

Informe SES

Inovação em Soluções Energéticas Sustentáveis

SEGUNDA EDIÇÃO

CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

PRODUÇÃO CIENTÍFICA E PATENTES

- Contextualização e motivação
- Tipo de Células a Combustível
- Aspectos metodológicos
- Panorama da produção científica global sobre células a combustível
- Panorama sobre a produção global de patentes sobre células a combustível

Informe iSES

**Inovação em Soluções
Energéticas Sustentáveis**

Segunda edição

**Células a Combustível
Produção Científica e Patentes**



Brasília-DF
Dezembro de 2023

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

Organização social supervisionada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)

Presidente

Fernando Cosme Rizzo Assunção

Diretores

Ary Mergulhão Filho

Carlos Roberto Fortner

C389i

Informe Inovação em Soluções Energéticas Sustentáveis - Informe ISES. Segunda edição - Células a combustível; produção científica e patentes. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2023.

52 p. il.

1. Célula a combustível. 2. Publicações. 3. Patentes. I. CGEE. II. Título.

CDU 606:620.951:621.352.6

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), SCS Qd 9, Torre C, 4º andar, Ed. Parque Cidade Corporate, CEP: 70308-200 - Brasília, DF, Telefone: (61) 3424 9600
<https://www.cgee.org.br/>

Todos os direitos reservados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Os textos contidos nesta publicação poderão ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos, desde que seja citada a fonte.

Referência bibliográfica:

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS- CGEE. **Informe Inovação em soluções energéticas sustentáveis - Informe ISES. Segunda edição** - Células a combustível; produção científica e patentes. Brasília, DF: CGEE, 2023. 52 p.

Este relatório é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do 2º Contrato de Gestão CGEE. - 18º Termo Aditivo/Ação: Internacionalização da CT&I Brasileira /Atividade: Inserção do CGEE em Agendas Internacionais - Projeto Agenda Positiva para a Mudança do Clima e do Desenvolvimento Sustentável 52.01.50.01/MCTI/2018.

Informe iSES

Inovação em Soluções Energéticas Sustentáveis

Segunda edição

Células a Combustível Produção Científica e Patentes

Supervisão

Fernando Rizzo Assunção

Líder

Marcelo Khaled Poppe

Equipe técnica do CGEE

Barbara Bressan

Daniella Fartes

Emilly Silva

Jackson Maia

Alina Cordeiro (estagiária)

Gabriela Britto (estagiária)

Assistente Administrativo

Rafael Metzner

Sumário

1. Contextualização e motivação	8
2. Tipo de células a combustível.....	10
3. Aspectos metodológicos	12
4. Panorama da produção científica global sobre células a combustível	13
4.1. Visão geral das publicações científicas sobre células a combustível	13
4.2. Caracterização da rede por <i>clusters</i> temáticos	16
4.2.1. <i>Cluster</i> 1: Otimização do sistema e aumento de performance	17
4.2.2. <i>Cluster</i> 2: PEMFC — célula a combustível de membrana polimérica de troca de prótons	19
4.2.3. <i>Cluster</i> 3: células de óxido sólido	22
4.2.4. <i>Cluster</i> 4: catalisadores — nanopartículas	24
4.2.5. <i>Cluster</i> 5: catalisadores de platina	26
4.2.6. <i>Cluster</i> 6: DMFC — célula a metanol direto	28
4.2.7. <i>Cluster</i> 7: células a combustível microbianas	30
4.2.8. <i>Cluster</i> 8: etanol	32
4.3. Análise sobre os países	35
4.3.1. Publicações brasileiras	36
5. Panorama sobre a produção global de patentes sobre células a combustível	40
5.1. Visão geral das patentes sobre células a combustível	40
5.2. Análise por tipos de Células a Combustível	44
5.3. Análise das patentes depositadas no Brasil	47
6. Considerações finais	50
7. Referências	51

Lista de Figuras

Figura 1: Palavras-chave da rede completa de artigos sobre células a combustível	13
Figura 2: Distribuição dos artigos por área de conhecimento do WoS	15
Figura 3: Evolução temporal do número de artigos sobre células a combustível	16
Figura 4: Nuvem de palavras-chave do <i>cluster 1</i>	17
Figura 5: 10 áreas do conhecimento mais frequentes no <i>cluster 1</i>	18
Figura 6: Evolução temporal da quantidade de artigos no <i>cluster 1</i>	19
Figura 7: Nuvem de palavras-chave do <i>cluster 2</i>	20
Figura 8: 10 áreas do conhecimento mais frequentes no <i>cluster 2</i>	21
Figura 9: Evolução temporal da quantidade de artigos no <i>cluster 2</i>	21
Figura 10: Nuvem de palavras-chave do <i>cluster 3</i>	22
Figura 11: 10 áreas do conhecimento mais frequentes no <i>cluster 3</i>	23
Figura 12: Evolução temporal da quantidade de artigos no <i>cluster 3</i>	23
Figura 13: Nuvem de palavras-chave do <i>cluster 4</i>	24
Figura 14: 10 áreas do conhecimento mais frequentes no <i>cluster 4</i>	25
Figura 15: Evolução temporal da quantidade de artigos no <i>cluster 4</i>	25
Figura 16: Nuvem de palavras-chave do <i>cluster 5</i>	26
Figura 17: 10 áreas do conhecimento mais frequentes no <i>cluster 5</i>	27
Figura 18: Evolução temporal da quantidade de artigos no <i>cluster 5</i>	27
Figura 19: Nuvem de palavras-chave do <i>cluster 6</i>	28
Figura 20: 10 áreas do conhecimento mais frequentes no <i>cluster 6</i>	29
Figura 21: Evolução temporal da quantidade de artigos no <i>cluster 6</i>	29
Figura 22: Nuvem de palavras-chave do <i>cluster 7</i>	30
Figura 23: 10 áreas do conhecimento mais frequentes no <i>cluster 7</i>	31
Figura 24: Evolução temporal da quantidade de artigos no <i>cluster 7</i>	31
Figura 25: Nuvem de palavras-chave do <i>cluster 8</i>	32
Figura 26: Evolução temporal da quantidade de artigos no <i>cluster 8</i>	34
Figura 27: Número de artigos por país do <i>cluster 8</i>	34

Figura 28: Países que mais publicaram no tema de células a combustível	36
Figura 29: Nuvem de palavras-chave dos artigos brasileiros	37
Figura 30: Distribuição das áreas do conhecimento da WoS para publicações brasileiras	38
Figura 31: Número de publicações brasileiras ao longo dos anos	39
Figura 32: Instituições brasileiras que mais publicam no tema de células a combustível	40
Figura 33: Evolução do número de patentes depositadas por ano	40
Figura 34: Distribuição dos depósitos de patentes por país	41
Figura 35: 15 países com maior número de depósitos	41
Figura 36: Principais depositantes do conjunto de patentes	42
Figura 37: Distribuição das 10 áreas do conhecimento mais frequentes dentre as patentes de células a combustível	43
Figura 38: Estruturas de códigos IPCs para as patentes de células a combustível	44
Figura 39: Depósitos de patentes do tipo PEMFC ao longo dos anos	45
Figura 40: Depósitos de patentes do tipo SOFC ao longo dos anos	45
Figura 41: Depósitos de patentes de DMFC ao longo dos anos	46
Figura 42: Número de patentes depositadas no Brasil por ano de prioridade	47
Figura 43: Principais depositantes de patentes no Brasil	48
Figura 44: Códigos IPCs mais frequentes das patentes depositadas no Brasil	49
Figura 45: Universidades brasileiras que realizam depósito de patentes de CC no Brasil	50

Lista de Tabelas

Tabela 1: Descrição dos principais tipos de células a combustível	11
Tabela 2: Palavras-chave mais frequentes da rede geral de células a combustível	14
Tabela 3: <i>Clusters</i> temáticos	16
Tabela 4: 20 palavras-chave mais frequentes do <i>cluster</i> 1	18
Tabela 5: 20 palavras-chave mais frequentes do <i>cluster</i> 2	20
Tabela 6: 20 palavras-chave mais frequentes no <i>cluster</i> 3	22
Tabela 7: 20 palavras-chave mais frequentes no <i>cluster</i> 4	24
Tabela 8: 20 palavras-chave mais frequentes no <i>cluster</i> 5	26
Tabela 9: 20 palavras-chave mais frequentes no <i>cluster</i> 6	28
Tabela 10: 20 palavras-chave mais frequentes no <i>cluster</i> 7	30
Tabela 11: 20 palavras-chave mais frequentes do <i>cluster</i> 8	33
Tabela 12: Palavras-chave mais frequentes das publicações brasileiras	37

1. Contextualização e motivação

A série *Informe Inovação em Soluções Energéticas Sustentáveis*, ou *Informe iSES*, busca produzir estudos estratégicos que visem a subsidiar processos de tomada de decisão em temas relacionados à energia e à transição energética. A primeira edição do Informe iSES teve foco o hidrogênio renovável, trazendo dados sobre publicações científicas, patentes e projetos comerciais no tema. Entre os principais resultados, observou-se a forte correlação do tema hidrogênio renovável com o tema de células a combustível (CC), o que é de se esperar, uma vez que a geração de energia, principalmente para mobilidade, por meio do uso do hidrogênio, é uma aplicação que tem sido vastamente estudada e desenvolvida com objetivo de contribuir para as metas de redução de emissões.

Uma célula ou uma pilha a combustível é um dispositivo que converte a energia química de um combustível diretamente em energia elétrica através de uma reação eletroquímica. As células a combustível operam silenciosamente e de maneira eficiente e confiável. Elas não emitem poluição particulada, podendo ter como

subproduto apenas água e oxigênio,¹ não possuem partes móveis e sua construção modular permite arranjos em diferentes escalas de potência. Além disso, as CC permitem o uso de combustíveis de fontes renováveis, como o hidrogênio verde e o etanol. Ainda, as células a combustível são mais eficientes, pois possuem a conversão em uma etapa – a conversão química para elétrica – diferentemente do que ocorre nos motores a combustão, que demandam múltiplos passos de conversão de energia (OMAR; MEHMET, 2014).

Os veículos alimentados a células a combustível também apresentam algumas vantagens em relação aos carros elétricos a bateria, pois elas continuam a produzir eletricidade desde que haja uma fonte de combustível, não exigindo recargas periódicas e, principalmente, reduzindo a dependência da indústria de produção de bateria que tem importantes desafios ambientais (DICKS; RAND, 2018).

É importante reforçar que, apesar das células a combustíveis serem frequentemente discutidas no âmbito de transporte, elas também têm aplicações estacionárias para geração de energia ou, até

mesmo, em dispositivos portáteis (DE SÁ *et al.*, 2022). A aplicabilidade de cada célula varia bastante dependendo do seu tipo e do combustível usado. A próxima seção entrará em maiores detalhes sobre os diferentes tipos de CC.

Apesar das grandes vantagens das células a combustível, é necessário destacar alguns pontos. Em primeiro lugar, a não emissão de gases poluentes deve ser considerada em células que usam hidrogênio puro. Outro ponto importante é: para que a célula seja uma tecnologia habilitadora da transição energética, é necessário que esse hidrogênio não seja produzido a partir de fontes fósseis. Sob esse aspecto, deve-se levar em conta não apenas a questão climática, mas também a própria viabilidade econômica e energética do processo, uma vez que qualquer energia fóssil usada para produção de hidrogênio sempre terá mais conteúdo energético do que o hidrogênio. Nesse contexto, é relevante discutir o papel das células a combustível no cenário brasileiro.

O Brasil é notoriamente conhecido por sua grande produção e uso de etanol. A indústria brasileira desse biocombustível é uma das mais

¹ Considerando o uso de hidrogênio como combustível.

desenvolvidas no mundo, sendo um dos poucos países a terem, por exemplo, plantas de escala industrial de etanol de segunda geração (etanol celulósico) e a fazer amplo uso da bioenergia do bagaço de cana-de-açúcar. A vasta disponibilidade de etanol, assim como toda sua indústria estruturada — mercado, logística, regulação, etc. — é uma oportunidade para o uso de células a etanol, como as de óxido sólido. De acordo com as previsões da Market and Market, as células de óxido sólidos deverão ser o tipo de célula com o maior crescimento de mercado até 2027 (MARKET-SANDMARKETS, 2022).

Outra oportunidade para o Brasil está relacionada ao desenvolvimento da produção nacional de hidrogênio. Atualmente, o Brasil conta com 12 projetos² de produção de hidrogênio (IEA, 2023). Além do desenvolvimento da oferta, o país também busca organizar o ambiente político e regulatório para produção, venda e consumo desse combustível. O Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2) é um exemplo do esforço em endereçar a necessidade de definir orientação estratégica para as

ações, visando ao desenvolvimento da economia do hidrogênio no Brasil. A criação dessa economia é um elemento essencial ao estabelecimento de uma indústria de células a hidrogênio no país.

Outro exemplo é o programa Combustível do Futuro, que visa a ampliar o uso de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de carbono no Brasil. No escopo desse programa, o Ministério de Minas e Energia (MME) conduziu um estudo para a avaliação técnica dos requisitos para desenvolvimento da tecnologia de célula combustível a etanol, enfatizando, por exemplo, a versatilidade de células a combustível de óxido sólido (BRASIL, 2022). O Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações (MCTI) também esteve envolvido no tema, principalmente por meio do Plano de Ação Tecnológica para Veículos Elétricos a Pilha a Combustível a Etanol, com o objetivo de promover o amadurecimento tecnológico da célula a combustível a etanol direto de óxido sólido (BRASIL, 2021). O Brasil também colabora internacionalmente com o desenvolvimento das células a combustível pela participação em iniciativas, como a

International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE).

Ao visar contribuir com os movimentos nacionais e internacionais em busca de tecnologias de baixo carbono, este *Informe* buscou trazer dados e indicadores de inovação para esse conjunto de tecnologias que são agrupadas como células a combustível. Dados de patentes e de artigos científicos contêm informações importantes sobre o nível de maturidade tecnológica, atores envolvidos, temas de fronteira, entre outras. Os panoramas apresentados aqui visam a explicitar esses pontos de forma a subsidiar tomadas de decisão acerca do tema.

A próxima seção apresentará uma visão geral sobre os diferentes tipos de células a combustível. Em seguida, serão apresentados os principais aspectos metodológicos para desenvolvimento dos panoramas. As seções 4 e 5 apresentarão os resultados e as reflexões sobre o panorama mundial de publicações científicas e de patentes, respectivamente. Por fim, a seção 6 trará as considerações finais deste documento.

² Em diferentes níveis de desenvolvimento, e podem ser consultados no banco de dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2023).

2. Tipo de células a combustível

Para se considerar o desenvolvimento de uma indústria de células a combustível, é necessário reconhecer que o termo abarca um conjunto de diferentes tecnologias. Apesar da composição básica de ânodo, cátodo e eletrólito, os diferentes tipos de células a combustível variam na forma como entregam a eletricidade, nos materiais usados na célula, do tipo de combustível, temperatura de trabalho, entre outros aspectos.

Entre os tipos mais conhecidos de células a combustível, pode-se citar: *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), Alcalina, *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC), *Direct Methanol Fuel Cells* (DMFC), *Phosphoric Acid Fuel Cells* (PAFCs), *Molten Carbonate Fuel Cells* (MFCs) e as *Direct Alcohol Fuel Cells* (DAFCs).

A PEMFC tem como principal elemento uma **membrana polimérica** umidificada que permite a passagem do próton enquanto o elétron é forçado a fluir para o circuito externo e gerar eletricidade. O elétron, então, volta para o cátodo e interage com o oxigênio e o íon próton para formar água. As PEMFCs utilizam, principalmente, hidrogênio como combustível, mas podem utilizar outros combustíveis, como o etanol, caso um reformador seja instalado. Um ponto negativo é que, para isso, há a necessi-

dade de etapas de purificação para evitar a contaminação rápida da célula. Outra desvantagem é o fato de usar platina, um material de elevado custo, como catalisador.

As células alcalinas foram uma das primeiras tecnologias de células a combustível desenvolvidas. Elas utilizam um **eletrólito alcalino**, principalmente hidróxido de potássio, em uma solução aquosa para gerar energia. Íons hidroxila passam pelo eletrólito permitindo que um circuito seja feito e a energia elétrica possa ser gerada. Apesar de não precisarem usar metais preciosos como catalisador, é muito sensível a contaminantes e enfrenta problemas de corrosão devido ao eletrólito.

As SOFCs - ou células a combustível de óxido sólido - são células que operam a altas temperaturas, chegando a 1.000 °C. Elas são compostas de ânodo e cátodo porosos e um **eletrólito sólido cerâmico** pelo qual atravessam íons de oxigênio em direção ao ânodo a fim de reagir com o combustível. As SOFCs, geralmente, usam uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono, formada pela reforma interna de combustível de hidrocarboneto, e ar como oxidante na célula. Dois pontos negativos associados às SOFCs são seu elevado tempo de inicialização e baixa resistência mecânica.

A fonte de energia dos sistemas DMFC é o **metanol**. No ânodo, o metanol é reformado em dióxido de carbono (CO₂), enquanto no cátodo o vapor ou a água são formados usando o oxigênio disponível no ar. As DMFCs são adequadas para fins de energia portátil devido à operação em baixa temperatura, longa vida útil e rápido sistema de reabastecimento. Entre as desvantagens das DMFC, pode-se citar: a baixa tensão e eficiência da célula, devido à cinética, e a toxicidade do combustível.

Já as PAFCs ou células de ácido fosfórico utilizam **ácido fosfórico líquido** como eletrólito e eletrodos de carbono porosos contendo um catalisador de platina. O portador de carga nesse tipo de célula de combustível é o íon de hidrogênio. Eles passam do ânodo para o cátodo através do eletrólito, e os elétrons expelidos retornam ao cátodo através do circuito externo e geram a corrente elétrica. Do lado do cátodo, a água é formada como resultado da reação entre elétrons, prótons e oxigênio com a presença do catalisador de platina para acelerar as reações. Em geral, as PAFCs são mais eficientes quando usadas para cogeração de eletricidade e calor, do que apenas na geração de eletricidade.

As MFCs ou células a carbonato fundido funcionam à alta temperatura com um eletrólito composto por uma mis-

tura de **sal de carbonato fundido** suspenso em uma matriz cerâmica de óxido de alumínio e lítio porosa e quimicamente inerte. Por operarem em altas temperaturas, metais não preciosos podem ser usados como catalisadores no ânodo e cátodo, reduzindo custos. No entanto, são passíveis de corrosão considerando que, além das altas temperaturas de operação, o eletrólito é corrosivo. Uma vantagem é

que, ao contrário das células de combustível alcalinas, de ácido fosfórico e PEM, as MCFCs não requerem um reformador externo para converter combustíveis, como gás natural e biogás em hidrogênio.

As DAFCs ou células a etanol direto são um tipo de célula de combustível alcalina. Algumas vantagens dessas células são seu baixo custo, baixa corrosividade e a capacidade de usar eletro-

catalisadores de metais relativamente baratos e não nobres, incluindo níquel, prata e paládio, em vez de platina, como no caso das PEMFCs.

A Tabela 1, a seguir, mostra uma comparação entre os tipos de células a combustível em termos de eletrólitos e combustíveis tipicamente utilizados, temperatura de trabalho, eficiência média e algumas características de destaque.

Tabela 1: Descrição dos principais tipos de células a combustível

Célula	Eletrólito típico	Combustível típico	Temperatura de trabalho (°C)	Eficiência média (%)	Outras características
PEM Baixa Temperatura	Naflon sólido	H2	60-80	40-60	Baixo peso e volume. Alta densidade de energia.
PEM Alta temperatura	Compósito sólido de Naflon/ polibenzimidazol (PBI) dopado em ácido fosfórico	H2	110-180	50-60	
Alcalina	Hidróxido de potássio	H2	60-90	~60	Baixo custo, porém, muito sensível a contaminantes e suscetível à corrosão.
Óxido sólido (SOFC)	Solid yttria-stabilized zircônia (YSZ)	Metano	500-1000	55-60	Pode usar diferentes tipos de combustíveis, como etanol.
Metanol direto (DMFC)	Naflon sólido	Metanol	Ambiente-110	35-60	Combustível líquido, o que torna mais fácil de armazenar e transportar.
Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFCs)	Ácido fosfórico líquido concentrado (H3PO4) em carboneto de silício (SiC)	H2	160-220	36-45	Mais eficientes quando usadas para a cogeração de eletricidade e calor.
Carbonato Fundido (MCFCs)	Liquidalkali carbonate (Li2CO3, Na2CO3, K2CO3) in Lithium aluminate (LiAlO2)	Metano	600-700	55-65	Não exige reformador externo para uso de metano ou biogás, o que reduz o custo.
Etanol direto	<i>Solid Nafions – Alkaline media – Alkaline – Acidmedia</i>	H+	Ambiente-120	20-40	Usa um biocombustível, porém com baixa densidade de potência.

Fonte: elaborada a partir de Dicks e Rand (2018), Mekhilef *et al.* (2012), Kamarudin *et al.* (2013) e Omar e Mehmet (2014)

3. Aspectos metodológicos

A segunda edição do *Informe iSES* tem o objetivo de trazer um panorama sobre dados de artigos científicos e patentes sobre células a combustível. Os panoramas apresentados neste Informe visam a explicitar esses pontos de forma a apoiar tomadas de decisão acerca do tema e também apresentar o banco de dados que foi criado e pode ser explorado em parceria com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE).

Para auxiliar na construção desse Informe, foi montado o Grupo de Trabalho de Células a Combustível do Informe iSES (GT FC iSES) com especialistas no tema. O GT FC iSES contribuiu principalmente em: levantar perguntas orientadoras para moldar o formato do Informe, validar as metodologias de busca de dados (artigos e patentes), sugerir os tipos de análises mais relevantes e verificar os resultados obtidos. O GT FC iSES foi formado por especialistas das instituições: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen), Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), Instituto Nacional de Propriedade Industrial (Inpi), Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Para o panorama de artigos científicos, foi utilizada a base de dados do *Web of Science* (WoS) com o termo de busca “*fuel cell*” considerando toda a série histórica da base. Essa busca resgatou 99.518 desde 1955 até setembro de 2022, que corresponde à data da busca. A WoS foi escolhida por ser uma base internacionalmente reconhecida por sua ampla abrangência de periódicos representativos e de qualidade.

Para o levantamento das patentes sobre células a combustível, foi utilizada a base Derwent Innovation Index, também disponibilizada pela Clarivate (CLARIVATE, 2023). A escolha dessa base foi determinada a partir do mapeamento e da comparação de bases internacionais de patentes. Como o foco deste estudo é uma análise global, a base da Derwent foi escolhida por fornecer uma versão traduzida de todos os seus registros para o inglês, além de aprimorar os títulos e resumos, harmonizando os dados e facilitando o processamento das informações. Outro fator-chave para a escolha foi a disponibilização do código International Patent Classification (IPC) para cada patente, auxiliando no processo de caracterização por temática tecnológica do conjunto de dados.

Buscou-se pelo termo “*fuel cell*” e a linha temporal utilizada foi do período inicial da base de janeiro de 1966 até setembro de 2022, totalizando 140.378 registros completos de patentes. A decisão da busca expressão “*fuel cell*” — e consequentemente o não uso de IPCs pré-determinados — teve como objetivo captar conteúdos abrangentes, que incluíssem as áreas do conhecimento que possam estar relacionadas com as CCs, ainda que a patente não trate especificamente dessa tecnologia.

A quantidade numerosa de patentes foi o desafio inicial dessa etapa do estudo, a plataforma utilizada permite o acesso e o *download* de até 100 mil documentos consecutivos, então foram realizadas duas grandes extrações e depois retirada quaisquer duplicadas, evitando que se perdesse documentação no processo e capturando os mais de 140 mil linhas de dados. Além disso, devido ao formato e à quantidade de arquivos, foi necessário o desenvolvimento de novas metodologias e ferramentas computacionais de análise para o caso das patentes. Esse novo cenário trouxe, de certa forma, uma visão inovadora e histórica sobre o tema.

4. Panorama da produção científica global sobre células a combustível

Esta seção visa a apresentar o panorama de publicações científicas sobre células a combustível. Para desenvolver esse panorama, foram feitas análises de caracterização temática e temporal

sobre as publicações científicas em todo o mundo. As subseções 4.1 e 4.2 apresentam informações que ajudam a caracterizar os temas e as áreas do conhecimento que têm se destacado no assunto

de células a combustível. As subseções 4.3 e 4.4 mostram uma análise dos países que mais publicam no tema com um enfoque nos dados sobre o Brasil.

4.1. Visão geral das publicações científicas sobre células a combustível

Para fazer uma caracterização temática de uma rede de quase 100.000 artigos, é necessário utilizar diferentes

informações dos dados. Para uma análise inicial, observaram-se as palavras-chave mais frequentes nos artigos.

A Figura 1 apresenta a nuvem de palavras-chave e a Tabela 2 apresenta as 20 palavras-chave mais frequentes.

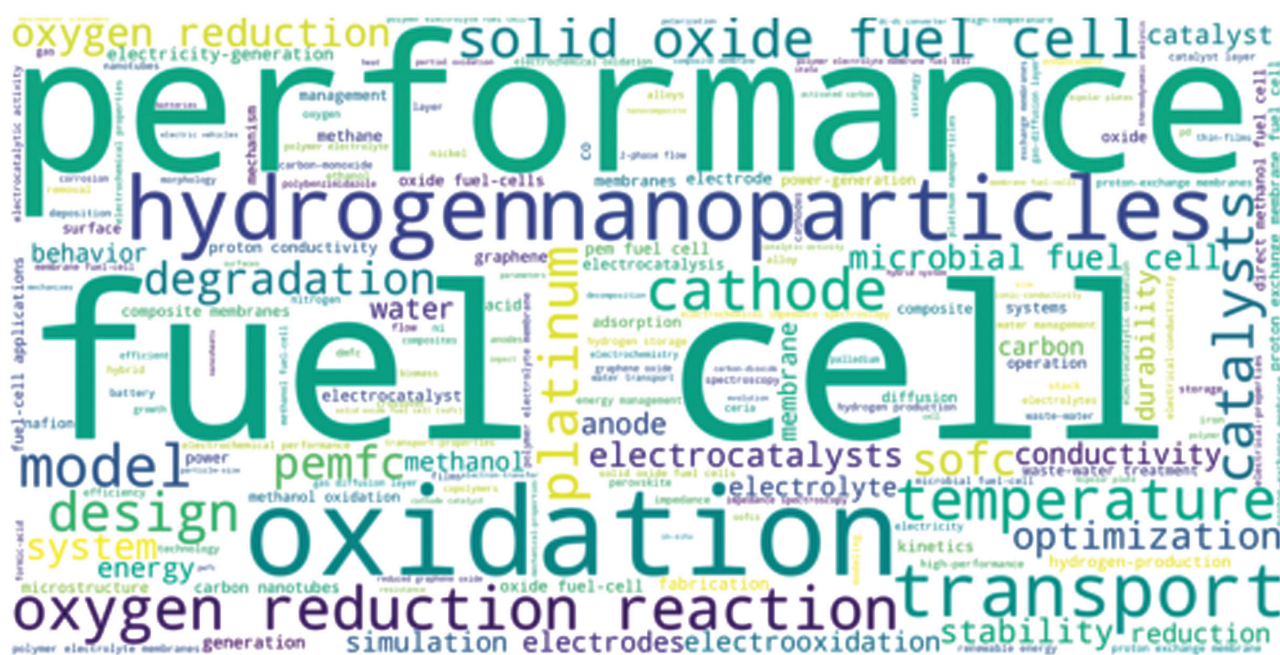


Figura 1: Palavras-chave da rede completa de artigos sobre células a combustível

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2: Palavras-chave mais frequentes da rede geral de células a combustível

#	Palavra	Frequência	#	Palavra	Frequência
1	fuel cell	24.964	11	solid oxide fuel cell	4.452
2	performance	19.235	12	catalysts	4.436
3	oxidation	5.560	13	design	4.314
4	nanoparticles	5.084	14	platinum	4.224
5	hydrogen	5.028	15	degradation	3.904
6	transport	4.847	16	pemfc	3.896
7	oxygen reduction reaction	4.742	17	sofc	3.811
8	model	4.571	18	oxygen reduction	3.717
9	temperature	4.546	19	optimization	3.676
10	cathode	4.463	20	system	3.545

Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que as palavras-chave envolveram aspectos relacionados ao processo eletroquímico da célula — *oxidation, oxygen reduction reaction, temperature* — aos elementos da célula — *nanoparticles, cathode, catalysts, platinum* — e a aspectos gerais sobre o funcionamento da célula, como *performance/optimization* e, ainda, sobre um dos principais combustíveis utilizados, o hidrogênio (*hydrogen*). É possível, dessa maneira, identificar referências diretas a SOFCs, que, de acordo com Markets e Markets

(MARKETSANDMARKETS, 2022), foi o maior segmento do mercado de células de combustível, por tipo, em 2022. Isso pode ser atribuído à flexibilidade de combustível de sua aplicação na geração combinada de calor e energia devido à sua alta temperatura.

A presença de muitas dessas palavras pode ser interpretada como indicativos dos tipos de desafios que, ainda, existem sobre as células a combustíveis, tais como o aumento da eficiência, a busca por melhores catalisadores, o controle da temperatura e

as alternativas de evitar a degradação da célula.

Na Figura 2, é possível observar as áreas de conhecimento mais frequentes nos artigos. Como esperado, observam-se áreas, por exemplo, energia de combustíveis, eletroquímica e físico-química como as mais frequentes. Algumas outras áreas do conhecimento indicam campos de estudo que apoiam o desenvolvimento e a otimização das células a combustível, como a nanotecnologia, ciência dos materiais e ciência de polímeros.

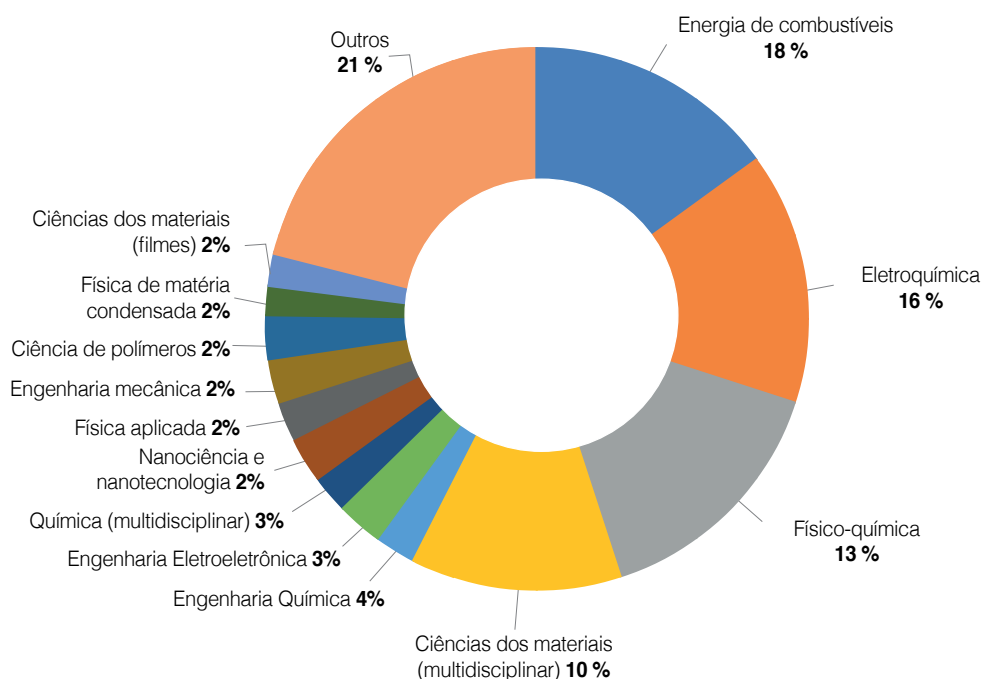


Figura 2: Distribuição dos artigos por área de conhecimento do WoS

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 3 apresenta a evolução temporal do número de publicações científicas sobre células a combustível. Observa-se uma tendência de crescimento acentuado principalmente entre os anos 2000 e 2010. Desde então, o crescimento tem sido mais lento. Yap e McLellan (2023) consideram essa primeira dé-

cada dos anos 2000 como a “fase de crescimento rápido” da economia do hidrogênio — que, por sua vez, está fortemente atrelado ao uso de células a combustível. Principalmente pela crescente preocupação dos EUA e da Europa em diversificar sua matriz de energia, que, além das crises do petróleo na dé-

cada de 70, se intensificaram com o ataque terrorista de 11 de setembro. O governo Bush (2001-2009) também foi um grande incentivador do desenvolvimento de carros movidos a células a combustível. A partir de 2010, o crescimento do número de publicações tem sido mais lento.

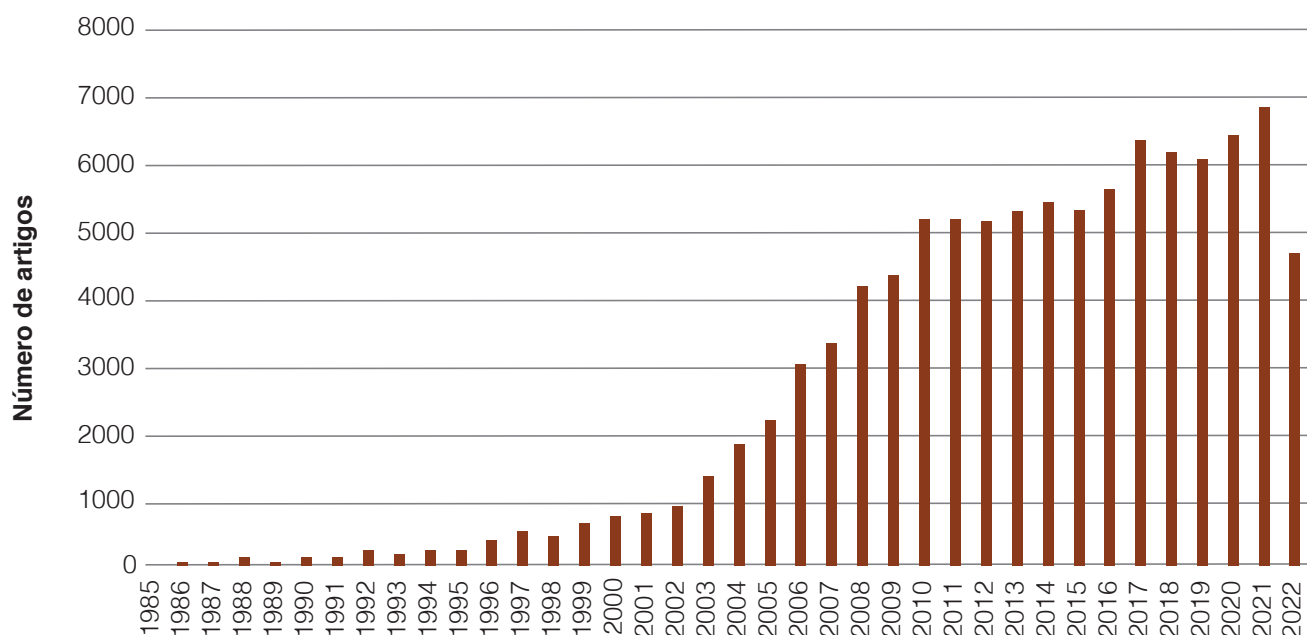


Figura 3: Evolução temporal do número de artigos sobre células a combustível

Fonte: Elaboração própria.

4.2. Visão geral das publicações científicas sobre células a combustível

Como forma de aprofundar a caracterização temática da rede de artigos sobre células a combustível, foram feitas análises de *clusters* gerados a partir de similaridade

semântica utilizando a ferramenta própria do CGEE, *Insight Net*. Essa ferramenta faz agrupamentos automáticos de artigos que são semanticamente similares conside-

rando as palavras do título, resumo e palavras-chave dos autores e dos periódicos. A Tabela 3 resume as informações sobre os *clusters* analisados.

Tabela 3: *Clusters* temáticos

Nº	Tema do <i>clusters</i>	Número de artigos
1	Otimização do sistema e aumento de performance	7.874
2	PEMFC – CC de membrana polimérica de troca de prótons	7.259
3	SOFC – célula a combustível de óxido sólido	6.791
4	Catalisadores – foco em nanopartículas	3.513
5	Catalisadores – foco em base de platina	3.270
6	DMFC – célula a combustível de metanol direto	2.759
7	Célula biológica	2.692
8*	Etanol – busca por “ethanol”	2.072

Nota: * O oitavo *cluster* referente a células a combustível que usam etanol não foi resultado da clusterização automática feita pelo *Insight Net*. Visando ter informações sobre esse tema em específico, foi feita uma busca manual por esse termo dentro dos artigos.

Fonte: Elaboração própria.

4.2.1. Cluster 1: Otimização do sistema e aumento de performance

A Figura 4 apresenta a nuvem de palavras-chave do *cluster* 1, e a Tabela 4 mostra a frequência das 20 palavras-chave mais citadas. O *cluster* 1 possui 7.874 artigos que tratam de diversos tópicos relacionados à melhora da *performance* e eficiência energética das células, ao aumento de confiabilidade, à redução de custo, em muitas

ocasiões, utilizando recursos de simulação computacional para essa avaliação. Apesar de uma elevada frequência de citações sobre as PEMFC, o *cluster* foca em discutir o sistema completo da célula, sem focar muito em diferentes tipos específicos.

Vários *subclusters* demonstraram investigações de aplicação em diferentes

tipos de veículos, entre eles, veículos híbridos elétrico/célula a combustível. Somam-se, ainda, vários artigos sobre sistemas híbridos de geração de energia que, além das células a combustível, utilizam outras fontes de energia renovável, como solar e eólica.



Figura 4: Nuvem de palavras-chave do *cluster* 1

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4: 20 palavras-chave mais frequentes do *cluster 1*

#	Palavra	Frequência	#	Palavra	Frequência
1	fuel cell	1.314	11	simulation	469
2	optimization	977	12	management	462
3	design	867	13	fuel cells	388
4	fuel-cell	826	14	strategy	363
5	system	790	15	hybrid	349
6	performance	783	16	pemfc	337
7	battery	697	17	renewable energy	333
8	model	658	18	systems	330
9	energy management	585	19	electric vehicles	328
10	hydrogen	577	20	power management	305

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 5 reforça a temática sistêmica do *cluster 1*, mostrando as 10 áreas do conhecimento mais frequentes. Observa-se que as áreas são mais transversais e associadas a sistemas comple-

xos de elementos. A Figura 6 apresenta a evolução temporal do *cluster 1*. É possível identificar forte interesse no tema até 2010, o que pode ter sido um resultado dos grandes investimentos no

carro a hidrogênio durante o governo George W. Bush nos EUA e que foi acompanhado por vários países do mundo. Após esse período, observaram-se ondas de interesse no tema.

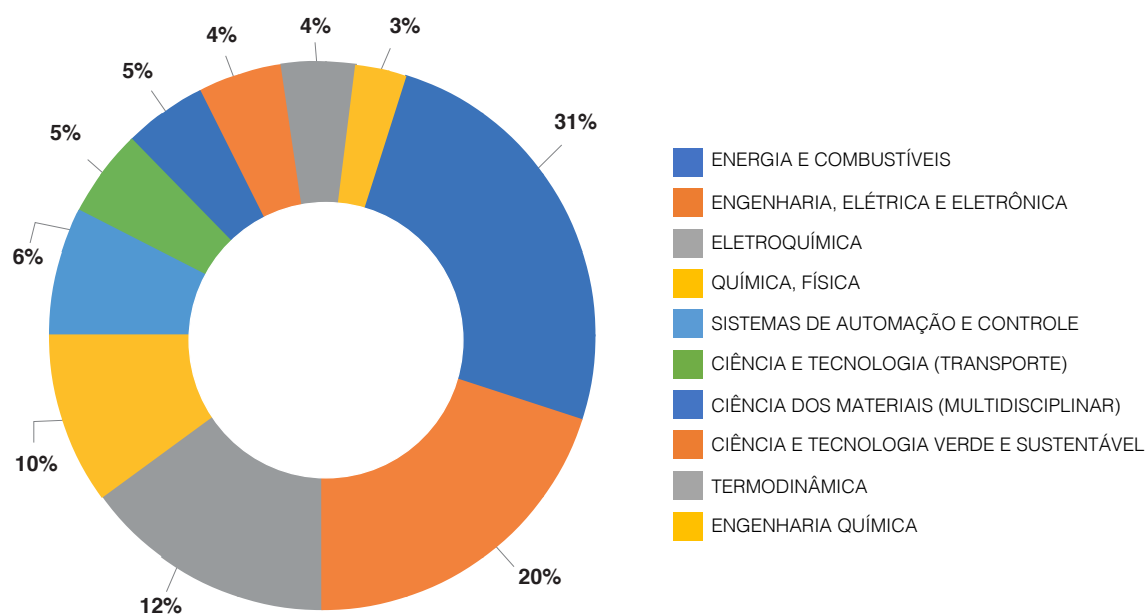


Figura 5: 10 áreas do conhecimento mais frequentes no *cluster 1*

Fonte: Elaboração própria.

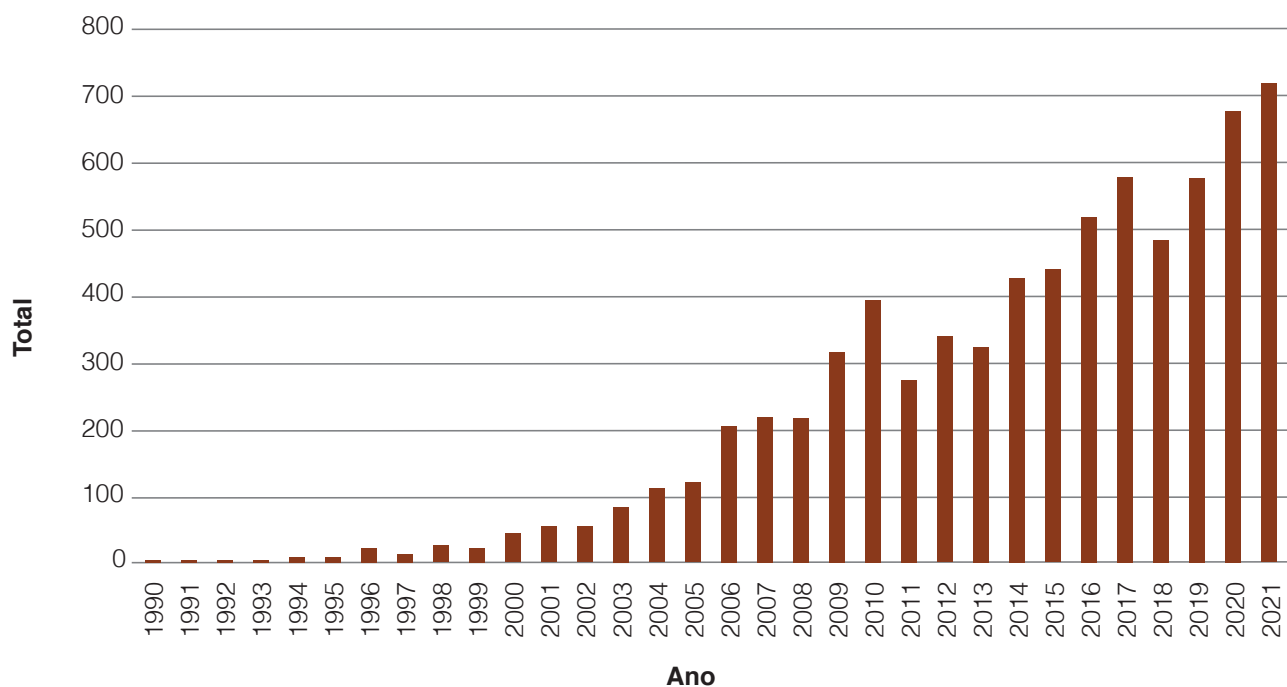


Figura 6: Evolução temporal da quantidade de artigos no *cluster 1*

Fonte: Elaboração própria.

4.2.2. Cluster 2: PEMFC – célula a combustível de membrana polimérica de troca de prótons

A Figura 7 apresenta a nuvem de palavras-chave do *cluster 2*, e a Tabela 5 apresenta as 20 palavras-chave mais citadas. O *cluster 2* possui 7.259 artigos que focam principalmente no desenvolvimento das PEMFC. Por ser um tipo de célula em um estágio elevado de desenvolvimento, os temas já caminham

para ganhos de eficiência, redução dos custos e aumento de durabilidade. Algumas palavras-chave, como *conductivity*, *proton conductivity* e *transport*, apontam para linhas de pesquisa que visam a melhorar *performance* da célula por meio da otimização do transporte de íons. A palavras-chave *composite*

membranes também vale ser citada ao indicar uma linha de pesquisa que foca no desenvolvimento de membranas que compreendem dois ou mais materiais, selecionados para otimizar as propriedades e/ou desempenho da membrana.

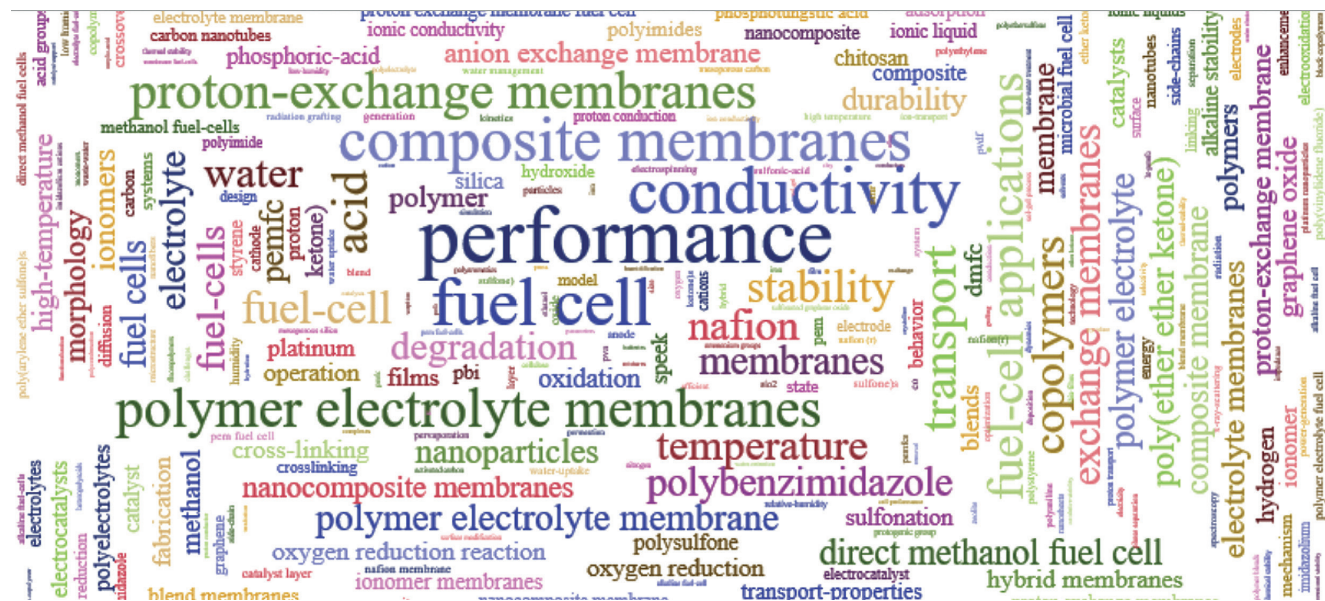


Figura 7: Nuvem de palavras-chave do *cluster 2*

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5: 20 palavras-chave mais frequentes do *cluster 2*

#	Palavra	Frequência	#	Palavra	Frequência
1	performance	1.550	11	acid	635
2	fuel cell	1.119	12	copolymers	553
3	conductivity	1.050	13	stability	537
4	composite membranes	992	14	fuel-cell	522
5	proton conductivity	977	15	water	509
6	polymer electrolyte membranes	776	16	temperature	501
7	proton-exchange membranes	725	17	nafion	491
8	transport	697	18	exchange membranes	454
9	fuel-cell applications	645	19	membranes	436
10	proton exchange membrane	644	20	power management	305

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 8 apresenta a físico-química e a eletroquímica como as áreas mais frequentes nos artigos do *cluster*. Isso reflete a característica mais específica desse *cluster* no desenvolvimento da célula,

mais do que no funcionamento do sistema como um todo. Esse foi o caso do *cluster* 1. A área de polímeros também aparece com uma frequência alta, mostrando a relevância de estudos so-

bre novos materiais para as membranas. A Figura 9 mostra uma tendência de redução dos números de artigos no tema, o que, nesse caso, reflete o processo de amadurecimento da tecnologia.

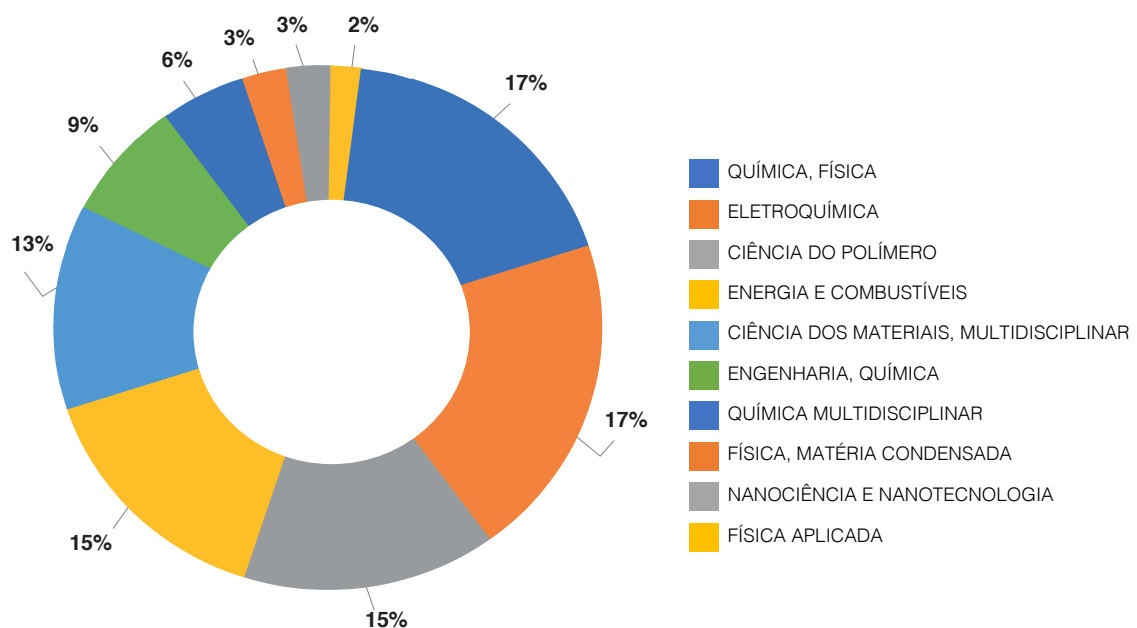


Figura 8: 10 áreas do conhecimento mais frequentes no *cluster* 2

Fonte: Elaboração própria.

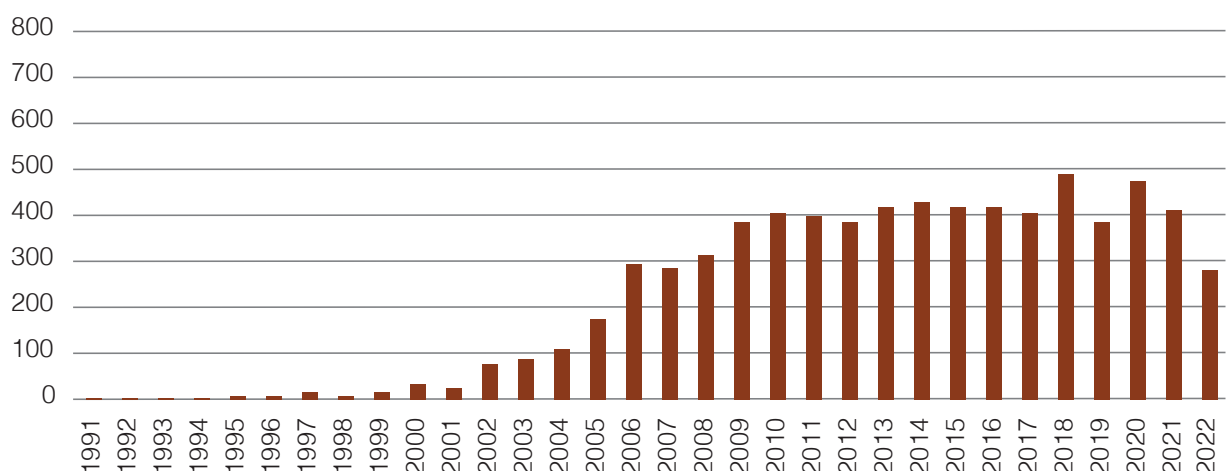


Figura 9: Evolução temporal da quantidade de artigos no *cluster* 2

Fonte: Elaboração própria.

4.2.3. Cluster 3: células de óxido sólido

A Figura 10 apresenta a nuvem de palavras-chave do *cluster 3*, e a Tabela 6 apresenta as 20 palavras-chave mais citadas. O *cluster 3* possui 6.791 artigos que discutem principalmente o desenvolvimento das células de óxido sólido - SOFC. Ob-

serva-se foco importante sobre a produção de ânodos e cátodos, o que inclui estudos sobre diversas técnicas e materiais para aumentar a eficiência da célula. Vários estudos também visam a analisar o processo de eletrólise em altas temperaturas, o que é

uma característica das SOFCs, com consequências associadas à degradação e durabilidade. Observa-se, ainda, a palavra-chave *yttria-stabilized zirconia*, que se trata de um material eletrolítico cerâmico comumente utilizado nas SOFCs.

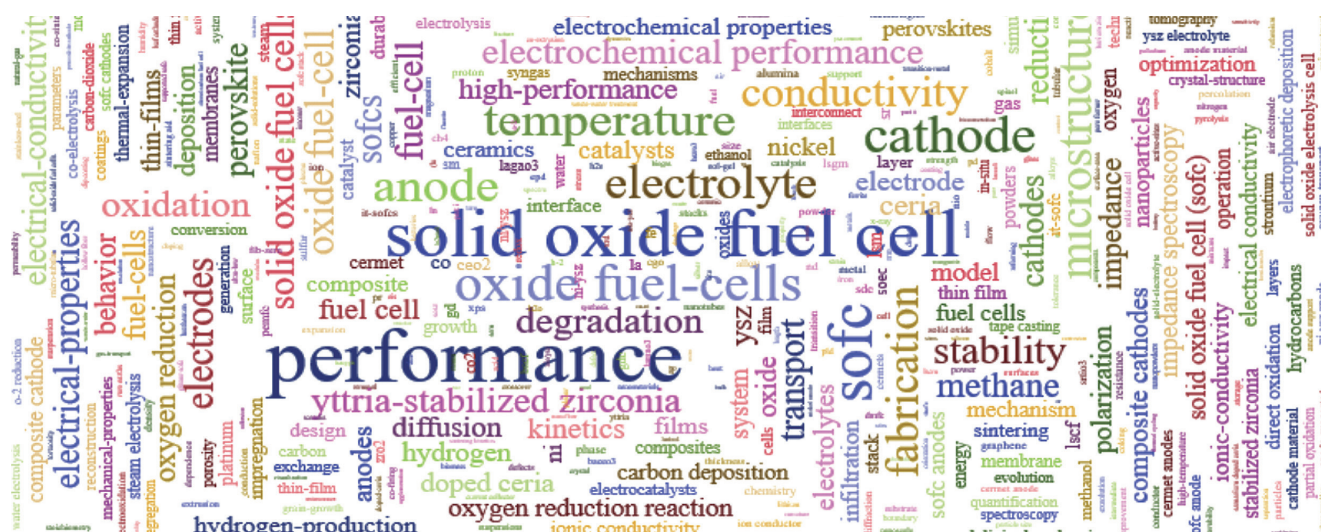


Figura 10: Nuvem de palavras-chave do *cluster 3*

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6: 20 palavras-chave mais frequentes no *cluster 3*

#	Palavra	Frequência	#	Palavra	Frequência
1	performance	1721	11	conductivity	527
2	solid oxide fuel cell	1342	12	oxide fuel-cell	451
3	sofc	1052	13	stability	436
4	oxide fuel-cells	806	14	electrodes	417
5	cathode	781	15	solid oxide fuel cells	391
6	temperature	706	16	oxidation	389
7	anode	702	17	degradation	388
8	microstructure	694	18	fuel-cell	370
9	electrolyte	645	19	yttria-stabilized zirconia	358
10	fabrication	575	20	electrochemical performance	356

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 11 apresenta as 10 áreas do conhecimento mais frequentes nos artigos do *cluster*. Observa-se forte presença da química e física, mas também da ciência dos

materiais, que pode ter sido influenciada pelos diversos estudos sobre a produção dos elementos das SOFCs. A Figura 12 mostra uma produção científica crescente no

tema entre 2002 e 2011, mas que vem caindo nos últimos anos, acompanhando a tendência de amadurecimento observado no caso das PEM-FCs.

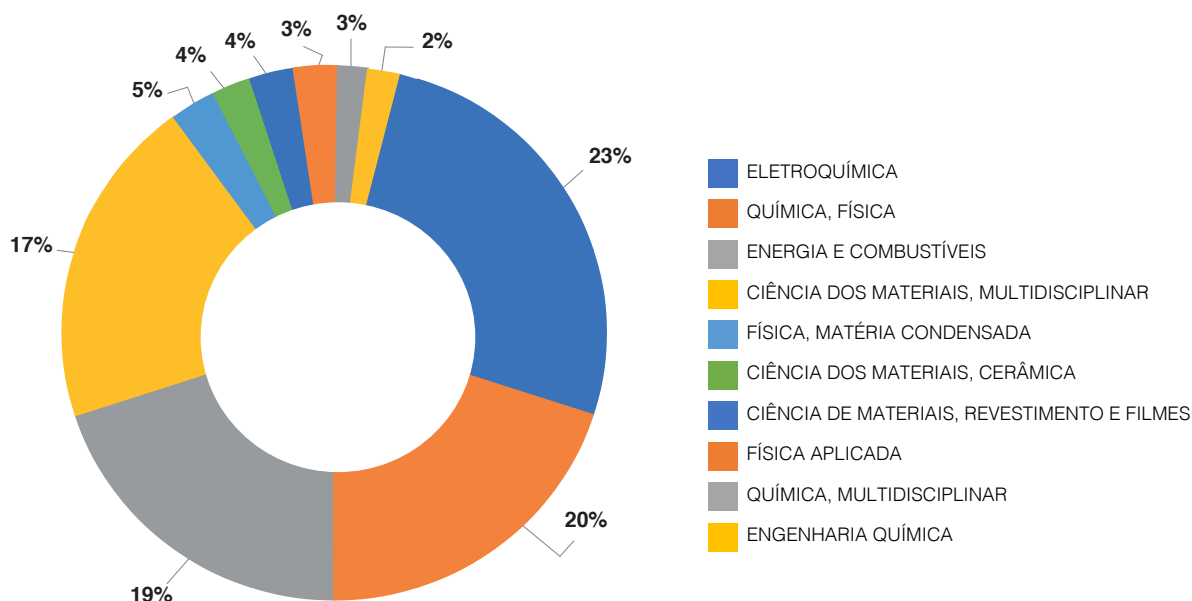


Figura 11: 10 áreas do conhecimento mais frequentes no *cluster 3*

Fonte: Elaboração própria.

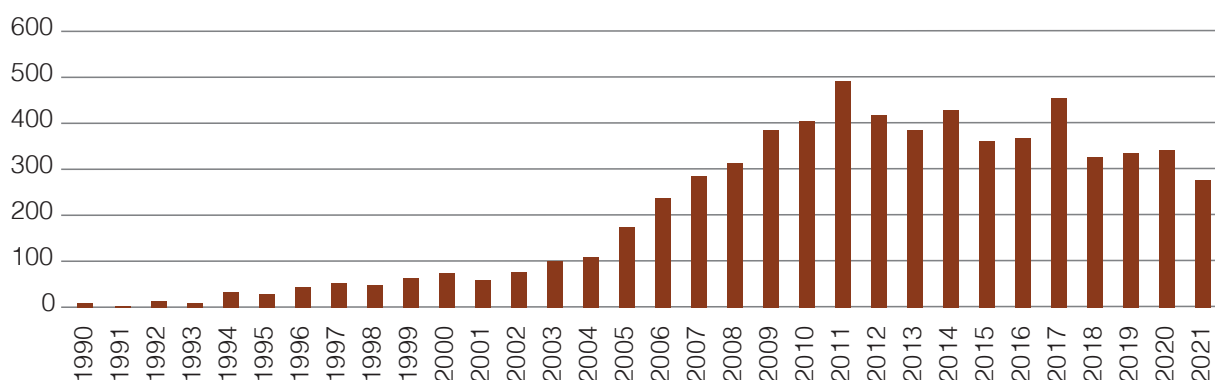


Figura 12: Evolução temporal da quantidade de artigos no *cluster 3*

Fonte: Elaboração própria.

4.2.4. Cluster 4: catalisadores – nanopartículas

A Figura 13 apresenta a nuvem de palavras-chave, e a Tabela 7 as 20 palavras-chave mais frequentes do cluster 4. O cluster tem 3.513 artigos que tratam de vários temas associados a catalisadores para as células a combustível com um dire-

cionamento para o uso de nanopartículas. As palavras *platinum* e *palladium* — platina e paládio — aparecem com muita frequência por se tratarem de elementos frequentemente usados nos eletrocatalisadores. Os catalisadores de paládio, mui-

tas vezes, são tratados como alternativa mais barata para o uso da platina. Vale destacar também a alta frequência da palavra *methanol*, muitas vezes, utilizada para indicar a aplicação em células a metanol direto — DMFCs.

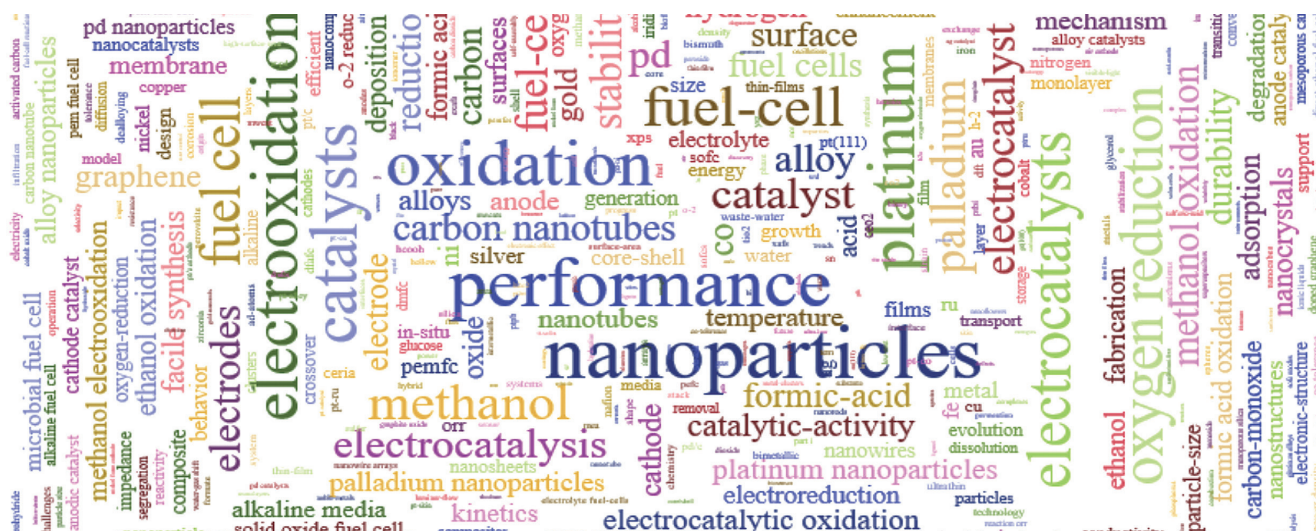


Figura 13: Nuvem de palavras-chave do cluster 4

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 7: 20 palavras-chave mais frequentes no cluster 4

#	Palavra	Frequência	#	Palavra	Frequência
1	nanoparticles	807	11	fuel cell	386
2	performance	688	12	methanol	360
3	oxidation	603	13	palladium	334
4	oxygen reduction reaction	601	14	catalyst	269
5	catalysts	572	15	electrocatalyst	266
6	electrooxidation	568	16	fuel-cells	253
7	platinum	558	17	stability	245
8	electrocatalysts	472	18	electrodes	243
9	oxygen reduction	458	19	electrocatalysis	240
10	fuel-cell	451	20	pd	220

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 14 mostra as 10 áreas do conhecimento mais frequentes nos artigos do *cluster 4*. Observa-se forte presença das áreas de química e eletroquímica, ciên-

cias dos materiais e energia. Diferente dos *clusters* anteriores, é possível identificar também a forte presença da área de nanotecnologia, que está atrelada à produção

dos catalisadores. A Figura 15 mostra que a produção de artigos nesses temas tem sofrido leve queda ao longo dos anos.

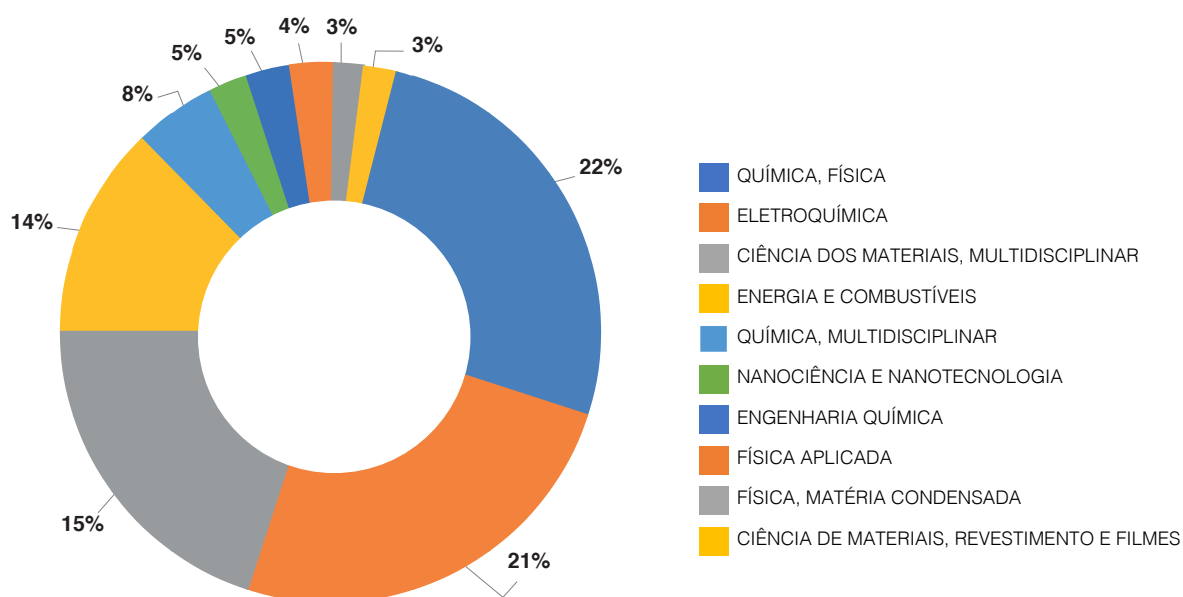


Figura 14: 10 áreas do conhecimento mais frequentes no *cluster 4*

Fonte: Elaboração própria.

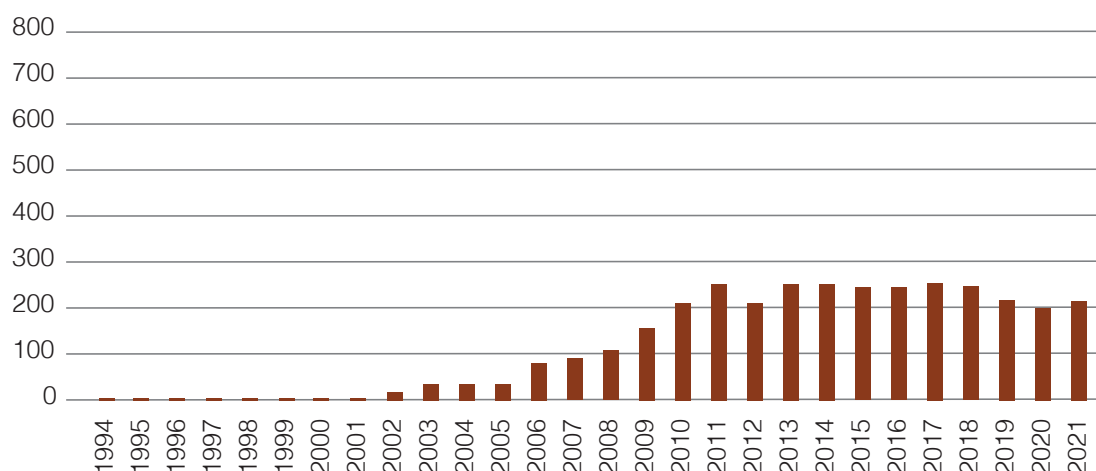


Figura 15: Evolução temporal da quantidade de artigos no *cluster 4*

Fonte: Elaboração própria.

4.2.5. Cluster 5: catalisadores de platina

O cluster 5 tem 3.270 artigos e reuniu principalmente artigos sobre catalisadores à base de platina. A Figura 16 mostra a nuvem de palavras-chave do cluster 5, e a Ta-

bela 8 as 20 palavras-chave mais frequentes. Os artigos tratam de várias técnicas de produção, tratamento e avaliação de catalisadores para as células a combustível. Ob-

serva-se forte presença do monóxido de carbono – CO e *carbon-monoxide* – por este ser um contaminante do catalisador de platina.

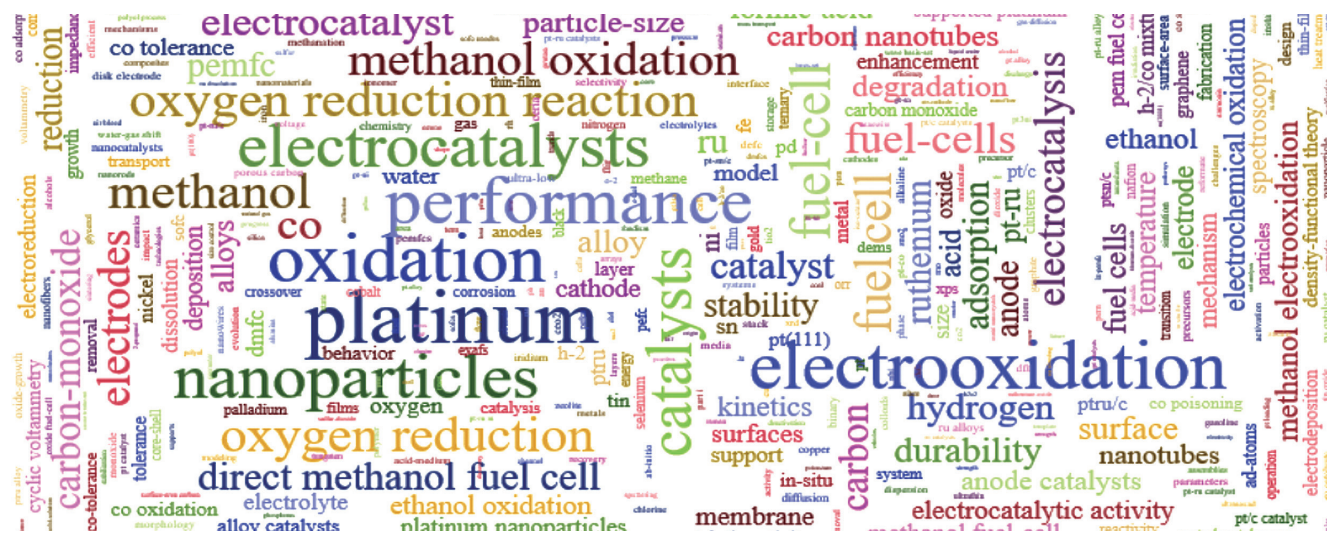


Figura 16: Nuvem de palavras-chave do cluster 5

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 8: 20 palavras-chave mais frequentes no cluster 5

#	Palavra	Frequência	#	Palavra	Frequência
1	platinum	797	11	oxygen reduction	335
2	oxidation	644	12	fuel cell	334
3	electrooxidation	633	13	methanol oxidation	297
4	performance	617	14	co	267
5	nanoparticles	551	15	electrodes	263
6	electrocatalysts	525	16	fuel-cells	252
7	catalysts	511	17	electrocatalysis	236
8	fuel-cell	396	18	electrocatalyst	226
9	methanol	352	19	carbon	216
10	oxygen reduction reaction	344	20	carbon-monoxide	212

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 17 enfatiza a similaridade entre o *cluster* 5 e 4, pois possuem artigos em áreas do conhecimento muito semelhantes, isto é, aquelas relacionadas ao desen-

volvimento de catalisadores para as células a combustível. Já em relação ao número de publicações no tema ao longo dos anos, observa-se que, para este *cluster*, a

queda nas publicações vem sendo mais acentuada (Figura 18), o que pode ser um indicativo de amadurecimento do tema.

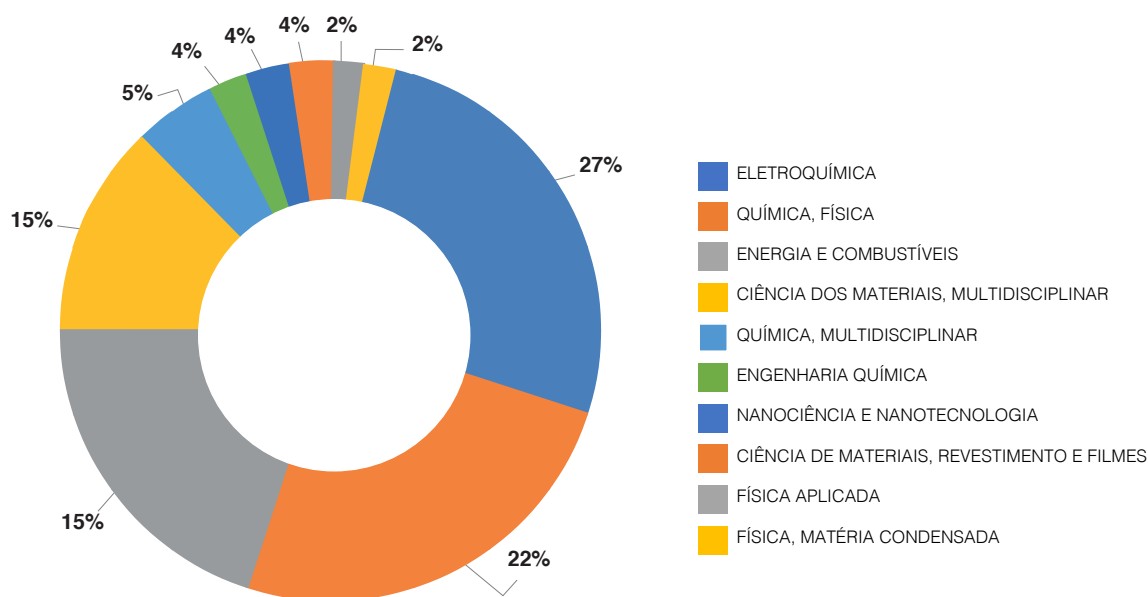


Figura 17: 10 áreas do conhecimento mais frequentes no *cluster* 5

Fonte: Elaboração própria.

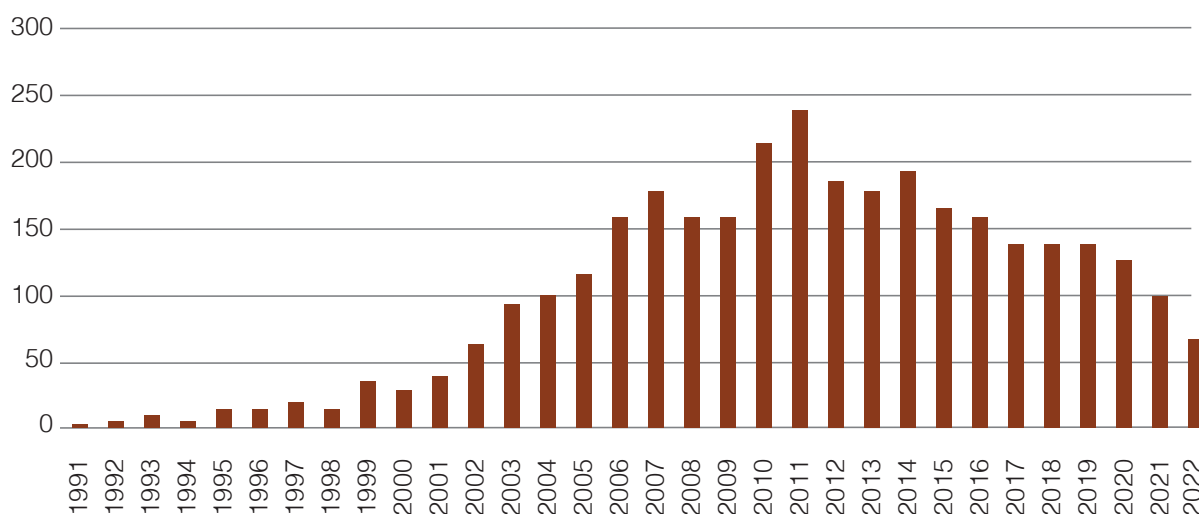


Figura 18: Evolução temporal da quantidade de artigos no *cluster* 5

Fonte: Elaboração própria.

4.2.6. Cluster 6: DMFC - célula a metanol direto

O cluster 6 possui 2.759 artigos que discutem vários assuntos relacionados ao tema das células de metanol direto, ou DMFC. A Figura 19 e a Tabela 9 deixam claro

o foco nesse tipo de célula. Entre os assuntos discutidos, têm-se investigações sobre o transporte de água na célula, avaliação/prevenção de degradação de membranas

e catalisadores, performance do cátodo da célula, desenvolvimento de microrreformadores e simulações e técnicas para controle de temperatura.

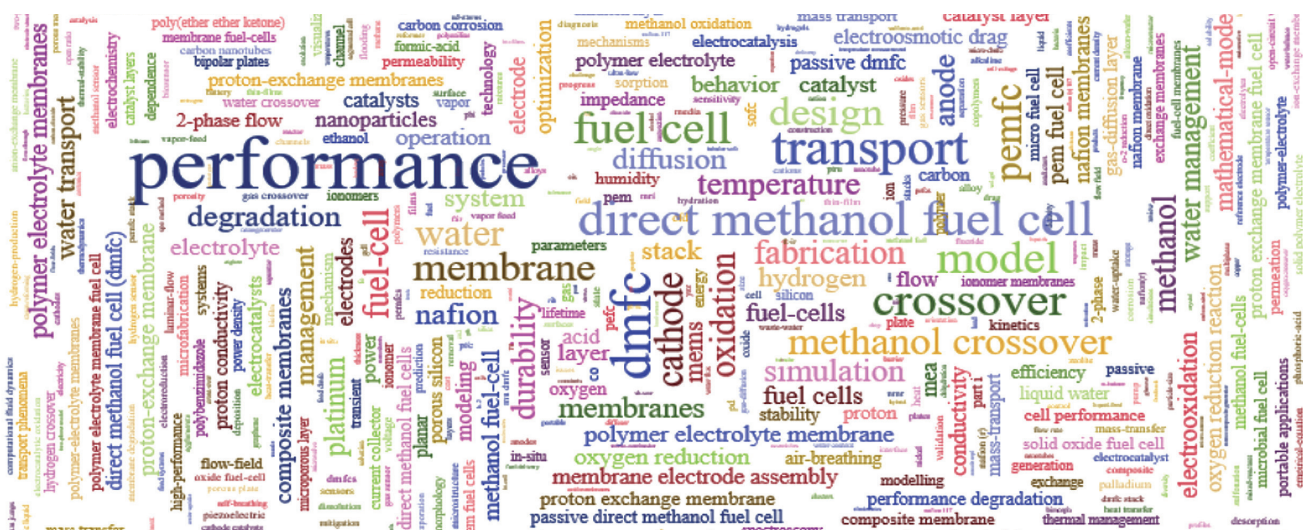


Figura 19: Nuvem de palavras-chave do cluster 6

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 9: 20 palavras-chave mais frequentes no cluster 6

#	Palavra	Frequência	#	Palavra	Frequência
1	performance	738	11	methanol crossover	193
2	dmfc	364	12	water	176
3	transport	345	13	cathode	175
4	direct methanol fuel cell	314	14	oxidation	143
5	crossover	279	15	fuel-cell	140
6	fuel cell	261	16	fabrication	133
7	model	260	17	methanol	126
8	design	215	18	temperature	125
9	membrane	207	19	durability	125
10	pemfc	199	20	simulation	123

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 20 mostra o perfil das áreas do conhecimento mais frequentes para o *cluster* 6. Nota-se aqui a presença das áreas de engenharia mecânica e instrumentação

que pode ser um reflexo da grande quantidade de artigos sobre miniaturização de componentes das DMFCs para uso portátil. A Figura 21 apresenta um aumento no

número de publicações sobre o tema seguido de um período de estabilização para posterior queda seguindo a tendência de amadurecimento dos *clusters* anteriores.

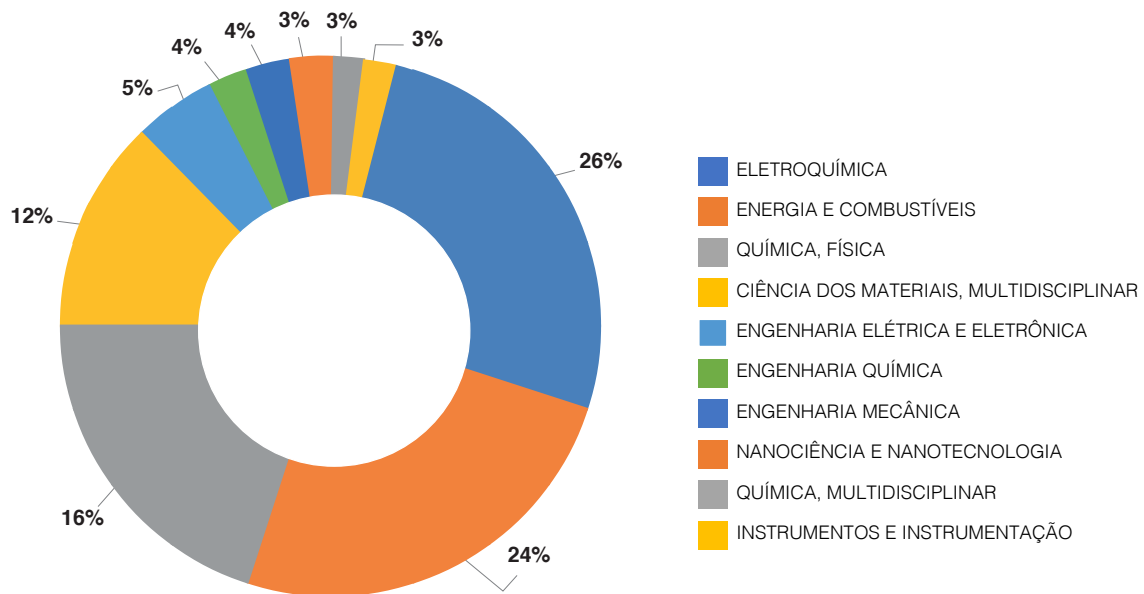


Figura 20: 10 áreas do conhecimento mais frequentes no *cluster* 6

Fonte: Elaboração própria.

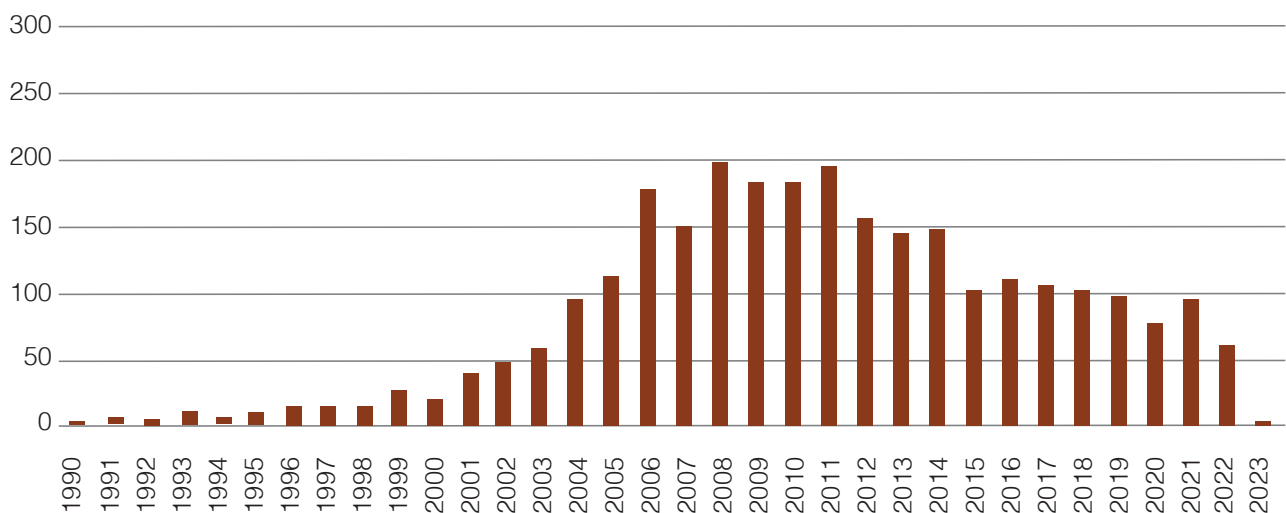


Figura 21: Evolução temporal da quantidade de artigos no *cluster* 6

Fonte: Elaboração própria.

4.2.7. Cluster 7: células a combustível microbianas

O cluster 7 é o que apresentou o caráter mais inovador da rede. Os temas giraram em torno das células a combustível microbianas, ou *microbial fuel cell*, como pode ser visto na Figura 22 e na Tabela 10. Células de com-

bastível microbianas funcionam como um processo bioeletroquímico que visa a produzir eletricidade usando os elétrons derivados de reações bioquímicas catalisadas por bactérias. Uma das aplicações mais visionadas

é o uso dessa energia em estações de tratamento de efluentes urbanos. Por esse motivo, observam-se com frequência as palavras-chave *waste-water treatment*, *waste-water* e *wastewater treatment*.

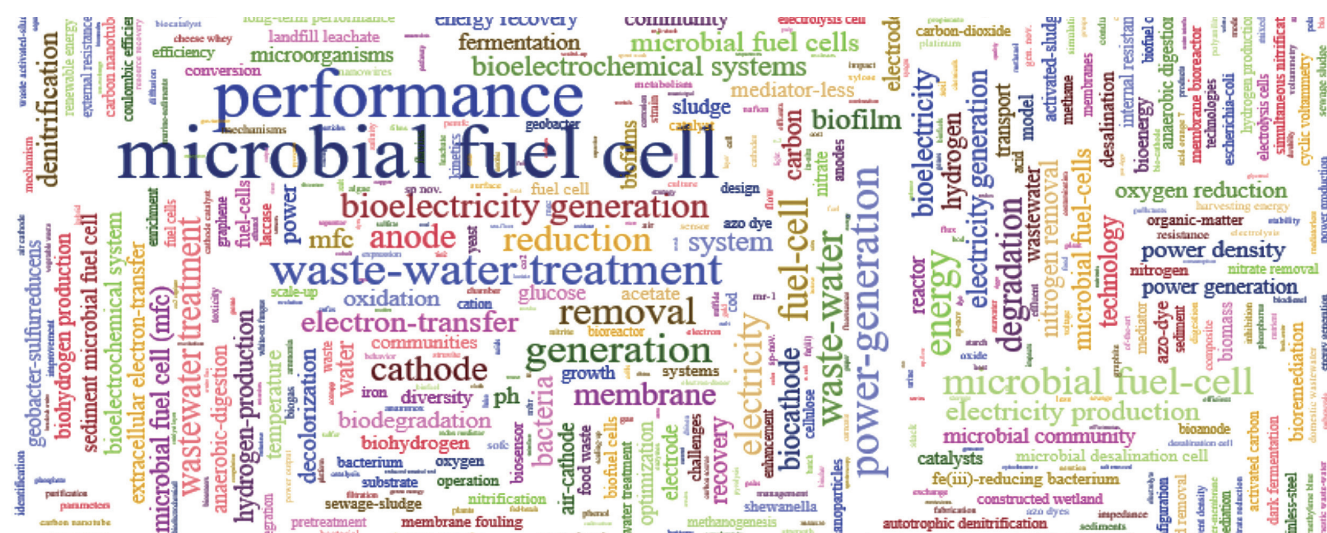


Figura 22: Nuvem de palavras-chave do cluster 7

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 10: 20 palavras-chave mais frequentes no cluster 7

#	Palavra	Frequência	#	Palavra	Frequência
1	microbial fuel cell	1.000	11	fuel-cell	236
2	performance	790	12	reduction	228
3	electricity-generation	748	13	electricity	213
4	waste-water treatment	376	14	cathode	210
5	power-generation	334	15	bioelectricity generation	204
6	generation	283	16	anode	185
7	waste-water	282	17	wastewater treatment	181
8	energy	267	18	degradation	179
9	microbial fuel-cell	261	19	membrane	164
10	removal	256	20	electron-transfer	158

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 23 apresenta um perfil de áreas do conhecimento bem mais diferenciado, com a presença da

biotecnologia, das ciências ambientais e da agricultura. A Figura 24 reforça o caráter inovador do *cluster* com

o aumento do número de publicações ao longo dos anos.

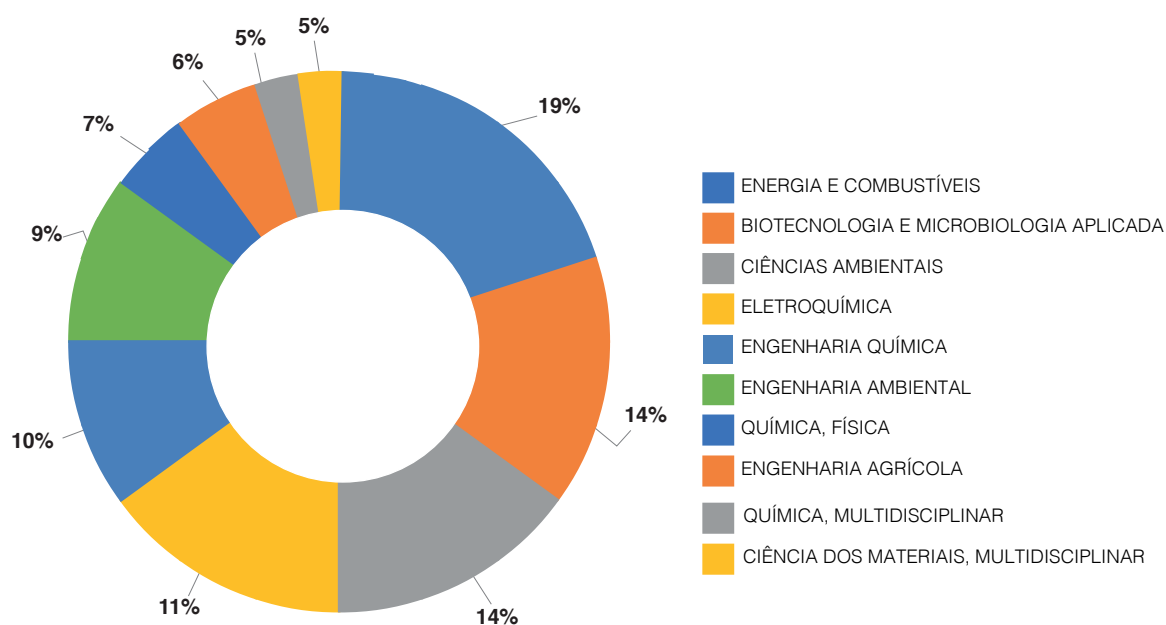


Figura 23: 10 áreas do conhecimento mais frequentes no *cluster 7*

Fonte: Elaboração própria.

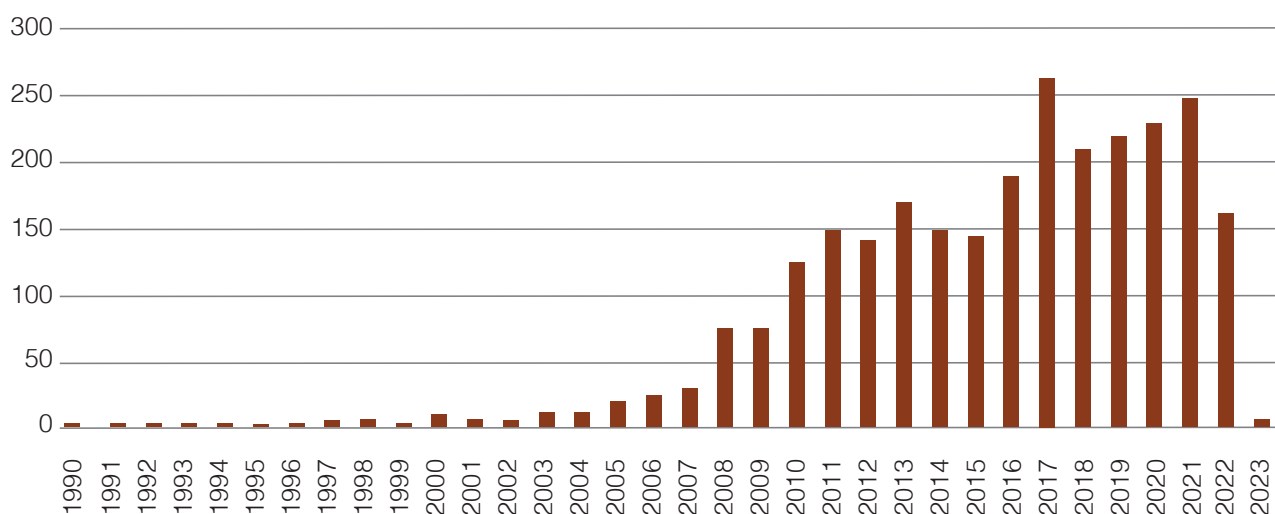


Figura 24: Evolução temporal da quantidade de artigos no *cluster 7*

Fonte: Elaboração própria.

4.2.8. Cluster 8: etanol

O cluster 8 foi construído por uma busca específica da palavra “ethanol”. Esse foco foi dado por conta do potencial brasileiro de fazer uso desse biocombustível em células a combustível. Um estudo conduzido pelo Ministério de Minas e Energia e pelo Ministério da Economia, em 2022 (BRASIL, 2022), apontou vantagens e desafios das tecnologias PEMFC e SOFC e condições para sua aplicação nacional. No caso

da segunda, foi enfatizada a grande vantagem de poder fazer uso de outros combustíveis, incluindo o etanol.

Como resultado dessa busca específica, foi gerada a nuvem de palavras-chave da Figura 25 e a Tabela 11. Observa-se as palavras *eletrooxidação*, *oxidation* e *ethanol oxidation*, isso porque esses processos são necessários para permitir a liberação do elétron da molécula de etanol para a geração de energia

nas células. A presença de palavras associadas a catalisadores — *catalysts*, *nanoparticles*, *platinum*, *electrocatalysts*, *palladium* — também reflete os esforços de melhorar os processos de oxidação do etanol. Também se observa a presença de palavras-chave relacionadas ao metanol, outro combustível líquido que pode ser usado em várias células a combustível.

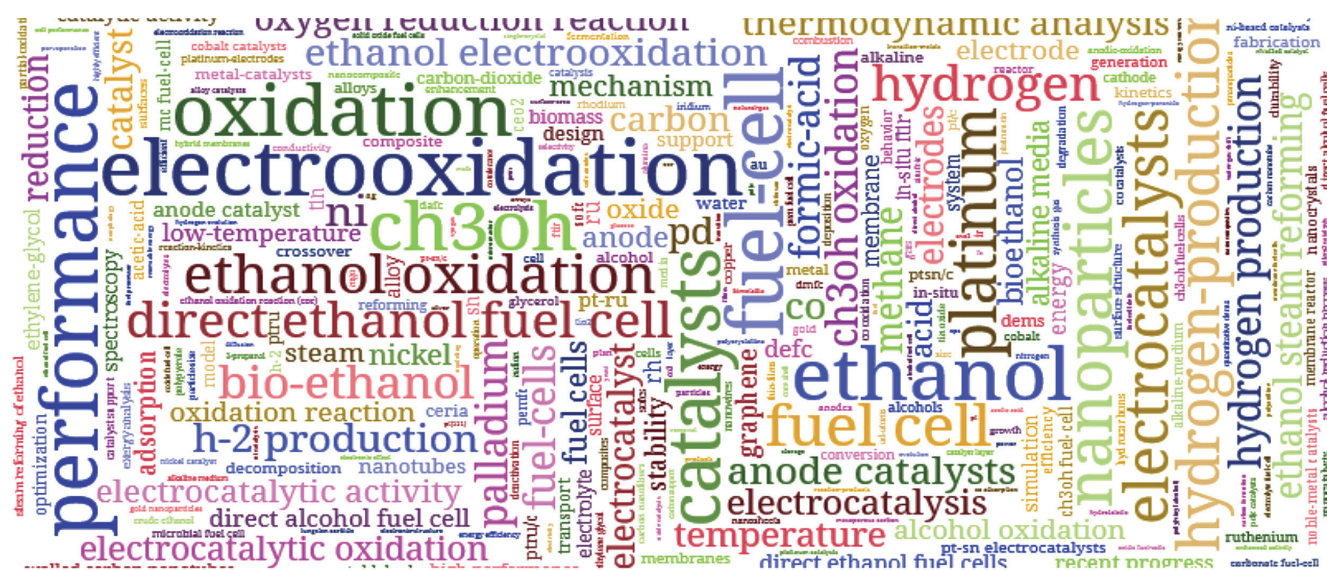


Figura 25: Nuvem de palavras-chave do cluster 8

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 11: 20 palavras-chave mais frequentes do *cluster* 8

#	Palavra	Frequência	#	Palavra	Frequência
1	electrooxidation	491	11	fuel cell	276
2	performance	456	12	hydrogen-production	261
3	ethanol	442	13	ethanol oxidation	244
4	fuel-cell	434	14	direct ethanol fuel cell	201
5	oxidation	419	15	hydrogen	196
6	catalysts	397	16	bio-ethanol	175
7	ch3oh	386	17	ni	159
8	nanoparticles	329	18	ch3oh oxidation	145
9	platinum	290	19	palladium	143
10	electrocatalysts	280	20	fuel-cells	141

Fonte: Elaboração própria.

De maneira geral, esse *cluster* tem artigos que tratam da oxidação e da reforma do etanol, o que inclui vários estudos sobre catalisadores. Vários estudos também tratam da termodinâmica do processo, muitas vezes com a finalidade de reduzir a temperatura de funcionamento da célula sem grandes perdas na eficiência. Também é

possível observar *subclusters* com o uso do etanol em diferentes tipos de célula, principalmente SOFC, PEM e alcalina (etanol direto). A Figura 26 mostra uma tendência de diminuição de artigos por ano, que, seguindo o que parece ser a tendência dos outros *clusters*, indica um amadurecimento da tecnologia.

A Figura 27 mostra a quantidade de artigos por país no *cluster* 8. Essa análise foi incluída na discussão do *cluster* para evidenciar a participação brasileira como o segundo país que mais publica no tema, o que mostra como vários estudos têm tido o foco estratégico em utilizar esse biocombustível nas células.

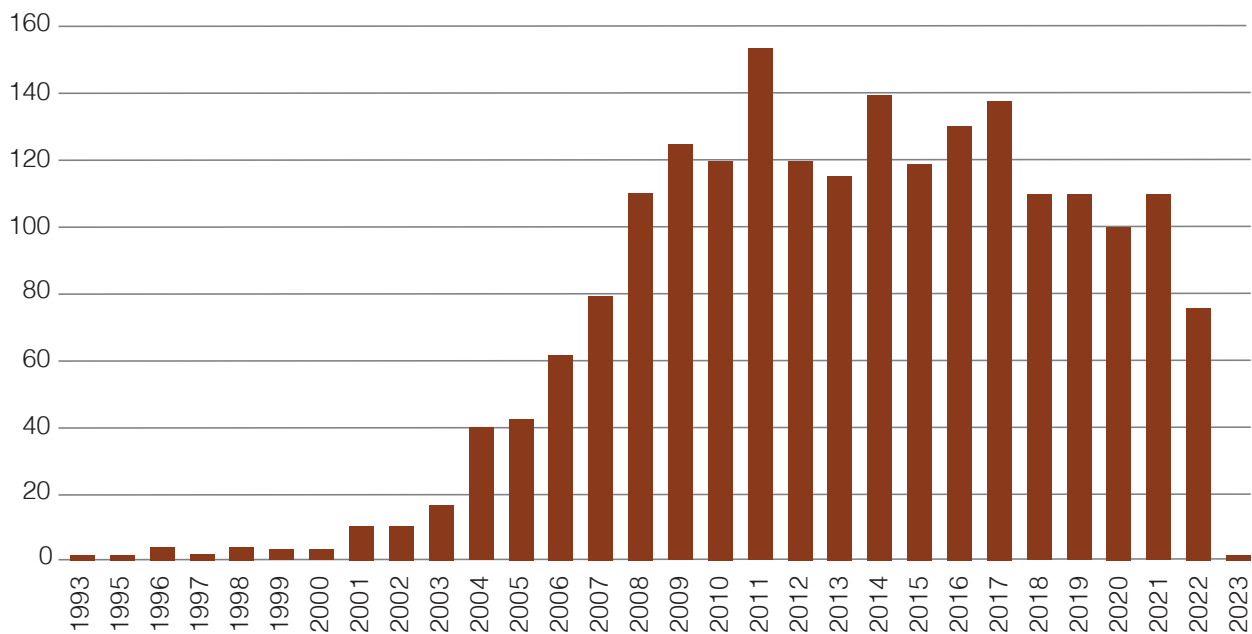


Figura 26: Evolução temporal da quantidade de artigos no *cluster 8*

Fonte: Elaboração própria.

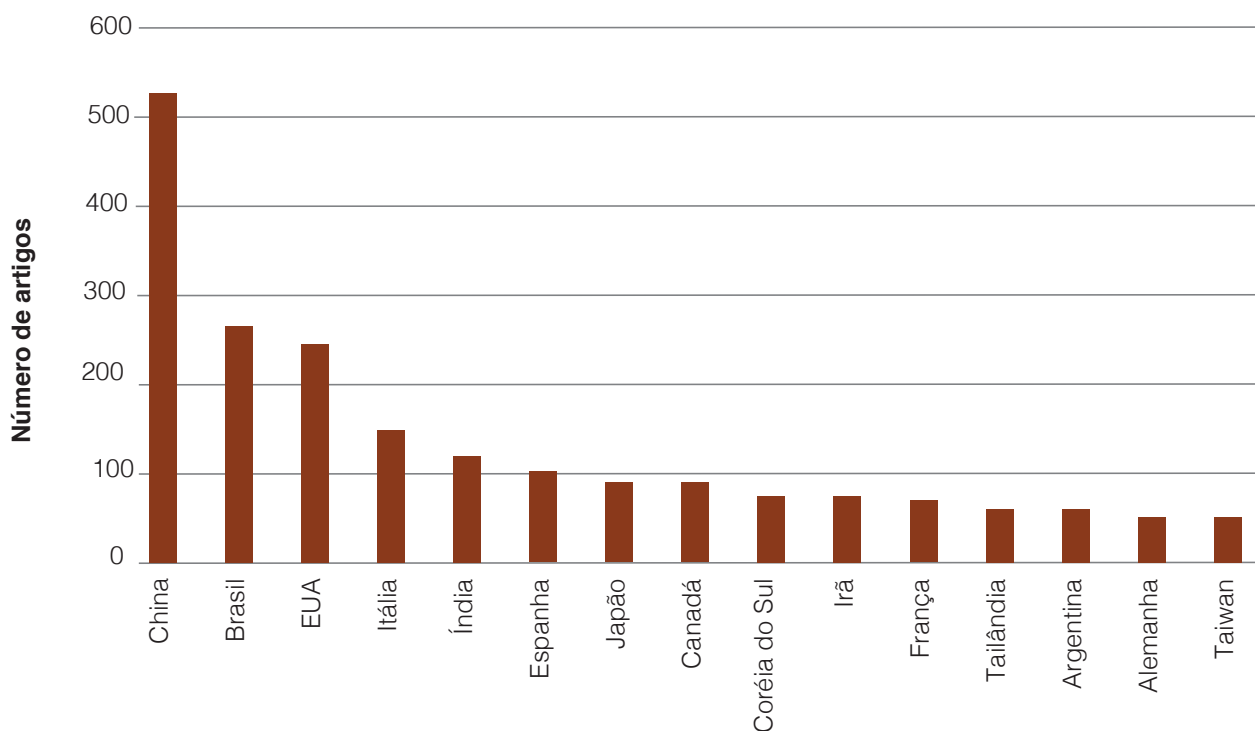


Figura 27: Número de artigos por país do *cluster 8*

Fonte: Elaboração própria.

4.3. Análise sobre os países

A Figura 28 apresenta os 20 países que mais publicam no tema de células a combustível com distinção entre as publicações de autores exclusivamente do país (sem parceria) e publicações que possuem autores de outros países (com parceira). A China e os EUA estão na liderança dos países que mais publicam no tema, seguido de Coreia do Sul e Japão, o que destaca a forte presença da Ásia Pacífico no desenvolvimento de estudos sobre células a combustível. Esses resultados estão alinhados com a atuação do mercado de CC. De acordo com Marketsand Markets (2022), Bloom Energy (EUA), Aisin Corporation (Japão), Doosan Fuel Cell Co., Ltd. (Coreia do Sul), Kyocera Corporation (Japão) e Plug Power Inc. (EUA) são os principais *players* que operam no mercado de células de combustível. Este resultado reflete algumas das ações que têm que sido promovidas por esses países.

A China tem visto um rápido desenvolvimento no mercado de células de combustível nos últimos anos, tendo como principal mercado o setor de transportes. Como exemplo, a China encomendou 74 ônibus elétricos de

células de combustível para a cidade de Zhangjiakou para os Jogos Olímpicos de Inverno de 2022. Algumas políticas têm sido destaque para o país, como a Estratégia de Energia Nova para Veículos (NEV), que estabelece metas para a implantação de células a combustível em veículos na China com incentivos financeiros para fabricantes e compradores, e o Plano Made in China 2025. Além disso, a infraestrutura de hidrogênio está fortemente em desenvolvimento, com investimentos na construção de uma rede de estações de abastecimento de hidrogênio para apoiar a demanda por veículos movidos a células a combustível (WANG, 2023).

O Japão instalou, em 2015, o programa Ene-farm, que levou à implantação de mais de 300.000 sistemas de células de combustível. O Japão está investindo em sistemas combinados de calor e energia com base em células de combustível. O Japão também vem preparando subsídios para ajudar empresas do setor a assumir a liderança no mercado de veículos com células de combustível movidos a hidrogênio (HIKIMA *et al.*, 2020).

A Coreia do Sul também tem uma estratégia industrial

de hidrogênio que visa a tornar o país um líder global na produção e implantação de veículos elétricos com célula de combustível (FCEV) e células de combustível estacionárias em grande escala para geração de energia. O país estabeleceu uma meta de produzir 6,2 milhões de FCEVs e implantar, pelo menos, 1.200 postos de abastecimento até 2040 (STANGARONE, 2021).

Já os EUA têm a Estratégia Nacional de Hidrogênio Limpo, que é uma política que explora oportunidades para o hidrogênio limpo contribuir para os objetivos nacionais de descarbonização em vários setores da economia, o que passa pelo uso de células a combustível (MILLER, *et al.*, 2020).

Também é possível visualizar, na Figura 28, uma participação expressiva de países europeus, ainda que uma parcela significativa das publicações tenha sido feita em parceria com outros países. O Brasil encontra-se na 19ª posição com 1.279 artigos dos quais 693 foram em parceria com outros países. A subseção 4.3.1 irá analisar em maiores detalhes os resultados para as publicações brasileiras.

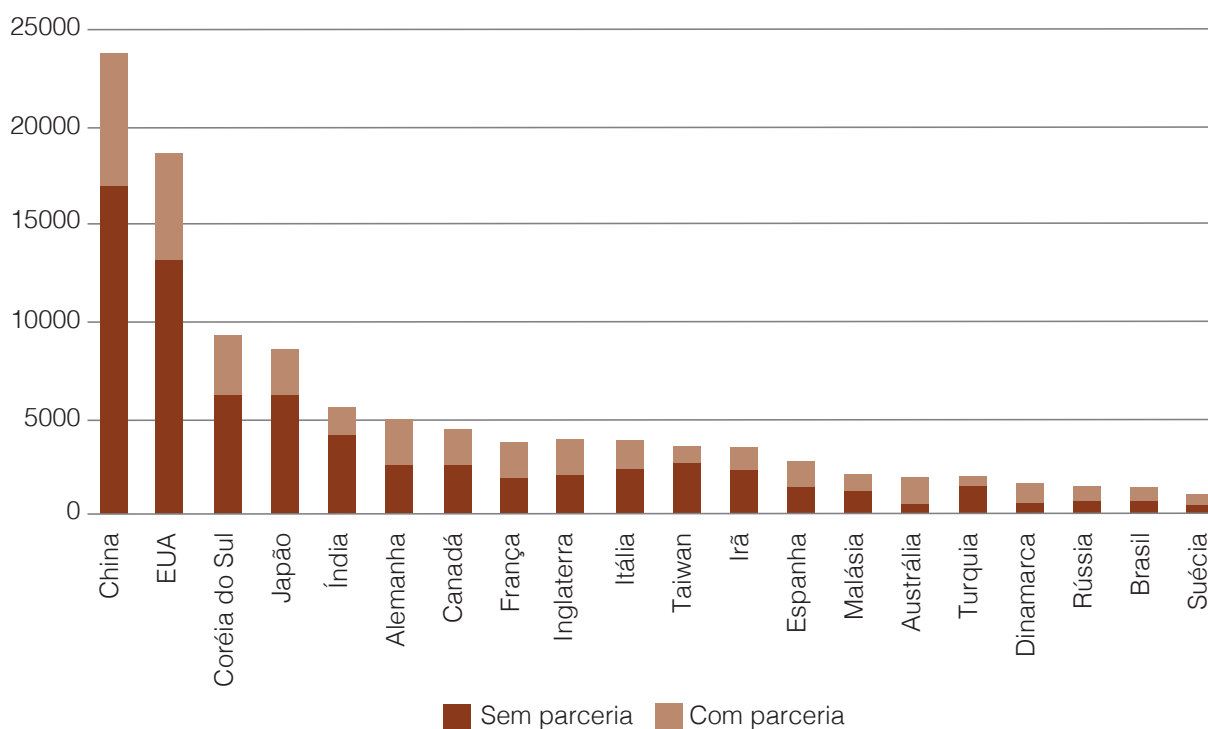


Figura 28: Países que mais publicaram no tema de células a combustível

Fonte: Elaboração própria.

4.3.1. Publicações brasileiras

Dos 99.468 artigos, 1.279 possuem autores brasileiros. Esse conjunto de artigos foi analisado e comparado com as informações da rede geral. Analisando a nuvem de palavras-chave (Figura 29), as 20 palavras-chave mais frequentes (Tabela 12) e a distribuição das áreas do conhecimento do WoS (Figura 30), observa-se que as pu-

blicações brasileiras tendem a seguir os padrões da rede geral, embora tenha como principal particularidade a presença do tema do etanol.

A presença do etanol é bastante esperada, uma vez que pode ser um combustível para as células e que é produzido em abundância no Brasil. O país é o segundo maior produtor de etanol do

mundo, e seu uso pode deixar o uso da célula a combustível ainda mais sustentável por ser produzido a partir de uma fonte renovável, o que não é necessariamente o que ocorre com o hidrogênio e o metanol, que atualmente são principalmente produzidos a partir de fonte fóssil.

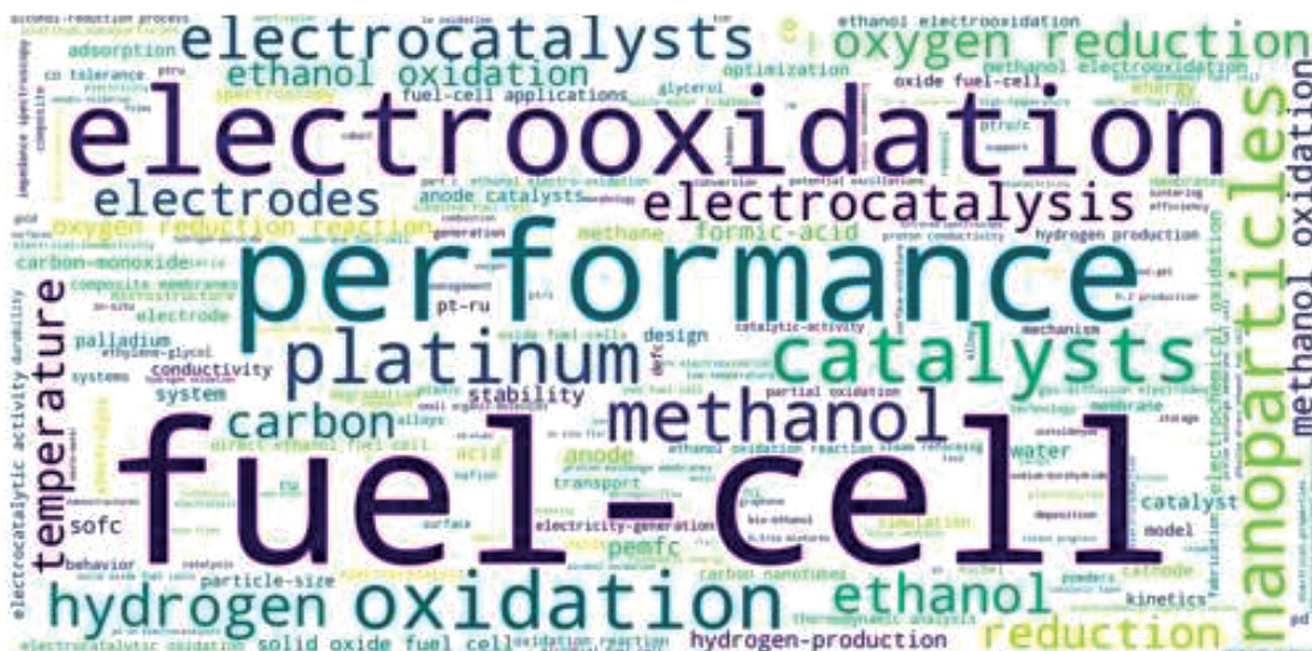


Figura 29: Nuvem de palavras-chave dos artigos brasileiros

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 12: Palavras-chave mais frequentes das publicações brasileiras

#	Palavra	Frequência	#	Palavra	Frequência
1	fuel-cell	559	11	ethanol	93
2	performance	221	12	electrocatalysis	87
3	electrooxidation	167	13	oxygen reduction	81
4	catalysts	166	14	electrodes	76
5	oxidation	166	15	carbon	74
6	platinum	142	16	temperature	69
7	nanoparticles	139	17	reduction	65
8	methanol	133	18	ethanol oxidation	62
9	electrocatalysts	119	19	methanol oxidation	62
10	hydrogen	113	20	oxygen reduction reaction	61

Fonte: Elaboração própria.

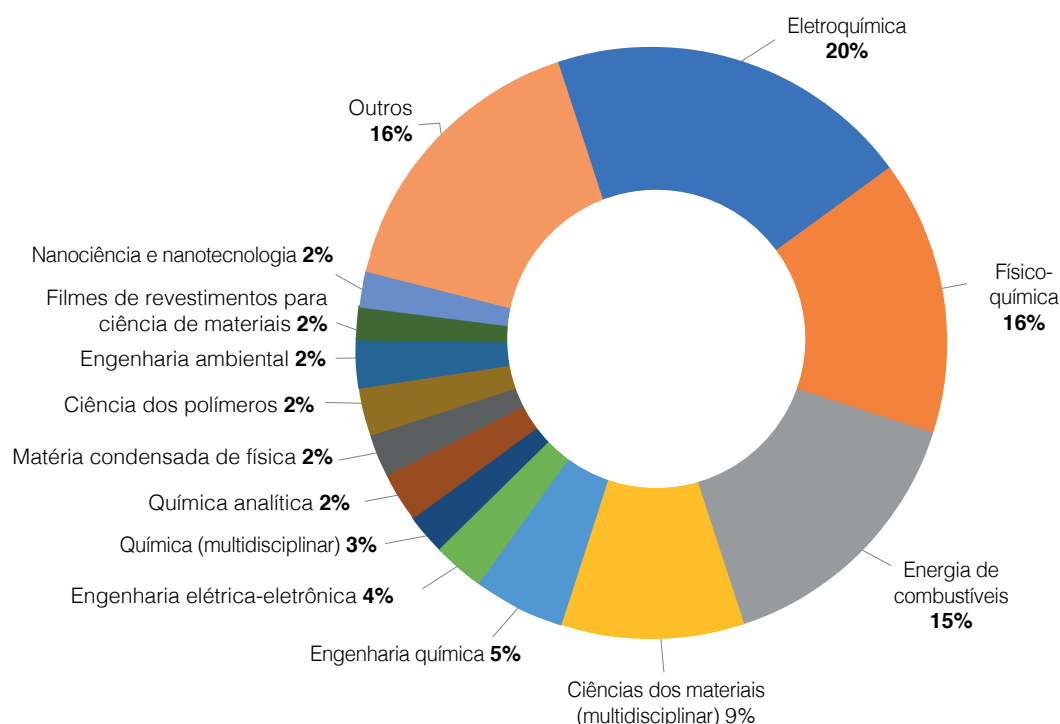


Figura 30: Distribuição das áreas do conhecimento da WoS para publicações brasileiras

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 31 também apresenta um perfil semelhante de publicações por ano da rede geral, tendo claro aumento na primeira década dos anos 2000, seguida de uma estabilização. Tal aumento parece seguir os movimentos internacionais de diversificação da matriz de energia, principalmente pelo início dos esforços dos EUA e da Europa em diversificar sua

matriz e particularmente dos incentivos provenientes do governo Bush (2001-2009). Num contexto nacional, no começo dos anos 2000, também tiveram movimentos favoráveis às células a combustível no país, como a proposta de Programa Brasileiro de Células a Combustível encomendada pela Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Energia em par-

ceria com o CGEE (CGEE, 2002). Diferentemente da rede geral, a tendência para o Brasil parece ser para uma estabilização.

A Figura 32 mostra as instituições brasileiras que mais publicam no tema. Observa-se que a região Sudeste concentra a maior parte das publicações, principalmente o estado de São Paulo.

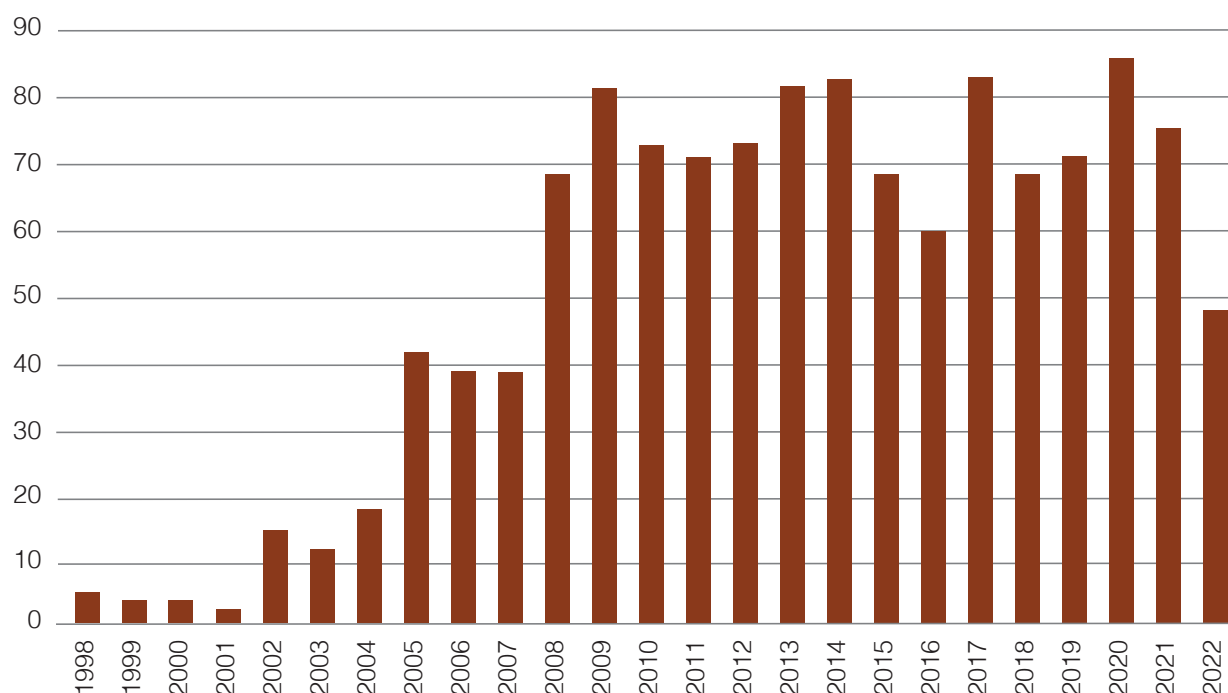


Figura 31: Número de publicações brasileiras ao longo dos anos

Fonte: Elaboração própria.

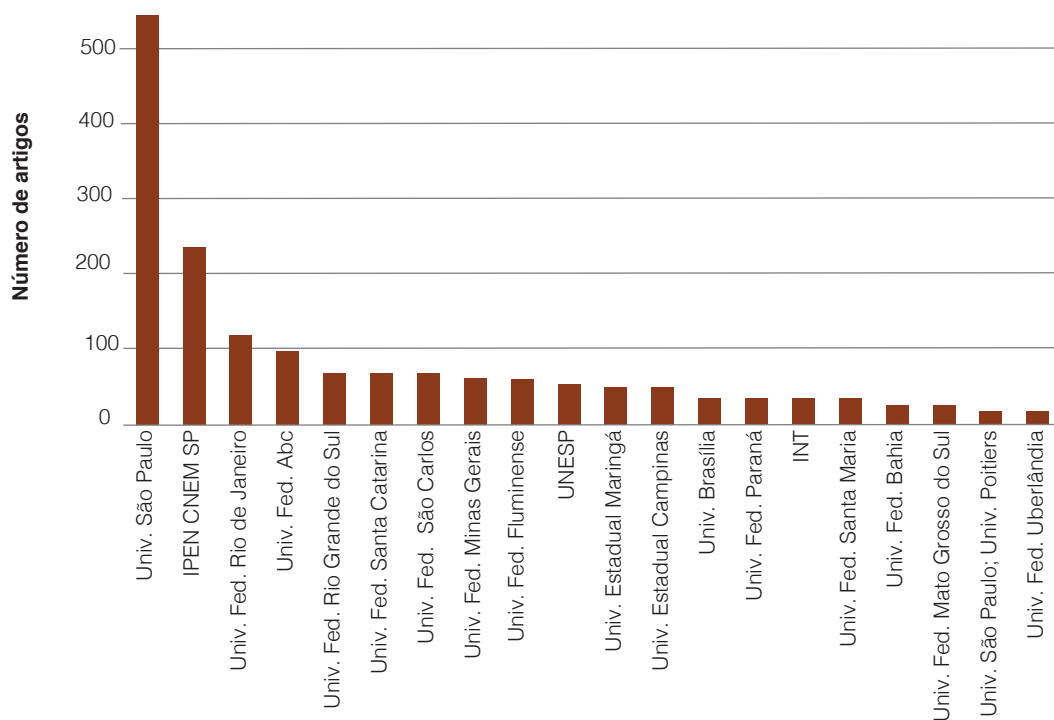


Figura 32: Instituições brasileiras que mais publicam no tema de células a combustível

Fonte: Elaboração própria.

5. Panorama sobre a produção global de patentes sobre células a combustível

Este *Informe* levantou 140.378 patentes no tema de células a combustíveis com o intuito de fazer um panorama em torno dessa tecnologia. As próximas seções vi-

sam a apresentar uma visão geral das patentes, com a evolução no número de depósitos ao longo dos anos e a distribuição das patentes por países, depositantes e

áreas do conhecimento; um foco em alguns tipos específicos de células; e, por fim, uma análise das patentes depositadas no Brasil.

5.1. Visão geral das patentes sobre células a combustível

A Figura 32 mostra o avanço no número de patentes depositadas por ano de prioridade - assim que a patente é submetida - e por ano da primeira publicação. Observa-se um perfil semelhante ao de artigos científicos,

com uma rápida aceleração dos depósitos de patentes a partir dos anos 2000. No entanto, ao contrário dos artigos, esse crescimento só se mantém até 2006. Nesse primeiro período de crescimento, Estados Unidos, Japão e

Alemanha são os países com os maiores números de depósitos. Já o segundo período de crescimento, a partir de 2015, é puxado pelos depósitos na China e na Coreia do Sul.

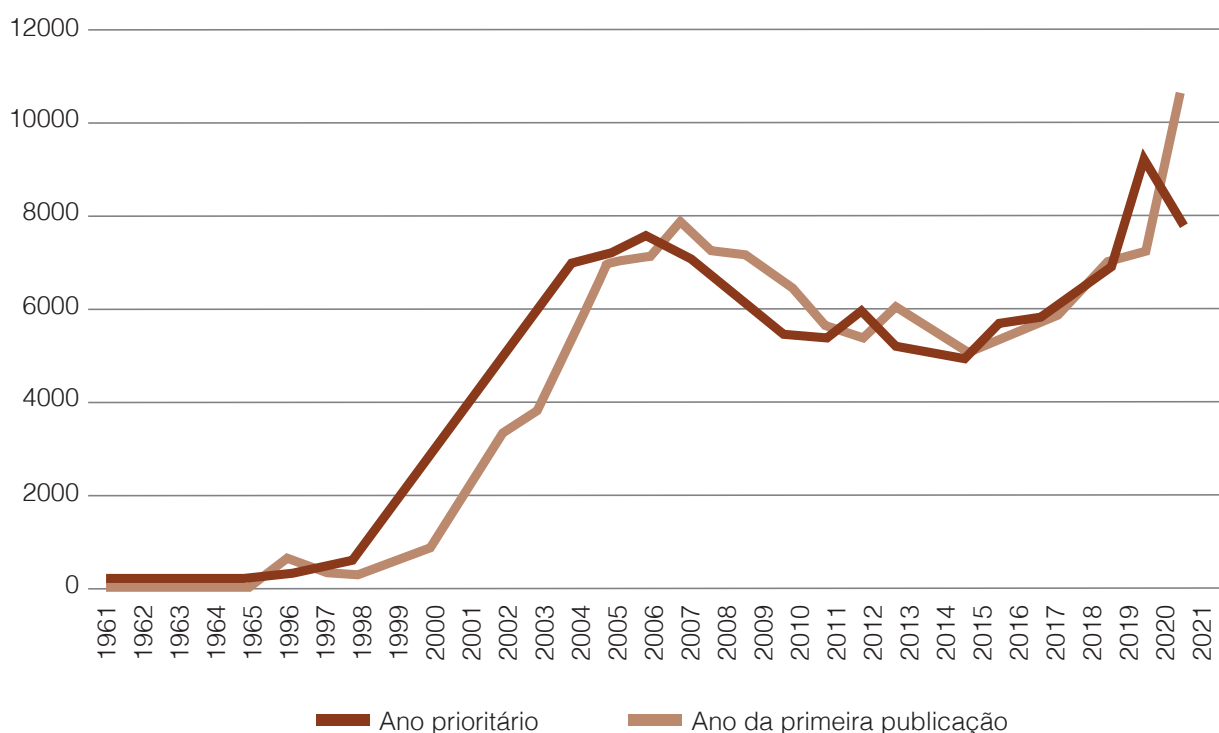


Figura 33: Evolução do número de patentes depositadas por ano

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 34 e a Figura 35 apresentam os países com o maior número de depósitos de patentes. Observa-se forte intenção de proteção da tecnologia no leste asiático, Esta-

dos Unidos e Alemanha como reflexo das estratégias desses países em fazer uso das células a combustível. A Figura 36 reforça a intensa atuação desses países no tema de células

a combustível ao apresentar os principais depositantes de patentes. Há, ainda, importante presença do Japão, da Coreia do Sul, da Alemanha e dos Estados Unidos.

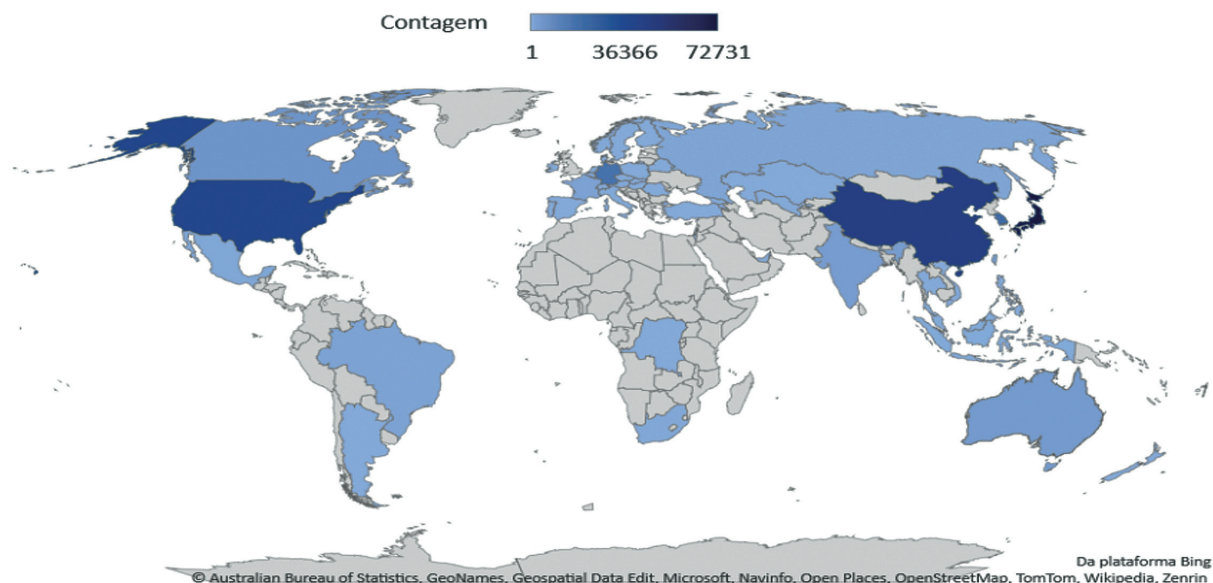


Figura 34: Distribuição dos depósitos de patentes por país

Fonte: Elaboração própria.

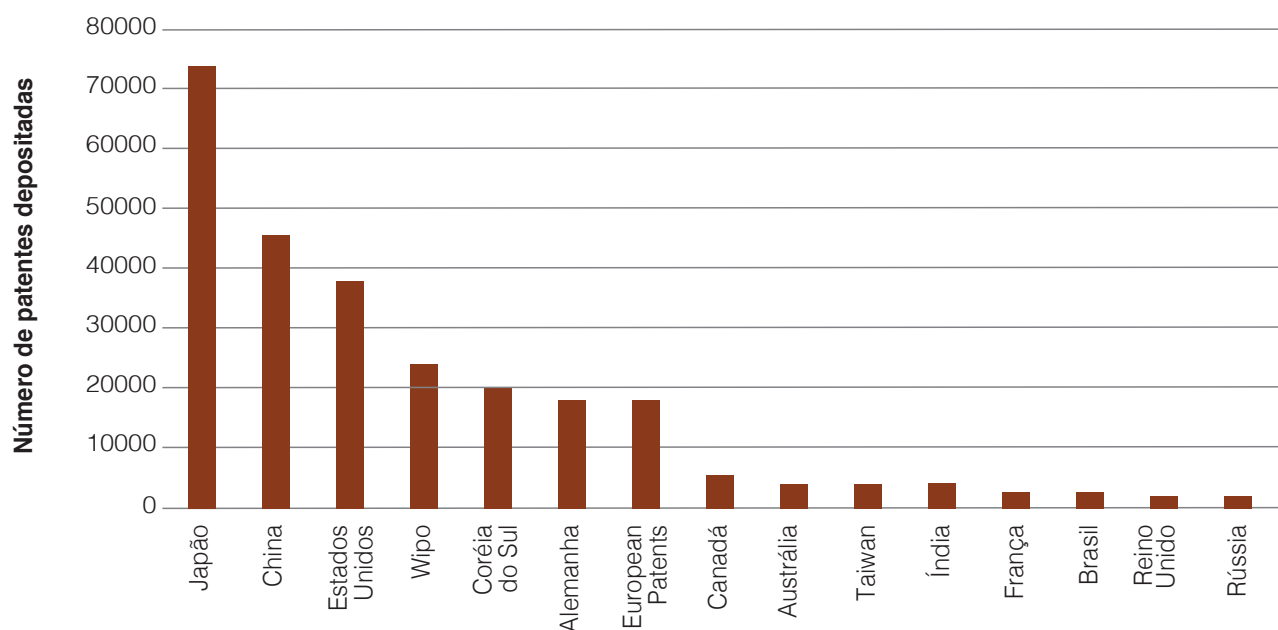


Figura 35: 15 países com maior número de depósitos

Fonte: Elaboração própria.

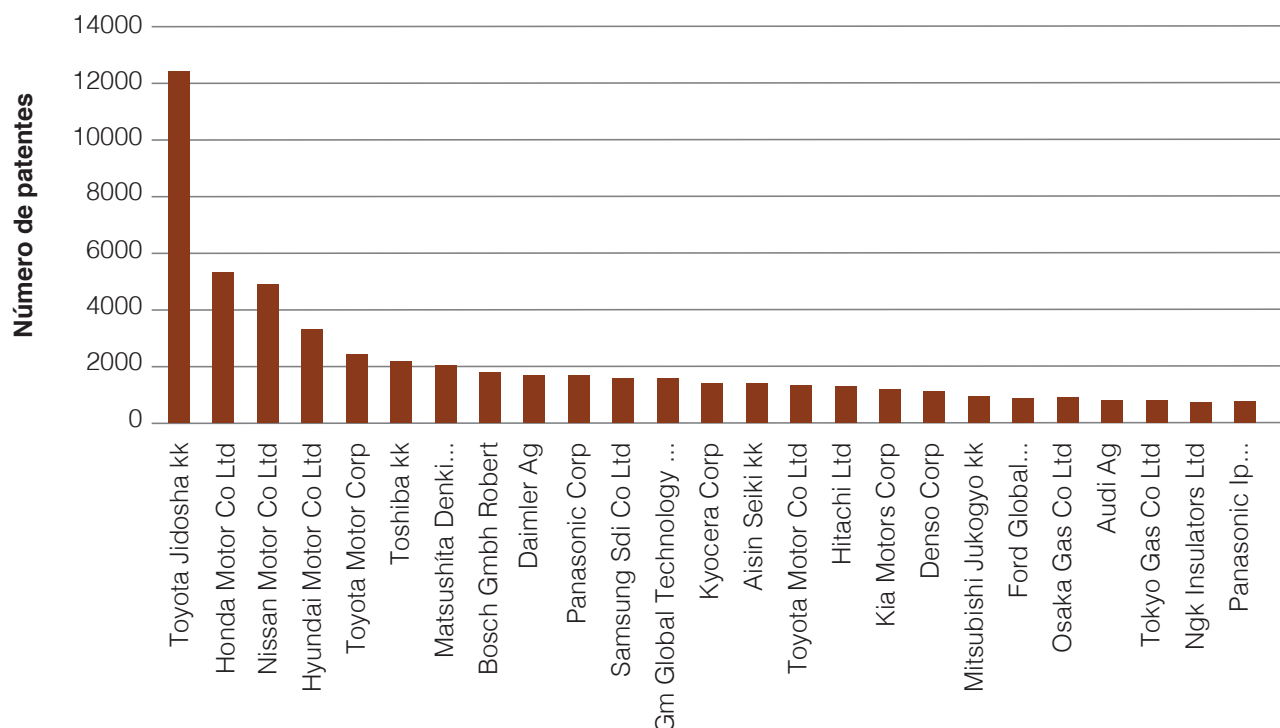


Figura 36: Principais depositantes do conjunto de patentes

Fonte: Elaboração própria.

De forma a analisar os temas tratados no conjunto de 140.378 patentes, foram observadas as áreas de conhecimento mais frequentes (Figura 37) e as principais estruturas de códigos de classificação internacional de patentes (*International Patent Classification – IPC*)

(Figura 38). Os códigos IPC fornecem um sistema hierárquico de linguagem para classificação de patentes e modelos de utilidade de acordo com as diferentes áreas da tecnologia a que pertencem (WIPO, 2022).

As áreas do conhecimento são semelhantes aos dos

artigos, mas é interessante notar a presença das áreas de ciências da computação e de telecomunicações de maneira muito mais destacada. Todavia as áreas de engenharia, eletroquímica e energia, ainda, são as predominantes.

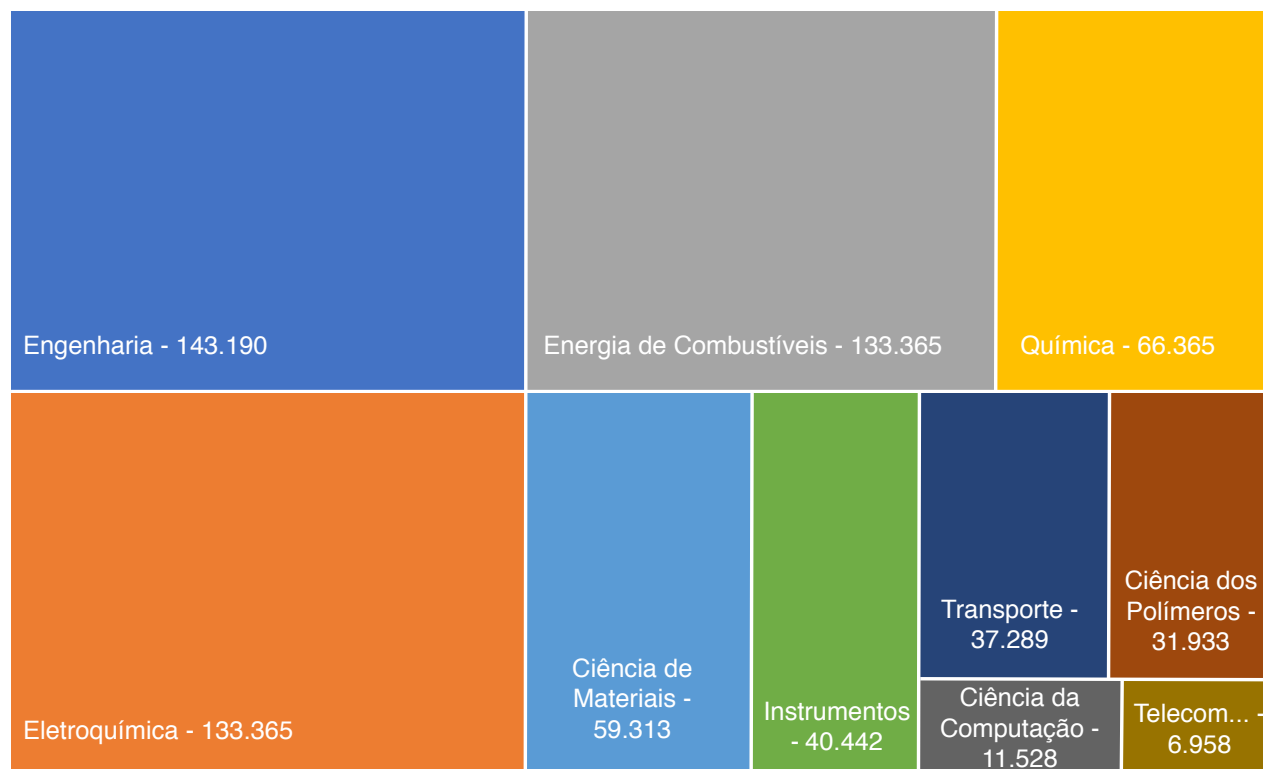


Figura 37: Distribuição das 10 áreas do conhecimento mais frequentes dentre as patentes de células a combustível

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 38 mostra o perfil de IPCs das patentes sob diferentes níveis de hierarquia do código. A primeira letra do código refere-se à seção, isto é, macroáreas do conhecimento. No topo da Figura 38, observa-se que as patentes são classificadas na sua maioria nas seções H, B e C, que se referem especificamente à eletricidade, ao transporte e à química e metalurgia. Optou-se por analisar mais especificamente as seções H e B. Na seção H, a

direita da Figura 38, a classe de maior frequência foi a H01 — elementos para eletricidade. Dentro dessa, a subclasse mais frequente foi a H01m — baterias ou processos de conversão de energia química em elétrica. Quando se chega a um nível de grupo mais frequente, é o específico de células a combustível, H01m8.

Na seção B, a esquerda da Figura 38, a classe mais frequente é a B60 — veículos em geral; e, dentro dessa, a

subclasse mais frequente foi a B60I — veículos propulsados por eletricidade.

Essa forte presença da seção B nas patentes enfatiza uma das principais aplicações das células a combustível que se refere ao uso em veículos. No entanto, dentro da série H, há a presença de códigos que se referem a todos os tipos de células, mesmo as com aplicação estacionária e para aplicação em dispositivos de telecomunicações.

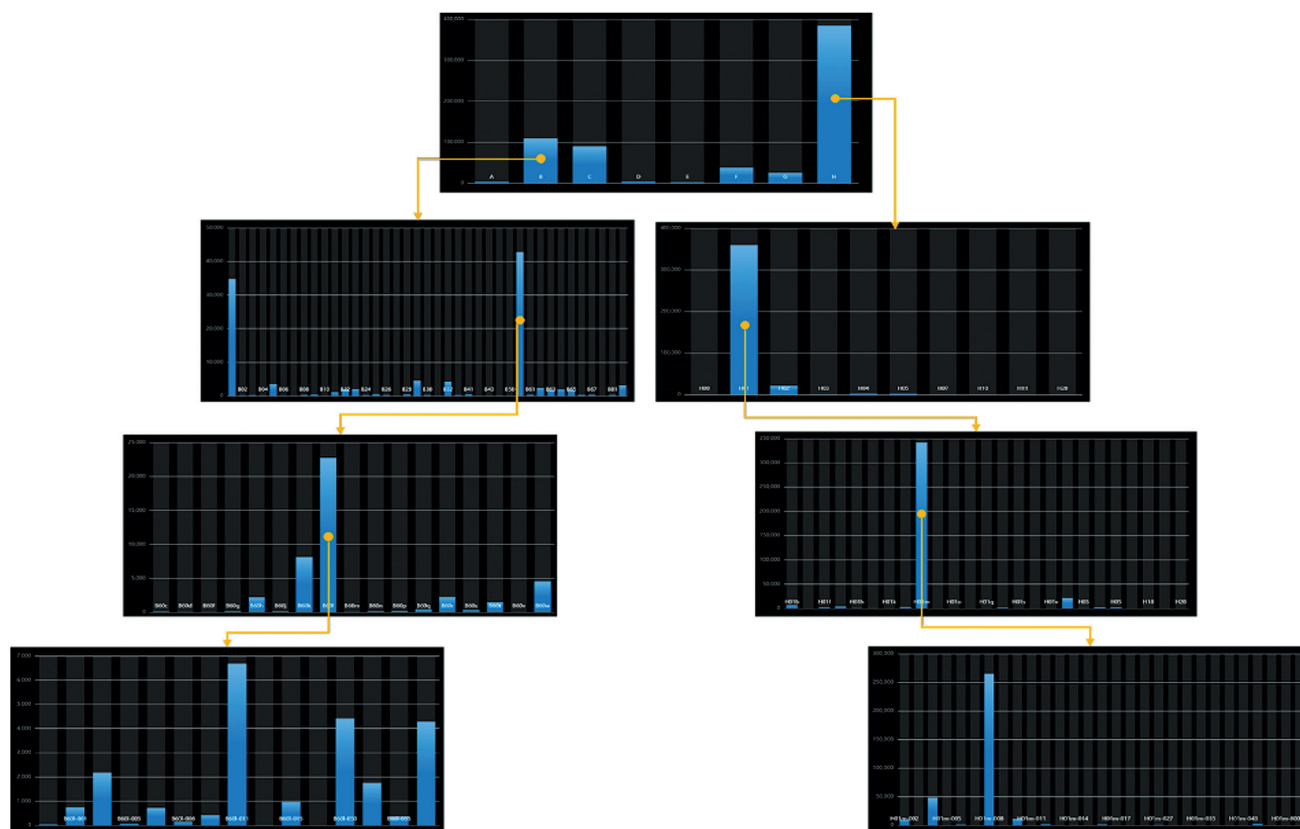


Figura 38: Estruturas de códigos IPC para as patentes de células a combustível

Fonte: Elaboração própria.

5.2. Análise por tipos de Células a Combustível

A seção 4.2 – *Caracterização da rede por clusters temáticos* – mostrou que os *clusters* sobre alguns tipos específicos de células – PEM, SOFC e DMFC – apresentavam uma tendência de queda no número de publicações ao longo dos anos. Isso pode ser um indicativo

da diminuição de interesse no tema ou de amadurecimento da tecnologia, quando passam a haver menor quantidade de estudos novos sobre o tema. Uma forma de investigar mais a fundo essas tendências é observar os comportamentos dos depósitos de patentes ao longo

dos anos. Para isso, foi feita uma busca no conjunto de patentes e foram analisados os comportamentos das patentes de PEM, SOFC e DMFC por ano. Essas informações estão na Figura 39, Figura 40 e Figura 41, respectivamente.

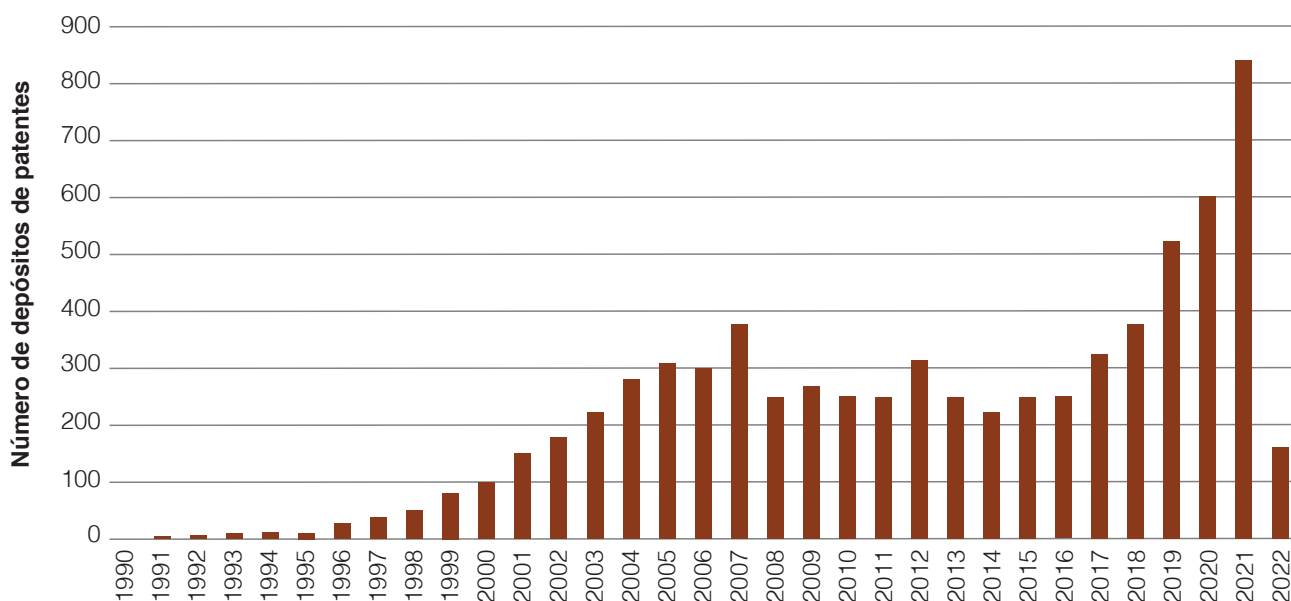


Figura 39: Depósitos de patentes do tipo PEMFC ao longo dos anos

Fonte: Elaboração própria.

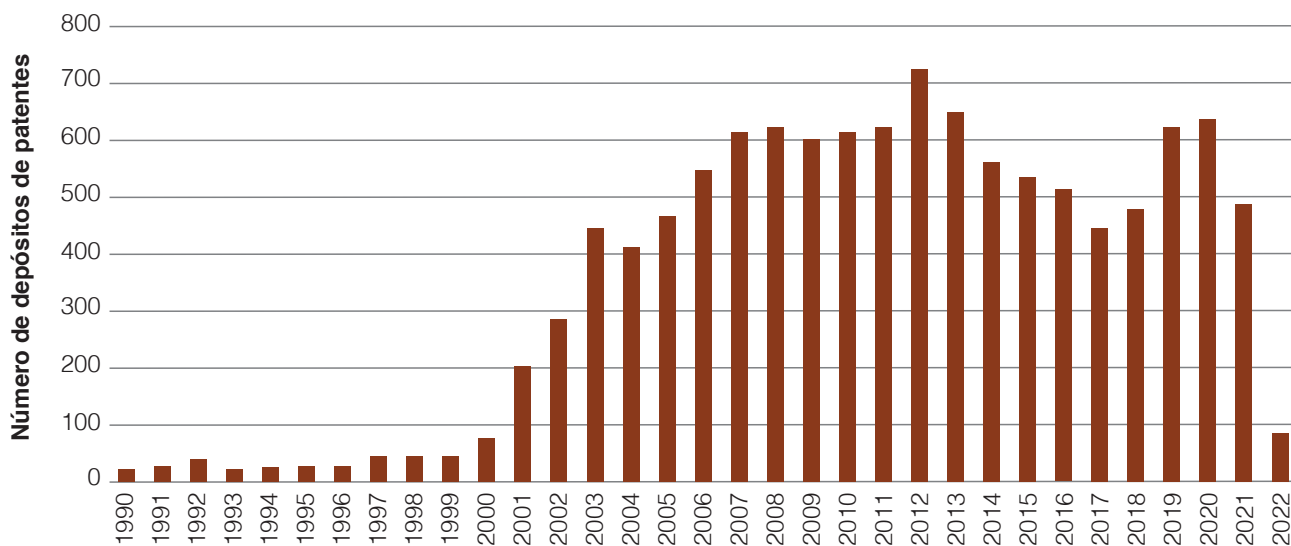


Figura 40: Depósitos de patentes do tipo SOFC ao longo dos anos

Fonte: Elaboração própria.

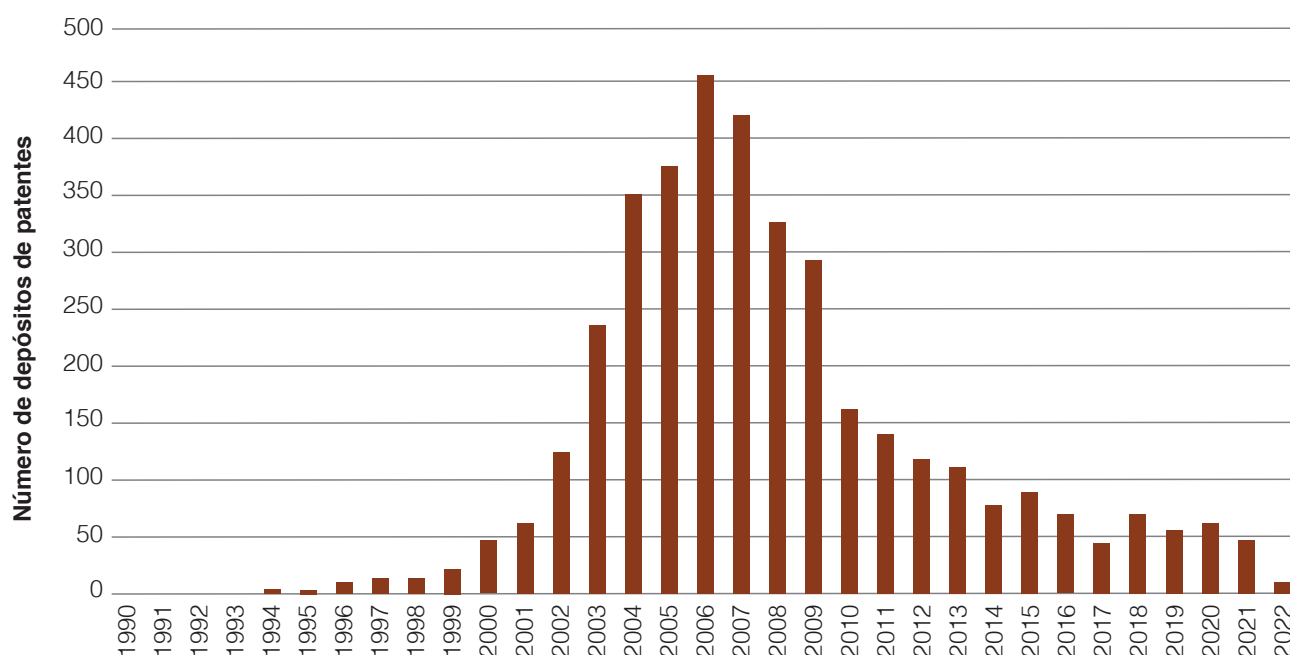


Figura 41: Depósitos de patentes de DMFC ao longo dos anos

Fonte: Elaboração própria.

Para as PEMFCs, a análise de artigos mostrou uma estabilidade na produção anual de novos estudos. No entanto, para as patentes, foi observado um grande número de depósitos a partir de 2016, como já foi visto na Figura 33 e que é puxado pelo aumento de depósitos na China e na Coreia do Sul. O comportamento da curva na Figura 39 reforça que vem havendo desenvolvimento tecnológico nessa área.

Para as SOFCs, em ambos os casos, há uma queda. No caso das patentes, a maioria dos depósitos são feitos no Japão. De acordo com a Market&Market, as SOFCs devem liderar o mercado de células a combustível em 2027, o que indica um amadurecimento tecnológico das SOFCs, sem grandes novas adições tecnológicas que resultariam em maiores números de artigos e patentes depositadas. O mesmo com-

portamento pode ser visto para o caso das DMFCs. De acordo com a Market Research Report 2022 da *Fortune Business Insights*, o tamanho do mercado global de célula de combustível de metanol direto foi de 1,73 milhão em 2020. O mercado está projetado para crescer de US\$ 2,00 milhões em 2021 para US\$ 5,85 milhões em 2028 (FORTUNE BUSINESS INSIGHTS, 2021).

5.3. Análise das patentes depositadas no Brasil

Entre o conjunto de 140.331 patentes, 1.242 foram depositadas no Brasil. A Figura 42 mostra a evolução do número de patentes por ano de prioridade. O padrão de crescimento até

o ano de 2006 visto para o conjunto completo se repete aqui, porém observa-se clara queda no número de depósitos a partir de 2007, o que pode indicar que o mercado brasileiro tem sido visto

como mais promissor em outras áreas relacionadas a energias de baixo carbono, como os biocombustíveis, energias renováveis e carros elétricos.

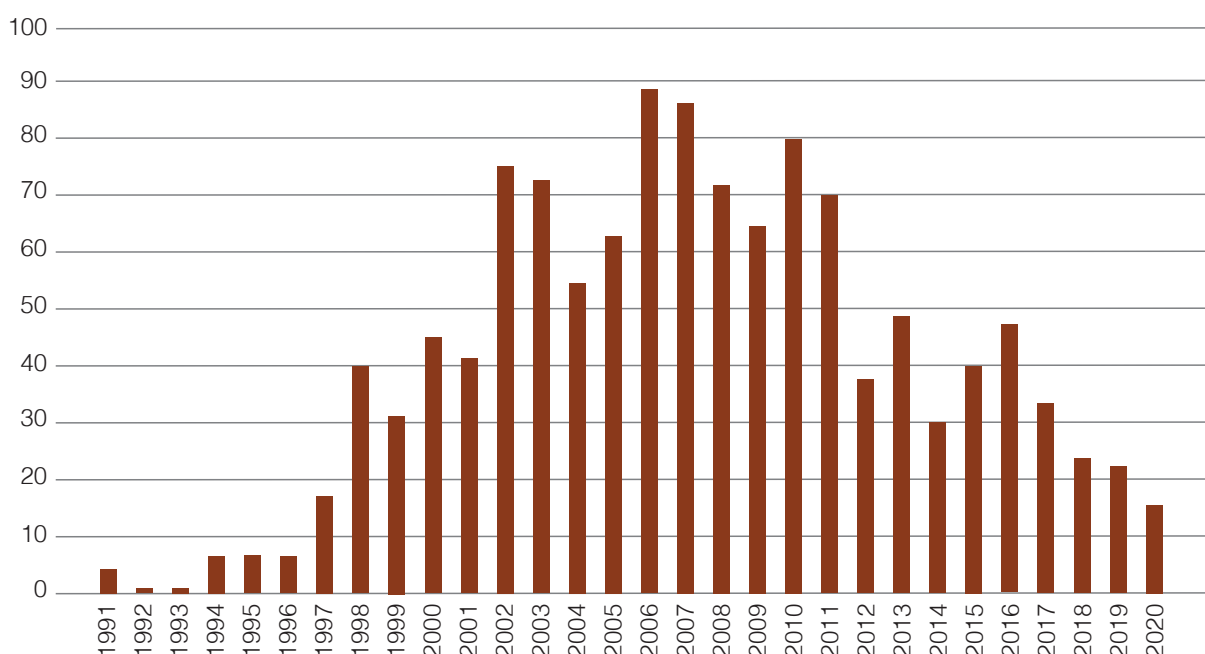


Figura 42: Número de patentes depositadas no Brasil por ano de prioridade

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 43 mostra os principais depositantes de patentes no Brasil. Observa-

-se forte presença de empresas de origem japonesa, britânica, francesa e americana,

um perfil mais diferenciado do que aquele da rede geral.

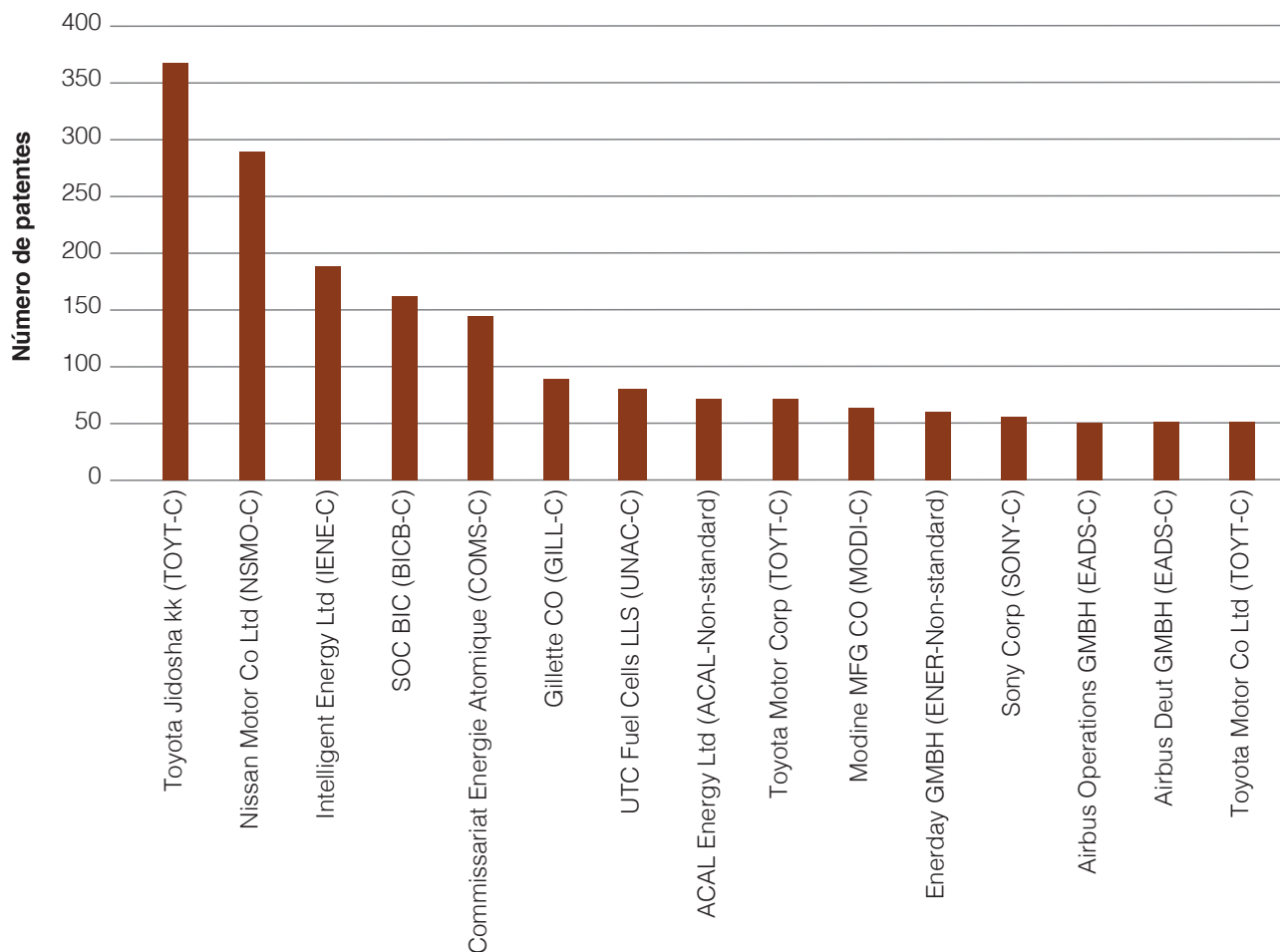


Figura 43: Principais depositantes de patentes no Brasil

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 44 mostra o perfil de códigos IPCs das patentes depositadas no Brasil. Assim como para a análise

geral, as seções mais frequentes foram a H, C e B. O código que está relacionado aos veículos por propul-

são elétrica também está em destaque no grupo de patentes depositados no Brasil.

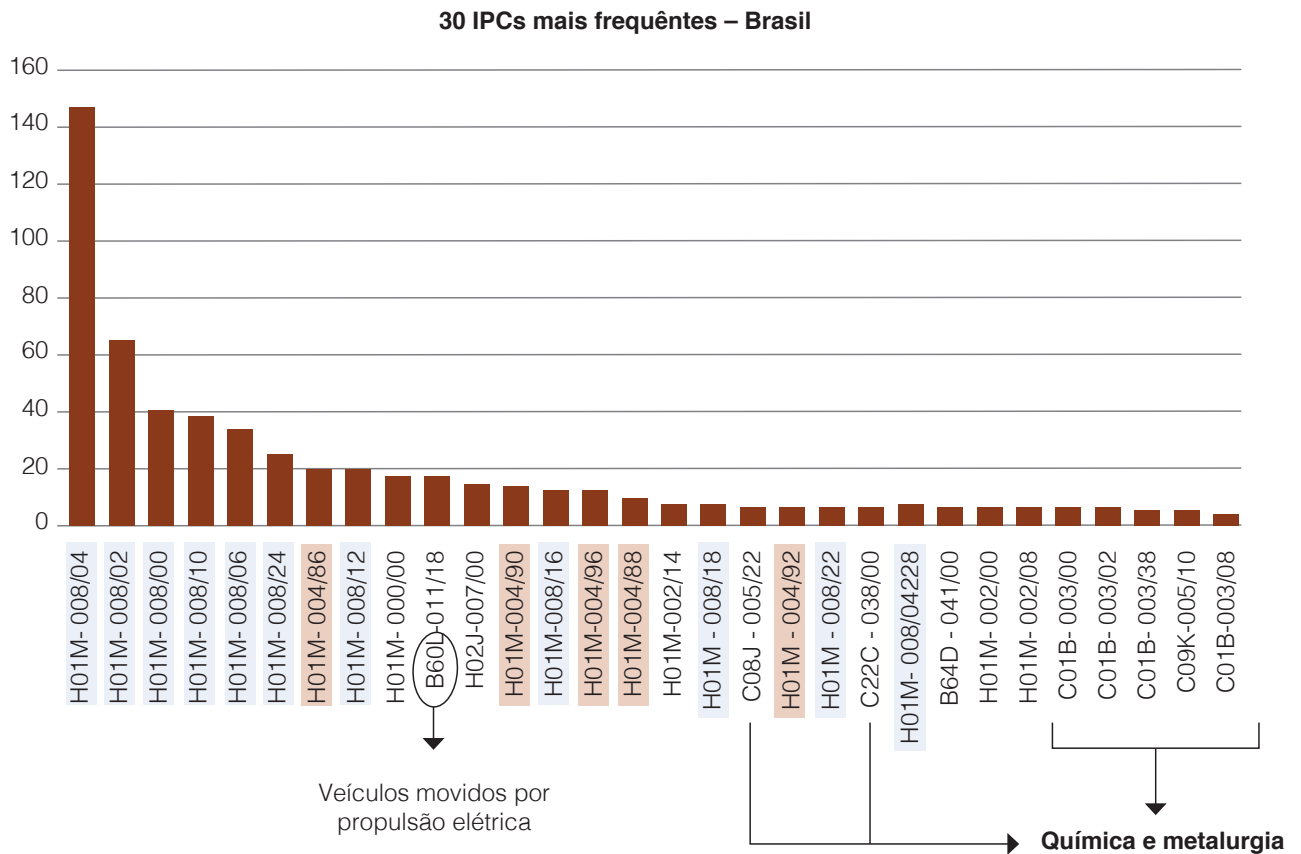


Figura 44: Códigos IPCs mais frequentes das patentes depositadas no Brasil

Fonte: Elaboração própria.

Focando numa análise nacional, foram buscadas dentro do conjunto de depositantes de patentes no Brasil universidades brasileiras. A Figura 45 mostra o resultado

dessa seleção, com o destaque para a UFRGS e a USP. Vale enfatizar que, apesar do elevado número de patentes identificadas neste estudo, a amostra estudada não deve

ser considerada como a totalidade de patentes em células a combustível já depositadas, como foi explicitado na seção 3.

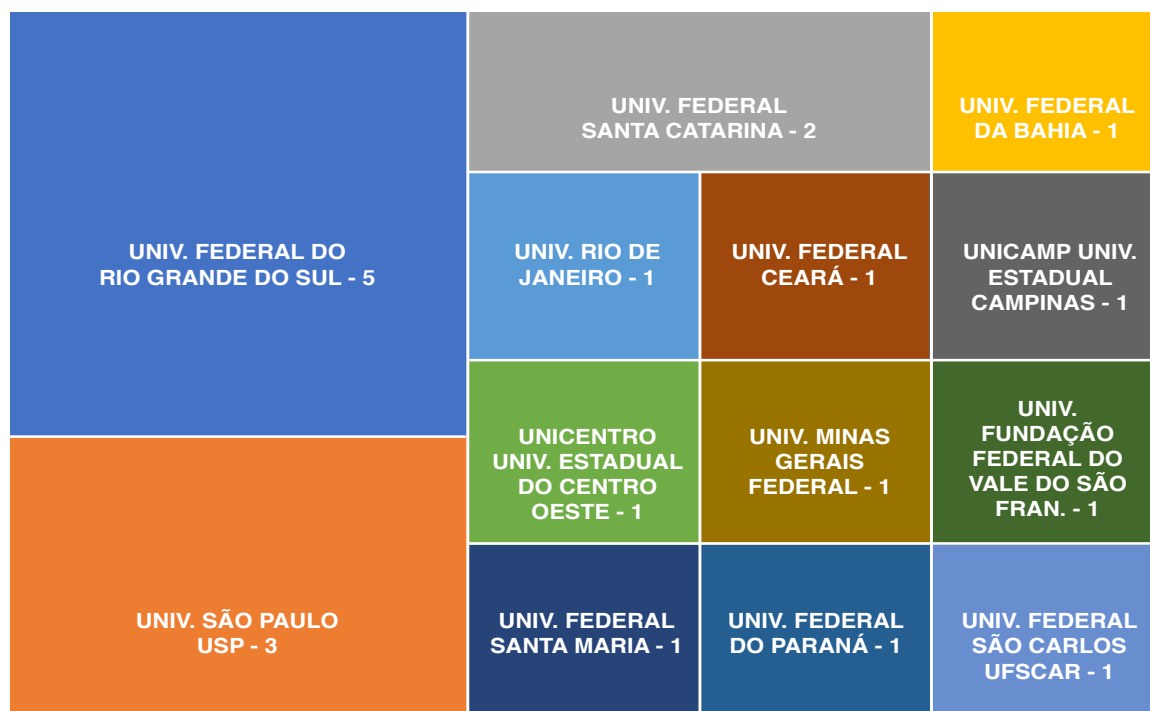


Figura 45: Universidades brasileiras que realizam depósito de patentes de CC no Brasil

Fonte: Elaboração própria.

6. Considerações finais

Esse *Informe* apresentou panoramas de artigos e patentes de células a combustível no Brasil e no mundo, acompanhado das tendências nacionais e internacionais. Em sua essência, publicações científicas e patentes trazem informações técnicas sobre o avanço de determinada tecnologia. Aqui foi possível verificar que alguns tipos de células possuem um nível de amadurecimento elevado, muitas já em nível comercial, ainda que apresentem oportunidade de aprimoramento para que seja possível a competição e a substituição de tecnologias tradicionais que utilizam ma-

téria-prima fóssil. Foram os casos principalmente das PEMFCs e das SOFCs.

Os resultados dos panoramas também mostram a importância de várias áreas relacionadas com as CCs e que apoiam o seu desenvolvimento. Algumas são bastante técnicas, como a área de novos materiais, nanotecnologia e catalisadores. Outras são mais abrangentes, como os estudos sobre produção, armazenamento e logística do hidrogênio para uso nas células. Outro exemplo é a aplicação veicular e o desenvolvimento de sistemas que utilizam as células a combustível.

Além das informações técnicas trazidas pelos artigos e patentes, é possível tirar outras conclusões. Este *Informe* destacou o crescente interesse da China e Coreia do Sul na última década em células a combustível. Esses países somam-se aos EUA, aos Japão e à Alemanha que, há mais de 20 anos, focam nessa tecnologia.

As diferentes análises feitas no contexto brasileiro mostra que o Brasil tem focado em estudar sistemas que utilizem o etanol como combustível da célula. O que é bastante coerente uma vez que o país é um dos líderes mundiais de produção de

etanol e já possui toda uma cadeia eficiente e sustentável de produção e distribuição a preços competitivos. Entretanto, é importante levar em consideração os desenvolvimentos recentes ocorridos no país relacionados à produção e ao uso do hidrogênio renovável. A busca por

técnicas sustentáveis de produção, criação de normas de armazenamento, distribuição e uso e políticas de incentivo abrem a oportunidade para o país de utilizar células a hidrogênio.

Por fim, este *Informe* gerou diversas análises que visam a dar apoio a decisões

estratégicas sobre o tema de células a combustível, mas principalmente criou um banco de dados de artigos e patentes que pode ser revisitado quando necessário para buscas mais específicas, sempre visando a auxiliar o processo decisório por meio de evidências.

7. Referências

BRASIL. Ministério das Minas e Energia - MME, Ministério da Economia - ME. **Relatório Ciclo-Otto**; GT - Célula combustível Avaliação técnica dos requisitos para desenvolvimento da tecnologia de célula combustível a etanol. Brasília: 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/relatorio_final_gt___celula_combustivel___roadmap.pdf/@/download/file

BRASIL. Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações - MCTI. **Planos de ação tecnológica para os setores do sistema energético, agricultura, florestas e outros usos da terra**. Brasília. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. 2021. p.23-28. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/tna_brazil/3_Sumario_dos_Planos_de_acao_tecnologica_mitigacao.pdf

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. **Programa Brasileiro de células a combustível**. Brasília: 2002. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Programa+Bras+Cel.+Combustivel_1167.pdf/8d33d701-6b70-40c8-a184-1ae5c55a9e30?version=1.0

CLARIVATE. **Derwent Innovation Index**. Index on web of Science. 2023. Disponível em: <https://clarivate.com/products/scientific-and-academic-research/research-discovery-and-workflow-solutions/webofscience-platform/derwent-innovations-index-on-web-of-science/#:~:text=Derwent%20Innovations%20Index%E2%84%A2%20facilitates,%2C%20electronic%2C%20and%20mechanical%20engineering.science/#:~:text=Derwent%20Innovations%20Index%E2%84%A2%20facilitates,%2C%20electronic%2C%20and%20mechanical%20engineering>.

DE SÁ, M.H.; PINTO, A.M.F.R.; OLIVEIRA, V.B. Passive small direct alcohol fuel cells for low-power portable applications: assessment based on innovative increments since 2018. **Energies** v.15, n.10, p. 3787. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/10/3787>

DICKS, A.L.; RAND, D.A.J. **Fuels cell systems explained**. Wiley. 2018.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Fuel cell market size, share & COVID-19**. Impact analysis, by type (proton Exchange membrane fuel cell, solid oxide fuel cell, phosphoric acid fuel cell and others), by application (transport, stationary and portable) and regional forecast, 2022-2029. 2021. 210 p.

HIKIMA, K.; TSUJIMOTO, M.; TAKEUCHI, M.; KAJIKAWA, Y. Transition analysis of budgetary allocation for projects on hydrogen-related technologies in Japan. **Sustainability**, v.12, n.20, p. 8546. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Kazuhiro-Hikima/publication/344680372_Transition_Analysis_of_Budgetary_Allocation_for_Projects_on_Hydrogen-Related_Technologies_in_Japan/links/5f894075299bf1b53e2c00fd/Transition-Analysis-of-Budgetary-Allocation-for-Projects-on-Hydrogen-Related-Technologies-in-Japan.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnNOUGFnZSI6InB1YmxpY-2FOaW9uliwicGFnZSI6InB1YmxpY2FOaW9uIn19. Acesso em: mar. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Hydrogen projects database**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>. Acesso em abril de 2023.

KAMARUDIN, M.Z.F.; KAMARUDIN, S.K.; MASDAR, M.S.; DAUD, W.R.W. Review: Direct ethanol fuel cells. **International Journal of Hydrogen Energy** v. 38, n.22, p. 9438-9453. 2013.

MARKETSANDMARKETS. **Fuel cell market global forecast to 2027**. May 2022. 321p.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A. Comparative study of different fuel cell technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v.16, n. 1, p. 981- 989. 2012.

MILLER, E.L.; THOMPSON, S.T.; RANDOLPH, K.; HULVEY, Z.; RUSTAGI, N.; SATYAPAL, S. US Department of Energy hydrogen and fuel cell technologies perspectives. **MRS Bulletin**, v. 45, n. 1, p. 57-64. 2020.

OMAR, Z.S.; MEHMET F.O. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.32C, p. 810-853. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114000227>

STANGARONE, T. South Korean efforts to transition to a hydrogen economy. **Clean technologies and environmental policy**, v.23, n.2, p.1-8. 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10098-020-01936-6.pdf?pdf=button>

WANG, Z. **Annual report on the big data of new energy vehicle in China (2021)**. Springer Nature: 2023. 159 p. Disponível em: <https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/58661/978-981-19-5508-2.pdf?sequence=1>

WIPO. World Intellectual Property Organization. **International patent classification (IPC)**. 2022. Disponível em: <https://www.wipo.int/classifications/ipc/en/> Acesso em: out. 2022.

YAP, J.; MCLELLAN, B. A historical analysis of hydrogen economy research, development and expectations, 1972 to 2020. **Environments**, v. 10, n. 11. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3298/10/1/11>

Agradecimento

Grupo de trabalho

Carlos Pérez (UFRGS)
Cristina Mendes (INPI)
Ennio Peres (Unicamp)
Fabio Coral (IPEN)

Irene Von der Weid (INPI)
José Geraldo (Cepel)
Priscila Rohem (INPI)
Sabrina Santos (INPI)

Expediente

Diretor-Presidente

Fernando Cosme Rizzo Assunção

Diretores

Ary Mergulhão Filho
Carlos Roberto Fortner

Supervisão

Fernando Rizzo Assunção

Líder

Marcelo Khaled Poppe

Equipe Técnica CGEE

Barbara Bressan
Daniella Fartes
Emilly Silva
Jackson Maia
Alina Cordeiro (estagiária)
Gabriela Britto (estagiária)

Assistente Administrativo

Rafael Metzner

Informe SES

Inovação em Soluções Energéticas Sustentáveis