

## Células a combustível: possibilidades e limitações

Fuel cells: possibilities and limitations

Pilas de combustible: posibilidades y restricciones

Recebido: 26/03/2022 | Revisado: 01/04/2022 | Aceito: 04/04/2022 | Publicado: 10/04/2022

### **Silvio Gentil Jacinto Junior**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4183-9932>  
Universidade Estadual do Ceará, Brasil  
E-mail: [silviogentil@hotmail.com](mailto:silviogentil@hotmail.com)

### **Solange Assunção Quintella**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6187-0953>  
Universidade Federal do Ceará, Brasil  
E-mail: [solange@gpsa.ufc.br](mailto:solange@gpsa.ufc.br)

### **Daniela Ribeiro Alves**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0746-2211>  
Universidade Estadual do Ceará, Brasil  
E-mail: [alves.danielaribeiro@gmail.com](mailto:alves.danielaribeiro@gmail.com)

### **Ivo Batista Conde**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6481-8598>  
Universidade Estadual do Ceará, Brasil  
E-mail: [ivo.conde@uece.br](mailto:ivo.conde@uece.br)

### **Janevane Silva de Castro**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5631-7603>  
Universidade Federal do Ceará, Brasil  
E-mail: [janevane\\_castro@hotmail.com](mailto:janevane_castro@hotmail.com)

### **Janaina Lopes Leitinho**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2893-6228>  
Universidade Federal do Ceará, Brasil  
E-mail: [janaina@crateus.ufc.br](mailto:janaina@crateus.ufc.br)

### **Resumo**

Do ponto de vista da matriz energética dominante a base de fontes fósseis, as tecnologias ligadas às células de combustível têm ganhado bastante destaque no meio científico. Elas podem ser apontadas como futuro vetor energético, principalmente quando atreladas as técnicas de economia de hidrogênio e as matrizes energéticas renováveis já existentes. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é promover a discussão sobre o uso e aplicação das células de combustível em substituição ao atual sistema energético, através da técnica de revisão da literatura. As células de combustível promovem baixas emissões de gases do efeito estufa, óxidos de nitrogênio e enxofre (NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>); o que permitem uma maior redução dos impactos sobre o meio ambiente. Além disso, podem operar em pequena, média e larga escala, podendo ser reaproveitadas para os mais diversos tipos de aplicações. Entre elas: a substituição dos carros movidos a motores de combustão interna, por carros elétricos; sendo estes mais eficientes na geração de energia, com menores quantidades de ruídos e impactos ambientais.

**Palavras-chave:** Hidrogênio; Células de combustível; Descarbonização; Ensino.

### **Abstract**

From the point of view of the dominant energy matrix based on fossil sources, technologies linked to fuel cells have gained much prominence in the scientific world. They can be seen as a future energy vector, especially when coupled with existing hydrogen saving techniques and renewable energy matrices. Thus, this study aims to promote the discussion about the use and application of fuel cells in substitution for the current energy system through the literature review technique. Fuel cells promote low emissions of greenhouse gases, nitrogen oxides, and sulfur (NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub>); this allows a more significant reduction of environmental impacts. In addition, they can function on a small, medium, and large scale and can be reused for a wide range of applications. Among them is replacing cars powered by internal combustion engines with electric cars; these are more efficient in generating energy, with lower amounts of noise and environmental impacts.

**Keywords:** Hydrogen; Fuel cells; Decarbonization; Teaching.

### **Resumen**

Desde el punto de vista de la matriz energética dominante la base de fuentes fósiles, las tecnologías ligadas a las células de combustible han ganado bastante destaque en el medio científico. Éstas pueden ser apuntadas como futuro vector energético, principalmente cuando se vinculan las técnicas de economía de hidrógeno y las matrizes

energéticas renovables ya existentes. De esta forma, el objetivo de este trabajo es promover la discusión sobre el uso y aplicación de las células de combustible en sustitución al actual sistema energético, a través de la técnica de revisión de la literatura. Las células de combustible promueven bajas emisiones de gases de efecto invernadero, óxidos de nitrógeno y azufre ( $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ ); lo que permite una mayor reducción de los impactos sobre el medio ambiente. Además, pueden operar a pequeña, media y gran escala, pudiendo ser reutilizadas para los más diversos tipos de aplicaciones. Entre ellas: la sustitución de los coches propulsados por motores de combustión interna por coches eléctricos; siendo estos más eficientes en la generación de energía, con menores cantidades de ruidos e impactos ambientales.

**Palabras clave:** Hidrógeno; Pilas de combustible; Descarbonización; Enseñanza.

## 1. Introdução

Atualmente, o Sistema Energético dominante baseia-se na utilização maciça de combustíveis fósseis para produção de energia estacionária e veicular. No Brasil, as hidrelétricas exercem o papel de geração energética estacionária e o etanol, utilizado como biocombustível é o complemento da matriz veicular. Todavia, mesmo o Brasil utilizando recursos naturais renováveis em boa parte de sua matriz energética, não é dispensado o uso de grandes quantidades de carvão mineral, gás natural e petróleo para atender e acompanhar o crescimento da demanda energética nacional (Bizerra *et al.*, 2018).

Embora as técnicas de aplicação das fontes fósseis passem por crescentes melhorias, sobretudo no quesito eficiência, ocasionando menos impactos ambientais na produção de energia; a crescente demanda energética gera mais poluição e requer maior eficiência dessa tecnologia. Além disso, desde a década de 1970, a comunidade científica tem questionado a escolha de vetores energéticos não renováveis, sobretudo pelo aumento das emissões de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e consequente intensificação do efeito estufa; e no que diz respeito à segurança energética pela crescente redução das fontes fósseis (Rohrich, 2008).

Sendo assim, a promoção de combustíveis com menos teor de carbono vem ocorrendo desde que grande parte da madeira foi substituída pelo carvão mineral, e desse para os derivados do petróleo, com o surgimento dos combustíveis líquidos; e posteriormente gasosos, como o gás natural; permitindo nessas substituições reduções das emissões de gás carbônico (Gentil, 2010)

Conforme o Relatório Técnico do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE (2010) o termo ‘Economia de Hidrogênio’ refere-se a um novo paradigma econômico baseado na substituição dos recursos não renováveis, sobretudo os derivados do petróleo, pelo hidrogênio como novo vetor energético. A relevância dessa modificação se dá, sobretudo na questão da segurança energética, pois a obtenção do gás hidrogênio pode ser realizada por meio de várias fontes locais, diminuindo a necessidade da importação do combustível. Além disso, a geração de energia elétrica através da célula de combustível a base de hidrogênio não produz gases do efeito estufa, uma vez que é produzido apenas água como subproduto de sua combustão.

Nesse sentido o termo descarbonização da matriz energética se torna relevante, pois a busca por fontes de energia menos dependentes do carbono promove um menor impacto ambiental e, sobretudo diminuem a quantidade de  $\text{CO}_2$  por unidade de energia gerada. Desse modo, a expressão Economia do Hidrogênio ganha destaque por utilizar o gás hidrogênio como vetor energético e a célula de combustível como a tecnologia capaz de transformá-lo em eletricidade.

O objetivo desse artigo é apresentar através da metodologia de revisão da literatura o emprego das células de combustível como fonte de energia limpa, sobretudo como uma proposta de descarbonização da matriz energética dominante baseada em fontes fósseis; evidenciando suas características e possibilidades de utilização; limitações e incertezas.

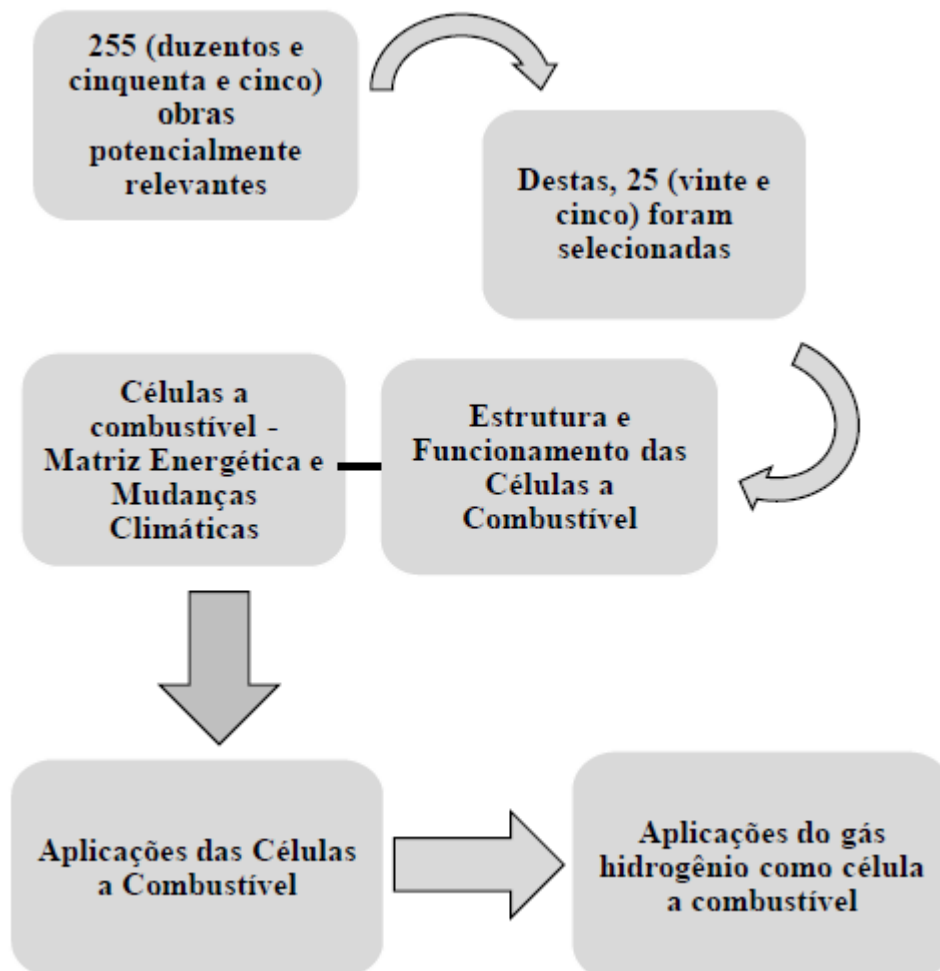
## 2. Metodologia

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, utilizou-se como recurso metodológico uma revisão narrativa da literatura, a partir do ano 2000, com a finalidade de reunir informações sobre as características e aplicações de diferentes

células de combustível; contribuindo para a síntese e construção de conhecimento sobre o tema. Conforme Rother (2007), as publicações que utilizam como metodologia a revisão narrativa buscam demonstrar o desenvolvimento ou o estado da arte de determinado assunto de forma ampla, teórica ou contextual.

Estes dados foram coletados em janeiro de 2022, em diferentes bases de dados, a saber: ‘Portal de Periódicos da Capes’, ‘Google Acadêmico’, ‘SciELO’, ‘Web of Science’, ‘Science Direct’, ‘sites governamentais’, ‘publicações em anais de eventos’, entre outras; sendo realizada posteriormente a análise do título e leitura minuciosa dos resumos. Os critérios de inclusão utilizados para a escolha foram publicações que apresentassem o estado da arte ou tratassem o tema de forma abrangente e/ou que contivessem aplicações concretas das células a combustível no cotidiano. Foram adotadas as palavras-chaves em português, inglês e/ou espanhol relacionadas ao tema, como por exemplo: ‘Células a combustível’, ‘Economia de hidrogênio’, ‘Hidrogênio’, ‘Política energética’, ‘Mudanças climáticas’, ‘Descarbonização’, entre outras. A exclusão foi realizada por ano de publicação, onde aqueles que não faziam parte do período analisado (2000 – 2021) foram descartados. Dos 255 arquivos potencialmente relevantes foram escolhidos 25, utilizando como critérios os temas elencados na Figura 1.

**Figura 1** – Levantamento bibliográfico realizado.



Fonte: Autores.

### 3. Resultados e Discussão

Para compor o arcabouço teórico deste artigo, foram selecionados 25 arquivos, a saber: 17 artigos publicados em revistas científicas; 4 arquivos disponibilizados em repositórios institucionais (um Trabalho de Conclusão de Curso – TCC, duas dissertações de mestrado e uma tese de doutorado), 1 livro em formato eletrônico (E-book); 1 relatório institucional e 2 artigos publicados em portais de notícias. Os artigos que fazem parte do corpo da pesquisa estão descritos na Tabela 1.

**Tabela 1** - Classificação dos artigos escolhidos quanto a temática abordada na pesquisa.

Número de artigos sobre a temática	Classificação do Artigo	Periódicos	Referência
04	Estrutura e Funcionamento das Células de Combustível	Revista de Química Industrial; Renewable and Sustainable Energy Reviews; Revista de Engenharia e Tecnologia; Química Nova.	(Linardi <i>et al.</i> , 2001; Mekhilef <i>et al.</i> , 2012; Robalinho & Santos, 2021; Wendt <i>et al.</i> , 2000)
03	Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz Energética	Revista Brasileira de Educação Ambiental; Revista Eletrônica de Materiais e Processos; Renewable and Sustainable Energy Reviews	(Bizerra <i>et al.</i> , 2018; Saron, 2007; Stambouli & Traversa, 2002)
02	Hidrogênio e suas aplicações como combustível	Ensaio e Ciência; Química Nova	(Silva, 2016; Ticianelli <i>et al.</i> , 2005)
08	Aplicações das Células a Combustível	Research, Society and Development; Química Nova; Agrogeoambiental; Revista Geografia, Meio Ambiente e Ensino; Revista de Política Agrícola; Journal of Power Sources.	(Andrade <i>et al.</i> , 2020; Brito <i>et al.</i> , 2020; Camparin <i>et al.</i> , 2007; Chohfi & Valença, 2009; Franciscan, 2020; Gentil, 2010; Joensen & Rostrup-Nielsen, 2002; Maia <i>et al.</i> , 2007)

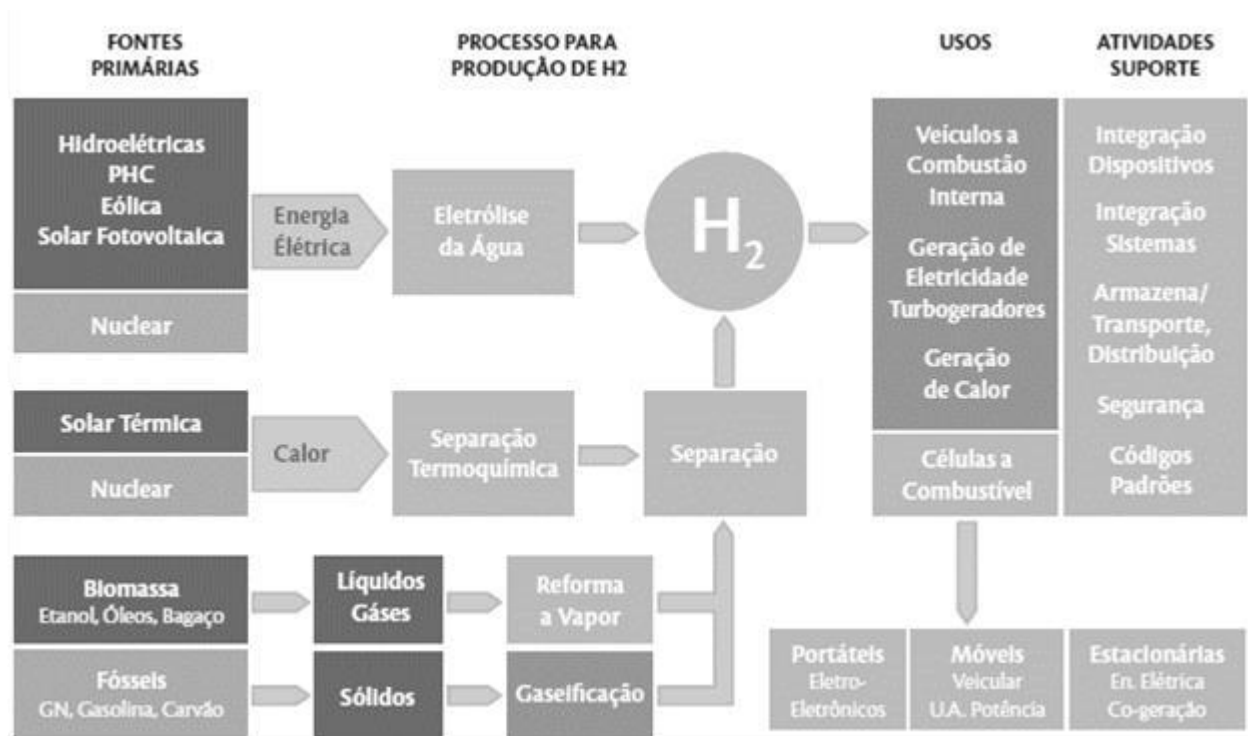
Fonte: Autores.

#### 3.1 Células de Combustível

Conforme Stambouli e Traversa, (2002) uma célula de combustível é um dispositivo de conversão de energia química em energia elétrica nas quais se combinam eletroquimicamente um combustível gasoso (representado pelo gás hidrogênio) e uma substância oxidante como o oxigênio presente no ar, por meio de eletrodos e através de um eletrólito condutor de íons, produzindo água ao final do processo.

Entretanto, o gás hidrogênio não é encontrado na sua forma elementar na natureza, uma vez que este se encontra sempre ligado a outro elemento ou composto químico; devendo ser produzido a partir de outro método (Silva, 2016). Entre esses processos estão: sua fabricação a partir da biomassa (Chohfi & Valença, 2009), e dos biocombustíveis como o etanol (Maia *et al.*, 2007); ou utilizando energia elétrica a partir das fontes renováveis existentes (hidráulica, eólica, solar e fotovoltaica) que por meio da eletrólise da água pode ser convertida em energia química com produção de hidrogênio (Braga, 2015). Todos esses procedimentos vinculados às células de combustível colocam o hidrogênio como um elemento de integração entre essas diversas tecnologias, promovendo sua geração a partir de vários insumos e processos, como se pode observar na Figura 2 do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CGEE, 2010).

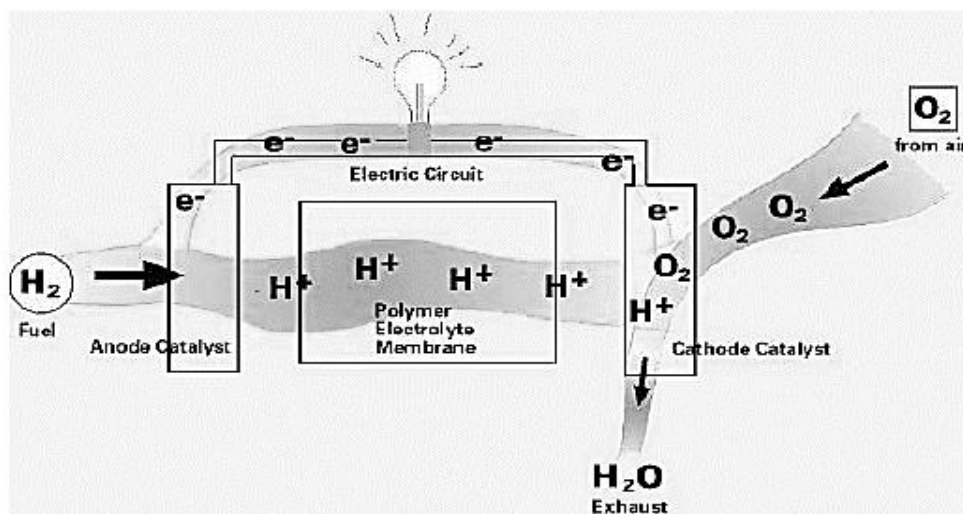
**Figura 2** - Possíveis rotas para utilização e produção do hidrogênio como vetor energético.



Fonte: Centro de Gestão de Estudos Estratégicos - CGEE (2010, p. 11).

Ainda conforme os autores, sobre o funcionamento interno da célula de combustível, Costa (2007) afirma que ela é formada por dois eletrodos (ânodo e cátodo) e entre eles está um eletrólito. O gás hidrogênio passa através do ânodo, sendo oxidado em cátions hidrônios (H<sup>+</sup>) que migram através do eletrólito, com liberação de elétrons que formarão a corrente elétrica. O gás oxigênio por sua vez entra pelo cátodo, reage com os íons H<sup>+</sup> presentes na solução formando água como subproduto, conforme a Figura 3 a seguir.

**Figura 3** - Princípio de Funcionamento de uma Célula de Combustível.



Fonte: Costa (2007).

Diante disto, as células de combustível são classificadas a partir do tipo de eletrólito utilizado, pois é a partir dele que se pode inferir a temperatura de operação da célula, o combustível apropriado para sua utilização e as reações químicas que ocorrerão no interior dela. Elas estão divididas em cinco grupos, a saber: Alcalina (Alkaline Fuel Cell - AFC); Eletrólito Polimérico (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell - PEMFC); Ácido Fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell - PAFC); Carbonato Fundido (Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC) e Óxido Sólido (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC), sendo que as três primeiras operam a baixas temperaturas (50 – 210 °C) e as duas últimas em temperaturas mais elevadas (630 – 1000 °C).

Na última década, muitos trabalhos científicos, oriundos da China, dos Estados Unidos e da Coreia do Sul, têm sido realizados na perspectiva de promoverem o desenvolvimento de pesquisas na área de Ciência, Tecnologia e Inovação – CI&T, direcionados aos estudos de viabilidade econômica e na produção de catalisadores e células à combustível de óxido sólido (Andrade *et al.*, 2020).

### 3.2 Tipos de Células à Combustível

#### 3.2.1 Alkaline Fuel Cell – AFC

A célula alcalina foi à precursora das células mais modernas. O seu modo de funcionamento consiste em uma série de metais não preciosos como eletrodos e catalisadores das reações químicas no ânodo e no cátodo, e como eletrólito uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH). Possui um bom desempenho e grande eficiência de funcionamento (83%), sendo bastante utilizada em viagens espaciais desde a década de 1960 (Wendt *et al.*, 2000)

As AFC's geralmente operam numa temperatura entre 60 e 90°C; todavia projetos recentes têm demonstrado resultados eficientes numa faixa de 23 a 70°C. Elas são classificadas como células de combustível de baixas temperaturas com utilização de catalisadores de baixo custo, como o níquel, por exemplo. Com produção combinada de calor e eletricidade (PCCE), as AFC's podem chegar a uma eficiência superior a 80%, com eficiência elétrica em torno de 60%, podendo gerar eletricidade acima de 20 kW. Atualmente são empregadas em submarinos, barcos, empilhadeiras e no setor de transportes (Camparin *et al.*, 2007).

Entretanto, sua desvantagem consiste em possuir grande facilidade de contaminação por gás carbônico e monóxido de carbono que reagem efetivamente com o hidróxido de potássio, exigindo em sua operação oxigênio e hidrogênio puro, o que inviabiliza sua comercialização pelo alto custo dos materiais empregados. Consequentemente, uma preocupação atual nesse tipo de célula é encontrar um substituto para o KOH (Mekhilef *et al.*, 2012).

#### 3.2.2 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell – PEMFC

São células que operam a baixas temperaturas e possuem como eletrólito uma membrana polimérica chamada de Proton Exchange Membran Fuel Cell – PEMFC, sendo as mais promissoras para o uso em automóveis. Isso se deve ao fato de serem mais leves e menores que as outras células de combustível, de fácil acionamento e desligamento, podendo dar início de imediato ao funcionamento de um carro; além de possuírem alta eficiência e baixa emissão de poluentes, chegando a não emitir óxidos de nitrogênio (NOx) mesmo utilizando no cátodo entrada de ar atmosférico (Wendt *et al.*, 2000).

Conforme Harris (2007), uma única célula combustível produz apenas 0,7 volts, havendo a necessidade de se combinar várias delas a fim de aumentar sua voltagem. Um pacote contendo 200 células combustíveis pode produzir 94 kW de energia contínua e atingir picos da ordem de 129 kW.

Além disso, para que haja a transferência dos prótons do gás hidrogênio para o cátodo é necessário que a membrana da PEMFC esteja continuamente hidratada. Temperaturas acima de 80 °C comprometem o funcionamento da célula por desidratação da mesma devido à perda de água por evaporação. Os cientistas buscam desenvolver PEMFC que operem a temperaturas abaixo de 0 °C, ou ambientes com baixa umidade e altas temperaturas (Nice, 2007). A célula de combustível de

metanol direto – DMFC também faz parte da PEMFC. Seu funcionamento é parecido com o da PEMFC, todavia, o combustível utilizado para sua operação é o metanol, que por ser tóxico, inviabiliza sua utilização no setor automobilístico. (Costa, 2007).

### 3.2.3 Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC

As células a ácido fosfórico foram desenvolvidas na década de 60 pela empresa United Technology Corporation. Elas utilizam eletrodos de papel carbono e como eletrólito ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ). O ácido fosfórico é um líquido incolor transparente, utilizado em fertilizantes, detergentes, aromatizante alimentar e produtos farmacêuticos. Sua condutividade elétrica é baixa em baixas temperaturas, de modo que a PAFC pode operar na faixa de 150 – 220°C. A 40°C a operação contínua do equipamento e sua partida são prejudicadas pela solidificação do ácido fosfórico (Linardi *et al.*, 2001).

A platina é utilizada como catalisador para acelerar as reações e a água produzida no sistema é utilizado para aquecimento. O monóxido de carbono (CO) também pode prejudicar a célula de combustível, ao ser produzido pelo aquecimento dos eletrodos, e comprometer a eficiência e o desempenho da PAFC. Além disso, esse tipo de célula combustível não necessita de gás oxigênio puro para sua operação, uma vez que o gás carbônico ( $CO_2$ ) não afeta diretamente o seu funcionamento. O custo inicial da PAFC é alto, pela utilização do oxigênio molecular presente no ar (21%) e pela utilização da platina como revestimento dos eletrodos. Atualmente, os sistemas operam com capacidade de 200 Kw, todavia já foram testados sistemas com capacidades superiores (11 MW). A eficiência elétrica desse equipamento gira em torno de 40 a 50% e sua PCCE em torno de 85% (Mekhilef *et al.*, 2012).

### 3.2.4 Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC

As células de combustível de carbonato fundido (MCFC's) operam a elevadas temperaturas. Na MCFC a reação no eletrodo de hidrogênio ocorre entre o hidrogênio combustível ( $H_2$ ) e o íon carbonato ( $CO_3^{2-}$ ) que ao reagirem formam dióxido de carbono, água e elétrons. No ânodo ocorre à conversão do gás metano ( $CH_4$ ) e da água em hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono. Esses últimos passam por reações eletroquímicas com liberação de elétrons, gerando a corrente elétrica (Ticianelli *et al.*, 2005).

As MCFC's são empregadas atualmente em usinas de carvão e gás natural e em aplicações elétricas industriais e militares. Suas principais vantagens e desvantagens estão atreladas a sua alta temperaturas de funcionamento. Elas não requerem catalisadores provenientes de metais nobres para as reações de oxirredução eletroquímica. Também não requerem altos custos de desenvolvimento de infraestrutura para instalação. Contudo, é necessário muito tempo de funcionamento para atingir a temperatura e a potência geradora desejada (Wendt *et al.*, 2000).

### 3.2.5 Solid Oxide Fuel Cell – SOFC

Da mesma forma que as MCFC, as células de combustível de óxido sólido (SOFC) também operam a elevadas temperaturas principalmente por possuírem um eletrólito cerâmico sólido de óxido metálico. Na célula de combustível, os hidrocarbonetos e o ar são reformulados em uma mistura de gás hidrogênio e monóxido de carbono. A cerâmica utilizada é formada por Zircônio estabilizado com Ytrio, o que garante sua alta estabilidade química e térmica e condutividade elétrica pura.

As SOFC's possuem uma capacidade de geração de centenas de MW, sendo utilizadas em sistemas de geração e distribuição de energia em larga escala. Sua PCCE varia em torno de 70 a 80% e o calor gerado como subproduto é reaproveitado para gerar mais eletricidade. Possuem baixas emissões de gases nocivos ( $NO_x$  e  $SO_x$ ). Essas células de combustível podem ser implementadas em sistemas locais de geração de energia, principalmente em zonas rurais que não

possuam acesso as redes públicas. Atrelados a isso está o baixo custo de manutenção e sua operação é livre de ruídos (Mekhilef *et al.*, 2012).

### 3.3 Aplicações e eficiência das células de combustível

Tendo em vista que existem vários tipos de células combustíveis, cada um com suas especificidades, é necessário esclarecer qual tecnologia se adequa melhor a uma finalidade específica. As células de combustível possuem uma longa faixa de geração de energia, variando entre kW e MW; dessa forma células de pequena escala podem ser aplicadas em equipamentos eletrônicos pessoais como celulares portáteis e computadores domésticos; aplicações em média escala incluem veículos automotivos, aparelhos domésticos, aplicações militares e transporte público; e as de larga escala se enquadram na geração e distribuição de energia em rede (Mekhilef *et al.*, 2012).

Existem inúmeras aplicações para as células de combustível, cada uma exigindo seus próprios requisitos de operação. Mas para a maioria das células suas aplicações podem ser classificadas nos seguintes grupos a seguir:

- I. Emprego com alta confiabilidade de potência: no setor de telecomunicações, nas instalações de produção de alta tecnologia e processamento de dados, nos call centers (Franchi, 2009; Robalinho & Santos, 2021);
- II. Aplicações com minimização ou eliminação de emissões: áreas industriais, aeroportos, automóveis, autocarros e regiões com rigorosas normas de emissão (Brito *et al.*, 2020; Saron, 2007)
- III. Aplicações para áreas com acesso limitado à rede de distribuição: em dispositivos portáteis e áreas remotas (Vieira *et al.*, 2019);
- IV. Aplicações para a gestão biológica de resíduos: utilização de biocélulas de combustível para o tratamento de águas residuárias (Franciscon, 2020).

Entretanto, embora as células de combustível possuam um grande leque de aplicações, uma delas tem ganhado destaque nos últimos anos; a fabricação de veículos elétricos a base de células de combustível (FCEV). Costa (2007) afirma que os motores de combustão interna dos carros comuns possuem uma baixa eficiência, em torno de 16%. Isso se deve ao fato de que boa parte da energia proveniente da combustão, é empregada principalmente para movimentar o veículo. Sua eficiência energética é limitada, pois esses automóveis não conseguem transformar toda energia térmica em energia mecânica, havendo dissipação de parte dela para o meio, conforme determinam as leis da termodinâmica e o Ciclo de Carnot.

Ainda conforme o autor, os veículos que operam a base de células de combustível possuem entre 40 e 45% de eficiência podendo com o avanço da tecnologia, aumentar ainda mais esse percentual. A empresa de automóveis: Toyota, com seu modelo de automóvel FCVH-4 movido a hidrogênio, obteve uma eficiência de 48%; três vezes superior a um modelo similar convencional movido à gasolina. Entre os outros benefícios estão: à redução das emissões de gases do efeito estufa; além de veículos a células de combustível funcionar com menos vibrações e ruídos; e algumas rotinas de manutenção como a troca de óleo, poderão ser eliminadas.

Conforme Nice (2007), se a célula de combustível for alimentada por gás hidrogênio puro, sua eficiência na transformação de energia química em energia elétrica gira em torno de 80%. Entretanto, essa eletricidade gerada precisa ser convertida em energia mecânica para o funcionamento do carro. Isso é realizado acoplando-se ao motor elétrico a um alternador que fará essa conversão, tornando a eficiência média final em torno de 64%.

Para Joensen e Rostrup-Nielsen (2002), caso a fonte combustível não seja hidrogênio puro, o equipamento precisará de um reformulador que transformará os hidrocarbonetos e álcoois em gás hidrogênio impuro, o que diminui a eficiência da célula de combustível. Entretanto, mesmo com essa redução, Nice (2007) afirma que um carro movido a células de combustível possui uma eficiência em torno de 20% variando até 65% dependendo do combustível utilizado para sua operação.



#### 4. Conclusão

A partir desse trabalho pode-se concluir que as pesquisas em desenvolvimento e aprimoramento das tecnologias de células de combustível associadas à Economia de Hidrogênio possibilitam uma maior redução das emissões dos gases do efeito estufa; e é uma alternativa viável a modificação da matriz energética dominante baseada em fontes não renováveis. Além disso, os diferentes usos dessas técnicas permitem sua operação em pequena, média e larga escala de geração de energia, possibilitando sua aplicação nas mais variadas áreas.

Sobre os tipos de células de combustível pode-se observar que a célula alcalina - AFC possui alta eficiência e funciona em baixas temperaturas; todavia seu custo operacional é muito alto devido à utilização de hidrogênio e oxigênio puros para evitar contaminação do eletrólito por monóxido e dióxido de carbono. Já as células de eletrólito polimérico – PEMFC possuem uma densidade de corrente e de potência elevadas e sua operação é bem flexível por serem células pequenas e leves; sendo promissora sua aplicação em carros elétricos, chegando a uma eficiência maior do que os carros convencionais movidos a motores de combustão interna.

A célula de ácido fosfórico – PAFC, opera numa faixa de temperatura mais elevada (160 a 200°C) e possui uma potência geradora da ordem de megawatt (MW), podendo ser utilizada em unidades estacionárias. Sua desvantagem é a contaminação da célula por monóxido de carbono e sua eficiência pode ser limitada pela corrosão da célula pelo ácido fosfórico. A célula de carbonato fundido – MCFC opera a altas temperaturas (600 – 750°C) e possui alta tolerância ao monóxido e dióxido de carbono, com eletrodos de metais como o níquel, barateando seu custo. É exigido bastante tempo para atingir sua temperatura de operação e potência desejada, tonando-se esse fator, uma desvantagem do processo. As de óxido sólido – SOFC também operam a elevadas temperaturas e são utilizadas em processos de geração e distribuição de energia de larga escala. Logo, possuem baixas emissões de gases poluentes e podem ser empregadas em áreas rurais, onde o acesso à rede pública seja restrito.

Diante do exposto, pode-se inferir que mais trabalhos na área de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) devem ser executados a fim de aprimorar e alavancar as pesquisas de utilização do hidrogênio e de outros insumos com menos teor de carbono em células combustíveis; a fim de em breve podermos ter essa tecnologia limpa a nosso alcance e promover através dela, a mitigação dos efeitos deletérios da utilização de combustíveis fósseis sobre o meio ambiente. Estudos futuros poderão integrar resultados de pesquisas científicas de cada célula de combustível (mensurando informações de sua estrutura e desenvolvimento, temperatura de operação, catalisadores e eficiência energética) a fim de verificar sua evolução e melhora tecnológica ao longo do tempo.

#### Referências

- Andrade, C. E. C. de.; Holanda, F. S. R.; Ubirajara, W. de M.; Bandeira, A. A. & Santos, L. D. V. (2020). Uma análise bibliométrica da literatura aplicada a transferência de tecnologia em células a combustível. *Research, Society and Development*, 9(12), e22391211021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i12.11021>
- Bizerra, A. M. C.; Queiroz, J. L. A. de; Coutinho, D. A. M. (2018). O impacto ambiental dos combustíveis fósseis e dos biocombustíveis: as concepções de estudantes do ensino médio sobre o tema. *Revista Brasileira de Educação Ambiental*, 13(3), 299–315.
- Braga, G. G. A. (2015). 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.
- Brito, M. L.; Ferreira Júnior, J. M.; Santos, L. C. L. dos; & Simonelli, G. (2020). Advances in ethanol autothermal reform for hydrogen gas production: a review. *Research, Society and Development*, 9(5), e126953070. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i5.3070>
- Camparin, R. H. *et al.* (2007). Avaliação da eficiência de uma célula a combustível estacionária de ácido fosfórico. *Química Nova*, 30(7), 1523–1528.
- Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE. (2011). Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade: 2010 – 2025. Ministério da Ciência e Tecnologia. CGEE – Brasília, DF.
- Chohfi, F. M.; Valença, G. P. (2009). Novos produtos e energia a partir de biomassa, uma matéria prima abundante e renovável para o Brasil. *Revista Agrogeambiental*, 1(1), 80–90.

- Costa, D. A. (2007). Células Combustíveis: uma abordagem contemporânea. [Trabalho de Conclusão de Curso]. Curso de Licenciatura em Física. Universidade Católica de Brasília., DF. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/9180276-Daniel-alves-costa-celulas-combustiveis-uma-abordagem-contemporanea.html>> Acessado em: 26. mar. 2022.
- Franchi, T. P. (2009). Utilização de células a combustível tipo PEM como alternativa na geração auxiliar em instalações elétricas de grande porte. [Dissertação de Mestrado]. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Franciscon, A. (2020). Produção de energia como subproduto em estações de tratamento de esgoto sanitário. *Revista Geografia, Meio Ambiente e Ensino*, 11(1), 75–90.
- Gentil, L. V. (2010). Energia da madeira na matriz brasileira. *Revista de Política Agrícola*, 19(3), 57–66.
- Harris, T. (2017). Como funciona o Hy-wire da GM. Disponível em: < <http://carros.hsw.uol.com.br/hy-wire-da-gm.htm> > Acesso em: 14 jan 2017.
- Joensen, F.; Rostrup-Nielsen, J.R. (2002). Conversion of hydrocarbons and alcohols for fuel cells. *Journal of Power Sources*, n.105, 195-201.
- Linardi, M.; Aricó, E. M.; Franco, E. G. (2001). Células de energia. *Revista de Química Industrial*, 717(3), 7–13.
- Maia, T. A. *et al.* (2007). Produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor de etanol utilizando catalisadores Cu/Ni// $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Química Nova*, 30(2), 339–345.
- Mekhilef, S.; Saidur, R.; Safari, A. (2012). Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 981–989.
- Nice, K.; Strickland, J. (2017). How Fuel Cells Works. Disponível em: < <http://auto.howstuffworks.com/fuel-cell.htm> > Acesso em: 14 jan. 2017.
- Robalinho, E., & Santos, K. A. dos. (2021). Célula a combustível tipo PEMFC: energia renovável e eficiente. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, 13(3), 1–9.
- Rohrich, S. S. (2008). Descarbonização do regime energético dominante: perspectivas para a economia do hidrogênio no Brasil. [Tese de Doutorado]. Programa de Pós-Graduação em Política Científica e Tecnológica. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, SP.
- Saron, C. (2007). Mudanças climáticas globais e o desenvolvimento da tecnologia de células a combustível. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 2(2), 16–28.
- Silva, I. A. da. (2016). Hidrogênio: combustível do futuro. *Ensaio e Ciência: C. Biológicas, Agrárias e da Saúde*, 20(2), 122–126.
- Stambouli, A. B.; Traversa, E. (2002). Fuel cells, an alternative to standard sources of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(3), 297–306.
- Ticianelli, E. A.; Camara, G. A.; Santos, L. G. R. A. (2005). Eletro-catálise das reações de oxidação de hidrogênio e de redução de oxigênio. *Química Nova*, 28(4), 664–669.
- Vieira, L. de S., Souza, I. R. de., & Brabo, D. R. (2019). Análise da necessidade de alternativas energéticas para lugares de difícil acesso: São Sebastião da Boa Vista (Marajó), viabilidade e alternativas menos poluidoras (1. ed). Ananindeua, PA: Editora Tacaiúnas. Disponível em: <[https://editoraitacaiunas.com.br/wp-content/uploads/2019/ebook/ebook\\_alternativas\\_energeticas.pdf?tm-epo-counter=1&tcaddtocart=3988](https://editoraitacaiunas.com.br/wp-content/uploads/2019/ebook/ebook_alternativas_energeticas.pdf?tm-epo-counter=1&tcaddtocart=3988)> Acesso em: 26 mar. 2022.
- Wendt, H.; Götz, M.; Linardi, M. (2000). Tecnologia de Células a combustível. *Química Nova*, 23(4), 538–546.