes-Benz eCitaro fuel cell foi desenvolvido para a aplicação da tecnologia em transporte público. Este modelo utiliza uma propulsão híbrida que combina baterias de alta performance com uma célula de combustível compacta da Toyota. Diferentemente do caminhão, a célula atua como um extensor de autonomia, recarregando as baterias durante a viagem e possibilitando uma autonomia ininterrupta de mais de 500 km, com potencial para alcançar 600 km (MERCEDES-BENZ, 2023).

**Figura 17 - Mercedes-Benz eCitaro fuel cell**

Fonte: MERCEDES-BENZ, 2023

#### 4.6.2 Hyundai Motor Company

A Hyundai também desenvolve a tecnologia no setor pesado, lançando em 2020 o XCIENT Fuel Cell, o primeiro caminhão FCEV produzido em série no mundo. Ele conta com dois stacks de célula PEMFC somando 180 kW (258 cv) de potência, auxiliado por uma bateria de 72kWh para fornecer o pique de torque na arrancada. Além disso, a capacidade de hidrogênio é de 32 kg no total, armazenado em 7 tanques de 35 MPa, que garantem uma autonomia de 400 km por abastecimento, realizado em até 20 minutos. O veículo já roda em frotas comerciais na Suíça, Alemanha, Coreia do Sul e EUA, com expansão prevista para a China nos próximos anos (HYUNDAI, 2025; HALDER et al., 2024).

Figura 18 - Hyundai XCIENT Fuel Cell



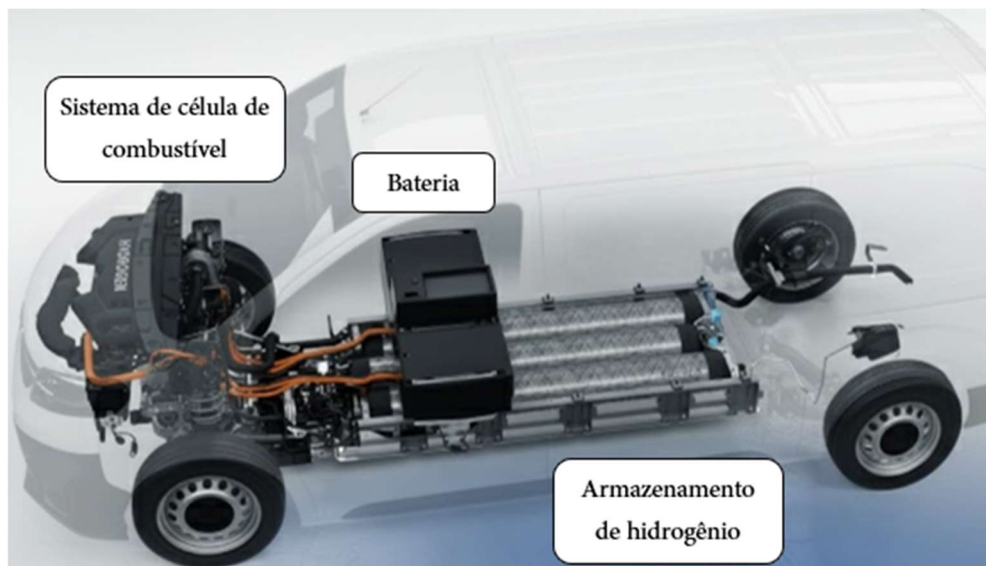
Fonte: Hyundai, 2020

#### 4.6.3 Stellantis

O grupo Stellantis adotou uma abordagem focada no segmento de veículos comerciais leves para a logística urbana e desenvolveu uma arquitetura modular denominada *Mid-Power Plug-in Hydrogen Fuel Cell*, adaptada para as plataformas de veículos comerciais já existentes como o Citroën Jumpy e a Fiat Ducato. O sistema aloca o *stack* de células de combustível de 45 kW sob o capô, enquanto três tanques de hidrogênio a 70MPa são posicionados no assoalho, sem invadir o espaço de carga. Esses veículos possuem uma bateria de 10,5 kWh com funcionalidade *Plug-in*, que pode ser recarregada na rede elétrica. Essa configuração garante uma autonomia de

400 km no ciclo WLTP e permite que a célula de combustível carregue a bateria durante a operação, mantendo a eficiência constante (STELLANTIS, 2025).

**Figura 19 - Sistema *Mid-Power Plug-in Hydrogen Fuel Cell* utilizado pela Stellantis**



Fonte: STELLANTIS, 2025 (Adaptado)

Comercialmente, os veículos foram lançados inicialmente nos mercados com infraestrutura mais madura na Europa como França e Alemanha. Entretanto, em 2025, a expansão da tecnologia foi desacelerada para focar na demanda imediata de BEVs (ELECTRIVE, 2025).

#### **4.6.4 Renault Group - HYVIA**

A Renault também abordou a tecnologia de FCEVs com foco nos veículos comerciais leves, por meio de um empreendimento conjunto com a *Plug Power*, denominado HYVIA. O principal produto dessa parceria é a van Renault Master Van H2-TECH, voltada para o transporte de cargas e passageiros. O veículo utiliza uma célula de combustível de 30 kW integrada a uma bateria *plug-in* de 20 kWh e tanques de 7,5 ou 9 kg de hidrogênio a 70 MPa, oferecendo autonomies de até 700 km (ciclo WLTP) nos modelos lançados em 2025 (RENAULT, 2025).

**Figura 20 - Renault Master Van H2-TECH**



Fonte: RENAULT, 2025

## 5 DESAFIOS TÉCNICOS E DE INFRAESTRUTURA

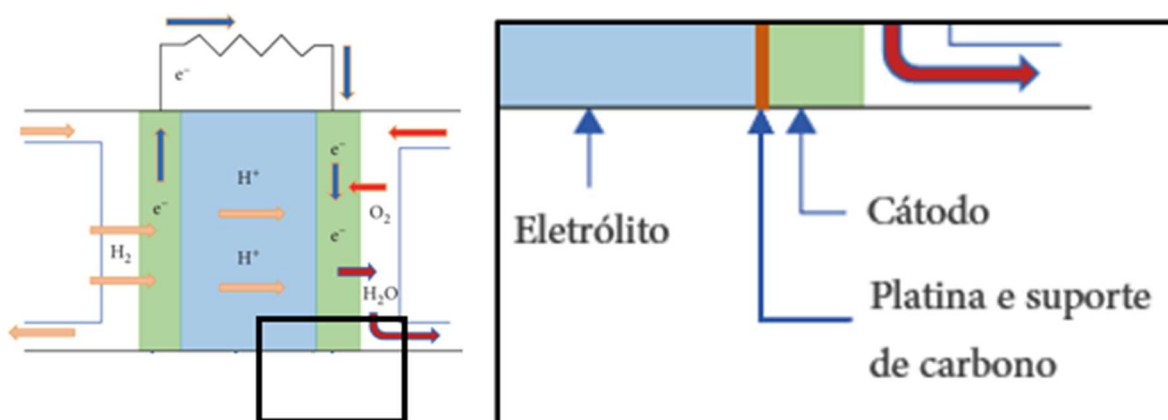
Apesar dos avanços, a consolidação dos FCEVs no mercado depende da superação dos desafios tecnológicos remanescentes e de barreiras de infraestrutura, de modo que possam se tornar viáveis ante os veículos de combustão interna e também os elétricos a bateria.

### 5.1 Catalisadores

No tocante aos catalisadores, a platina (Pt) é o elemento mais utilizado nas células de combustível PEMFC, especialmente no cátodo, onde a reação de redução de oxigênio é cineticamente lenta. Embora os ICEs já empreguem metais do grupo da platina em conversores catalíticos para controle de emissões, entre 3g e 7g, FCEVs de primeira geração chegavam a usar mais de 30g, o que tornava a produção em massa inviável devido ao custo e escassez do elemento (POLLET et al., 2019; AMINUDIN et al, 2022).

A pesquisa atual se concentra em reduzir a quantidade de platina necessária sem comprometer a eficiência do sistema. Uma das abordagens mais promissoras é o uso de nanopartículas de platina e ligas metálicas, como Pt-Co ou Pt-Ni, que permitem aumentar a área de superfície eletroquimicamente ativa e reduzir a quantidade de platina necessária para a mesma potência. Além disso, os ciclos dinâmicos de partida e parada (*start/stop*) comum dos veículos afetam a durabilidade das células de combustível. A variação de tensão que ocorre nesses momentos acelera a oxidação do suporte de carbono utilizado para apoiar a platina fisicamente no cátodo, de modo que essa se desprende e reduz a área eletroquimicamente ativa (POLLET et al., 2019; BETHOUX, 2020; CULLEN et al., 2021).

Figura 21 - Platina e suporte de carbono na célula PEMFC



Fonte: Elaborado pelo autor com adaptação de QASEM; ABDULRAHMAN, 2024

### 5.3 Armazenamento e segurança

O armazenamento seguro e eficiente do hidrogênio a bordo é um fator essencial para o avanço dos FCEVs. A baixa densidade energética volumétrica do hidrogênio em condições ambiente exige que ele seja armazenado sob alta pressão ou a temperaturas criogênicas, o que impõe desafios de engenharia e segurança. (AMINUDIN et al.; 2022).

A tecnologia dominante atualmente é a do armazenamento do hidrogênio comprimido, no qual são utilizados tanques cilíndricos tipo IV, feitos de uma camada interna de polímero envolta por compósitos de fibra de carbono, que suportam a pressão de 70MPa. O principal desafio é o grande volume ocupado pelos tanques, o que impacta o design e o espaço interno do veículo. A exemplo do Mirai, que apesar de ser um sedan médio, tem seu espaço interno afetado pelo cilindro que percorre abaixo do console central (HALDER et al., 2023; BETHOUX, 2020).

**Figura 22 - Vista interna de um Mirai, exibindo os tanques de hidrogênio**



Fonte: TOYOTA, 2021

O armazenamento em estado líquido a temperaturas criogênicas oferece maior densidade energética volumétrica e permite maior autonomia com menor volume de tanque. O que o torna atrativo para o transporte pesado de longa distância, como é o caso do caminhão GenH2 desenvolvido pela Daimler. No entanto, o processo de liquefação consome uma quantidade significativa de energia, cerca de 30% da energia do hidrogênio. Além disso, há as perdas por *boil-off*, quando o calor ambiente provoca a evaporação gradual do hidrogênio se o veículo não for utilizado por longos períodos (HALDER et al., 2023; FANG et al., 2024).

#### **5.4 Produção de hidrogênio**

Embora os FCEVs sejam veículos de emissão zero no tubo de escape, a sustentabilidade da tecnologia depende da rota de produção do hidrogênio. Atualmente, segundo a Agência Internacional de Energia (2023), mais de 95% do hidrogênio consumido mundialmente é classificado como cinza, ou seja, foi produzido a partir de fontes não renováveis como hidrocarbonetos.

Nos principais mercados onde os veículos a célula de combustível já circulam, como Estados Unidos e Europa, o hidrogênio é obtido através da reforma a vapor do gás natural. Nesse processo, o metano do gás reage com o vapor de água a alta temperatura e pressão e é convertido em  $H_2$  e CO (4). O monóxido de carbono resultante é convertido em mais hidrogênio através da reação de deslocamento gás-

água (*Water-Gas Shift*) (5). Contudo, como subproduto o processo gera CO<sub>2</sub> de origem fóssil, que é liberado na atmosfera sem compensação de absorção (BOLDRIN; BRANDON, 2019; IEA, 2023).



A alternativa considerada limpa é o hidrogênio verde, produzido via eletrólise da água utilizando eletricidade de fontes renováveis como eólica ou solar. Embora tecnicamente viável, esta rota é pouco explorada devido à necessidade de grande potência elétrica, o que, conseqüentemente, aumenta o custo do H<sub>2</sub> verde em relação ao H<sub>2</sub> cinza (IEA, 2023).



### 5.5 Infraestrutura de abastecimento de hidrogênio

A escassez de estações de reabastecimento de hidrogênio representa o principal gargalo logístico para ampla adoção dos veículos movidos a célula de combustível, que dependem da construção de uma cadeia de abastecimento inteiramente nova. Atualmente, essa infraestrutura não se desenvolve de forma homogênea, mas principalmente através de polos regionais incentivados por políticas públicas. A Ásia lidera a expansão global, com redes mais consolidadas no Japão e na Coreia do Sul. Na Europa, destaca-se a Alemanha. Já na América do Norte, a infraestrutura restringe-se quase exclusivamente ao estado da Califórnia (IEA, 2023).

A complexidade está nas exigências termodinâmicas do abastecimento. Para garantir o tempo de recarga rápido assim como veículos a combustão, o hidrogênio deve ser injetado nos tanques a pressões de 70MPa. Esse processo gera um aquecimento excessivo do gás devido à compressão rápida, exigindo que as estações possuam sistemas de pré-resfriamento capazes de reduzir a temperatura do hidrogênio para -40 °C antes que ele entre no veículo, conforme estipulado pelo protocolo de abastecimento SAE J2601. Dessa maneira, a baixa demanda de veículos não justifica o alto investimento em postos de abastecimento, e a falta de postos inibe a adoção em massa dos veículos (BETHOUX, 2020; CULLEN et al., 2021; HALDER et al., 2023).

**Figura 23 - Posto de abastecimento de hidrogênio na Alemanha**

Fonte: H2 MOBILITY, 2025

## 5.6 Legislação e homologação

Diferentemente dos veículos convencionais, os FCEVs introduzem riscos específicos associados ao armazenamento de gás a alta pressão e à inflamabilidade do hidrogênio. Para isso, foi criado o Regulamento Técnico Global nº 13 (GTR No. 13) da UNECE e o Regulamento da ONU nº 134. Estes documentos servem como guia para a segurança de veículos a hidrogênio e definem protocolos para o sistema de armazenamento de hidrogênio comprimido. Os tanques do Tipo IV devem ser submetidos a testes de ruptura hidráulica, resistência ao fogo e ciclos de pressão para garantir que não haja vazamento ou explosão mesmo em cenários de colisão (UNECE, 2023).

**Figura 24 - Tanque de H<sub>2</sub> em teste de incêndio**

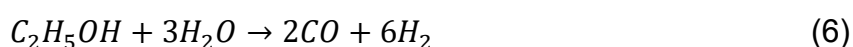
Fonte: UNECE, 2023

Simultaneamente, a durabilidade e bom funcionamento do *powertrain* é assegurada pela normatização da qualidade do combustível. A norma ISO 14687 estipula que o hidrogênio destinado a aplicações automotivas deve atender ao Grau D, com pureza mínima de 99,97%. O controle de contaminantes é fundamental para evitar o envenenamento irreversível dos catalisadores de platina, diferenciando o combustível veicular do hidrogênio industrial de menor custo (ISO, 2025).

Além disso, a viabilidade da infraestrutura e a redução do custo dos veículos dependem diretamente de políticas públicas e de subsídios. Nos Estados Unidos destaca-se o *Inflation Reduction Act* (IRA), que subsidia a produção de hidrogênio limpo para tornar o combustível competitivo frente ao diesel (EUA, 2022). Na União Europeia, o regulamento *Alternative Fuels Infrastructure Regulation* (AFIR), impõe a obrigatoriedade de instalação de postos de abastecimento a cada 200 km nas principais rotas da rede transeuropeia até 2030 (UNIÃO EUROPEIA, 2023). Já na Coreia do Sul, o país estabeleceu a estratégia denominada Neutralidade de Carbono 2050, que inclui subsídios diretos para a compra de veículos a hidrogênio, como o Hyundai Nexon, e financiamento estatal para a construção de estações de reabastecimento (COREIA DO SUL, 2020).

## 6 PERSPECTIVAS E O CENÁRIO BRASILEIRO

No Brasil, em um cenário ainda pré-comercial de veículos FCEV, a legislação foi modernizada para impulsionar a tecnologia de produção de hidrogênio e valorizar a produção de biocombustíveis. A Lei nº 14.948/2024 (Marco Legal do Hidrogênio), que classifica o combustível pela intensidade de emissões de carbono, independentemente da rota de produção, valida legalmente o hidrogênio obtido via reforma a vapor do etanol (6)(7) como uma fonte limpa (BRASIL, 2024). O processo é semelhante ao que ocorre na reforma do metano.



### 6.1 Rede de distribuição de etanol

Dessa maneira, o Brasil possui boa perspectiva em um cenário de transição energética devido à maturidade de sua indústria de biocombustíveis. O etanol, produzido majoritariamente a partir da cana-de-açúcar e utilizado como um combustível final, pode atuar como um vetor eficiente de hidrogênio renovável, legitimado pelo Marco Legal do Hidrogênio. Isso é possível porque sua origem fornece um equilíbrio de emissão de carbono, no qual o CO<sub>2</sub> emitido durante o uso energético é absorvido pela biomassa durante a fotossíntese (BRASIL, 2024; EPE, 2021).

O principal ponto positivo do uso de etanol é que esse permanece em estado líquido nas condições normais de temperatura e pressão. O que elimina a necessidade de compressores de alta pressão ou resfriamento criogênico, como é o caso para o hidrogênio puro. Além disso, o país conta com uma infraestrutura de abastecimento capilarizada, com mais de 40.000 postos distribuídos pelo território. Essa disponibilidade de infraestrutura viabiliza rotas tecnológicas de transição que não exigem a construção de novos postos específicos de abastecimento de H<sub>2</sub>, servindo de incentivo para projetos piloto que exploram a geração de hidrogênio por meio da reforma do etanol, tanto estacionária quanto a bordo de veículos (EPE, 2021; ANP, 2024).

## 6.2 Produção de hidrogênio a partir do etanol

Atualmente, existem dois projetos sendo desenvolvidos no país que exploram a produção de hidrogênio a partir de etanol. O primeiro é uma estação de abastecimento de H<sub>2</sub> localizada no campus da Universidade de São Paulo (USP). A iniciativa, resultado de um consórcio liderado pela Shell Brasil com a participação de empresas como a Raízen e a Toyota, visa validar a tecnologia de reforma do etanol para obter hidrogênio renovável. A planta-piloto, inaugurada no segundo semestre de 2023, tem capacidade de produzir cerca de 4,5 kg de hidrogênio por hora e é utilizada para abastecer três ônibus Marcopolo e dois veículos leves, os já mencionados Toyota Mirai e Hyundai Nexu, que circulam exclusivamente no campus (TOYOTA, 2023; SHELL, 2025).

**Figura 25 - Estação de abastecimento de hidrogênio localizada na USP**



Fonte: CONFEA, 2025

Paralelamente, o segundo projeto é o desenvolvido pela Nissan em parceria com o IPEN, utilizando células de combustível de óxido sólido. Neste caso, o etanol alimenta diretamente um reformador integrado ao sistema SOFC, que opera em alta temperatura para converter o etanol em CO<sub>2</sub>, hidrogênio e, conseqüentemente, eletricidade. O uso dessa tecnologia destoa das células PEMFC normalmente utilizadas para projetos automotivos e reforça o potencial do etanol para a mobilidade a hidrogênio no contexto brasileiro (NISSAN, 2021; FANG et al., 2024).

**Figura 26 - Centro de Células a Combustível e Hidrogênio do IPEN**



Fonte: IPEN, 2025

A importância desses projetos reside em contornar o principal gargalo para a adoção de FCEVs em muitos países que é a infraestrutura de abastecimento. Ao utilizar a logística já estabelecida da indústria do álcool, o Brasil pode ter uma rota mais eficiente e econômica para a transição.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho analisou o estado da arte das células de combustível para aplicação automotiva, investigando seus fundamentos, tecnologias, os principais desafios e perspectivas. Foi constatado que a tecnologia PEMFC atingiu maturidade técnica e se posiciona como uma solução viável e complementar aos veículos elétricos a bateria para a descarbonização do setor de transporte. Contudo, sua adoção em larga escala ainda enfrenta barreiras econômicas e de infraestrutura.

Ficou evidenciado que os FCEVs reúnem as vantagens das tecnologias concorrentes, como a eficiência e a ausência de emissões locais, assim como os motores elétricos dos BEVs. A autonomia estendida e o tempo de reabastecimento rápido característicos dos veículos convencionais ICEVs também é vantajosa. Modelos comerciais analisados, como o Toyota Mirai e o Hyundai Nexo, demonstram que a engenharia veicular já superou os principais obstáculos de desempenho e segurança. Contudo, o custo elevado, impulsionado principalmente pelo uso de metais nobres como a platina nos catalisadores, a complexidade dos sistemas de armazenamento de hidrogênio a alta pressão e a ausência de postos de abastecimento disseminados continuam sendo fatores limitantes para a ampla adoção.

Ademais, a revisão bibliográfica apontou uma convergência de disseminação inicial mais viável para os FCEVs no transporte pesado e em frotas internas. Caminhões de longa distância, ônibus e veículos de entrega que retornam a uma base central e passam por menos ciclos de *start/stop* são os candidatos mais promissores, uma vez que o funcionamento constante preserva a durabilidade do *stack* e a infraestrutura de abastecimento pode ser construída de forma centralizada nas garagens das frotas, contornando o gargalo de abastecimento.

Por fim, a pesquisa evidenciou a posição favorável do Brasil no tocante à infraestrutura e origem do combustível. Enquanto os principais mercados também buscam soluções para descarbonizar a produção de hidrogênio, o uso do etanol como vetor energético oferece uma alternativa de H<sub>2</sub> renovável. Aliada à recente sanção do Marco Legal do Hidrogênio, a capacidade de utilizar a rede de distribuição de etanol viabiliza tanto a reforma estacionária quanto a embarcada, o que permite ao país contornar o gargalo da distribuição de H<sub>2</sub> puro e criar um cenário promissor para o desenvolvimento e disseminação de FCEVs em território nacional.

## REFERÊNCIAS

ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: 2024**. Rio de Janeiro: ANP, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-brasileiro-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-2024#Se%C3%A7%C3%A3o%203>. Acesso em: 04 jan. 2026

AMINUDIN, M. A. et al. **An overview: Current progress on hydrogen fuel cell vehicles**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 48, n. 11, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.156>. Acesso em: 21 abr. 2025.

BETHOUX, Olivier. **Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles: State of the Art and Perspectives**. Energies, v. 13, n. 21, p. 5843, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13215843>. Acesso em: 21 abr. 2025.

BMW. **BMW iX5 Hydrogen (G05): Mobilidade baseada em hidrogênio**. Disponível em: <https://www.bmw.com.br/pt/topics/fascination-bmw/bmw-concept-vehicle/bmw-ix5-hydrogen-overview.html>. Acesso em: 10 jul. 2025.

BMW. **BMW USA. X5**. Disponível em: <https://www.bmwusa.com/vehicles/x-series/x5/bmw-x5.html>. Acesso em: 16 jan. 2026.

BOLDRIN, Paul; BRANDON, Nigel P. **Progress and outlook for solid oxide fuel cells for transportation applications**. Nature Catalysis, v. 2, p. 571-577, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0310-y>. Acesso em: 1 out. 2025.

BRANCO, Carolina M. **Eletrólito polimérico à base de resina hidrocarbônica para uso com membrana celulósica em célula a combustível tipo PEM alimentada com hidrogênio**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/139367>. Acesso em: 22 abr. 2025

BRASIL. **Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024.** Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 ago. 2024. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2023-2026/2024/lei/l14948.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14948.htm). Acesso em: 5 dez. 2025.

CONFEA. **USP inicia testes de planta para produzir hidrogênio a partir do etanol.** Brasília, 10 de março de 2025. Disponível em: <https://www.confex.org.br/usp-inicia-testes-de-planta-para-produzir-hidrogenio-partir-do-etanol>. Acesso em: 5 jan. 2026

COREIA DO SUL. **2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea: Towards a sustainable and green society.** Seul: Ministry of Environment, 2020. Disponível em: [https://climate-laws.org/documents/2050-carbon-neutral-strategy-of-the-republic-of-korea\\_7369?q=Paris+Agreement&sf=date&so=desc&c=UNFCCC&r=&l=south-korea](https://climate-laws.org/documents/2050-carbon-neutral-strategy-of-the-republic-of-korea_7369?q=Paris+Agreement&sf=date&so=desc&c=UNFCCC&r=&l=south-korea). Acesso em: 5 dez. 2025.

CULLEN, D.A. et al. **New roads and challenges for fuel cells in heavy-duty transportation.** Nature Energy, v. 6, p. 462-473, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00775-z>. Acesso em: 1 out. 2025

DAIMLER TRUCK. **#HydrogenRecordRun: Mercedes-Benz GenH2 Truck cracks 1,000 kilometer mark with one fill of liquid hydrogen.** Disponível em: [https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/daimler-truck-hydrogenrecordrun-mercedes-benz-genh2-truck-cracks-1000-kilometer-mark-with\\_one-fill-of-liquid-hydrogen-52369346](https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/daimler-truck-hydrogenrecordrun-mercedes-benz-genh2-truck-cracks-1000-kilometer-mark-with_one-fill-of-liquid-hydrogen-52369346). Acesso em: 4 out. 2025

ELECTRIVE. **Stellantis halts hydrogen vehicle plans in Europe amid market stagnation.** Disponível em: <https://www.electrive.com/2025/07/16/stellantis-halts-hydrogen-vehicle-plans-in-europe-amid-market-stagnation/>. Acesso em: 23 dez. 2025.

EPE. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio.** Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes->

dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio\_23Fev2021NT%20%282%29.pdf. Acesso em: 04 jan. 2026

EUA. **H.R.5376 - Inflation Reduction Act of 2022**. Public Law 117-169. Washington, DC: U.S. Congress, 2022. Disponível em: <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376/text>. Acesso em: 7 dez. 2025.

FANG, T. et al. **Review of Fuel-Cell Electric Vehicles**. Energies, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17092160>. Acesso em: 2 out. 2025.

H2 MOBILITY. **H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG**. Disponível em: <https://h2.live/en/>. Acesso em: 2 jan. 2026.

HALDER, P. et al. **Advancements in hydrogen production, storage, distribution and refuelling for a sustainable transport sector: Hydrogen fuel cell vehicles**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 52, p. 973-1004, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.204>. Acesso em: 2 out. 2025

HALDER, P. et al. **Performance, emissions and economic analyses of hydrogen fuel cell vehicles**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 199, p. 114543, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114543>. Acesso em: 15 set. 2025

HONDA. **2026 Honda CR-V**. Disponível em: <https://automobiles.honda.com/tools/build-and-price-trimwalk?modelseries=cr-v&modelyear=2026&tw=hybrid>. Acesso em: 16 jan. 2026.

HONDA. **2025 Honda CR-V Fuel Cell**. Disponível em: <https://automobiles.honda.com/cr-v-fcev#>. Acesso em: 14 set. 2025.

HONDA. **Honda Clarity Fuel Cell: carros a hidrogénio | Honda Portugal**. Disponível em: <https://honda-automoveis.pt/blog/honda-clarity-fuel-cell-o-futuro-ja-presente/>. Acesso em: 14 set. 2025.

HONDA. **Honda Reveals Specification for its Next-generation Fuel Cell Module | Honda Global Corporate Website**. Disponível em: <https://global.honda/en/newsroom/news/2025/c250219eng.html>. Acesso em: 14 set. 2025.

HYUNDAI. **2024 Hyundai NEXO Model Research**. Hyundai of Lincolnwood. Disponível em: <https://www.hyundaiolincolnwood.com/new-hyundai-nexo-model-review/>. Acesso em: 16 jan. 2026.

HYUNDAI. **Hidrogênio renovável será testado no SUV Hyundai NEXO no Brasil em projeto pioneiro no mundo**. Disponível em: <https://www.hyundai.com.br/imprensa/hidrogenio-renovavel-sera-testado-no-suv-hyundai-nexo-no-brasil-em-proje-to-pioneiro-no-mundo.html>. Acesso em: 4 out. 2025.

HYUNDAI. **NEXO Features**, 2025. Disponível em: <https://www.hyundai.com/eu/models/nexo/features.html>. Acesso em: 4 out. 2025.

HYUNDAI. **Hyundai TUCSON Hybrid**. All-purpose Hybrid SUV. Disponível em: <https://www.hyundaiusa.com/us/en/vehicles/tucson-hybrid>. Acesso em: 16 jan. 2026.

HYUNDAI. **XCIENT Fuel Cell Truck | Hydrogen Truck | Hyundai Motor Company**. Disponível em: <https://ecv.hyundai.com/global/en/products/xcient-fuel-cell-truck-fcev>. Acesso em: 4 out. 2025.

IEA. **Global Hydrogen Review 2023**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>. Acesso em: 29 set. 2025.

IPEN. **Centro de Células a Combustível e Hidrogênio**. Disponível em: <https://www.gov.br/ipen/pt-br/centros-de-pesquisa/centro-de-celulas-a-combustivel-e-hidrogenio>. Acesso em: 5 jan. 2026.

ISO 14687:2025. **Hydrogen fuel quality – Product specification**. International Organization for Standardization, 2025. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/69539.html>. Acesso em: 3 jan. 2026.

JUNIOR, Silvio Gentil Jacinto et al. **Células a combustível: possibilidades e limitações**. Research, Society and Development, v. 11, n. 5, e40111528522, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28522>. Acesso em: 22 jul. 2024.

MERCEDES-BENZ. **eCitaro fuel cell**. Disponível em: <https://showroom.mercedes-benz-bus.com/int/en/models/ecitaro-fuel-cell.html>. Acesso em: 4 out. 2025

MERCEDES-BENZ. **NECAR 1: The first fuel cell vehicle from Mercedes-Benz**. PUBLIC ARCHIVE. [S.I.]: Mercedes-Benz Group. Disponível em: <https://mercedes-benz-publicarchive.com/>. Acesso em: 21 dez. 2025.

MIRANDA, L. H. T. G. et al. **Células a combustível como alternativa para redução de CO2 equivalente na frota de veículos leves**. InterfacEHS, ISSN 1980-0894 Seção, Vol. 8, n. 2. 2013. Disponível em: [https://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/wp-content/uploads/2013/09/87\\_Secao-InterfacEHS.pdf](https://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/wp-content/uploads/2013/09/87_Secao-InterfacEHS.pdf). Acesso em: 22 jul. 2024.

NASA. **NASA's Moon Shot Launched Commercial Fuel Cell Industry | NASA Spinoff**. Disponível em: [https://spinoff.nasa.gov/NASA%E2%80%99s\\_Moon\\_Shot\\_Launched\\_Commercial\\_Fuel\\_Cell\\_Industry](https://spinoff.nasa.gov/NASA%E2%80%99s_Moon_Shot_Launched_Commercial_Fuel_Cell_Industry). Acesso em: 18 dez. 2025.

NISSAN. **Nissan e IPEN fecham acordo para desenvolver pesquisa com bioetanol para célula de combustível**. Nissan Newsroom Brasil, 25 fev. 2021. Disponível em: <https://brazil.nissannews.com/pt-BR/releases/nissan-e-instituto-de-pesquisas-energeticas-e-nucleares-ipen-assinam-novo-acordo-para-seguir-no-desenvolvimento-do-uso-de-bioetanol-para-veiculos-movidos-a-celula-de-combustivel>. Acesso em: 28 jun. 2025.

NISSAN. **Nissan inicia testes com sistema estacionário de geração de energia movido a bioetanol**. [S.I.]: Nissan News Brazil, 2024. Disponível em: <https://brazil.nissannews.com/pt-BR/releases/nissan-inicia-testes-com-sistema-estacionario-de-geracao-de-energia-movido-a-bioetanol>. Acesso em: 28 dez. 2025.

OLIVEIRA, R. C. DE. **TD 2787 - Panorama do hidrogênio no Brasil**. Texto para Discussão, p. 1–59, 4 ago. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.38116/td2787>. Acesso em: 29 set. 2025.

PARDHI, S. et al. **A Review of Fuel Cell Powertrains for Long-Haul Heavy-Duty Vehicles: Technology, Hydrogen, Energy and Thermal Management Solutions**. Energies 2022, 15, 9557. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15249557>. Acesso em: 01 out. 2025.

POLLET et al. **Current status of automotive fuel cells for sustainable transport**. Current Opinion in Electrochemistry, v. 16, p. 90–95, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2019.04.021>. Acesso em: 01 out. 2025.

QASEM, N.; ABDULRAHMAN, G. **A recent comprehensive review of fuel cells: History, types, and applications**. International Journal of Energy Research, v. 2024, n. 1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2024/7271748>. Acesso em: 02 out. 2025.

RENAULT. **MASTER H2-TECH PROTOTYPE**. Disponível em: <https://www.renault.com.br/veiculo-conceito/master-h2-tech-prototype.html>. Acesso em: 26 dez. 2025.

SAE INTERNATIONAL. **SAE J2601: Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles**, SAE Standard J2601\_202005, Revised May 2020, Issued March 2010. Disponível em: [https://doi.org/10.4271/J2601\\_202005](https://doi.org/10.4271/J2601_202005). Acesso em: 16 jan. 2026.

SHELL. **USP realiza testes da primeira planta de hidrogênio renovável a partir do etanol**. Disponível em: <https://www.shell.com.br/imprensa/press-releases-2025/USP-realiza-testes-da-primeira-planta-de-hidrogenio-renovavel-a-partir-do-etanol.html>. Acesso em: 20 set. 2025.

SILVA, Pâmela de Melo. **A história, desenvolvimento e trajetória das células a combustível**. 2017. 1 CD-ROM. Trabalho de conclusão de curso (licenciatura - Química) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de

Ciências, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/155503>. Acesso em: 21 abr. 2025.

SNE RESEARCH. **Global Hydrogen Fuel Cell Vehicle (FCEV) Sales in 2021**. Seoul: SNE Research, Feb. 2022. Disponível em: [https://www.sneresearch.com/en/insight/release\\_view/229/page/](https://www.sneresearch.com/en/insight/release_view/229/page/). Acesso em: 28 dez. 2025

STELLANTIS. **HYDROGEN-FUEL-CELL-ZERO-EMISSION\_PRESSKIT**. Disponível em: [https://www.stellantis.com/content/dam/stellantis-corporate/news/media-events/HYDROGEN-FUEL-CELL-ZERO-EMISSION\\_PRESSKIT.pdf](https://www.stellantis.com/content/dam/stellantis-corporate/news/media-events/HYDROGEN-FUEL-CELL-ZERO-EMISSION_PRESSKIT.pdf). Acesso em: 23 dez. 2025.

TANAKA, S. et al. **Fuel cell system for Honda CLARITY fuel cell**. eTransportation, v. 3, p. 100046. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100046>. Acesso em: 3 out. 2025.

TOYOTA. **2025 Toyota Camry**. Disponível em: <https://www.toyota.com/camry/2025/>. Acesso em: 16 jan. 2026.

TOYOTA. **2026 Toyota Mirai Fuel Cell Vehicle**. Innovation is Power. Disponível em: <https://www.toyota.com/mirai/>. Acesso em: 16 jan. 2026.

TOYOTA. **Mirai Static 2021**. Disponível em: <https://media.toyota.co.uk/images/model/mirai-2021-current/>. Acesso em: 5 dez. 2025.

TOYOTA. **Toyota Launches the New Mirai**. Toyota Motor Corporation, 9 dez. 2020. Disponível em: <https://global.toyota/en/newsroom/toyota/33558148.html>. Acesso em: 5 jul. 2025.

TOYOTA. **Toyota do Brasil firma parceria com Shell Brasil, Raízen, Hytron, USP e Senai para testes de hidrogênio renovável a partir de etanol em projeto de Pesquisa e Desenvolvimento - Toyota Comunica**. Disponível em: <https://www.toyotacomunica.com.br/toyota-do-brasil-firma-parceria-com-shell-brasil-r>

aizen-hytron-usp-e-senai-para-testes-de-hidrogenio-renovavel-a-partir-de-etanol-em-projeto-de-pesquisa-e-desenvolvimento/. Acesso em: 5 out. 2025.

UNECE. **Global Technical Regulation No. 13: Hydrogen and Fuel Cell Vehicle Safety**. Geneva: UNECE, 2023. Disponível em: <https://unece.org/sites/default/files/2023-07/ECE-TRANS-180-Add.13-Amend1e.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2026.

UNIÃO EUROPEIA. **Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure**. Official Journal of the European Union, L 234, 22 set. 2023. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1804>. Acesso em: 5 dez. 2025.