

Análise da Difusão Tecnológica de Células de Combustível Baseadas em Etanol

Analysis of the Technological Diffusion of Ethanol-Based Fuel Cells

Fabricio Costa Silva¹, Cristina M. Quintella¹

¹Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil

Resumo

As células de combustível baseadas em etanol, que utilizam o biocombustível diretamente ou como insumo para geração de hidrogênio, têm sido objeto de atenção nos últimos anos devido ao seu potencial de grande eficiência aliada ao baixo impacto ambiental. Este estudo pretende mapear, com suporte da plataforma Orbit, o estágio de desenvolvimento dessa tecnologia a partir da análise de documentos de patentes e desenvolver modelos matemáticos que descrevam um panorama da difusão da inovação nesse campo. Foram realizadas análises que permitiram examinar o comportamento histórico geral dos depósitos de patentes referentes a esse tipo de célula combustível, bem como de subtipos como as DEFCs e SOFCs. Os modelos construídos sugerem que as células de alta temperatura têm perspectivas promissoras de inserção no mercado em médio prazo, enquanto as DAFCs encontram-se em escala anterior de maturidade, exigindo maior esforço de pesquisa a fim de contornar desafios relativos aos seus aspectos construtivos e de custo-efetividade.

Palavras-chave: Patentes; Células de Combustível; Etanol.

Áreas Tecnológicas: Biocombustíveis. Prospecção Tecnológica. Células de Combustível.

Abstract

Ethanol-based fuel cells, which use biofuel either directly or as an input for hydrogen generation, have attracted attention in recent years due to their potential for high efficiency combined with low environmental impact. This study seeks to map the development stage of this technology with support from the Orbit platform, through the analysis of patent documents and the development of mathematical models that depict an overview of innovation diffusion in this field. Analyses were conducted to examine the overall historical trends of patent filings related to this type of fuel cell, as well as specific subtypes like DEFCs and SOFCs. The models developed suggest that high-temperature fuel cells have promising prospects for medium-term market entry, while DAFCs are at an earlier maturity stage, requiring additional research efforts to address challenges related to their structural aspects and cost-effectiveness.

Keywords: Patents; Fuel Cells; Ethanol.



1 Introdução

A energia é indiscutivelmente um recurso essencial para o progresso socioeconômico e uma questão central quando se fala de desenvolvimento sustentável, dado que seu impacto ambiental influencia diversas dimensões da vida humana (Guzowski; Martin; Zabaloy, 2021). Embora as transições históricas das economias agrícolas para industriais e, posteriormente, para as baseadas no conhecimento tenham alterado os padrões de consumo e tecnologias (IEA, 2017), o cenário atual revela uma persistente dependência de combustíveis fósseis. Estes são responsáveis por 90% das emissões de CO₂ e 35% de metano antropogênico (Energy Transitions Commission, 2023), representando um obstáculo significativo para a transição energética rumo a fontes mais limpas e eficientes.

Diante disso, entidades como o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) tem reiterado a necessidade urgente de reduzir emissões de gases de efeito estufa a fim de evitar impactos catastróficos nos recursos hídricos, ecossistemas e saúde humana (Energy Transitions Commission, 2023; IPCC, 2023). Nesse cenário, as células de combustível, particularmente as baseadas em etanol, surgem como uma solução promissora por seu potencial de aliar eficiência energética e baixas emissões.

As Células de Combustível (no inglês designadas *Fuel Cell*, ou FC) são dispositivos de conversão eletroquímica de energia que podem produzir eletricidade diretamente a partir de vários combustíveis, incluindo hidrogênio, hidrocarbonetos, compostos nitrogenados, etc., com a ajuda de um oxidante como o ar ambiente (Wang *et al.*, 2024). Embora quase todos os hidrocarbonetos conhecidos, além do carbono puro, possam ser utilizados como combustíveis, o mais amplamente utilizado é o hidrogênio (Tampe; Höse; Götze, 2023). Do ponto de vista conceitual, a descoberta do princípio de funcionamento das células de combustível remonta ao século XIX, porém os primeiros dispositivos funcionais dessa natureza só foram produzidos na década de 1950, quando o interesse em sua aplicação aumentou à medida que a NASA começou a buscar alternativas para suprimento energético para voos espaciais (DiCicco, 2024).

Tais dispositivos se notabilizaram por apresentar eficiência de conversão e produção elétrica superiores às tecnologias convencionais à combustão interna, além de emitirem menos substâncias tóxicas, como NO_x, ozônio e particulados (Badwal *et al.*, 2015). Essa característica lhes confere um valioso atributo *eco-friendly*. Além disso, sua modularidade, os baixos níveis de ruído, a alta utilização de combustível e a capacidade de cogeração de calor e energia no local de uso final as tornam uma opção atrativa para aplicações portáteis, estacionárias e de transporte (Qasem; Abdulrahman, 2024).

Entre os principais tipos de células de combustível, destacam-se:

- 1) Células de Combustível Alcalinas (AFCs);
- 2) Células de Combustível de Ácido Fosfórico (PAFCs);
- 3) Células de Combustível de Óxido Sólido (SOFCs);
- 4) Células de Combustível de Carbonato Fundido (MCFCs);
- 5) Células de Combustível de Membrana de Troca de Prótons (PEMFCs);
- 6) Células de Combustível de Membrana de Troca de Ânions (AEMFCs).

Em linhas gerais, os diversos modelos diferem entre si pelos materiais utilizados, eletrólitos para a condução iônica interna, e temperaturas de operação (Tampe; Höse; Götze, 2023). Porém, todas compartilham de um mesmo *design* fundamental (Rolo; Costa; Brito, 2024). Conforme descrito por Huang *et al.* (2022), ao comparar aspectos operacionais de alguns dos modelos citados, como composição dos eletrólitos, temperatura de operação, eficiência, complexidade construtiva, e custos de fabricação e de componentes, à medida que a temperatura de operação se eleva, a eficiência do sistema é favorecida, exigindo, em contrapartida, uma complexidade construtiva cada vez mais alta e também mais financeiramente dispendiosa.

No que se refere ao insumo de alimentação de células de combustível, o etanol, um recurso renovável, versátil e amplamente utilizado em ramos como saúde, alimentício e farmacêutico, além do setor energético, tem captado bastante atenção nos últimos anos. Sua capacidade de catalisar reações redox em temperatura ambiente, manejo seguro e infraestrutura de distribuição em larga escala consolidada o destacam como alternativa viável ao hidrogênio (Osman *et al.*, 2024). No Brasil, o segundo maior produtor mundial, o etanol já desempenha um papel crucial na matriz energética, impulsionado por políticas de descarbonização e segurança energética (Vidal, 2022; Cebri, 2023). Além disso, o país avança na produção de etanol de segunda geração, derivado de biomassa lignocelulósica, que pode reduzir em até 80% as emissões de gases de efeito estufa (IEA, 2022).

O etanol pode ser utilizado nas chamadas *Direct Ethanol Fuel Cells* (DEFCs), ou células de combustível de etanol direto, que se destacam pela simplicidade, especialmente em aplicações portáteis e no transporte, sendo ideais para dispositivos compactos e portáteis (Pethaiah *et al.*, 2015). Em geral, as DEFCs são categorizadas em ácidas ou alcalinas. As DEFCs ácidas tipicamente empregam

membranas de troca de prótons (PEMs), enquanto as alcalinas usam membranas de troca de ânions (AEMs) (Osman *et al.*, 2024). Dessa forma, as DEFCs são comumente entendidas como variações das células dos tipos PEMFC e AEMFC alimentadas com etanol.

A literatura também descreve outros tipos de *Fuel Cell* que podem ser alimentadas com etanol, porém operando em alta temperatura e dependentes de processos de reforma para geração de hidrogênio. São elas as Células de Óxido Sólido – ou *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC), e as Células de Carbonato Fundido – ou *Molten Carbonate Fuel Cells* (MCFC). A temperatura de operação elevada dessas células lhes confere flexibilidade no uso de combustíveis (hidrogênio, gás natural, etanol etc.) e alta eficiência. De acordo com Fiuza *et al.* (2012), o processo de reforma pode ocorrer externa ou internamente. No caso particular da SOFC, os autores indicam que as células desse tipo podem operar com três diferentes configurações de reforma de etanol, cada uma com características específicas.

No Reformador Externo (ER-SOFC), o etanol é convertido em hidrogênio em um sistema separado antes de ser alimentado na célula, o que evita a formação de carbono no ânodo e melhora a durabilidade, sendo ideal para grandes sistemas estacionários devido à viabilidade de armazenamento e ao transporte de hidrogênio puro. No Reformador Interno Indireto (IIR-SOFC), o reformador está próximo à célula, mas fisicamente separado, permitindo um controle térmico eficiente e aproveitando o calor gerado pela operação, o que aumenta a eficiência. Já no Reformador Interno Direto (DIR-SOFC), o etanol é introduzido diretamente no ânodo, em que a reforma e a geração de eletricidade ocorrem simultaneamente, resultando em um *design* compacto e leve, adequado para sistemas móveis e de médio porte, embora a formação de carbono represente um desafio técnico para sua durabilidade.

Conforme evidenciado anteriormente, o etanol como insumo para células de combustível tem perspectivas futuras promissoras, porém ainda não totalmente delineadas. Por esse motivo, este trabalho se propõe a proceder, a partir da análise de documentos de patentes, um mapeamento do estado da técnica, bem como construir modelos que representem o perfil de difusão da tecnologia de células de combustível baseadas em etanol, aqui entendidas como aquelas que:

- 1) são alimentadas diretamente com etanol; ou
- 2) utilizam o etanol como insumo para geração de hidrogênio por meio de processos de reforma.

No contexto desta pesquisa, as células de combustível baseadas em etanol serão referidas também pela sigla CCBEs.

2 Metodologia

Para alcançar o objetivo deste trabalho, optou-se pela análise de documentos de patentes, utilizando a plataforma Orbit como instrumento principal. A Orbit, embora seja uma solução paga, foi disponibilizada gratuitamente para os discentes do Programa de Pós-Graduação em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação (Profinit). Quintella, Pires e Ribeiro (2020) destacam que a ferramenta é amplamente reconhecida por sua robustez e pelas funcionalidades avançadas, como diversidade de campos pesquisáveis, integração de sistemas de classificação de patentes (IPC, CPC, ECLA, JP-FI, USPC) e recursos de análise rápida e personalizada, consolidando-a como uma das ferramentas mais poderosas no mercado de análise de patentes.

Com os procedimentos metodológicos definidos, iniciou-se a etapa de busca de dados. Inicialmente, testes exploratórios foram realizados utilizando uma chave de busca preliminar, denominada “chave genérica”:

((FUEL_CELL)/TI/AB/CLMS AND (EAPD < 2023-01-01))

Essa primeira abordagem tinha como intuito fazer referência a patentes relacionadas a células de combustível em geral (*Fuel Cell*) depositadas antes de 1º de janeiro de 2023 (EAPD < 2023-01-01). Essa chave recuperou 164.507 resultados, uma quantidade extremamente elevada, como era de se esperar. Após sucessivos refinamentos, chegou-se à seguinte chave de busca, chamada “chave específica”:

(((((FUEL_CELL OR FC) NOT BATTER+)/TI/AB/CLMS AND (HYDROCARBON OR ETHANOL OR ALCOHOL+ OR LIQUID_FUEL+)/TI/AB/CLMS) AND ((H01M-008/10 OR (H01M-008/1011 OR H01M-008/10/11) OR H01M-008/12) NOT (A61P OR A61K))/IPC/CPC) AND (EAPD < 2023-01-01))

A chave específica retornou 6.398 resultados e foi estruturada considerando os blocos de campos de texto, códigos indexadores e corte temporal, seguindo estratégia detalhada no Quadro 1.

Quadro 1 – Estratégia de seleção de documentos de patente

CAMPO DE BUSCA	EXPRESSÃO	OBJETIVO DO FILTRO
TI/AB/CLMS	Fuel_cell OR FC	Limitar pesquisa a documentos que mencionam <i>Fuel Cell</i> (células de combustível) ou seu acrônimo (FC)
(Termos no título, resumo ou reivindicações)	Not Batter+	Excluir resultados fora do escopo (baterias e variações do termo)
	Hydrocarbon OR Ethanol OR Alcohol+ OR Liquid_fuel+	Limitar pesquisa a documentos relacionados direta ou indiretamente a etanol
/IPC/CPC (classificação IPC ou CPC)	H01M-008/10	Restringir a busca a patentes que mencionam células de combustível com eletrólitos sólidos (apontando para os tipos PEMFC, AEMFC ou SOFC)
	H01M-008/1011	Abranger na pesquisa documentos que mencionam células de combustível de álcool direto (que incluem o subtipo DEFC)
	H01M-008/12	Abranger na pesquisa documentos que mencionam células operando em alta temperatura (especialmente SOFC)
	NOT (A61P OR A61K)	Excluir da pesquisa documentos fora do escopo
EAPD (Data do depósito da família de patentes)	< 2023-01-01	Filtrar patentes depositadas antes de 2023 (respeitando período de sigilo)

Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo (2024)

Sobre os Códigos Indexadores, o processo de refinamento das chaves de busca revelou como mais adequados os seguintes códigos da Classificação Internacional de Patentes (CIP):

- 1) **H01M 008/10**: Células a combustível com eletrólitos sólidos;
- 2) **H01M 008/1011**: Células a combustível de álcool direto (DAFC);
- 3) **H01M 008/12**: Células a combustível com eletrólitos sólidos funcionando em alta temperatura.

Esses códigos foram selecionados para restringir os resultados aos relacionados a dispositivos passíveis de utilização de etanol. Além disso, após observação de dados recuperados não aderentes ao propósito do trabalho, foram excluídos os resultados associados aos códigos da CIP A61P e A61K, que fazem referência a atividades terapêuticas ou preparações médicas. Por fim, quanto ao corte temporal, para garantir a relevância e a atualidade dos dados e, ao mesmo tempo, respeitar o período de sigilo de 18 meses após o depósito, aplicou-se um filtro que considerou apenas famílias de patentes depositadas antes de 1º de janeiro de 2023.

No que diz respeito aos gráficos, optou-se por estabelecer o ano de 1990 como marco inicial, com o propósito de proporcionar uma visualização mais clara e confortável dos dados. É importante destacar, entretanto, que o conjunto analisado inclui patentes depositadas em anos anteriores a essa data. Para a análise de dados, foram utilizados recursos nativos da plataforma Orbit, complementados pelas ferramentas Microsoft Excel, Google Sheets e a linguagem de programação Python. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos na próxima seção.

3 Resultados e Discussão

As séries históricas referentes às chaves genérica e específica encontram-se plotadas na Figura 1. Pela análise do gráfico, verifica-se que no período focado – 1990 a 2022 – o comportamento das curvas representativas de ambas as chaves é bastante similar na maior parte do tempo. Fica evidente um crescimento acentuado do início dos anos de 1990 até a primeira metade dos anos 2000, seguido de retração que se estende até o ano de 2015. Este último ano marca o início de um descolamento entre as curvas, uma vez que, enquanto os resultados da chave genérica voltam a um crescimento exponencial, os da

chave específica experimentam um crescimento bem mais discreto, longe de retornar ao patamar de meados dos anos 2000. Levando em consideração que o combustível mais comumente utilizado em células de combustível é o H_2 , pode-se dizer que o comportamento da curva genérica está correlacionado à indústria do hidrogênio. Mais do que isso, dada a similaridade comportamental das curvas genérica e específica até 2015, assume-se que os mesmos marcos históricos que influenciaram a curva genérica também foram relevantes para o comportamento da curva específica até o referido ano de corte.

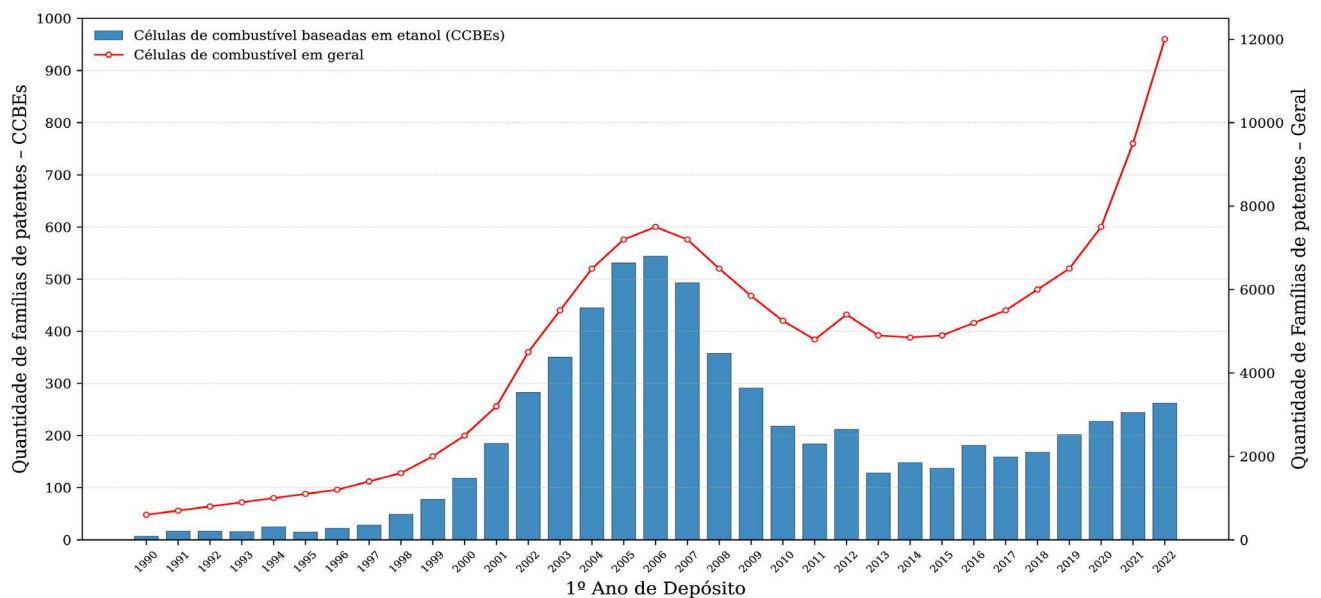
Em uma breve retrospectiva, cabe salientar que, antes de 1990, o desenvolvimento das células de combustível foi liderado pela NASA, que incorporou essa tecnologia em missões espaciais na década de 1960. A entidade também contribuiu para o surgimento da Célula de Combustível de Membrana de Troca de Prótons (PEMFC) e o aperfeiçoamento das Células Alcalinas, ao fornecer financiamento a terceiros para desenvolvimento de protótipos (Dicicco, 2024). Então, em 1990, a NASA revelou o desenvolvimento da Célula a Combustível de Metanol Direto (DMFC), num movimento que aproximava a tecnologia de células de combustível de seu uso comercial em larga escala (Qasem; Abdulrahman, 2024). Dessa forma, a década de 1990 marcou uma abertura ao mercado que culminou em um incremento expressivo nos depósitos de patentes associadas às *fuel cells* na década seguinte, conforme mostra a Figura 1.

Outro elemento relevante para o crescimento do número de depósito de patentes relacionadas à tecnologia

de células de combustível foi a crescente atenção a questões ambientais. Como mostrado na Figura 2, dois importantes marcos conjunturais de interesse ambiental, a Rio 92 e a assinatura do Protocolo de Quioto, foram realizados nesse período, este último coincidindo com o início da fase de crescimento exponencial em ambas as curvas genérica e específica. Amparados pelos resultados do primeiro relatório do IPCC, esses eventos compartilhavam o fato de representarem pontos de inflexão no esforço global para promover o desenvolvimento sustentável ao destacar a necessidade de ações coordenadas para mitigar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e preservar o meio ambiente, favorecendo investimentos em tecnologias *eco-friendly*. Esse novo *modus operandi* privilegiava discussões em torno do hidrogênio e de biocombustíveis em geral, como o etanol.

Indo adiante, observa-se que a primeira década dos anos 2000 foi extremamente prolífica em termos de depósitos de patentes. Uma das possíveis causas para esse *boom* pode ter sido a criação em novembro de 2003 da Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio (IPHE), iniciativa do Departamento de Energia dos Estados Unidos. Tratava-se de um esforço internacional para organizar e implementar iniciativas de PD&I, uso comercial e demonstração de tecnologias de hidrogênio e células a combustível (CGEE, 2010). Um exemplo notável dessa “era de ouro” foi a criação do primeiro protótipo de veículo elétrico com célula de combustível de etanol direto (DE-FCEV), demonstrado por estudantes da Universidade de Offenburg, na Alemanha, na edição europeia do Shell Eco-Marathon em maio de 2007 (Badwal *et al.*, 2015).

Figura 1 – Séries históricas de depósitos de patentes sobre células de combustível em geral e células de combustível baseadas em etanol



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo com dados extraídos da plataforma Orbit (2024)

Observa-se pela análise das Figuras 1 e 2 que a partir de 2006 começa a ocorrer um declínio nos depósitos de patentes de células de combustível, tanto na perspectiva geral quanto especificamente sobre as CCBEs. A tendência favorável às atividades de PD&I vistas anteriormente, que foram impulsionadas pelo IPHE e pela agenda ambiental então em evidência, foi interrompida pela crise econômica de 2008, que afetou diversos setores produtivos. Como resultado, os investimentos foram reduzidos, e empresas e governos passaram a priorizar tecnologias com retorno mais rápido. Nesse cenário, veículos à bateria (BEVs) ganharam destaque: em 2010, o Nissan Leaf foi o primeiro veículo elétrico a ser produzido em série, e em 2013 o Tesla Model S deu mais vigor à então incipiente indústria de veículos a bateria.

O impacto desses eventos sobre o depósito de patentes de células de combustível aparentemente se estendeu até 2015, quando a assinatura do Acordo de Paris neste mesmo ano (United Nations, 2015) e a criação do Hydrogen Council em 2017 (Hydrogen Council, 2017) contribuíram para um novo incremento no número de depósitos ao revitalizar o interesse pelo hidrogênio e suas tecnologias derivadas.

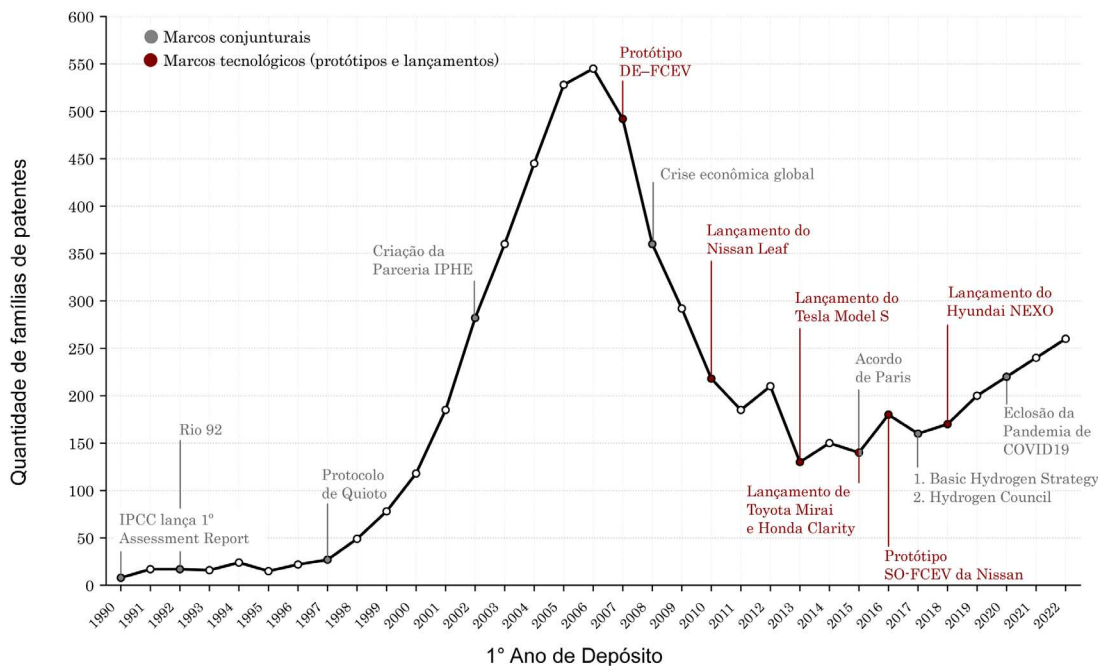
Outros fatores que sustentaram esse viés de alta foram o lançamento pelo Japão de sua primeira estratégia nacional de hidrogênio, a Basic Hydrogen Strategy, em 2017, que influenciou outros países, e o advento dos primeiros veículos com célula de combustível de hidrogênio com relativo sucesso comercial, Toyota Mirai e Honda Clarity (2015). Em 2016, houve também o anúncio da Nissan do desenvolvimento de um veículo com tecnologia SOFC

alimentado por etanol, cujo protótipo foi apresentado em agosto no Rio de Janeiro, durante os Jogos Olímpicos (Nissan Motors, 2016).

Sobre o descolamento das curvas genérica e específica a partir de 2015, este trabalho não chegou a explicações conclusivas. No entanto, os dados analisados sugerem que isso é consequência dos desafios técnicos consideráveis ainda a serem superados para o desenvolvimento das CCBEs, evidenciando que este campo de estudo ainda carece de maior aprofundamento em termos de pesquisa e pode estar restrito a nichos. As células de combustível convencionais, por outro lado, já estão no mercado há décadas e encontram-se num estágio de desenvolvimento bem mais avançado, atraindo muito mais atenção e investimentos que se traduzem em maior quantidade de patentes. No final da série, observa-se expressivo número de depósitos de patentes entre 2019 e 2022 relativos à chave genérica e um crescimento moderado relativo às CCBE, numa demonstração de que os dados não capturaram os efeitos da pandemia de Covid-19.

Quando se observa a distribuição geográfica dos depósitos de patentes elaborada a partir da chave específica, verifica-se que o Japão, que já desempenha um papel central no cenário global de tecnologias de hidrogênio devido a sua infraestrutura avançada e sua estratégia nacional, também é destaque quando enfocadas as células de combustível baseadas em etanol. A Figura 3 distingue duas perspectivas acerca da geografia das patentes: o número de patentes por país de proteção (gráfico a) e o número por país de primeira prioridade (gráfico b).

Figura 2 – Eventos que influenciaram depósitos de patentes sobre células de combustível baseadas em etanol



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo com dados extraídos da plataforma Orbit (2024)

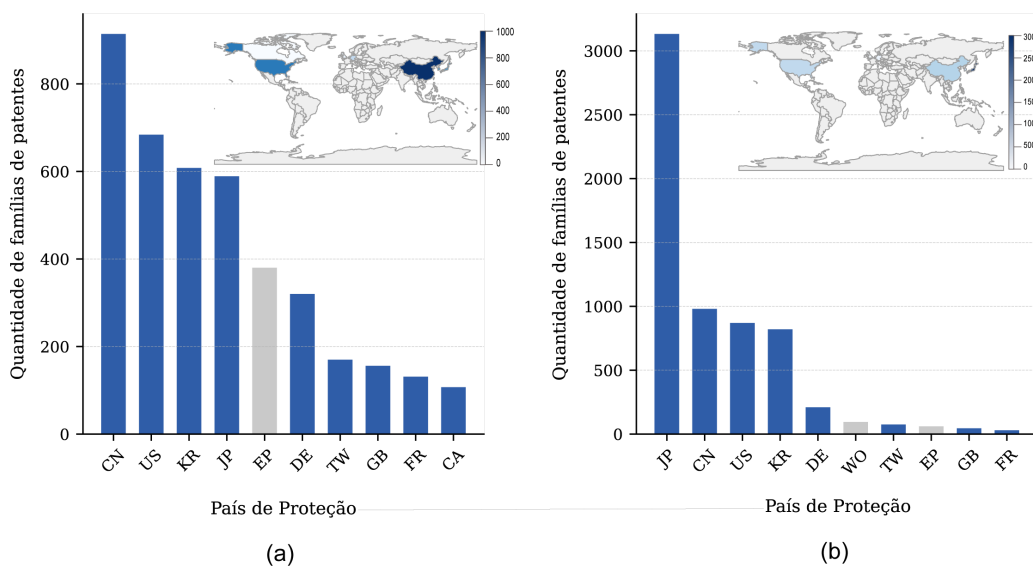
No gráfico (a), observa-se que a China é o território mais acessado para proteção de patentes, seguida por Estados Unidos, Coreia do Sul e Japão. Além disso, o gráfico também destaca a presença significativa de patentes registradas sob a sigla EP, que representa um sistema centralizado de patentes europeias que permite que um único pedido seja submetido para múltiplos países europeus, economizando tempo e recursos para os inventores. Essa concentração revela que os depositantes desenvolveram uma estratégia focada em potenciais grandes mercados consumidores, especialmente o asiático, o americano e o europeu, que já detêm as maiores frotas de veículos elétricos com células de combustível (IEA, 2023), e, portanto, são territórios em que a incorporação de CCBs no mercado automotivo seria mais rápida. No gráfico (b), observa-se o Japão com uma liderança incontestável como país de primeira prioridade, numa indicação de que é principal vetor do desenvolvimento tecnológico das CCBs.

Acrescente-se que, de acordo com Kaur *et al* (2024), o uso de dispositivos DEFC em nível prático ainda é limitado devido à necessidade de eletrocatalisadores baratos e de alto

desempenho para catalisar o processo do ânodo, no qual ocorre a reação de oxidação do etanol. Os mesmos autores explicam que embora exista um grande potencial comercial para as DEFCs, há vários obstáculos para maximizar seu desempenho: catalisadores de metais nobres de custo elevado, vida útil reduzida do eletrocatalisador, além de desafios no gerenciamento de água e calor.

Não surpreende, portanto, que, ao analisar a Figura 4, na qual consta a série de depósitos de patentes para chave específica conforme os códigos da CIP mais prevalentes, cujo detalhamento consta no Quadro 2, percebe-se que a atividade inventiva nesse recorte dá bastante destaque para o desenvolvimento de eletrodos e mecanismos de controle de pressão e temperatura (disposições auxiliares). Outro ponto relevante que emerge da Figura 4 é o destaque para as células com eletrólitos sólidos e de alta temperatura, sendo que as SOFCs reúnem essas duas últimas características. Isso sugere que células de combustível do tipo SOFC têm sido um dos direcionadores do desenvolvimento de células de combustível baseadas em etanol.

Figura 3 – Famílias de patentes por (a) país de proteção e por (b) país de primeira prioridade



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo com dados extraídos da plataforma Orbit (2024)

Quadro 2 – Top 5 de Códigos IPC mais prevalentes para chave específica

ORDEM	IPC	PERCENTUAL	DESCRIÇÃO
1	H01M-008/10	64,74%	Células de combustível com eletrólitos sólidos
2	H01M-008/02	36,87%	Células a combustível, sua fabricação - Detalhes
3	H01M-008/04	29,01%	Células a combustível, sua fabricação - Disposições auxiliares
4	H01M-004/86	23,09%	Eletrodos inertes com atividade catalítica
5	H01M-004/88	20,71%	Eletrodos inertes com atividade catalítica – processos de manufatura

Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo com dados extraídos da plataforma Orbit (2024)

Examinando especificamente os dados referentes a patentes que continham códigos relacionados a células de alta temperatura e a DAFCs (células de álcool direto), que são subtipos das CCBEs, procedeu-se uma modelagem matemática com o intuito de criar um panorama específico da difusão das referidas tecnologias. Tais dados foram representados na Figura 5 a partir de curvas S e suas respectivas curvas ajustadas pelo modelo. As curvas em S, ao representar resultados cumulativos de depósitos de patentes, permitem observar as diferentes fases do ciclo de vida tecnológico, refletindo sua evolução ao longo do tempo (Zartha *et al.*, 2016).

A fim de suavizar a visualização das curvas S, realizou-se um ajuste similar ao aplicado por Speziali e Nascimento (2020), admitindo que os processos de difusão patentária podem ser matematicamente representados pela função logística, de comportamento sigmoidal. A conveniência de utilizar esse tipo de função reside no fato de que ela é adequada para descrever fenômenos com crescimento inicial lento, seguido de uma fase de aceleração, e, posteriormente, uma estabilização, refletindo bem o comportamento observado na difusão tecnológica (Griliches, 1957; Mansfield, 1961; Bass, 1969; Meade; Islam, 2006).

Da modelagem, emergiram as equações a seguir para células baseadas em etanol sem segmentação (1); células

baseadas em etanol de alta temperatura (2); e células a álcool direto (3):

$$(1) \quad y = 5750,85 - \frac{5750,85}{1 + e^{-\frac{t-18,03}{3,37}}}, \quad R^2 = 0,9892$$

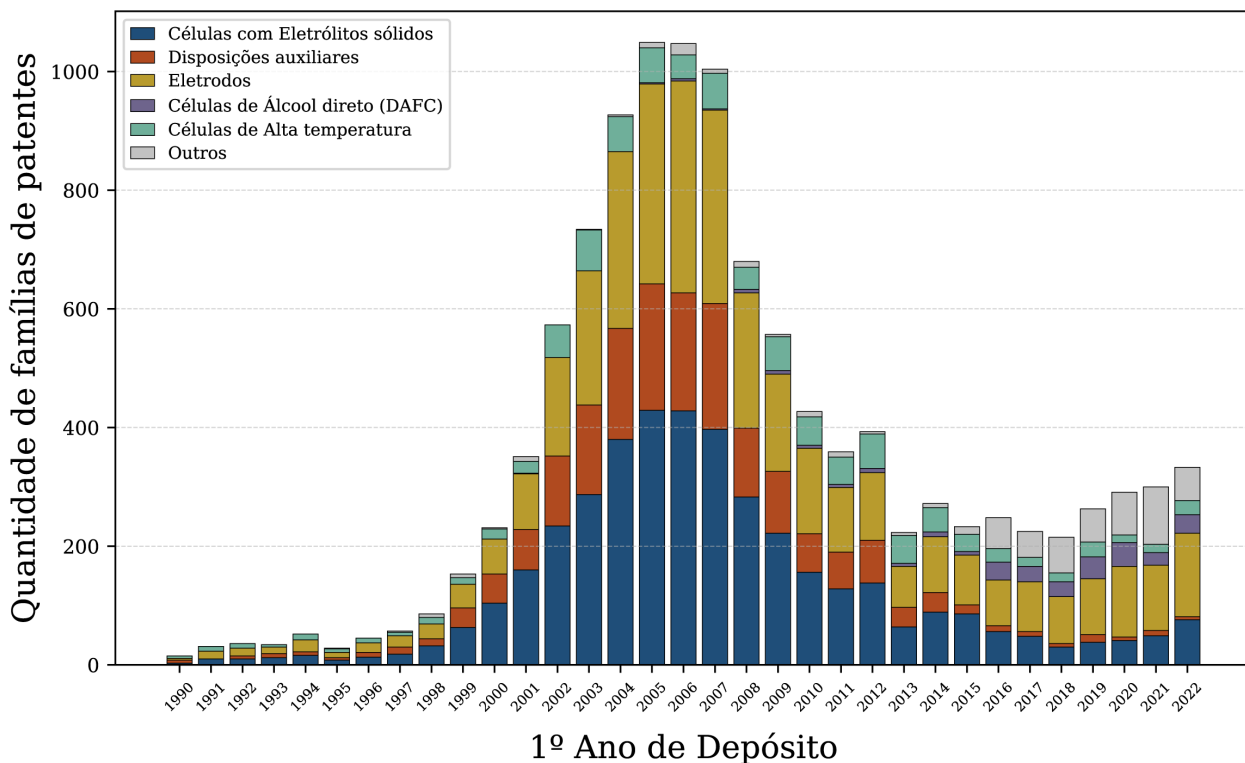
$$(2) \quad y = 951,66 - \frac{951,66}{1 + e^{-\frac{t-19,02}{3,67}}}, \quad R^2 = 0,9982$$

$$(3) \quad y = 528,05 - \frac{528,05}{1 + e^{-\frac{t-32,70}{3,62}}}, \quad R^2 = 0,9965$$

Essas equações apresentam coeficientes de determinação (R^2) próximos a 1, indicando um excelente ajuste dos modelos aos dados observados, o que sugere que a função logística captura bem o processo de difusão patentária para essas tecnologias.

Analisando isoladamente a Figura 5 (a), pode-se inferir que a tecnologia em termos gerais atingiu um platô. No entanto, observando as segmentações para células de alta temperatura e de álcool direto, verifica-se que o desenvolvimento tecnológico das células de alta temperatura, este sim, está em fase de estagnação, enquanto as DAFCs persistem na fase exponencial. Isso sugere que as células de alta temperatura atingiram uma maturidade tal que já lhes permitiria ser incorporadas pelo mercado, enquanto as DAFCs ainda estariam se consolidando.

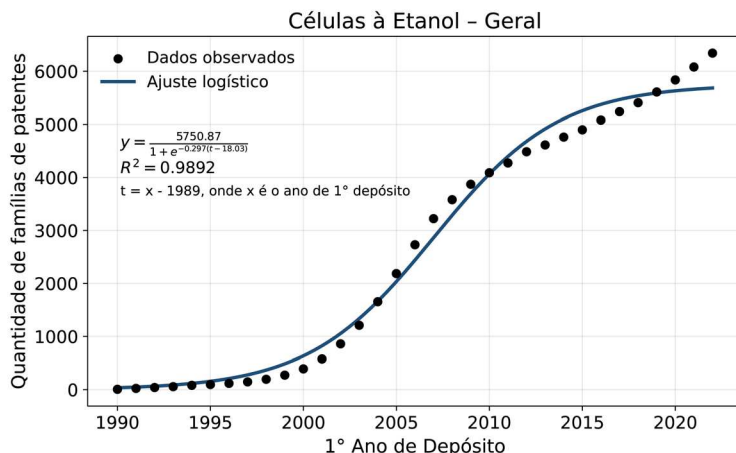
Figura 4 – Série histórica de depósitos de patentes de células de combustível baseadas em etanol segmentada de acordo com os códigos da CIP



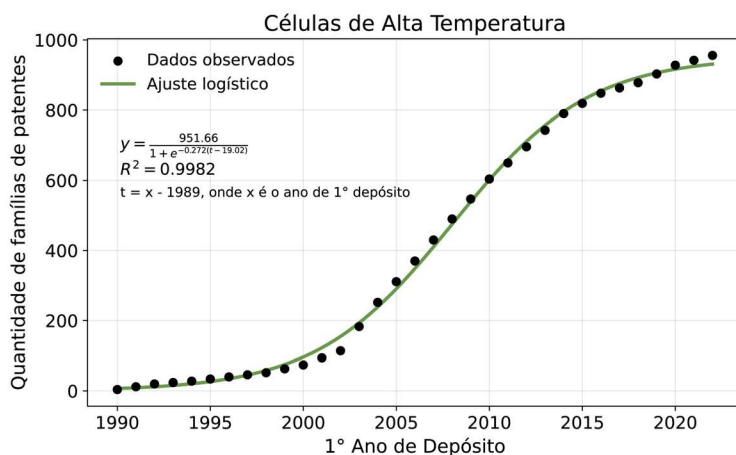
Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo com dados extraídos da plataforma Orbit (2024)

Figura 5 – Curvas S com respectivos ajustes: (a) Resultados sem segmentação: $R^2 = 0,989$; (b) Células combustíveis de alta temperatura: $R^2 = 0,998$; (c) Células DAFC: $R^2 = 0,997$

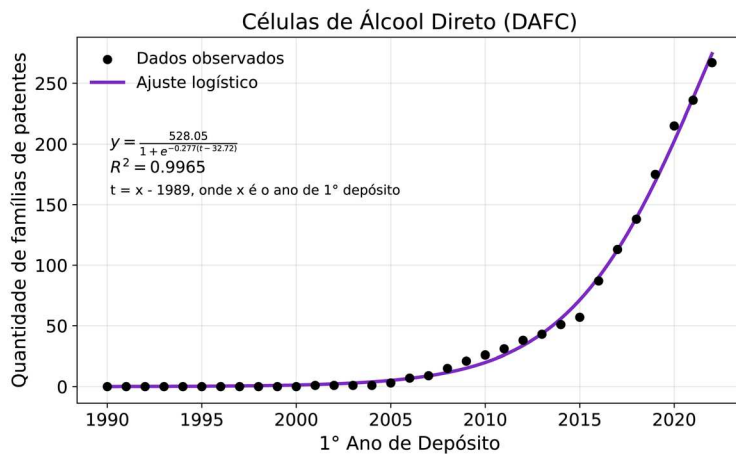
(a) Resultados gerais cumulativos e ajuste



(b) Células de alta temperatura



(c) Células de álcool direto (DAFC)



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo com dados extraídos da plataforma Orbit (2024)

Por fim, ao contextualizar a realidade brasileira à luz dos resultados obtidos com a chave específica, restringindo as patentes depositadas em território nacional, observa-se que foram recuperados apenas cinco resultados, sumarizados no Quadro 3. A título de comparação, usando o mesmo critério, o Brasil fica atrás de países como Bulgária (6), Portugal (9), Arábia Saudita (10), África do Sul (21) e Índia (74) e bem distante de Japão (553), Coreia do Sul (601), Estados Unidos (656) e China (894).

No Brasil, a Nissan Motors está entre as depositantes de três das patentes sobre CCBEs encontradas. Na lista aparecem ainda Toyota Motors, AVL list (em parceria com a Nissan) e a 3G S Technologies Pte. A julgar pela natureza dos negócios empreendidos pelos depositantes, verifica-se que a tecnologia está sendo projetada majoritariamente para o mercado automotivo no país.

Sobre as soluções propostas pela Nissan Motors, destaca-se um sistema integrado de controle de fluxos de combustível em uma célula tipo SOFC (patente BR112018011215), que otimiza a eficiência energética e aumenta a vida útil do ânodo. A empresa também propôs um *design* aprimorado de célula de combustível, focado na maximização da eficiência e na mitigação de contaminações nos eletrodos causadas por subprodutos do combustível (patente BR112018000299). Em parceria com a AVL List, a Nissan também introduziu um método avançado para o desligamento seguro de sistemas de células de combustível, com o objetivo de evitar danos químicos e térmicos (patente BR112019001925). Esse sistema utiliza mecanismos automatizados para regular dinamicamente os fluxos de gases e as temperaturas, permitindo um processo de desligamento controlado.

Quadro 3 – Patentes relacionadas a células de combustível baseadas em etanol protegidas no Brasil

PATENTE	DEPOSITANTE	PROPOSTA	BENEFÍCIOS
BR112018011215 (concedida)	Nissan Motors	Sistema SOFC e método para reduzir a oxidação do ânodo durante períodos de inatividade.	Maior vida útil, eficiência energética e segurança.
BR102020004097 (concedida)	Toyota Motors	Método para fabricação de MEAs, otimizando a tinta de catalisador e reduzindo falhas no processo de transferência.	Produção de MEAs de alta qualidade, maior eficiência, menor custo e maior durabilidade.
BR112018000299 (concedida)	Nissan Motors	Sistema com células de combustível em série, minimizando a reação de metano para evitar queda de temperatura.	Maior eficiência, desempenho estável e redução de perdas energéticas.
BR112022015719 (Em análise)	3G S Technologies PTE	Tecnologias para reforma de combustíveis, captura e reutilização de carbono e geração de energia em sistemas integrados.	Redução de emissões, flexibilidade no uso de combustíveis e maior sustentabilidade.
BR112019001925 (concedida)	AVL List e Nissan Motors	Método de desligamento controlado para células de combustível, reduzindo a formação de monóxido de carbono.	Maior vida útil do sistema, redução de emissões e operação mais limpa.

Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo com dados extraídos da plataforma Orbit (2024)

A Toyota Motor, por sua vez, buscou explorar materiais mais avançados para os substratos dos eletrodos no conjunto membrana-eletrodos (MEA), visando ampliar a resistência à degradação em sistemas que utilizam etanol como combustível e prolongar a vida útil dos componentes. Já a 36S Technologies aprimorou o processo de reforma de etanol para a produção de hidrogênio de alta pureza, desenvolvendo um reformador eletroquímico que utiliza membranas avançadas para otimizar a eficiência energética, reduzir emissões e minimizar os custos operacionais (patente BR112022015719), o que, em tese torna, o uso do

etanol ainda mais competitivo como fonte de hidrogênio para células de combustível.

Analisando a realidade local pelo prisma da chave genérica, foram obtidos 486 resultados. Destes, 91 correspondem a famílias de patentes com primeira prioridade no Brasil, com destaque para os seguintes depositantes: Comissão Nacional de Energia Nuclear, Universidade de São Paulo, Universidade Federal do Rio de Janeiro e Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Principais depositantes de patentes de primeira prioridade no Brasil

DEPOSITANTE	FAMÍLIAS DE PATENTES
Comissão Nacional de Energia Nuclear	16
Universidade de São Paulo (USP)	5
COPPE (UFRJ)	4
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	4
Novocell Sistemas de Energia	3
Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D)	2
Electrocell Indústria & Comércio de Equipamentos Elétricos	2
Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP	2
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE	2
Oxiteno	2

Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo com dados extraídos da plataforma Orbit (2024)

Ao examinar o resumo das patentes dentro desse recorte mais amplo, verifica-se que o foco inventivo local para células de combustível em geral está em aumentar a eficiência, reduzir custos, prolongar a vida útil e ampliar as aplicações das células a combustível. As soluções propostas englobam desde o desenvolvimento de novos materiais com propriedades otimizadas até a criação de processos de fabricação mais eficientes e a otimização do *design* das células.

Restringindo os resultados a patentes já concedidas (29), é possível destacar: patente BR202017019434, da universidade baiana Univasf, um modelo de utilidade que propõe o uso de materiais microporosos e matrizes poliméricas para a bioprodução de eletricidade em células de combustível; patente BR102015017672, depositada em conjunto pela UFRGS e pela concessionária Equatorial Energia, que descreve um dispositivo para análise de rendimento eletroquímico e elétrico de célula a combustível do tipo SOFC ao avaliar o desempenho do cátodo, do eletrólito e do ânodo de uma célula a combustível unitária operando em altas temperaturas; e a patente BR102014003438, da USP, que apresenta um sistema para veículos híbridos que combina um motor a combustão interna com uma célula a combustível. O objetivo principal é otimizar a produção de energia a partir do etanol, gerando um combustível mais eficiente para o motor e hidrogênio puro para a célula a combustível.

Esses exemplos demonstram que a produção patentária no Brasil no campo das células de combustível, embora pouco expressiva em termos quantitativos, tem potencial de alta qualidade. Pela combinação de iniciativas já em escala de protótipo – como veículos SOFCs com etanol e parcerias para desenvolvimento de estações de reforma do

biocombustível em hidrogênio – e das regulamentações da indústria do hidrogênio ora em avanço no Brasil, abre-se uma nova janela de oportunidades para o desenvolvimento local de CCBs. Particularmente, as recém-aprovadas leis, Lei n. 14.948/2024 e Lei n. 14.990/24, que compõem o marco legal do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono e incentivam o uso de etanol como uma das rotas tecnológicas para produção de hidrogênio no país, tendem a atrair atenção de investidores e contribuir para disseminar iniciativas mais abrangentes de PD&I nesse campo específico. Diante desse cenário de um ambiente regulatório robusto e favorável ao desenvolvimento de Cadeias de Valor do Hidrogênio locais, a expectativa é a de que a produção tecnológica relativa às CCBs ganhe tração.

4 Considerações Finais

O presente estudo sugere que o desenvolvimento tecnológico das células de combustível baseadas em etanol ainda tem um significativo espaço para progredir. Desafios técnicos relativos ao desenvolvimento de componentes críticos desses dispositivos, especialmente eletrodos e catalisadores, que impactam diretamente em indicadores como eficiência, vida útil e custos de produção, além de desafios no gerenciamento de água e calor, têm sido um obstáculo para sua viabilidade comercial e parecem ter contribuído para um crescimento moderado no número de depósitos de patentes nesse campo particular em comparação com tecnologias de células de combustível convencionais alimentadas com hidrogênio. Os modelos aqui descritos apontam que tecnologia SOFC se destaca entre as células de combustível baseadas em etanol e sugere que sua inserção no mercado deve acontecer em médio prazo, dado o perfil de difusão da tecnologia. Em contrapartida, as DEFCs

apresentam desafios que demandam pesquisa básica e, portanto, estão ainda em escala inferior de maturidade tecnológica. Apesar de sua infraestrutura amplamente disponível para distribuição de etanol, o Brasil não tem apresentado destaque no desenvolvimento de patentes de células de combustível baseadas no biocombustível, contrariando sua vocação agroindustrial, numa indicação de que talvez sejam necessários incentivos de ordem pública para desenvolvimento local da tecnologia, a exemplo do que ocorreu no Japão em relação às células de combustível convencionais.

5 Perspectivas Futuras

A tecnologia de células de combustível baseadas em etanol tem se mostrado promissora devido aos seus atributos *eco-friendly* e por explorarem o potencial de um combustível renovável com cadeia de suprimentos consolidada. Para acelerar os avanços, faz-se necessário superar desafios técnicos, especialmente aqueles relacionados à eficiência catalítica, à durabilidade dos eletrodos e aos custos de produção. Portanto, melhorias em catalisadores e materiais resistentes à degradação são essenciais para que células dessa natureza se tornem competitivas. Nesse sentido, tais componentes críticos devem continuar sendo o foco de pesquisa e de depósitos de patentes nos próximos anos. Especificamente em relação às células tipo SOFC, alguns desafios para o uso automotivo prenunciado para médio prazo são a miniaturização dos protótipos e a integração do reformador à célula, dados os requisitos de peso e espaço, a fim de viabilizar produção escalável e de baixo custo. Além disso, é essencial que sejam duráveis, resistindo a ciclos térmicos e mecânicos, com robustez suficiente para operação prolongada. No caso das DEFCs, acrescente-se que são necessários esforços no sentido de aprimorar as membranas poliméricas, haja vista a alta permeabilidade ao etanol das membranas comerciais de Nafion. Portanto, a expectativa é a de que os depósitos de patentes se concentrem sobre possíveis soluções para esses obstáculos técnicos nos próximos anos.

Referências

- BADWAL, S. P. S. *et al.* **Direct ethanol fuel cells for transport and stationary applications – a comprehensive review.** *Applied Energy*, v. 145, p. 80-103, 2015.
- BASS, Frank M. A new product growth model for consumer durables. *Management Science*, v. 15, n. 5, p. 215-227, 1969.
- CEBRI – CENTRO BRASILEIRO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS. **Neutralidade de carbono até 2050: cenários para uma transição eficiente no Brasil.** 2023. Disponível em: https://www.cebri.org/media/documentos/arquivos/PTE_RelatorioFinal_PT_Digital_.pdf. Acesso em: 12 ago. 2024.
- CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Hidrogênio energético no Brasil.** Brasília, 2010. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf. Acesso em: 18 mar. 2024.
- DICICCO, M. **Tech Today: NASA's Moonshot launched commercial fuel cell industry.** 2024. Disponível em: <https://www.nasa.gov/technology/tech-transfer-spinoffs/tech-today-nasas-moonshot-launched-commercial-fuel-cell-industry/>. Acesso em: 2 out. 2024.
- ENERGY INSTITUTE. **Statistical Review of World Energy 2024.** [2024]. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review>. Acesso em: 30 out. 2024.
- ENERGY TRANSITIONS COMMISSION. **Fossil fuels in transition: committing to the phase-down of all fossil fuels.** 2023. Disponível em: <https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/11/ETC-Fossil-Fuels-MainReport.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2024.
- FIUZA, R. *et al.* A utilização de etanol em célula a combustível de óxido sólido. *Química Nova*, v. 35, n. 8, 2012.
- GRILICHES, Zvi. Hybrid corn: an exploration in the economics of technological change. *Econometrica*, v. 25, n. 4, p. 501-522, 1957.
- GUZOWSKI, C.; MARTIN, M. M. I.; ZABALOY, M. F. Energy poverty: conceptualization and its link to exclusion – brief review for Latin America. *Ambiente & Sociedade*, v. 24, 2021.
- HYDROGEN COUNCIL. **Founding story.** Brussels, 2017. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/en/founding-story/>. Acesso em: 8 fev. 2024.
- HUANG, Y. *et al.* Thermal management of polymer electrolyte membrane fuel cells: a critical review of heat transfer mechanisms, cooling approaches, and advanced cooling techniques analysis. *Energy Conversion and Management*, v. 254, 2022.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Access Outlook 2017 – from poverty to prosperity.** 2017. Disponível em: https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2017/10/WEO2017SpecialReport_EnergyAccessOutlook.pdf. Acesso em: 13 ago. 2024.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Feedstock to biofuels: opportunities for advanced biofuels – supply chain analysis and reduction in CAPEX/OPEX.** 2022. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2023/05/The-Feedstock-to-Biofuels-Opportunities-for-advanced-biofuels.pdf>. Acesso em: 5 set. 2024.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2023 – catching up with climate ambitions.** 2023. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacfl4d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2024.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023: synthesis report.** 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf. Acesso em: 25 jul. 2024.

KAUR, J. *et al.* **Electrocatalytic ethanol oxidation reaction: recent progress, challenges, and future prospects.** *Discover Nano*, v. 19, art. 137, 2024.

MANSFIELD, Edwin. Technical change and the rate of imitation. *Econometrica*, v. 29, n. 4, p. 741–766, 1961.

MEADE, Nigel; ISLAM, Towhidul. Modelling and forecasting the diffusion of innovation – a 25-year review. *International Journal of Forecasting*, v. 22, n. 3, p. 519–545, 2006.

NISSAN MOTORS. **Nissan mostra veículo elétrico movido a célula de combustível de bioetanol no RenovaBio 2030.** 2016. Disponível em: <https://brazil.nissannews.com/pt-BR/releases/nissan-mostra-ve-culo-el-trico-movido-a-c-lula-de-combust-vel-de-bioetanol-no-renova-bio>. Acesso em: 25 set. 2024.

OSMAN, S. H. *et al.* Catalyst modification in direct ethanol fuel cell: an update. *Ionics*, v. 30, p. 5141–5158, 2024.

PETHAIAH, S. S. *et al.* The impact of anode design on fuel crossover of direct ethanol fuel cell. *Bulletin of Materials Science*, p. 273–278, 2016.

QASEM, N. A. A.; ABDULRAHMAN, G. A. Q. A recent comprehensive review of fuel cells: history, types, and applications. *International Journal of Energy Research*, v. 2024, art. 7271748, 2024.

QUINTELLA, C. M.; PIRES, E. A.; RIBEIRO, N. M. Sistemas de busca de patentes: análise comparativa entre Espacenet, Patentscope, Google Patents, Lens, Derwent Innovation Index e Orbit Intelligence. *Cadernos de Prospecção*, Salvador, v. 13, n. 1, 2020.

ROLO, I.; COSTA, V. A. F.; BRITO, F. P. Hydrogen-based energy systems: current technology development status, opportunities and challenges. *Energies*, v. 17, n. 1, p. 180, 2023.

SPEZIALI, M. G.; NASCIMENTO, R. da S.

Patentometria: uma ferramenta indispensável no estudo de desenvolvimento de tecnologias para a indústria química. *Química Nova*, v. 43, n. 10, p. 1538–1548, 2020.

TAMPE, A.; HÖSE, K.; GÖTZE, U. Sustainability-oriented assessment of fuel cells – a literature review. *Sustainability*, v. 15, n. 19, p. 14368, 2023.

TEIXEIRA, L. P. **Prospecção tecnológica: importância, métodos e experiências da Embrapa Cerrados.** 2013. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/981247/1/doc317.pdf>. Acesso em: 18 set. 2024.

VIDAL, M. **Agroindústria – etano.** 2022. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1409/3/2022_CDS_237.pdf. Acesso em: 2 jun. 2024.

WANG, Y. *et al.* Flexible fuel cells: a prospective review. *Energy Reviews*, v. 3, n. 4, p. 100099, 2024.

ZARTHA, J. W. *et al.* Technological life cycle analysis using S-curves. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 110, p. 257–266, 2016.

Sobre os Autores

Fabricio Costa Silva

E-mail: fabricio.costa@ufba.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7290-8049>

Mestre em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para Inovação pela Universidade Federal da Bahia em 2025.

Endereço profissional: Universidade Federal da Bahia, Instituto de Química, Câmpus de Ondina, Ondina, Salvador, BA. CEP: 40170-290.

Cristina M. Quintella

E-mail: cris5000tina@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3827-7625>

DPhil em Ciências Moleculares pela University of Sussex, UK em 1993.

Endereço profissional: Universidade Federal da Bahia, Instituto de Química, Departamento de Química Geral e Inorgânica, Câmpus de Ondina, Ondina, Salvador, BA. CEP: 40170-290.