

CENTRO UNIVERSITÁRIO SAGRADO CORAÇÃO – UNISAGRADO

GABRIEL JIO LE WU

CÉLULAS A COMBUSTÍVEL: APLICAÇÕES E DESAFIOS NA TRANSIÇÃO PARA  
ENERGIA LIMPA

BAURU

2023

GABRIEL JIO LE WU

CÉLULAS A COMBUSTÍVEL: APLICAÇÕES E DESAFIOS NA TRANSIÇÃO PARA  
ENERGIA LIMPA

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como parte dos requisitos  
para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Química - Centro  
Universitário Sagrado Coração.  
Orientador: Prof. Dr. Herbert Duchatsch  
Johansen

BAURU  
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com  
ISBD

W959c

Wu, Gabriel Jio Le

Células a combustível: aplicações e desafios na transição para  
energia limpa / Gabriel Jio Le Wu. -- 2023.

21f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Herbert Duchatsch Johansen

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia  
Química) - Centro Universitário Sagrado Coração - UNISAGRADO -  
Bauru - SP

1. Hidrogênio. 2. Células a Combustível. 3. Descarbonização. 4.  
Meio Ambiente. I. Johansen, Herbert Duchatsch. II. Título.

GABRIEL JIO LE WU

CÉLULAS A COMBUSTÍVEL: APLICAÇÕES E DESAFIOS NA TRANSIÇÃO PARA  
ENERGIA LIMPA

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como parte dos requisitos  
para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Química - Centro  
Universitário Sagrado Coração.

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Herbert Duchatsch Johansen (Orientador)  
Centro Universitário Sagrado Coração

---

Prof. Me. Alexander da Silva Maranhão (Banca Examinadora)  
Centro Universitário Sagrado Coração

---

Prof. Dr. Danilo Sinkiti Gastaldello (Banca Examinadora)  
Centro Universitário Sagrado Coração

## RESUMO

O artigo discute o uso de células a combustível como uma alternativa de energia limpa para combater os efeitos negativos da ação humana no meio ambiente. O objetivo é revisar várias tecnologias de células a combustível, tipos de eletrólitos, combustíveis, seus aspectos positivos e negativos, bem como suas aplicações. O método empregado envolve uma revisão bibliográfica a partir de 2000, coletando informações de diversas fontes. O artigo aborda os princípios das células a combustível, tipos de células como: célula a combustível alcalina (AFC), célula a combustível de membrana trocadora de próton (PEMFC), célula a combustível de ácido fosfórico (PAFC), célula a combustível de carbonato fundido (MCFC), e célula a combustível de óxido sólido (SOFC), principais combustíveis, aplicações e benefícios ambientais, destacando que, embora ofereçam uma solução mais limpa para a geração de energia, as células a combustível ainda enfrentam desafios, como custos elevados e questões de segurança no transporte e armazenamento de hidrogênio.

**Palavras-chave:** Hidrogênio. Células a Combustível. Descarbonização. Meio Ambiente.

## ABSTRACT

This article discusses the use of fuel cells as a clean energy alternative to combat the negative effects of human actions on the environment. The objective is to review various fuel cell technologies, types of electrolytes, fuels, their positive and negative aspects, as well as their applications. The method employed involves a bibliographic review from 2000, collecting information from various sources. The article addresses the principles of fuel cells, types of cells such as: Alkaline Fuel Cell (AFC), Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC), Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC), and Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), primary fuels, applications, and environmental benefits, highlighting that, although they offer a cleaner solution for energy generation, fuel cells still face challenges, such as high costs and safety issues in hydrogen transportation and storage.

**Keywords:** Hydrogen. Fuel Cells. Decarbonization. Environment.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>6</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	6
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>8</b>
4.1	PRINCÍPIOS DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL.....	8
4.2	TIPOS DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL .....	10
4.3	PRINCIPAIS COMBUSTÍVEIS.....	14
<b>5</b>	<b>APLICAÇÕES DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL</b> .....	<b>15</b>
5.1	APLICAÇÕES RECENTE DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL.....	16
<b>6</b>	<b>BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL</b> .....	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>LIMITAÇÕES E DESAFIOS</b> .....	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>18</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>20</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Nos dias de hoje, os efeitos negativos da ação humana sobre o planeta tem sido cada vez mais preocupante, pois atividades como a queima de combustíveis fósseis contribuem para o aumento do efeito estufa, poluição do solo, das águas e do ar, conseqüentemente, prejudicando a saúde e qualidade de vida das pessoas e dos ecossistemas.

Diante deste cenário, é essencial a procura por alternativas de energia limpa e renovável. As fontes de energia renováveis e limpas utiliza recursos que possuem um ciclo contínuo para renovar-se, como a água e o sol, por exemplo. Suas vantagens de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e minimizar a poluição pode trazer benefícios econômicos e sociais, pois muitas vezes são mais acessíveis e sustentáveis a longo prazo (SEBRAE, 2021).

Desde a década de 1970, a comunidade científica tem questionado a escolha de fontes de energia não renováveis, devido ao aumento das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e à intensificação do efeito estufa. Mesmo que a técnicas de aplicação das fontes fósseis passem por aprimoramento, no quesito eficiência, causando menos impactos ambientais na produção de energia (JACINTO JUNIOR *et al.*, 2022).

A demanda global por energia está prevista para crescer ao longo do tempo, impactando o consumo de recursos naturais e relacionando-se ao declínio na taxa de natalidade. Segundo a ONU, a população mundial deve atingir aproximadamente 9,7 bilhões até 2050, com a América Latina contribuindo com 18% desse crescimento (ONU, 2019).

Por conta do aumento da população dependência tecnológica e a demanda por energia elétrica em todos os setores aplicáveis têm crescido significativamente, aumentando a necessidade de fontes de energia mais eficientes e limpas. É nesse contexto que a célula a combustível surge como uma alternativa promissora.

A célula a combustível (FC, do inglês *fuel cell*) é um dispositivo que utiliza um combustível e um oxidante para produzir energia e vapor de água através de uma reação eletroquímica ao invés da combustão, por conta disso as emissões de gases



do efeito estufa na atmosfera são mínimas e pouco agressivas ao meio ambiente (JACINTO JUNIOR *et al.*, 2022).

Uma célula a combustível possui uma grande variedade de aplicações como fornecimento de energia para automóveis, celulares, geração de energia estacionária de pequeno, médio e grande portes, até de os setores espacial, militar, aéreo e naval (FAN *et al.*, 2021).

## **2 OBJETIVO**

O objetivo desse artigo é discutir, por meio de uma revisão bibliográfica, a utilização das células a combustível como uma alternativa de energia limpa, com foco na sua contribuição para a descarbonização da matriz energética atualmente dominada por fontes fósseis. Serão abordados os vários tipos de tecnologias de membranas e eletrólitos existentes, os combustíveis que poderão ser utilizados e seus aspectos positivos e negativos.

## **3 METODOLOGIA**

Neste estudo, para atingir os objetivos de pesquisa, realizou-se uma revisão narrativa da literatura a partir do ano 2000, com o propósito de coletar informações abrangentes sobre as características e aplicações de várias tecnologias de células a combustível, contribuindo para a síntese e expansão do conhecimento sobre o tema. Os dados foram obtidos em abril de 2023 a partir de diversas fontes, incluindo 'Google Acadêmico', 'SciELO', 'Web of Science', 'ScienceDirect' e sites governamentais, entre outros. A análise abrangeu a avaliação dos títulos e a leitura detalhada dos resumos dos artigos.

Foram empregadas palavras-chave em português e inglês relevantes para o tema, como 'Células a combustível', 'Hidrogênio', 'Mudanças climáticas', 'Descarbonização', entre outras. No total, foram identificados 15 arquivos que atenderam aos critérios de inclusão definidos para este estudo, com uma limitação de data de publicação de 2000 a 2023.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 PRINCÍPIOS DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Uma célula a combustível é um dispositivo que converte energia química em energia elétrica, utilizando um suprimento contínuo de combustível e oxidante. O que distingue as células a combustível das baterias convencionais é que elas não armazenam energia, mas a produzem enquanto os reagentes estiverem disponíveis.

As células a combustível têm diversas aplicações, como alimentar veículos, edifícios e dispositivos portáteis. Além disso, as células a combustível também podem reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a dependência de combustíveis fósseis, uma vez que podem utilizar hidrogênio ou outros combustíveis renováveis como fontes de energia (*U.S. Department of Energy, 2020*).

O uso das células a combustível apresenta uma vantagem significativa em relação à sua alta eficiência e à ausência de emissão de poluentes quando o hidrogênio é utilizado em seu estado puro (*VARGAS et al., 2006*). Além disso, as células a combustível de hidrogênio, a água é o único produto resultante do processo de geração de energia, eliminando assim, a emissão de dióxido de carbono e poluentes atmosféricos que causam poluição e problemas de saúde. Também as células a combustível apresentam baixo nível de ruído durante a operação devido à presença reduzida de componentes móveis (*FAN et al., 2021*).

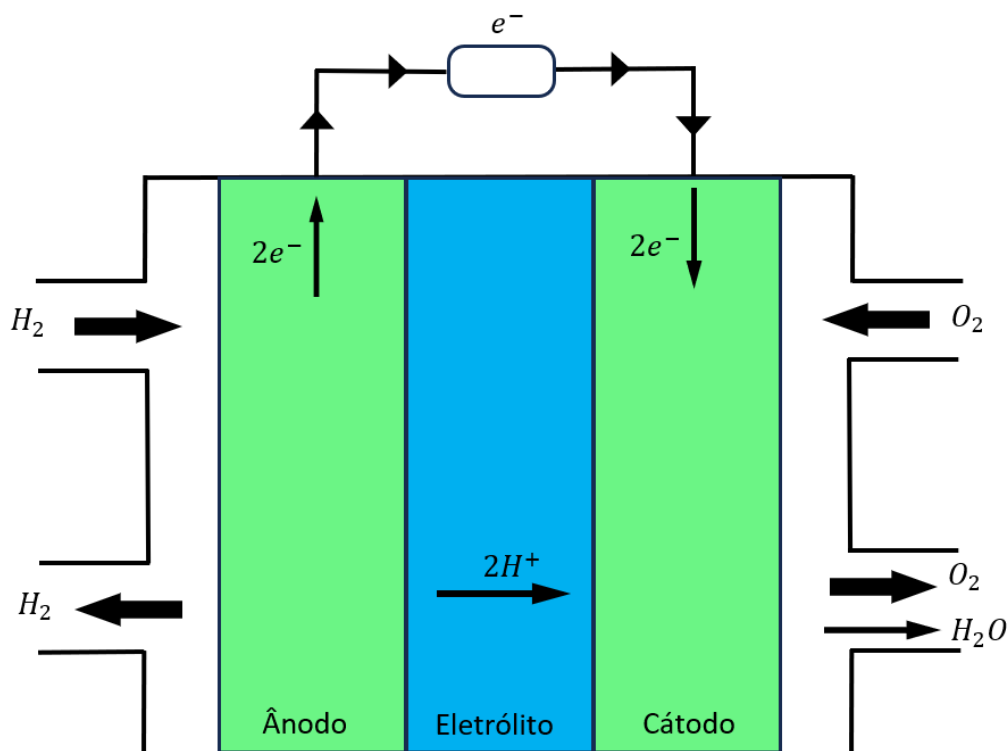
No entanto, o gás hidrogênio ( $H_2$ ) não é encontrado em sua forma elementar na natureza, pois está sempre ligado a outro elemento ou composto químico, o que requer a utilização de métodos para sua produção (*SILVA, 2016; RODRIGUES, R. P. et al., 2019*). Uns dos métodos seria a utilização de energia elétrica obtida a partir de fontes renováveis como hidráulica, eólica, solar e fotovoltaica, que pelo processo de eletrólise da água pode ser convertida em energia química com produção de hidrogênio (*BRAGA, 2015*).

A célula a combustível possui uma estrutura básica composta por uma camada de eletrólito em contato com um ânodo (terminal negativo) e um cátodo (terminal positivo), ambos porosos e revestido com uma fina camada de catalisador a base de platina ou níquel num dos lados, que facilita reações químicas entre o oxigênio ( $O_2$ ) e o hidrogênio ( $H_2$ ). Em uma típica, o ânodo, que é o eletrodo negativo

(-), é alimentado continuamente com um gás combustível, enquanto o cátodo, o eletrodo positivo (+), recebe um oxidante, geralmente o  $O_2$  do ar. A reação eletroquímica que ocorre nos eletrodos resulta na produção de uma corrente elétrica (VARGAS et al., 2006).

A Figura 1 exibe, de maneira simplificada, a estrutura e os direcionamentos das reações que ocorre no interior da célula a combustível.

Figura 1 - Representação da célula a combustível.



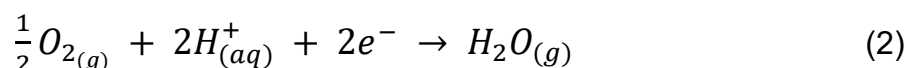
Fonte: Modificado a partir de Carvalho (2021)

Dentro da célula a combustível, o gás hidrogênio ( $H_2$ ) pressurizado é direcionado para o terminal negativo, o ânodo. O gás é obrigado a atravessar um catalisador. Quando as moléculas de hidrogênio entram em contato com o catalisador, ocorrendo a Reação 1. Essa reação de oxidação resulta na separação dois íons de hidrogênio ( $H^+$ ) e 2 elétrons ( $e^-$ ) (DUARTE, D.; FERREIRA, Í., 2023).



Os elétrons livres são transportados através do ânodo, seguindo um percurso ao redor do eletrólito, até alcançarem o circuito externo, onde podem ser utilizados para acender uma lâmpada ou acionar um motor elétrico. Em seguida, os elétrons retornam ao terminal positivo, o cátodo (VARGAS *et al.*, 2006).

No lado no cátodo, o reagente oxidante geralmente oxigênio ( $O_2$ ), que é coletado do ar, é forçado a se espalhar no catalisador do terminal positivo, onde ocorre a Reação 2. Nesta reação de redução, os íons  $H^+$  ligam-se com o átomo de oxigênio ( $O_2$ ) e 2 elétrons ( $2 e^-$ ) provenientes do circuito externo, para formar a molécula de água ( $H_2O$ ) e é liberado uma certa quantidade de calor (DUARTE, D.; FERREIRA, Í., 2023; FAN *et al.*, 2021).



A molécula de água ( $H_2O$ ) sai da célula a combustível na forma de vapor de água, por conta do calor gerado, pode ser utilizado para gerar mais eletricidade (cogeração) por meio de aquecimento, ou ser integrado a uma turbina a vapor. O vapor também pode ser utilizado na eletrólise para produzir  $H_2$  novamente, através de painéis solares (VARGAS *et al.*, 2006).

## 4.2 TIPOS DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Com base no tipo de eletrólito utilizado, as células a combustível podem ser categorizadas em vários tipos de células a combustível, cada uma com sua temperatura de operação e o combustível apropriado. A classificação mais comum das células é pelo tipo de eletrólito utilizado e isso inclui: *Alkaline Fuel Cell* (AFC), *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC), *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC) e *Solid Oxid Fuel Cell* (SOFC).

### ***Alkaline Fuel Cell - AFC***

As células a combustível alcalina utilizam metais não preciosos como eletrodos, e uma solução de hidróxido de potássio como eletrólito. Com um bom desempenho e alta eficiência de funcionamento, as células alcalinas operam em temperaturas

entre 60 °C e 90 °C. Essas células, classificadas como de baixa temperatura, utilizam catalisadores de baixo custo, como o níquel. No entanto, sua principal desvantagem está na facilidade de contaminação por dióxido de carbono e monóxido de carbono, exigindo a utilização de oxigênio e hidrogênio puros em sua operação, o que torna sua comercialização inviável devido ao alto custo dos materiais utilizados (JACINTO JUNIOR *et al.*, 2022).

### ***Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC***

As células a combustível com uso de membrana trocadora de prótons são células que operam a baixas temperaturas (30 °C a 100 °C) e possuem uma fina membrana polimérica como eletrólito sólido, possibilitando ter uma maior densidade de corrente e menos corrosão. Como catalisador utiliza-se a platina para melhorar a eficiência, porém é sensível à contaminação por CO (AGUIAR, C. R., 2016; RODRIGUES, R. P. *et al.*, 2019).

### ***Phosphoric Acid Fuel Cell - PAFC***

As células a combustível de ácido fosfórico opera na faixa de temperatura de 150 °C a –220 °C, devido à baixa condutividade elétrica do ácido fosfórico em baixas temperaturas. A solidificação do ácido fosfórico em temperaturas mais baixas pode prejudicar a operação contínua e a partida do equipamento (JACINTO JUNIOR *et al.*, 2022). Além da platina ser usada como catalisador para acelerar as reações, a PAFC possui limitações devido a corrosões e baixa densidade de corrente (AGUIAR, C. R., 2016).

### ***Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC***

As células a combustível de carbonato fundido são projetadas para melhorar a eficiência por meio do uso de um eletrólito fundido de carbonatos de lítio, sódio e/ou potássio em altas temperaturas torno de 650 °C, possibilitam o processo de cogeração. Elas são versáteis e podem utilizar uma ampla variedade de combustíveis, incluindo hidrogênio, monóxido de carbono, gás natural, propano,

diesel, biometano e subprodutos do processo de gaseificação de carvão (RODRIGUES, R. P. *et al.*, 2019; CARVALHO, S. H. D., 2021).

### ***Solid Oxide Fuel Cell – SOFC***

As células a combustível de óxido sólido operam em altas temperaturas devido ao eletrólito cerâmico sólido de óxido metálico que possuem e também não precisam de catalisadores, pois suas temperaturas fornecem a energia necessária para as reações (CARVALHO, S. H. D., 2021). Nessas células, os hidrocarbonetos e o ar são reformulados em uma mistura de gás hidrogênio e monóxido de carbono. A cerâmica utilizada, composta por zircônio (Zr) estabilizado com ítrio (Y), proporciona alta estabilidade química, térmica e condutividade elétrica (JACINTO JUNIOR *et al.*, 2022).

A seguir é apresentada a Tabela 1 que destaca as principais características e tipos de células de combustível, permitindo uma rápida comparação entre eles.

Tabela 1. Tipo de células a combustível.

<b>Tipos</b>	<b>AFCs</b>	<b>PEMFCs</b>	<b>PAFCs</b>	<b>MCFCs</b>	<b>SOFCs</b>
<b>Eletrólito</b>	KOH concentrado	Náfon®	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZrO <sub>2</sub>
<b>Combustível</b>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> OH	Combustível reformado (CH <sub>4</sub> , CO, H <sub>2</sub> )	Gás de carvão purificado, gás natural e combustível reformado (CH <sub>4</sub> , CO, H <sub>2</sub> )	Gás de carvão purificado e gás natural (CH <sub>4</sub> , CO)
<b>Oxidante</b>	O <sub>2</sub>	Ar atmosférico	Ar atmosférico	Ar atmosférico	Ar atmosférico
<b>Catalisador</b>	Pt/Ru	Pt/Ru	Pt	NiO	Ni
<b>Temperatura de operação</b>	65 °C a 220 °C	-40 °C a 90 °C	150 °C a 200 °C	650 °C a 700 °C	600°C a 1000 °C
<b>Eficiência do sistema</b>	60% a 70%	43% a 68%	40% a 55%	55% a 65%	55% a 65%
<b>Vantagens</b>	Maior eficiência comparado aos outros tipos de células a combustível	Alta densidade de potência, Operação flexível, Mobilidade	Maior desenvolvimento tecnológico.	Tolerância a CO/CO <sub>2</sub> Eletrodos à base de Ni, Reforma interna, alta eficiência teórica	Alta eficiência (cinética favorável). Reforma interna
<b>Desvantagens</b>	Sensível a CO <sub>2</sub> , remoção da água, Gases ultrapuros	Custo da membrana, Contaminação do catalisador com CO	Vida útil limitada pela corrosão e, Sensibilidade a CO (<2%)	Corrosão do cátodo, longo período de tempo para atingir a temperatura de operação	Problemas de materiais; Expansão térmica
<b>Aplicação</b>	Terrestre e aeroespacial especial	Veículo elétrico e fonte de energia móvel	Fornecimento de energia regional (100 kW a alguns MW, por exemplo, usina)	Central elétrica (100 kW a 1 MW)	Central elétrica (10 kW a 1 MW)

Fonte: Modificado a partir de VARGAS *et al.* (2006) e FAN *et al.* (2021).

### 4.3 PRINCIPAIS COMBUSTÍVEIS

No universo, o elemento químico mais abundante é o hidrogênio, representando cerca de 75% da massa de toda matéria e mais de 90% dos átomos. O hidrogênio é uma molécula altamente eficiente para armazenar energia, tornando-o uma fonte amplamente pesquisada para produção de energia elétrica e térmica de forma renovável (SILVA, 2016).

Quando produzido a partir de fontes sustentáveis, como etanol e água, e utilizando tecnologias limpas, como energias solar, eólica e hidrelétrica, o hidrogênio se transforma em um combustível ecologicamente correto. A queima de hidrogênio com oxigênio puro resulta apenas em calor e água, e mesmo quando queimado com ar, que contém nitrogênio, a emissão de poluentes atmosféricos, como óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), é menor em comparação com os combustíveis fósseis (VARGAS *et al.*, 2006).

Embora o hidrogênio seja altamente inflamável, seu nível não é superior ao do gás natural, uma fonte energética em crescimento no Brasil, que pode desempenhar um papel significativo na produção de hidrogênio, uma vez que contém metano ( $\text{CH}_4$ ) em sua composição (VARGAS *et al.*, 2006).

Na Terra, o hidrogênio não é encontrado em sua forma mais pura, mas sim em combinação com outros elementos (como hidrocarbonetos e seus derivados). Portanto, a obtenção de hidrogênio requer a extração de várias fontes (SILVA, 2016; RODRIGUES, R. P. *et al.*, 2019).

Atualmente existem diversas tecnologias para a produção de hidrogênio, obtida a partir de processos eletrólise da água, reforma a vapor do gás natural, oxidação de hidrocarbonetos e gaseificação do carvão (BRAGA, 2015).

Alguns tipos de células a combustíveis não são necessários a aplicação direta do hidrogênio como combustível, o que torna elas flexíveis, ou seja, podem funcionar a partir de gás natural, gasolina, biodiesel ou outros combustíveis. Isso ocorre por meio de um reformador químico que converte o combustível introduzido em hidrogênio ou por reformulação interna em algumas células (MIRANDA; SEO; VILELA JUNIOR, 2013).



## 5 APLICAÇÕES DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

As células a combustíveis possuem diversas aplicações devido ao poder de geração de energia, variando entre quilowatt (kW) e megawatt (MW), portanto as células de pequeno porte podem ser empregadas em dispositivos eletrônicos pessoais, como smartphones e computadores portáteis. Já as aplicações de médio porte abrangem veículos automotivos, eletrodomésticos, uso militar e transporte público. Entretanto, as células de grande porte são utilizadas na geração e distribuição de energia em rede (JACINTO JUNIOR *et al.*, 2022).

Há uma variedade de tipos de células a combustível, cada um com suas próprias características distintas, que podem incluir as seguintes variações:

As células a combustível alcalina (AFC) inicialmente foram usadas pela NASA em missões espaciais pelo fato de ter ótimo desempenho e eficiência de funcionamento. Atualmente são utilizadas em submarinos, barcos, empilhadeiras e no setor de transportes (CARVALHO, S. H. D., 2021).

As células a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFC) são ideais para aplicações portáteis e moveis devido à sua baixa temperatura de operação, leveza, tamanho compacto e facilidade de acionamento. Além disso, essas células de combustível possuem alta eficiência na conversão de energia e alta densidade de potência. Uma das suas maiores vantagens é sua capacidade de operar com emissões reduzidas de poluentes, inclusive a notável redução nas emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), mesmo quando o ar atmosférico é utilizado no cátodo (LUPATINI, K. N., 2016).

As células a combustíveis de ácido fosfórico (PAFC) são frequentemente empregadas em módulos de 400 kW ou mais, encontrando aplicação na geração de energia estacionária em diversos locais, como hotéis, hospitais, mercearias e edifícios comerciais. Essas células são capazes de aproveitar o calor residual, tornando-as ainda mais eficientes e versáteis para suprir as demandas energéticas desses ambientes (U.S. Department of Energy, 2020).

As células a combustível de carbonato fundido (MCFC) são utilizadas atualmente em usinas de carvão e gás natural, bem como em aplicações elétricas industriais e militares. Devido ao funcionamento em temperaturas elevadas, cerca de 650 °C, é possível utilizar metais não preciosos como catalisadores no ânodo e

no cátodo, o que contribui para a redução dos custos (U.S. Department of Energy, 2020; JACINTO JUNIOR *et al.*, 2022).

As células a combustível de óxido sólido (SOFC) possuem uma capacidade de geração de centenas de MW e são utilizadas em sistemas de geração e distribuição de energia em larga escala. Além disso, apresentam baixas emissões de gases nocivos, como NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> (RODRIGUES, R. P. *et al.*, 2019).

## 5.1 APLICAÇÕES RECENTES DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Em 2014, a montadora de carros Toyota estreou seu primeiro carro movido a células a combustível, o Toyota Mirai, um sedã de quatro lugares semelhante ao Prius. O sistema de células a combustível possuía um poder de geração de 100 kWh com 2 tanques de hidrogênio extremamente robustos, apresentando uma autonomia de 502 Km por tanque. Em 2015, a comercialização de veículos movidos a hidrogênio teve início nos Estados Unidos. Até o momento, cerca de 10.000 unidades foram vendidas globalmente, sendo a maioria adquirida na Califórnia porque é o único local com 44 postos de abastecimento de hidrogênio em operação (DUARTE, D.; FERREIRA, Í., 2023).

Em 2010, a Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU/SP) iniciou o projeto de ônibus a célula a combustível hidrogênio para o desenvolvimento de uma solução mais limpa para o transporte público urbano no Brasil. O projeto envolve a obtenção e manutenção de quatro ônibus a célula a combustível de hidrogênio, a criação de uma estação de produção de hidrogênio por eletrólise e a supervisão do abastecimento e do desempenho dos veículos no Corredor Metropolitano São Mateus/Jabaquara. Os ônibus estão em operação desde o final de 2013 e obtiveram uma redução mensal de cerca de 8 toneladas nas emissões de CO<sub>2</sub>, comparada aos ônibus movido a diesel convencional (REGINA; LOPES, 2013).

O estudo de Silva, Severino e Oliveira (2010) avaliou a aplicação de tecnologias de geração solar fotovoltaica e células a combustível para fornecimento contínuo de energia elétrica a comunidades isoladas na região amazônica. Eles se concentraram em um projeto-piloto no Centro de Pesquisa Canguçu (CPC) próximo à Ilha do Bananal, no sudoeste do Tocantins. No entanto, devido aos custos elevados

dos componentes, o estudo concluiu que, mesmo atendendo aos requisitos técnicos na região norte, o sistema ainda era inviável para aplicação no Brasil.

## **6 BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL**

O hidrogênio pode desempenhar um papel importante no futuro de baixas emissões de carbono, uma vez que pode ser produzido localmente a partir de várias fontes, reduzindo a dependência de importações de combustíveis. Além disso, a geração de eletricidade por meio de células a combustível de hidrogênio não gera gases do efeito estufa, resultando apenas na produção de água como subproduto da combustão (JACINTO JUNIOR *et al.*, 2022).

Nas células a combustível de hidrogênio, a única emissão resultante é a água, evitando a poluição por dióxido de carbono e outros poluentes. Além disso, essas células têm funcionamento silencioso devido à pouca movimentação de peças internas (FAN *et al.*, 2021).

Conforme Miranda, SEO e Vilela Junior (2013), o uso de células a combustíveis pode reduzir até 50% da emissão de poluentes e gases causadores do efeito estufa, como o CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, com relação a utilização de combustíveis fósseis, tendo como consequência a melhoria do sistema respiratório, especialmente em áreas urbanas e a preservação do meio ambiente.

A redução das mudanças climáticas teria um impacto positivo na saúde, levando a menos crianças sofrendo de doenças relacionadas ao calor, desnutrição, doenças infecciosas, traumas físicos e mentais, problemas de saúde mental e doenças respiratórias. Esses benefícios para a saúde começariam imediatamente e teriam efeitos ao longo da vida, já que os danos e doenças resultantes da exposição precoce podem afetar a saúde a longo prazo (RODRIGUES, R. P. *et al.*, 2019).

## **7 LIMITAÇÕES E DESAFIOS**

Mesmo que as células a combustível ofereçam uma alternativa limpa e eficiente para a geração de energia, elas apresentam desvantagens como qualquer outra tecnologia. Neste contexto, é crucial compreender os desafios que ainda

precisam ser enfrentados. Após análises, destacam-se as seguintes desvantagens das células de combustível:

- As células a combustível para geração elétrica estacionária ainda possuem custos muito altos, tornando-as inadequadas para substituir as tecnologias baseadas em combustíveis fósseis atualmente (RODRIGUES, R. P. *et al.*, 2019);
- O elevado custo de produção de componentes essenciais, como catalisadores, devido à utilização de metais preciosos, como a platina e outros materiais valiosos (CARVALHO, S. H. D., 2021);
- Risco de envenenamento do eletrólito para combustíveis alternativos a hidrogênio, podendo afetar significativamente a eficiência e durabilidade (U.S. *Department of Energy*, 2020);
- Desafios relacionados ao transporte e armazenamento do hidrogênio, devido à sua extrema inflamabilidade e potencialmente explosivo (MIRANDA; SEO; VILELA JUNIOR, 2013).

## **8 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Atualmente, a crescente preocupação com os impactos negativos das atividades humanas no meio ambiente tem impulsionado a busca por alternativas de energia limpa e renovável. As células a combustível, por meio de uma reação eletroquímica em vez da combustão, surgem como uma promissora solução para mitigar os danos causados ao planeta. Elas reduzem drasticamente as emissões de gases de efeito estufa, oferecendo uma forma mais sustentável de geração de energia. No entanto, apesar de suas inúmeras vantagens, como uma variedade de aplicações e a capacidade de aproveitar o hidrogênio como um recurso amplamente disponível, as células a combustível enfrentam desafios, incluindo altos custos de produção e a necessidade de superar obstáculos na produção e armazenamento de hidrogênio.

A diversidade de tipos de células a combustível, com características e faixas de operação distintas, abre um leque de aplicações que vão desde dispositivos eletrônicos móveis até sistemas de geração de energia em larga escala. O hidrogênio, por ser altamente eficiente e de baixo impacto ambiental, desempenha

um papel muito importante nesse cenário. No entanto, os desafios, como custos elevados e preocupações com a segurança na manipulação do hidrogênio, requerem soluções tecnológicas e regulatórias para viabilizar a ampla adoção das células a combustível. À medida que a pesquisa e o desenvolvimento avançam e políticas de incentivo à transição para energias limpas ganham força, as células a combustível prometem desempenhar um papel crucial na construção de um futuro mais sustentável, minimizando os impactos ambientais e melhorando a qualidade de vida das pessoas.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, Cassius Rossi. Contribuição ao Gerenciamento e Controle de Células a Combustível e Armazenamento de Energia para a Operação em Geração Distribuída. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. São Carlos, 2016. p. 37-69. Disponível em:

<<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde-09112017-103011/pt-br.php>>. Acesso em: 17 out. 2023.

BRAGA, Gustavo Garcia Arantes. Aspectos técnicos, econômicos e de sustentabilidade da produção de hidrogênio renovável. [Dissertação de Mestrado]. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista, São Paulo, SP. 2015. Disponível em:

<<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/131893>>. Acesso em: 10 jun. 2023.

CARVALHO, Samuel H. D. O desenvolvimento inicial de uma tecnologia alternativa de células a combustível sustentáveis de baixo custo aliado a uma análise comparativa aos principais modelos disponíveis no mercado. Trabalho de conclusão do Curso de Engenharia Química; São Paulo, 2021. Disponível em:

<[https://www.oswaldocruz.br/www/RESOURCES/PDFS\\_TRABALHOS\\_IC/TCC%20-%20IC%20-CARVALHO;%20SAMUEL%202021.pdf](https://www.oswaldocruz.br/www/RESOURCES/PDFS_TRABALHOS_IC/TCC%20-%20IC%20-CARVALHO;%20SAMUEL%202021.pdf)>. Acesso em: 7 out. 2023.

DUARTE, Diego; FERREIRA, Ítalo. Tecnologia contendo células de combustível a hidrogênio no Toyota Mirai. **Repositório Universitário da Ânima**, Pernambuco, 2023. Disponível em:

<<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/33937>>. Acesso em: 17 out. 2023.

FAN, Lixin; TU, Zhengkai; CHAN, Siew Hwa. *Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review*. **Energy Reports**, vol. 7, no. 1. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.003>.

JACINTO JUNIOR, Silvio Gentil; QUINTELLA, Solange Assunção; ALVES, Daniela Ribeiro; CONDE, Ivo Batista; CASTRO, Janevane Silva de; LEITINHO, Janaina Lopes. Células a combustível: possibilidades e limitações. **Research, Society and Development**, Ceará, vol. 11, no. 5, e40111528522, 2022. DOI: <https://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28522>.

LUPATINI, Karine Natani. Desenvolvimento de Membranas de Quitosana para Aplicação em Células a combustível. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura. Paraná, 2016. Disponível em: <<https://tede.unioeste.br/handle/tede/811#preview-link0>>. Acesso em: 17 out. 2023.

MIRANDA, Luiz H. T. G.; SEO, Emília S. M.; VILELA JUNIOR, Alcir. Células a combustível como alternativa para redução de CO<sub>2</sub> equivalente na frota de veículos leves. **InterfacEHS - Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, vol. 8, no. 2, p. 158-181, 2013. Disponível em:

<<http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/4042>> Acesso em: 20 out. 2023.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. População mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050, diz relatório da ONU. 2019. Brasília, DF. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/83427-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-deve-chegar-97-bilh%C3%B5es-de-pessoas-em-2050-diz-relat%C3%B3rio-da-onu>>. Acesso em: 30 de dez. de 2023.

REGINA, Ivan Carlos; LOPES, Marcos Correia. Ônibus a célula a combustível hidrogênio para transporte urbano no Brasil. **ENGENHARIA TRANSPORTE EMTU/SP**. 2013. Disponível em:

<[http://www.brasilengenharia.com/portal/images/stories/revistas/edicao616/616\\_onibus\\_celula.pdf](http://www.brasilengenharia.com/portal/images/stories/revistas/edicao616/616_onibus_celula.pdf)> Acesso em: 20 out. 2023.

RODRIGUES, Robson Pereira; SOUZA, José Eduardo Silva; TAMBOR, José Humberto Machado. As células de combustível de hidrogênio: suas aplicações no sistema energético global em equilíbrio com o meio ambiente. **Brasil Para Todos - Revista Internacional**, vol. 7, no. 1, p. 21–34, 2019. Disponível em:

<[https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais\\_Sem\\_Int\\_Etn\\_Racial/article/view/607](https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais_Sem_Int_Etn_Racial/article/view/607)>. Acesso em: 7 out. 2023.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Conheça os benefícios da implementação da energia renovável. Artigos da Sebrae, 2021. Disponível em: <<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/conheca-os-beneficios-da-implementacao-da-energia-renovavel,1eb2b94e3a7e3810VgnVCM100000d701210aRCRD>>. Acesso em: 15 abr. 2023.

SILVA, Inara Amoroso. Hidrogênio: combustível do futuro. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, vol. 20, núm. 2, pp. 122-126. 2016. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/260/26046651010.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2023.

SILVA, Sergio B.; SEVERINO, Mauro M.; OLIVEIRA, Marco A. G. de. SISTEMA HÍBRIDO SOLAR FOTOVOLTAICO, CÉLULA A COMBUSTÍVEL E BATERIAS APLICADOS A COMUNIDADES ISOLADAS NA REGIÃO DA AMAZÔNIA BRASILEIRA. **Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS**. 2010. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1425/1416>> Acesso em: 20 out. 2023.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Fuel Cell Basics**. 2020. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-basics>>. Acesso em: 10 jun. 2023.

VARGAS, Reinaldo A.; CHIBA, Rubens; FRANCO, Egberto G.; SEO, Emília S.M. Uma visão da tecnologia de células a combustível. In: CONGRESSO DE ADMINISTRACAO DA FACULDADE ALFACASTELO, 16-18 de maio, 2006, Alphaville, SP., 2006, Disponível em:

<<http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/13238>>. Acesso em: 17 abr. 2023.