

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

**Estudo prospectivo do potencial de adoção
de Pilhas a Combustível de Óxido Sólido a
etanol no setor de transporte de carga
rodoviário de longa distância do Brasil**

IGOR BARRETO JULIÃO

Rio de Janeiro, RJ

Mai/2024

ESTUDO PROSPECTIVO DO POTENCIAL DE ADOÇÃO DE PILHAS A
COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO A ETANOL NO SETOR DE TRANSPORTE
DE CARGA RODOVIÁRIO DE LONGA DISTÂNCIA DO BRASIL

IGOR BARRETO JULIÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Planejamento Energético, COPPE, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em
Planejamento Energético.

Orientadores:

Alexandre Salem Szklo

Pedro R. R. Rochedo

Rio de Janeiro, RJ

Maio de 2024

ESTUDO PROSPECTIVO DO POTENCIAL DE ADOÇÃO DE PILHAS A
COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO A ETANOL NO SETOR DE TRANSPORTE
DE CARGA RODOVIÁRIO DE LONGA DISTÂNCIA DO BRASIL

Igor Barreto Julião

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Orientador(es): Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Alexandre Salem Szklo

Aprovada por: Prof. Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Prof. Alexandre Salem Szklo

Prof. Paulo Emílio Valadão de Miranda

Prof. Bruno Soares Moreira Cesar Borba

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2024

Julião, Igor Barreto

Estudo prospectivo do potencial de adoção de Pilhas a Combustível de Óxido Sólido a etanol no setor de transporte de carga rodoviário de longa distância do Brasil/ Igor Barreto Julião. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XIV, 153 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Alexandre Salem Szklo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 119-139.

1. Pilha a Combustível. 2. Etanol. 3. Óxido Sólido. I. Rochedo, Pedro Rua Rodriguez *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

*“Life before death, strength before weakness and journey before
destination”*

The Stormlight Archives, Bradon Sanderson

“Um mestre eu quero ser”

- Pokémon, sexta abertura

*“Meu filho, burro preto tem um monte por aí, mas preto burro não dá,
né?”*

- Dona Malvina Bernardes Gomes

Agradecimentos

Queira começar este trabalho agradecendo a Deus e meus amigos espirituais por me permitirem conhecer as pessoas incríveis que aqui cito. Agradeço imensamente e dedico esse trabalho as seguintes pessoas:

Minha mãe, Andrea, meu pai, Douglas, minha irmã preferida, Dafiny, e meu cunhado, Pedro, os quais foram indispensáveis para todas as minhas conquistas até aqui, e que me permitiram estar aqui realizando mais um sonho. Estendo esses agradecimentos ao resto de minha família, Barreto e Julião, os quais sempre se fizeram presentes e companheiros, e àqueles que já não se fazem mais presentes fisicamente. Em especial cito minha falecida avó, Arlete, que completou 10 anos de falecida poucos dias antes da defesa desse trabalho. E, em contrapartida, também incluo a brotinho Laura que vêm por aí.

Aos amigos de infância, Gabriel, Wesley, Fernandinho, Kauê, Glauco e Jorge, que nossa amizade seja eterna!

Aos amigos do Ensino médio e da Rural, Andrey, Breno, Maria Clara, Myllena, Camila, Neubi, Geórgia, Marcelle, Fabiano (o mago), Gabriel, Lucas, Lincoln, Wallace, Paulo, Gabriela, Rubens, David, Caio, Hall e Bibi. Pessoas incríveis que tive a honra de conhecer e a felicidade de chamar de amigos.

Aos amigos Odiadores (*Haters Gonna Hate*) que me ajudaram a aguentar tanta coisa até aqui.

Aos demais amigos da família que sempre me apoiaram e torceram por mim!

Aos novos amigos do PPE, Pedro, Leonardo, Nívia, Fernando, Leandro, Marcelo, Luís e Lena, aos funcionários e professores do PPE.

Aos professores membros da banca, Bruno Borba e Paulo Emílio Miranda, obrigado por aceitarem o convite e todas as contribuições!

Aos meus orientadores, Alexandre Szklo e Pedro Rochedo. Não sei como começar a agradecer a paciência e orientação. Obrigado por me ajudarem a encontrar um novo caminho na minha vida, de coração.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO PROSPECTIVO DO POTENCIAL DE ADOÇÃO DE PILHAS A
COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO A ETANOL NO SETOR DE TRANSPORTE
DE CARGA RODOVIÁRIO DE LONGA DISTÂNCIA DO BRASIL

Igor Barreto Julião

Maio/2024

Orientadores: Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Alexandre Salem Szklo

Programa: Planejamento Energético

Diante da crise climática e tendência de eletrificação do setor de transporte, as pilhas a combustível representam uma opção de mitigação de emissões de CO₂ devido a suas maiores eficiências relativamente aos motores de combustão interna, menores emissões atmosféricas e elevada autonomia. Em especial, destacam-se as Pilhas a Combustível de Óxido Sólido (PaCOS), que apresentam altas eficiências de 1ª Lei e podem operar com combustíveis diversos, como o etanol. Assim, este trabalho avalia a introdução da PaCOS a etanol no transporte de cargas no Brasil, de forma a auxiliar o país a atingir suas metas climáticas, reduzir a dependência da importação de diesel e se aproveitar de uma oportunidade para o setor sucroenergético. Para tal, desenvolveram-se cenários de longo prazo para avaliar a penetração potencial da eletrificação em caminhões pesados no país, e foi proposto um *roadmap* tecnológico. Como resultado, identificou-se que a tecnologia pode resultar em vantagens para o setor de transportes, como a redução do consumo de diesel e emissões de CO₂ (aproximadamente 42%), assim como representa uma oportunidade de mercado para o etanol. Não obstante, ainda são necessários esforços em pesquisa e desenvolvimento, a fim de solucionar questões operacionais das pilhas, como a deposição de carbono, altas temperaturas de operação e tempo de vida, e ainda se deve desenvolver a cadeia de valor das matérias primas utilizadas na manufatura dos sistemas, o que inclui a produção e processamento de minerais estratégicos, como os associados aos elementos de Terras Raras.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PROSPECTIVE ASSESSMENT OF THE POTENTIAL FOR IMPLEMENTATION
OF ETHANOL-POWERED SOLID OXIDE FUEL CELLS IN THE LONG-
DISTANCE ROAD FREIGHT TRANSPORT SECTOR IN BRAZIL

Igor Barreto Julião

May/2024

Advisor: Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Alexandre Salem Szklo

Department: Energy Planning

Faced with the climate crisis and the electrification trend in the transport sector, fuel cells represent an option for mitigating CO₂ emissions due to their greater efficiency compared to internal combustion engines, lower atmospheric emissions and high autonomy. In particular, Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) stand out because of their high 1st Law efficiencies and can operate with different fuels, such as ethanol. Therefore, this work evaluates the introduction of ethanol SOFCs in cargo transportation in Brazil, in order to help the country achieve its climate goals, reduce dependence on diesel imports and take advantage of a new opportunity for the sugar-energy sector. To this end, long-term scenarios were developed to evaluate the potential penetration of electrification in heavy trucks in the country, and a technological roadmap was proposed. As a result, it was identified that the technology could result in advantages for the transport sector, such as reducing diesel consumption and CO₂ emissions (approximately 42%), as well as representing a market opportunity for ethanol. However, research and development efforts are still needed in order to solve operational issues with batteries, such as carbon deposition, high operating temperatures and lifetime, and the value chain of raw materials used in systems manufacturing, which includes the production and processing of strategic minerals, such as those associated with Rare Earth elements.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas.....	xii
Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Estrutura da Dissertação.....	3
Pilhas a combustível: Conceito e contextualização.....	5
2.1. Fundamentos e história.....	5
2.2. Tipos de pilhas a combustível e maturidade tecnológica	7
2.2.1. Pilha a Combustível de Membrana Trocadora de Prótons (PaCMTP).....	9
2.2.2. Pilha a Combustível de Metanol Direto (PaCMD).....	9
2.2.3. Pilha a Combustível Alcalina (PaCA).....	10
2.2.4. Pilha a Combustível de Ácido Fosfórico (PaCAF)	11
2.2.5. Pilha a Combustível de Carbonato Fundido (PaCCF).....	11
2.2.6. Pilha a Combustível de Óxido Sólido (PaCOS)	11
2.3. Aplicações e mercado atual.....	13
2.4. Síntese do Capítulo.....	30
Pilha a combustível de Óxido Sólido (PaCOS).....	33
3.1. Fundamentos Eletroquímicos da PaCOS	33
3.2. Componentes Materiais.....	37
3.2.1. Eletrólitos	38
3.2.2. Anodo	39
3.2.3. Catodo	42
3.2.4. Estrutura e interconexão.....	42
3.3. Descarte e reciclagem.....	45
3.4. Aplicações, mercado e custos.....	46
O setor brasileiro de cana e de transporte.....	53
4.1. Panorama da cadeia de cana-de-açúcar	53
4.2. Panorama do setor de transporte	56
4.3. Novos desafios do setor sucroenergético	60
4.4. O papel das pilhas a combustível e do álcool.....	62
Metodologia	67
5.1 Roadmap	68

5.1.1.	Patentes	69
5.1.2.	Escala de prontidão tecnológica	70
5.1.3.	Proposições de ações	72
5.2	Construção de cenários.....	72
5.2.1.	Ajuste de curvas de penetração e construção das curvas dos cenários.....	74
5.2.2.	Projeção de frota e venda de veículos	78
5.2.3.	Cálculo do consumo de combustível, emissões de gases e de materiais	79
	Resultados e discussão	84
6.1.	Levantamento de patentes	84
6.1.1.	LATIPAT	84
6.1.2.	ESPACENET	85
6.1.3.	PATENTSCOPE	87
6.2.	Histórico de investimentos, principais atores e centros de pesquisa do país.....	89
6.3.	Nível de Prontidão Tecnológica (TRL).....	94
6.4.	Cenários de penetração tecnológica	97
6.4.1.	Cenário de referência	99
6.4.2.	Cenários com PaCOS a etanol.....	101
6.5.	Roadmap	107
	Considerações finais.....	115
	Referências bibliográficas	119
	Anexo I.....	140
	Anexo II	145
	Anexo III	147

Lista de Figuras

Figura 1 - Desenvolvimento da pilha a combustível ao longo da história.	6
Figura 2 - Esquemática de uma pilha a combustível.	7
Figura 3 - Diagrama de operação de pilhas a combustível com diferentes eletrólitos. Reações no Catodo-Anodo com um eletrólito com (a) transporte protônico, (b) transporte de hidroxilas protônico, (c) transporte de carbonato e (d) transporte de íons de oxigênio.	8
Figura 4 - Capacidade total em MW de pilhas a combustível comercializados entre 2017-2021 por setor, sendo o último ano uma projeção.....	13
Figura 5 - Comparação da Potência Específica e Energia Específica de diferentes tecnologias.	17
Figura 6 - Esquemática das reações envolvidas na operação de uma PaCOS com combustíveis oxigenados.....	37
Figura 7 - Esquemática dos dois designs de uma pilha a combustível.	43
Figura 8 - Esquemática de diferentes suportes de pilhas a combustível.....	44
Figura 9 - Esquemática de principais materiais dos componentes de PaCOS.....	45
Figura 10 - Esquemática do sistema de estoque de eletricidade baseado em ReSOFC.....	49
Figura 11 - Evolução da produção brasileira de etanol.....	54
Figura 12 - Áreas de cultivo de cana-de-açúcar mapeadas por satélite.....	55
Figura 13 - Emissões totais para o setor de Energia, desagregada em subsetores.	58
Figura 14 - Emissões de CO ₂ desagregadas do subsetor de Queima de Combustíveis.....	58
Figura 15 - Consumo de Combustível nos transportes.	59
Figura 16 - Resultados de performance das pilhas a combustível.	65
Figura 17 - Fluxograma com as principais etapas desse trabalho.	68
Figura 18 - Metodologia para a elaboração de <i>Roadmap</i> tecnológico.	69
Figura 19 - Fluxograma com as principais etapas desse trabalho.	73
Figura 20 - Penetração tecnológica no licenciamento de veículos Flex, Elétricos leves e pesados/semipesados.....	75
Figura 21 - Penetração tecnológica no licenciamento de veículos flex, EV e pesados/semipesados ajustada para curva logística.	76
Figura 22 - Cenários de penetração de veículos pesados com pilhas a combustível de óxido sólido a etanol.	77
Figura 23 - Projeção do licenciamento de veículos pesados/semipesados de carga.	98
Figura 24 - Frota de veículos de carga pesados/semipesados.	98

Figura 25 - Projeção de venda de caminhões FCEV para os 3 cenários.	102
Figura 26 - Quantidade total (em 1000 unidades) de pilhas a combustível comercializadas em 2017-2021 por tipo de pilha a combustível.	141
Figura 27 - Capacidade total em MW de pilhas a combustível comercializadas em 2017-2021 por tipo de pilha a combustível.....	141

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação entre diferentes pilhas a combustível.	8
Tabela 2 - Comparação entre as eficiências do trem de força.	17
Tabela 3 - Veículos com pilhas a combustível e estações de abastecimento de Hidrogênio de países membros IPHE.	18
Tabela 4 - Modelos e características de FCEV.	20
Tabela 5 - Preços e incentivos na compra de carros FCEV em diferentes países.	21
Tabela 6 - Projetos internacionais de ônibus com pilhas a combustível.	23
Tabela 7 - Exemplos de sistemas com pilhas a combustível disponíveis para caminhões pesados e médios (HDT/MDT).....	25
Tabela 8 - Caminhões FCEV em desenvolvimento.	26
Tabela 9 - UAVs movidos a pilhas a combustível.	29
Tabela 10 - Custos de sistemas atuais e objetivos para uma comercialização bem sucedida. ...	48
Tabela 11 - Consumo de combustíveis pelo setor de transporte rodoviário (em 10 ³ tep).	57
Tabela 12 - Preços médio anuais de etanol hidratado, gasolina C e relativo (PE/PG).	60
Tabela 13 - Comparação entre motores de combustão interna, elétricos com pilhas a combustível e elétricos a bateria.....	62
Tabela 14 - Escala de prontidão tecnológica (TRL).....	71
Tabela 15 - Categorização da frota de veículos.....	74
Tabela 16 - Parâmetros de curvas logísticas de dados da literatura.	76
Tabela 17 - Parâmetros de curvas logísticas para os cenários propostos.	77
Tabela 18 - Dados de consumo específico para um caminhão a hidrogênio, veículo leve a hidrogênio e o protótipo da Nissan a etanol.	80
Tabela 19 - Consumo específico (CS) dos veículos.....	81
Tabela 20 - Fatores de emissão de CO, NO _x , NMHC, MP, NO ₂ e CO ₂ para motores Diesel. ..	81
Tabela 21 - Input material para manufatura da PaCOS, por stack.	82
Tabela 22 - Síntese dos cenários de penetração tecnológica.....	83
Tabela 23 - Emissões de CO, NO _x , NMHC, MP, NO ₂ e CO ₂ para motores Diesel no cenário de referência.....	99
Tabela 24 - Projeção de frota e de vendas de veículos pesados com PaCOS em 2050.	101
Tabela 25 - Projeção de frota e de vendas de veículos considerando a taxa de crescimento alternativa para o MP.	101

Tabela 26 - Emissões de CO, NO _x , NMHC, MP, NO ₂ e CO ₂ para motores Diesel nos cenários propostos.	102
Tabela 27 - Consumo de etanol nos diferentes cenários.	103
Tabela 28 - Matéria prima para manufatura das pilhas a combustível.	105
Tabela 29 - Dados de produção e reservas de Cobalto, Lítio e Grafita.	111
Tabela 30 - Comparação de custos e performances de pilhas a combustível para uso estacionário.	140
Tabela 31 - Resumo de custos de um sistema APU de 1kW com PaCOS.	141
Tabela 32 - Resumo de custos de um sistema APU de 5kW com PaCOS.	142
Tabela 33 - Resumo de custos de um sistema PaCOS de 100 kW para CHP.	142
Tabela 34 - Resumo de custos de um sistema PaCOS de 250 kW para CHP.	143
Tabela 35 - Resumo de custos de sistemas PaCOS com CHP em 2015 e 2020.	143
Tabela 36 - Resultados de custos diretos para as pilhas a combustível de óxido sólido (\$/kW).	144
Tabela 37 - Resultados de custos totais, considerando custos do BOP e mark-up de 50%, para as pilhas a combustível de óxido sólido (\$/kW).	144
Tabela 38 - Estimativas de reciclabilidade e potencial de economia de materiais.	145
Tabela 39 - Impactos da construção de uma planta de SOEC de 150 kW sem e com a reciclagem de materiais.	145
Tabela 40 - Quantidade de matéria prima produzida e evitada por ano, e, o impacto ambiental por ano ao se utilizar materiais reciclados.	146
Tabela 41 - Dados do ESPACENET obtidos com a query nftxt = "solid oxide fuel cell".	147
Tabela 42 - Dados do ESPACENET obtidos com a query ntxt = "solid oxide fuel cell".	147
Tabela 43 - Dados do ESPACENET obtidos com a query nftxt = "ethanol" AND nftxt = "solid oxide fuel cell".	148
Tabela 44 - Dados do ESPACENET obtidos com a query ntxt = "ethanol" AND ntxt = "solid oxide fuel cell".	148
Tabela 45 - Dados do ESPACENET obtidos com a query (nftxt = "solid oxide fuel cell") NOT nftxt = "reformer".	148
Tabela 46 - Dados do ESPACENET obtidos com a query (ntxt = "solid oxide fuel cell") NOT ntxt = "reformer".	149
Tabela 47 - Dados do ESPACENET obtidos com a query (nftxt = "ethanol" AND nftxt = "solid oxide fuel cell") NOT nftxt = "reformer".	149
Tabela 48 - Dados do ESPACENET obtidos com a query (ntxt = "ethanol" AND ntxt = "solid oxide fuel cell") NOT ntxt = "reformer".	150

Tabela 49 - Dados da PATENTSCOPE com a query “FP:(solid oxide fuel cell)”	150
Tabela 50 - Dados da PATENTSCOPE com a query “FP:(solid oxide fuel cell) NOT reformer”.	151
Tabela 51 - Dados da PATENTSCOPE com a query “FP:ethanol AND (solid oxide fuel cell)”	151
Tabela 52 - Dados da PATENTSCOPE com a query “FP:ethanol AND (solid oxide fuel cell) NOT reformer”	151
Tabela 53 - Dados da PATENTSCOPE com a query “EN_ALLTXT:(solid oxide fuel cell)”.	152
Tabela 54 - Dados da PATENTSCOPE com a query “EN_ALLTXT:(solid oxide fuel cell) NOT reformer”	152
Tabela 55 - Dados da PATENTSCOPE com a query ”EN_ALLTXT:ethanol AND (solid oxide fuel cell)”	153
Tabela 56 - Dados da PATENTSCOPE com a query “EN_ALLTXT:ethanol AND (solid oxide fuel cell) NOT reformer”	153

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Segundo o último relatório do *International Panel of Climate Change* (IPCC), o Sexto Relatório de Avaliação (AR6), as mudanças climáticas globais são um risco à qualidade de vida humana, afetando a sociedade nas esferas econômicas, sociais e ambientais (DELAZERI, DA CUNHA, *et al.*, 2022, MIKLAUTSCH, WOSCHANK, 2022). Caso haja atrasos em ações globais de adaptação da sociedade e mitigação de emissões de gases mais assertivas, a breve janela de oportunidade para assegurar os objetivos estabelecidos no Acordo de Paris será perdida (GRUBB, OKEREKE, *et al.*, 2021).

Conforme a 6ª Edição do relatório do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) publicado em 2021, o total de emissões brasileiras de gases de efeito estufa em 2020 foi de 1,785 GtCO₂eq (GWP AR5). O setor de energia foi responsável por 22% das emissões totais, 392 MtCO₂eq (BRASIL, 2022). Neste caso, o setor de transporte é o principal responsável pelas emissões de GEE, compreendendo mais de 50% das emissões derivadas da combustão. Ademais, destaca-se o óleo diesel, a energia final mais utilizada no país, responsável por aproximadamente 46% do consumo energético do setor de transportes e utilizado principalmente em veículos pesados, como ônibus e caminhões (EPE, 2022b).

Assim, é necessário avaliar opções tecnológicas aos motores a diesel e ao próprio uso desse combustível fóssil. Todavia, as alternativas de descarbonização do setor de transporte acabam sendo mais desafiadoras, uma vez que, além da necessidade de diminuir as emissões de GEE, também há a questão da portabilidade e densidade energética dos combustíveis utilizados (BOLDRIN, BRANDON, 2019). Neste contexto, a tecnologia de pilhas a combustível se torna uma opção para viabilizar a eletrificação do transporte, particularmente do transporte de longo percurso de cargas, para os quais o uso de veículos baseados exclusivamente em baterias enfrenta desafios.

De fato, as pilhas a combustível¹ (em inglês, *Fuel Cell*, FC) são sistemas que permitem a conversão de energia química em energia elétrica e calor útil (MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012). Tais conversores energéticos possuem maior eficiência de conversão de energia química, quando comparados aos motores convencionais a combustão interna (ICE), que, como qualquer máquina térmica, são limitados pelo ciclo de Carnot; também são portáteis, produzem pouco ruído e oferecem autonomia a veículos, quando comparado com outras tecnologias, como os elétricos convencionais baseados exclusivamente a baterias (KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009, RATH, KUMAR, *et al.*, 2019, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019).

Entre os diferentes tipos de pilhas a combustível, destacam-se as pilhas a combustível de óxido sólido (PaCOS), que apresentam eletrólitos de materiais cerâmicos, possuem uma das maiores eficiências de conversão de energia química em eletricidade e calor útil, entre as pilhas a combustível (DOE, 2010, HUSSAIN, Saddam, YANGPING, 2020, KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009, LINDORFER, ROSENFELD, *et al.*, 2020), são capazes de processar diferentes tipos de combustíveis, como biocombustíveis (LI, Nanqi, LIU, *et al.*, 2023), e não são suscetíveis a envenenamento por CO (SU, HU, 2020) apesar de ainda serem sensíveis a deposição de carbono e envenenamento por enxofre (LI, Yixing, PANG, *et al.*, 2021).

Ainda, a possibilidade do emprego de etanol em pilhas a combustível de óxido sólido, como principal combustível, oferece vantagens no contexto brasileiro, para além do abatimento das emissões de gases de efeito estufa e emissões atmosféricas de impacto local como material particulado, NOx e SOx. O Brasil, além de ser o segundo maior produtor de etanol do mundo, é um grande consumidor e importador de diesel para suprir sua demanda interna, tendo importado 14,5 bilhões de litros de diesel apenas em 2023 (BRASIL, 2024a). O país é, então, vulnerável a riscos de suprimento e variações do preço do gasóleo/diesel na Bacia do Atlântico. Ademais, o país também é dependente do transporte rodoviário, sendo este modal responsável por 75% de toda mercadoria movimentada pelo território (BRASIL, 2024c), o que intensifica a exposição do país a esses fatores exógenos.

¹ À guisa de esclarecimento, neste trabalho, a nomenclatura a ser utilizada tanto para o conversor energético unitário, quanto para o conjunto destes, ou *stack*, será de “pilha a combustível”.

Ademais, usado exclusivamente na mobilidade em veículos leves, direto ou indireto em misturas com gasolina, o etanol possui um risco de perder mercado e relevância setorial em um cenário de aumento do papel da eletrificação, especialmente se ela ocorrer através de carros elétricos a bateria. Portanto, este trabalho visa avaliar a introdução de PaCOS a etanol no país, de forma a auxiliar o Brasil a atingir suas metas climáticas estabelecidas, reduzir a dependência nacional de diesel, ampliar os usos do etanol e apresentar a eletrificação como oportunidade para o setor sucroenergético.

Para tal, este estudo propõe-se a estruturar um *roadmap* tecnológico, a partir da avaliação da maturidade da tecnologia através de levantamentos da literatura, patentes e os principais atores (públicos e privados), que podem auxiliar no seu desenvolvimento e introdução no país. O *roadmap* também inclui a elaboração e simulação de cenários de longo prazo para avaliar o potencial de penetração da eletrificação em caminhões pesados no país. Este tipo de avaliação apresenta relevância para a comunidade acadêmica devido à escassez de estudos sobre a adoção da tecnologia no contexto brasileiro, que analisem sua implementação e a capacidade brasileira de apoiar esta mudança tecnológica.

1.2 Estrutura da Dissertação

Este trabalho é composto deste capítulo introdutório, onde foram apresentadas suas principais motivações e objetivo, e outros 6 capítulos.

No Capítulo 2 o conceito e funcionamento das pilhas a combustível será melhor explicado, apresentando a história do seu desenvolvimento, os principais tipos de pilhas a combustível, suas aplicações variadas e o estado atual do mercado global destas.

O capítulo 3 focará especificamente nas pilhas a combustível de óxido sólido (PaCOS). Neste capítulo, será apresentada a fundamentação eletroquímica para o funcionamento das PaCOS e seus elementos componentes. Ademais, também serão abordados o descarte das pilhas, suas principais aplicações e o mercado atual para este tipo de pilha a combustível.

No capítulo 4, serão discutidos o estado atual dos setores de transporte e sucroenergético, e estimativas futuras para sua evolução. Neste capítulo, serão também discutidas as barreiras enfrentadas atualmente por esses setores e as oportunidades e desafios, que o processo de eletrificação poderia trazer-lhes.

Os capítulos 5 e 6 são referentes a metodologia, resultados e discussão, e apresentarão o método escolhido neste trabalho para a construção de cenários de penetração tecnológica e revisão bibliográfica. Ao fim do capítulo 6, será concluída a análise de *roadmap*, visando apresentar recomendações para auxiliar no desenvolvimento da tecnologia no país.

Por fim, o capítulo 7 conclui o estudo, resumizando suas principais mensagens e resultados, e listando suas limitações, a fim de propor novos trabalhos no tema.

Capítulo 2

Pilhas a combustível: Conceito e contextualização

2.1. Fundamentos e história

Frente a importância que o setor de transporte apresenta para os cenários de mitigação globais e a dificuldade de abatimento deste setor, esforços tem sido concentrado no desenvolvimento e aperfeiçoamento tecnológico como as baterias e as Pilhas a Combustível (em inglês, *Fuel Cell* - FC). As pilhas a combustível são aparelhos eletroquímicos de conversão de energia química em energia elétrica e calor, tendo como um dos principais subprodutos a formação de água. Diferentemente das baterias, esses aparelhos não armazenam energia e geram eletricidade continuamente, enquanto houver a alimentação de combustível. Além disso, não são máquinas térmicas, como os Motores a Combustão Interna (MCI) convencionais, uma vez que operam segundo reações eletroquímicas de oxirredução, e por isso não são limitadas pelo Ciclo de Carnot, o que as permite atingir eficiências de conversão maiores que os de MCI (KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009, MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012, RATH, KUMAR, *et al.*, 2019, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019).

Apesar do interesse recente, as pilhas a combustível são tecnologias conhecidas há mais de um século. No começo do século 19 se aprofundavam os conhecimentos em eletrólise, período de descoberta de alguns metais alcalinos, os quais foram a base para o desenvolvimento da primeira bateria a gás pelo físico-químico galês William Robert Grove em 1839 (LUCIA, 2014).

O termo “Pilha a Combustível” foi cunhado pelos cientistas Ludwig Mond e Charles Langer que estudavam células a hidrogênio, utilizando carvão como combustível. O modelo desenvolvido por esses dois cientistas foi revisado por Francis Bacon, que em 1958 apresentou a primeira Pilha a Combustível Alcalina com 5 kW de capacidade, que viria ser utilizadas nas missões Apollo no começo da década de 60 através do *International Fuel Cell* (IFC) em Windsor nos EUA. Além disso, no final da década de

50 também foram utilizados as primeiras Pilhas a Combustível de Troca Protônica no programa espacial *Gemini*. O IFC viria desenvolver na década de 1970 uma versão de 12 kW para ser utilizada em ônibus espaciais em órbita. E, apesar de inicialmente sua utilização ser voltada para utilização militar, desde então diferentes grupos vêm investindo para expandir seus usos e aplicações, principalmente para a geração estacionária e em transporte (ABDALLA, HOSSAIN, *et al.*, 2018, KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009, LUCIA, 2014, RATH, KUMAR, *et al.*, 2019). A figura 1 esquematiza a evolução tecnológica das pilhas a combustível pela história.

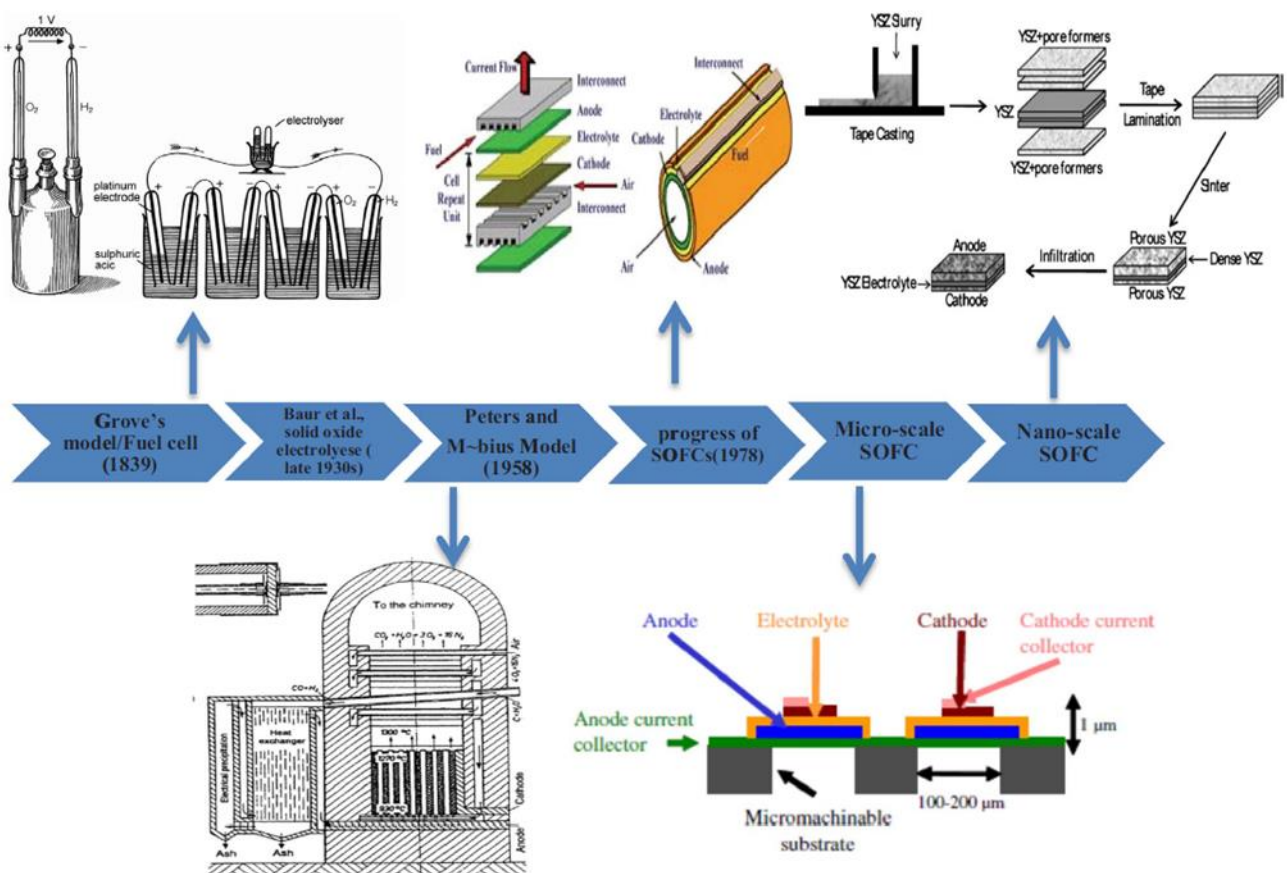


Figura 1 - Desenvolvimento da pilha a combustível ao longo da história.

Fonte: Adaptado de Abdalla e Hossain, et al. (2018)

As pilhas a combustível operam basicamente pela reação inversa de eletrólise da água e possuem uma estrutura básica constituída por 3 elementos: O anodo, o qual é a região que entra em contato com o combustível, e, onde este será oxidado, uma vez que invés de um processo de combustão, as pilhas a combustível operam por um processo de oxirredução; o catodo, o qual é a região que entra em contato com o ar, e, onde as moléculas de O_2 serão reduzidas à íons O^{2-} ; e um separador eletrolítico, por onde ocorre

a passagem de íons (KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009). A figura 2 esquematiza uma pilha a combustível genérica e seu funcionamento.

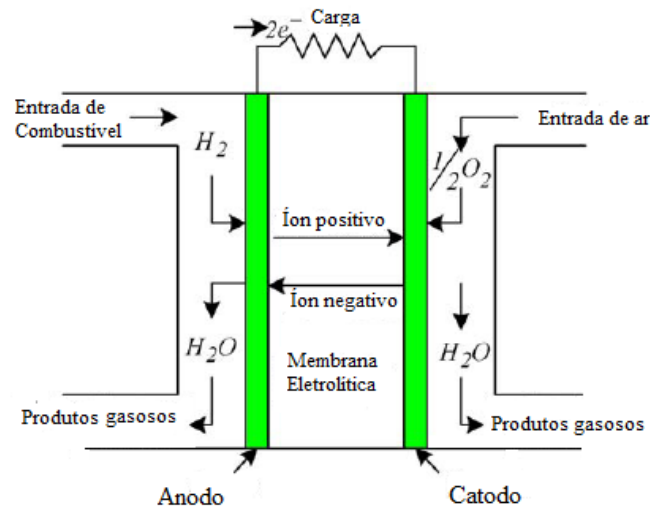


Figura 2 - Esquematização de uma pilha a combustível.

Fonte: Adaptado de Kirubakaran, Jain, *et al.* (2009)

2.2. Tipos de pilhas a combustível e maturidade tecnológica

As pilhas a combustível são classificadas principalmente de quatro formas diferentes. Primeiramente, pode-se avaliar suas temperaturas de operação, podendo ser classificadas como pilhas a combustível de baixa, média ou alta temperatura. Duas formas são referentes à estrutura da pilha a combustível, sendo a primeira de acordo com a estrutura de apoio do sistema, podendo ter o eletrólito, o ânodo ou um metal como suporte, ou, com o formato das pilhas a combustível, podendo ser planar ou tubular. E, por último, de acordo com o tipo de eletrólito e combustível utilizado. Em relação a este último, podem-se dividir as pilhas a combustível em 6 grupos principais: (A) Pilhas a combustível de membrana de troca protônica (PaCMTP); (B) Pilhas a combustível de Metanol Direto (PaCMD); (C) Pilhas a combustível Alcalinas (PaCA); (D) Pilhas a combustível de Ácido Fosfórico (PaCAF); (E) Pilhas a combustível de Carbonato Fundido (PaCCF); (F) Pilhas a combustível de Óxido Sólido (PaCOS) (KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009, LINDORFER, ROSENFELD, *et al.*, 2020, MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012). A figura 3 esquematiza o funcionamento dessas 6 pilhas a combustível e a tabela 1 sumariza os 6 tipos aqui apresentados.

Tabela 1 - Comparação entre diferentes pilhas a combustível.

	PaCA	PaCMTP	PaCMD	PaCAF	PaCCF	PaCOS
Eletrólito	Hidróxido de potássio	Membrana polimérica	Membrana polimérica	Ácido fosfórico	Carbonato fundido	Cerâmica
Combustível	H ₂	H ₂	Metanol	H ₂	H ₂ , Gás Natural, C ₃ H ₈ , CO	H ₂ , Gás Natural, C ₃ H ₈ , CO, EtOH, entre outros
Temperatura (°C)	60-100	50-100	60-200	150-220	600-700	600-1000
Eficiência (%)	60-70	40-50	>40	>40	50-60	50-60

Fonte: Adaptado de KIRUBAKARAN, et al. (2009), MEKHILEF, et al., (2012), LINDORFER, et al., (2020).

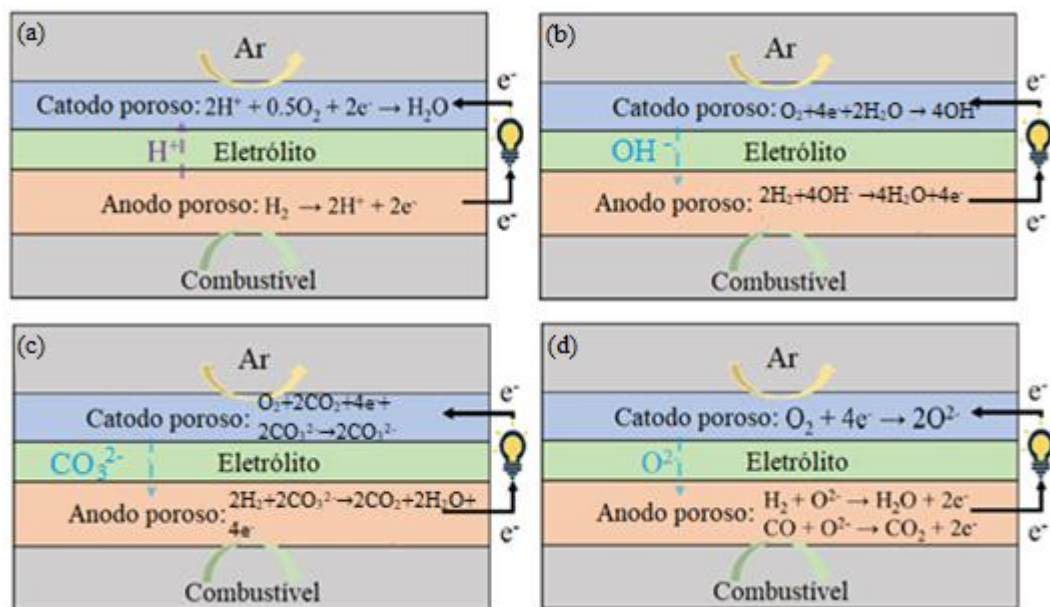


Figura 3 - Diagrama de operação de pilhas a combustível com diferentes eletrólitos. Reações no Cátodo-Anodo com um eletrólito com (a) transporte protônico, (b) transporte de hidroxilas protônico, (c) transporte de carbonato e (d) transporte de íons de oxigênio.

Fonte: Adaptado de Xu, Guo, et al. (2022).

2.2.1. Pilha a Combustível de Membrana Trocadora de Prótons (PaCMTP)

As Pilhas a Combustível de Membrana Trocadora de Prótons (em inglês, *Proton-Exchange Membrane Fuel Cell*, PEMFC) são constituídas de um eletrólito polimérico, normalmente do tipo Teflon como o Nafion, que conecta os dois eletrodos porosos e é considerada uma pilha a combustível de baixa temperatura uma vez que apresenta uma das mais baixas temperaturas de operação, na faixa de 50-100 °C (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022, KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009). O funcionamento desse tipo de pilhas a combustível é ilustrado na figura 3a. O processo começa com a formação de prótons pela ação do catalisador no combustível, o qual é transportado pela membrana, enquanto o elétron é forçado a passar por um circuito externo e gerar eletricidade. O elétron retorna então para o catodo e reage com o próton e oxigênio para formar água (MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012).

Esse tipo de pilhas a combustível utiliza hidrogênio gasoso como combustível, é o atualmente mais comercializado e mais avançado tecnologicamente. Utilizam H₂ como combustível e por isso conseguem oferecer a sistemas a alta densidade de potência do combustível. Ademais, apresentam uma Eficiência Elétrica na faixa de 40-50%, e, devido à baixa temperatura de operação, a emissão apenas de vapor de água e o rápido tempo de *start-up*, são atualmente cotadas como boas opções para a descarbonização do setor de transporte, principalmente em relação a veículos leves. Todavia, seus altos custo, associados também a utilização de platina como catalisador, e a própria utilização de hidrogênio ainda são os maiores empecilhos para uma maior expansão da PaCMTP (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022, KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009, MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012).

2.2.2. Pilha a Combustível de Metanol Direto (PaCMD)

As Pilha a Combustível de Metanol Direto (em inglês, *Direct Methanol Fuel Cell*, DMFC) são pilhas a combustível que operam em baixas temperaturas (60-200°C) e com a injeção direta de metanol no sistema, ou seja, sem uma etapa anterior de reforma do combustível para a produção de hidrogênio, o qual é o caso das PaCTP convencionais. Todavia, este tipo de pilha a combustível ainda é considerada um subtipo de PaCMTP

por utilizar um eletrólito polimérico, normalmente sendo este o Nafion (KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009, MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012).

A principal vantagem da utilização desse tipo de pilha a combustível é referente a utilização de um combustível de fácil armazenamento e transporte, quando comparado ao hidrogênio (GIORDANO, BERRETTI, *et al.*, 2023), e sua relativa alta eficiência energética, de aproximadamente 40% (MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012). Todavia, esse tipo de pilha a combustível normalmente também utiliza catalisadores de platina e paládio e, por isso, também sofre com o envenenamento de CO, e, o preço desse metal nobre se apresenta como uma barreira para uma comercialização em maior escala (GIORDANO, BERRETTI, *et al.*, 2023, SHI, WANG, *et al.*, 2024). Ademais, a performance do sistema sofre com o *crossover*² do combustível entre os eletrodos (KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009, MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012), e a cinética de reação da reforma do metanol nestas condições é relativamente lenta, o que diminui a eficiência do processo (KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009, SHI, WANG, *et al.*, 2024).

Esse tipo de pilhas a combustível ainda não é tão comercializado como as PaCMTP, apresentando um mercado estimado 5300 unidades em 2021, totalizando por volta de 0,5 MW de capacidade de potência, frente as mais de 55 mil unidades de PaCMTP que resultam em quase 2000 MW de capacidade (HART, JONES, *et al.*, 2022).

2.2.3. Pilha a Combustível Alcalina (PaCA)

Similar a sua contraparte na eletrólise, as Pilhas a Combustível Alcalinas (em inglês, *Alkaline Fuel Cell*, AFC) foram uma das primeiras pilhas a combustível a serem criadas e utilizadas fora de laboratórios. As PaCA utilizam uma solução aquosa de Hidróxido de Potássio (KOH) como eletrólito e hidrogênio gasoso como combustível, operam em baixas temperaturas (60-100 °C), possuem alta eficiência elétrica (60-70%) e conseguem operar com catalisadores baratos, como o Níquel. Todavia, seu eletrólito é extremamente sensível à contaminação por CO₂ e outras substâncias, necessitando operar com ar purificado, e a natureza corrosiva do hidróxido diminui o tempo de vida do eletrólito. Seu funcionamento básico é esquematizado na figura 3b (KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009, MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012, SHIVA KUMAR, LIM, 2022).

² *Crossover* de combustível se refere a passagem do combustível da região do Anodo para a do Catodo. Tal ocorrência resulta em uma perda de eficiência, uma vez que há o desperdício de combustível, e, além disso, o combustível pode envenenar e por isso diminuir a eficiência catalítica do Catodo e deteriorar estruturalmente o eletrólito (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015).

2.2.4. Pilha a Combustível de Ácido Fosfórico (PaCAF)

As Pilhas a Combustível de Ácido Fosfórico (em inglês, *Phosphoric Acid Fuel Cell*, PAFC), como o nome sugere, são pilhas a combustível que utilizam Ácido Fosfórico concentrado como eletrólito e hidrogênio gasoso como combustível, e por isso também são representadas pela figura 3a. Operam em faixa de temperatura de 150-220 °C e, assim, apresentam potencial para cogeração de eletricidade e calor, com eficiência elétrica por volta de 40% e atingindo até 85% em CHP (*Combined Heat and Power*), sistemas que apresentam mecanismos de aproveitamento do calor útil gerado. Não necessitam de oxigênio puro para sua operação, todavia ainda utilizam os caros catalisadores de platina, são suscetíveis a envenenamento de seus eletrodos por CO e a natureza corrosiva do eletrólito pode diminuir o tempo de vida das pilhas a combustível. Esse tipo de pilha a combustível é encontrado em estágio de comercialização, sendo normalmente encontrado com capacidade de até 500 kW, com plantas de mais de 1 MW em fase de testes (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022, KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009, MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012).

2.2.5. Pilha a Combustível de Carbonato Fundido (PaCCF)

As pilhas a combustível de carbonato fundido (em inglês, *Molten Carbonate Fuel Cell*, MCFC) são consideradas de altas temperaturas, uma vez que operam na faixa de 600-700 °C, o que as permite operar com hidrogênio, gás natural, propano e CO, e não necessitam de metais caros como catalisadores. O Eletrólito é composto de carbonatos de Lítio e Potássio, por exemplo, os quais são sólidos em temperatura ambiente, mas líquidos na temperatura de operação, o que acarreta em um longo tempo de *start-up* até começar a gerar eletricidade. Sua operação é esquematizada na figura 3c e este tipo de pilha a combustível apresenta eficiência elétrica na faixa de 50-60% (KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009, LINDORFER, ROSENFELD, *et al.*, 2020, MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012).

2.2.6. Pilha a Combustível de Óxido Sólido (PaCOS)

As pilhas a combustível de óxido sólido (em inglês, *Solid Oxide Fuel Cell*, SOFC) são pilhas a combustível de altas temperaturas, que operam na faixa de 600-1000 °C e possuem materiais cerâmicos como eletrólitos. São capazes de processar diferentes tipos de combustíveis, como hidrogênio, metano, CO, gás natural, etanol, entre outros combustíveis hidrocarbonados, uma vez que, diferente das PaCMTP, estas conseguem

fazer a reforma interna do combustível (formação internamente de hidrogênio), e, não são suscetíveis a envenenamento por CO. Todavia, ainda sofrem com envenenamento por enxofre e deposição de carbono no anodo, proveniente da alimentação de combustíveis ricos em carbono (LI, Yixing, PANG, *et al.*, 2021, SU, HU, 2020).

Dependendo do tipo de íon conduzido no eletrólito, as PaCOS podem ser classificadas de três maneiras: Condutores do íon de oxigênio (O²⁻); Condutores de prótons; Condutores de íon mistos. A figura 3d esquematiza uma pilha a combustível com o transporte de íon de oxigênio, onde se tem o transporte do íon do catodo para o anodo pela diferença de potencial entre as duas regiões. Já o transporte de prótons ocorre de maneira similar ao das PaCMTP, esquematizado na figura 3b. Por sua vez, as pilhas a combustível com condução mista são uma tentativa de aumentar a condutividade iônica na pilha a combustível e, assim, aumentar a eficiência do processo de conversão, e podem apresentar o transporte de diferentes tipos de íons, como algumas membranas de carbonato a base de Céria, que apresentam o transporte de prótons, oxigênio e carbonato. Porém, estas ainda são pouco estudadas (LYU, XIE, *et al.*, 2020, XU, GUO, *et al.*, 2022).

A capacidade de reforma interna e de alimentação de diferentes combustíveis desse tipo de pilha a combustível está associada a oxidação dos combustíveis promovida pelo íon de oxigênio e pelas altas temperaturas em que operam, uma vez que, para os eletrólitos utilizados atualmente, há uma diminuição exponencial da resistência de polarização ôhmica com o aumento de temperatura. Sendo assim, os eletrólitos condutores de oxigênio são os mais utilizados e estudados (LI, Nanqi, LIU, *et al.*, 2023, LI, Yixing, PANG, *et al.*, 2021, LYU, XIE, *et al.*, 2020, SU, HU, 2020, XU, GUO, *et al.*, 2022).

As pilhas a combustível de óxido sólido operam com eficiência na faixa de 50-60% podendo atingir até 90% na geração de energia quando associado a CHP e se destacam pela flexibilidade de alimentação de combustíveis. Todavia, as altas temperaturas de operação, devido às limitações materiais, os altos preços de sistemas, e, elevado tempo de *start-up*, pelas altas temperaturas que precisam atingir, são os principais limitantes de uma comercialização mais abrangente (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022, KIRUBAKARAN, JAIN, *et al.*, 2009, LI, Nanqi, LIU, *et al.*, 2023, MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012, SU, HU, 2020).

2.3. Aplicações e mercado atual

O setor de pilhas a combustível vem apresentando um crescimento expressivo nas últimas décadas, e recentemente, em 2021, atingiu a capacidade de potência de mais de 2,3 GW em aproximadamente 86 mil unidades, mesmo com o impacto da pandemia de COVID-19 (ANL, 2020, HART, JONES, *et al.*, 2022). Apesar do setor de transporte ser um dos principais investidores na tecnologia de pilhas a combustível, uma vez que estas são uma alternativa para a descarbonização deste, substituindo principalmente os ICes mas também como uma opção aos veículos a bateria convencionais, a aplicação das pilhas não se limita a tal (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019). De maneira geral, o mercado de pilhas a combustível pode ser dividido em três grandes grupos: Transporte, geração estacionária de potência e geração portátil de potência (ANL, 2020). A figura 4 demonstra a capacidade total de pilhas a combustível comercializada entre 2017 e 2021 dividida por setor de aplicação, e é perceptível que apesar do setor de transporte ser o foco principal do mercado, as pilhas a combustível também vêm ganhando espaço em outros setores.

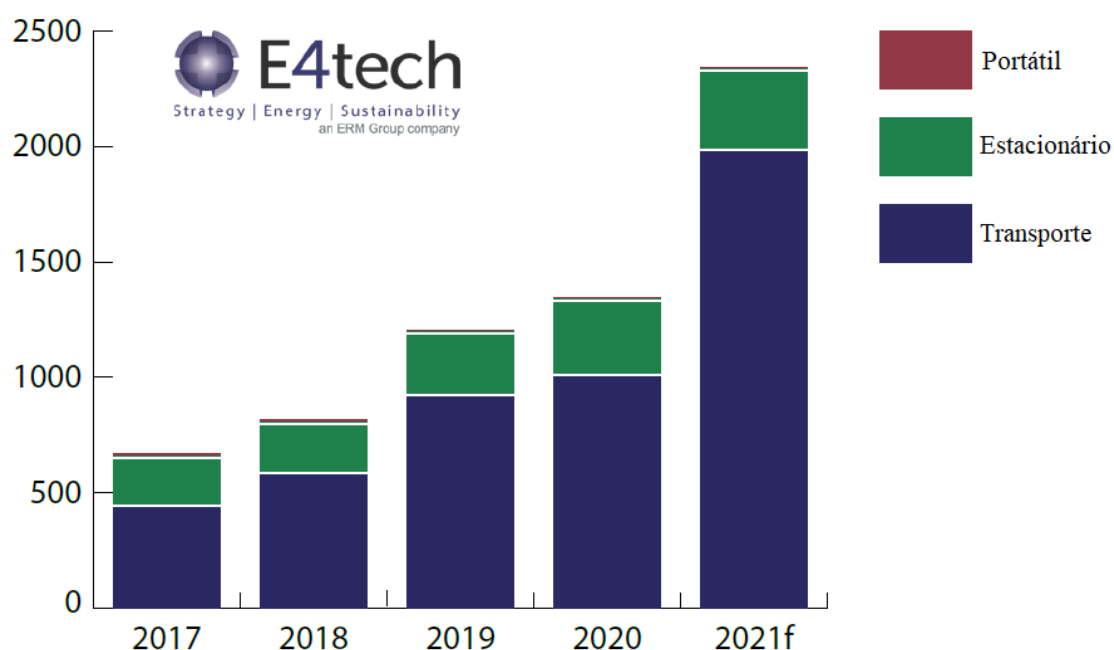


Figura 4 - Capacidade total em MW de pilhas a combustível comercializados entre 2017-2021 por setor, sendo o último ano uma projeção.

Fonte: Adaptado de Hart, Jones, et al. (2022).

De acordo com o relatório “*Fuel Cell Market: Global Industry Trends, Size, Share, Growth, Opportunities and Forecast (2023-2028)*”, o mercado de pilhas a combustível atingiu o valor US\$ 4,3 bilhões em 2022, com projeção de crescimento até US\$16,4 bilhões com taxa de crescimento composta anual (CARG) de 25,12% até 2028. Tal crescimento é principalmente impulsionado pelos incentivos globais da substituição de combustíveis fósseis e desenvolvimento de geração de energia mais sustentável. Além disso, o relatório cita as seguintes entidades como sendo agentes centrais do mercado: Ballard Power Systems Inc, Bloom Energy Corporation, Toshiba Fuel Cell Power Systems Corporation, FuelCell Energy Inc, Plug Power Inc, Nuvera Fuel Cells Inc, AFC Energy plc, SFC Energy AG, Mitsubishi Hitachi Power Systems Ltd, Panasonic Corporation, Intelligent Energy Limited and Doosan Fuel Cell America Inc (DEGNAN, 2023).

Alguns trabalhos citam que as pilhas a combustível teriam um grande potencial na geração de eletricidade em locais isolados, onde não há acesso ao grid nacional, permitindo o acesso sem a geração de poluentes e com baixos níveis de ruído (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022, LINDORFER, ROSENFELD, *et al.*, 2020). Além disso, a utilização das pilhas a combustível no sistema energético principal, também seria vantajoso, uma vez que as pilhas a combustível são flexíveis em operação, apresentam alta eficiência, especialmente os sistemas com cogeração de calor e eletricidade (CHP), e demandariam poucas alterações nos já existentes sistemas (LINDORFER, ROSENFELD, *et al.*, 2020, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019). As pilhas a combustível permitem a operação, por exemplo, tanto em grandes demandas, como com centenas de kW, e até em baixas demandas, como 1kW, mantendo a alta eficiência na faixa dos 50-60% (CIGOLOTTI, GENOVESE, 2021a, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019).

Outra abordagem parecida, seria a de utilização em estabelecimentos comerciais e não comerciais, os quais são reportados de serem responsáveis de até 28% de todas as emissões relacionadas a energia final, e mais de 55% do consumo global de eletricidade, permitindo a diminuição dos custos de operação e emissões de GEE (MAROCCO, GANDIGLIO, *et al.*, 2022). Estes usos das pilhas a combustível são especialmente interessantes ao se considerar a operação com CHP, ocasionando em uma maior eficiência do sistema. Todavia, o alto CAPEX e baixo tempo de vida das pilhas a combustível são os principais empecilhos para uma expansão do mercado.

Entretanto, esses custos vêm diminuindo com o aumento da produção, e, o tempo de vida aumentado com o aperfeiçoamento das tecnologias (MAROCCO, GANDIGLIO, *et al.*, 2022, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019). Por exemplo, o *Battelle Memorial Insitute* e o Departamento de Energia do EUA (DOE) apresentaram em 2017 um relatório onde avaliaram o efeito da economia de escala nos preços de produção de pilhas a combustível para uso estacionário, do tipo de troca protônica e óxido sólido, e observaram que atingindo a produção de 50 mil unidades por ano de cada tipo, seria possível reduzir os custos das pilhas de 1 kW de 1052,34 US\$/kW para 460,06 US\$/kW, para a PaCMTP, e 8482,51 US\$/kW para 1183,04 US\$/kW, para a PaCOS (CIGOLOTTI, GENOVESE, 2021b). No Anexo I podem-se encontrar alguns dados de performance e custos de sistemas estacionário de uso europeu, encontrados a partir da análise de mercado feito por um consórcio europeu para pesquisa de pilhas a combustível e hidrogênio em 2021.

O mercado para esse uso vem crescendo e o valor de mercado de pilhas a combustível para uso estacionário foi estimado em 1,8 bilhões de dólares em 2018, e projetado para atingir até 5,08 bilhões de dólares até 2030, tendo países como os EUA, Japão e, a China, futuramente, como líderes de mercado (CIGOLOTTI, GENOVESE, 2021a). Atualmente, o Japão e a Europa lideram o mercado de sistemas de geração de pequena escala, como sistemas CHP para residências e lojas, enquanto os EUA é o maior instalador de sistemas de pilhas a combustível de larga escala (ANL, 2020, CIGOLOTTI, GENOVESE, 2021a). Inclusive, foi através do financiamento do Ene-Farm, programa responsável pelo grande número de instalações no país, que o Japão conseguiu abaixar os preços das unidades das pilhas a combustível para US\$ 7000/unidade de PaCMTP e US\$ 8000/unidade de PaCOS (CIGOLOTTI, GENOVESE, 2021a).

Dependendo do tipo de aplicação, e o tamanho do sistema requerido, a dominância dos tipos de pilhas a combustível varia de país para país. Por exemplo, nos EUA a maior parte da capacidade instalada de pilhas a combustível é de PaCOS (300 MW) com uma pequena parcela de PaCMTP (10 MW), uma vez que o foco no país é a geração em larga escala (CIGOLOTTI, GENOVESE, 2021a). Por sua vez, para comércios e micro geração os sistemas com PaCMTP são os mais empregados (CIGOLOTTI, GENOVESE, 2021b). É interessante pontuar que o uso da PaCOS possibilita os menores custos de operação, pela maior eficiência, contudo está também apresenta os maiores custos de instalação atualmente (MAROCCO, GANDIGLIO, *et al.*, 2022, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*,

2019). Veja o Anexo I para maiores detalhamentos da capacidade instalada por tipo de pilha a combustível.

Em relação a aplicação portátil, as pilhas a combustível apresentam destaque por apresentarem uma ótima densidade energética, compacidade, eficiência e durabilidade, sendo interessante para computadores, celulares e câmeras, entre outros aparelhos eletrônicos portáteis, e até carregadores de bateria portáteis (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022, LINDORFER, ROSENFELD, *et al.*, 2020, RATH, KUMAR, *et al.*, 2019). O trabalho de Rath e Kumar, *et al.*, (2019) descreve alguns dos usos das pilhas a combustível nesses dispositivos eletrônicos dos últimos 20 anos, e relatam alguns aparelhos operando por meses sem troca da bateria.

Comparando as pilhas a combustível com as baterias portáteis, como as de Lítio, de Ni/Cd e Ni-MH, as pilhas a combustível são mais leves, apresentam maiores tempos de operação, mais estáveis e um ciclo de vida mais barato. Uma comparação de outras propriedades dessas tecnologias pode ser vista na figura 5. Além desses aparelhos, devido a flexibilidade e confiabilidade das pilhas, seu uso tem se expandido em setores militares, como em robôs e veículos (RATH, KUMAR, *et al.*, 2019, WANG, Yun, RUIZ DIAZ, *et al.*, 2020).

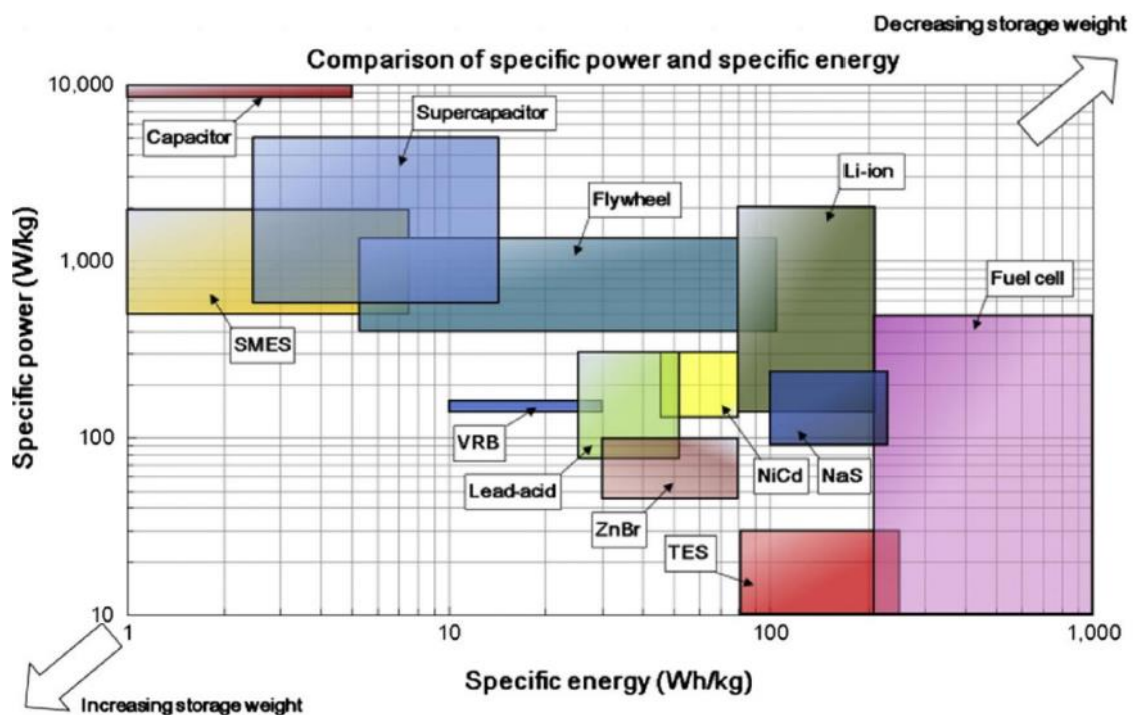


Figura 5 - Comparação da Potência Específica e Energia Específica de diferentes tecnologias.

Fonte: Wang, Ruiz Diaz, et al., (2020).

Retornando a discussão do setor de transporte, há uma grande expectativa relativa ao crescimento das pilhas a combustível no mercado de veículos, uma vez que as pilhas a combustível seriam uma opção menos poluente, mais eficiente e com melhor autonomia do que outras alternativas (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022). Os carros de passageiros com pilhas a combustível são chamados de FCEV (*Fuel Cell Electric Vehicle*) e operam associados a uma bateria, uma vez que as pilhas a combustível servem para geração de eletricidade e calor útil (MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012).

Para melhor entendimento das vantagens dessa tecnologia pode-se usar a tabela 2 para comparar os diferentes meios de propulsão. Tanto as baterias quanto as pilhas a combustível apresentam uma eficiência de conversão de energia em força mecânica (*power train efficiency*) bem superior à dos ICEs. Comparativamente, estes motores apresentam uma eficiência de conversão de energia mais altas que os motores térmicos convencionais, visto que não possuem as limitações termodinâmicas do “ciclo de Carnot” (GONÇALVES, SAVIOLI LOPES, *et al.*, 2021, RATH, KUMAR, *et al.*, 2019).

Tabela 2 - Comparação entre as eficiências do trem de força.

Combustível	Eficiência do trem de força (%)
Gasolina	17
Diesel	20
BEV	80
Veículo elétrico híbrido com gasolina	28
FCEV	45

Fonte: Adaptado de (GOODARZI, HAYES, 2018)

Outro ponto, é que os BEVs (veículos elétricos a bateria) apesar de serem atualmente mais baratos que os FCEVs, ainda são mais caros que os veículos ICEs, apresentam a menor autonomia, menor longevidade do motor e um tempo de recarga mais demorado que as demais opções. Sendo assim, a utilização de pilhas a combustível pode

se mostrar interessante para ônibus e caminhões, uma vez que ambos apresentam mais espaço e suporte para tanques de combustível, necessitariam de uma potência superior à que as baterias normalmente fornecem e, a utilização das pilhas a combustível permitiria uma recarga de combustível rápida, comparável com a de ICES. Além disso, a necessidade de construção de pontos de recarga e de investimentos para expansão do grid elétrico para suprir o aumento expressivo de demanda de energia elétrica para recarregar as baterias também são custos que dificultariam a adoção em larga escala dessa tecnologia num futuro breve (GONÇALVES, SAVIOLI LOPES, *et al.*, 2021, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019).

Atualmente, as PaCMTP são as pilhas a combustível mais utilizadas para aplicação em veículos, representando mais de 86% da capacidade das pilhas a combustível em mobilidade (quase 2000 MW). A utilização das PaCMTP é preferível uma vez que estas oferecem as temperaturas de operação mais baixas, compactidade e um rápido tempo de *start-up* (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022, LINDORFER, ROSENFELD, *et al.*, 2020, MEHMETI, MCPHAIL, *et al.*, 2016, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019, WANG, Yun, RUIZ DIAZ, *et al.*, 2020). As figuras 6 e 7 ilustram a evolução das quantidades e capacidades respectivamente dessas pilhas a combustível comercializadas entre 2017 e 2021.

Como dito anteriormente, o setor de transporte é a principal destinação das pilhas a combustível comercializadas, sendo este o destino de mais de 47 mil unidades das 70 mil comercializadas em 2019, e correspondia a praticamente 83% de toda a capacidade de potência das pilhas a combustível comercializadas em 2021 (ANL, 2020, HART, JONES, *et al.*, 2022). Sua implementação varia desde automóveis leves de passageiros e veículos utilitários esportivos, até ônibus, vans e caminhões (médios e pesados), e mais recentemente até em trens, aviões e navios (ANL, 2020, HART, JONES, *et al.*, 2022, RATH, KUMAR, *et al.*, 2019, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019). A tabela 3 descreve a quantidade de veículos e estruturas de abastecimento em países membros da *International Partnership for Hydrogen and Fuel cell in the Economy* (IPHE), estimado pelo Departamento de Energia dos EUA (DOE) em 2019, e mesmo que estas sejam estimativas, ainda é perceptível que atualmente Japão, Coréia do Sul, China e EUA são os principais investidores nesse tipo de tecnologia.

Tabela 3 - Veículos com pilhas a combustível e estações de abastecimento de Hidrogênio de países membros IPHE.

País	Carros	Ônibus	Caminhões	Empilhadeiras
Brasil	-	4 com 1 híbrido	-	-
Canadá	17	1	2	> 400
China	50	2800	1200	2
França	324	0	1	180
Alemanha	530	21	2	100
Itália	15	10	0	5
Japão	3433	22	-	160
Coréia do Sul	3216	7	-	-
Holanda	162	8 com 12 programados	16	0
Noruega	159	5	-	10
África do Sul	0	0	0	1
Reino Unido	100	20	0	-
EUA	7800	35 com mais 39 em desenvolvimento	Em fase de demonstrações	> 26000
Total	15806	2934	1219	27658

Fonte: Adaptado de ANL (2020).

Em relação a infraestrutura de abastecimento, a organização “H2 Station” compila dados de estações de abastecimento de hidrogênio pelo mundo. Segundo o banco de dados, o número das estações quintuplicou em menos de 10 anos, atingindo o montante estimado de 921 unidades em 2023, sendo 197 apenas na China. Entretanto, os dados chineses ainda são incertos devido ao acesso restrito a esses dados, podendo os valores serem ainda maiores. A Europa lidera em números de estações, seguida da China e EUA (H2STATION, 2024).

Samsun et. al. (2022) realizou um levantamento sobre o número de veículos com pilhas a combustível (incluindo caminhões, utilitário, carros de passageiros e ônibus) ao fim de 2021, e, os dados demonstram o crescimento do setor. Ao todos os autores contabilizaram 51437 veículos com pilhas a combustível (FCEV), tendo a Coréia do Sul

como líder, apresentando 38% dos veículos, seguido de EUA com 24%, China com 16% e Japão com 13%, proporção em concordância com os dados levantados pelo DOE. Além disso, os autores pontuam um grande crescimento no número de carros de passageiros entre o fim de 2020, com 25932 veículos, e o fim de 2021, com 42192 veículos (SAMSUN, REX, *et al.*, 2022).

Atualmente, todas as grandes montadoras investem em FCEV, porém Hyundai, Toyota, Honda e Daimler são destaque na categoria, sendo da Toyota, inclusive, o primeiro FCEV comercializado, o Toyota Mirai em 2014 (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022, LINDORFER, ROSENFELD, *et al.*, 2020, MEHMETI, MCPHAIL, *et al.*, 2016, WANG, Yun, RUIZ DIAZ, *et al.*, 2020). O Mirai dominou o mercado de FCEVs até o final de 2019, com até 75% de participação das ações, encontrando concorrência apenas no Hyundai Nexo em meados de 2020 (SAMSUN, REX, *et al.*, 2022). Na tabela 4 há o exemplo de alguns dos modelos produzidos por estas montadoras e suas características.

Tabela 4 - Modelos e características de FCEV.

Tipo	Modelo	Pressão do tanque (bar)	Range (km)	Consumo de combustível (kg/100km)
Carro	Daimler B-Klasse F-Cell	700	380	0,97
Carro	Toyota FHCV-adv	700	830	0,72
Carro	Honda FCX clarity	50	460	0,87
Carro	Hyundai Nexo	70 (Mpa)	380 miles (756 km)	65/58/61 (City/highway/Comb – MPGe) (0,84)
Ônibus	Daimler citaro FuelCell Hybrid	350	>250	10 - 14

Fonte: Adaptado de Aminudin, Kamarudin, *et al.* (2022), Lindorfer, Rosenfeld, *et al.* (2020) e Rath, Kumar, *et al.*, (2019).

Na tabela 5 é apresentada uma visão geral dos preços de carros de passageiros FCEV em diferentes países, e quanto de incentivos e subsídios dos governos ou empresas, o consumidor recebe para comprar um determinado veículo. A Coreia do Sul, por exemplo, recebe incentivos do governo federal e de governos locais, conseguindo reduzir o preço final em até quase 50% do original (SAMSUN, REX, *et al.*, 2022), apontando que a grande popularidade dos carros no país está relacionada com o grande incentivo nacional para tal.

Tabela 5 - Preços e incentivos na compra de carros FCEV em diferentes países.

País	Preço do carro FCEV		Incentivos	
	Moeda Nacional	Em dólares	Moeda Nacional	Em dólares
Coréia do Sul	KRW 67,65 - 70,05 milhões	59137 - 61235	KRW 22,5 milhões (governo) + KRW 10 - 15 milhões (governos locais)	19669 + 8742 - 13112
EUA	USD 49500 - 66000 USD 59435 - 62885		USD 800 (federal) + USD 2500-9500 (estados federais)	
China	-	-	RMB 6000/ kWel, máx. de RMB 200000	930/kWel, máx. de 31013
Japão	JPY 6,45 - 7,82 milhões JPY 7,12 milhões	58768 - 71250 64872	JPY 1,45 - 2,38 milhões	13211 - 21685
Alemanha	EUR 63900 - 73900 EUR 77290	75621 - 87456 91467	EUR 7500	8876
França	-	-	EUR 2000 - 6000	2367 - 7101
Canadá	CAD 54990 - 76750	43852 - 61204	CAD 5000 (federal) + CAD 3000 - 8000 (estados)	3987 + 2392 - 6380
Itália	-	-	EUR 6000 - 10000	7101 - 11834
Áustria	EUR 59500 (preço inicial)	70414	EUR 4000 (companhias e organizações) - EUR 5000 (privado)	4734 - 5917
Espanha	aprox. EUR 65000	76923	Até EUR 6000	7101
Suécia	SEK 849000	94333	SEK 70000	7778

Fonte: Adaptado de Samsun, Rex, et al. (2022).

Todavia, como mencionado anteriormente, as PaCMTP são pilhas a combustível movidas a hidrogênio, e este combustível apresenta atualmente diversas dificuldades logísticas e de produção. Em um primeiro momento é necessária a criação de um mercado que oferte H₂ o suficiente para satisfazer o crescimento da demanda, o que levaria tempo e investimento, visto que atualmente não há tais estruturas em larga escala (ERDOĞAN, GEÇICI, *et al.*, 2023). Ademais, atualmente a produção do H₂ é voltada basicamente para

satisfazer a demanda da indústria petroquímica, sendo a reforma de gás natural o método mais usual, porém, está também é possível de ser realizada por processos de gaseificação, eletrólise e oxidação parcial. Estes processos também são caros e, em alguns casos, não são tecnologias maduras o suficiente para produção em larga escala (RATH, KUMAR, *et al.*, 2019, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019).

Para o armazenamento, basicamente, utiliza-se a compressão ou liquefação do hidrogênio para garantir a densidade energética do combustível. Ambas as opções apresentam uma penalidade energética grande, sendo a maior na liquefação podendo ocasionar em um custo de operação alto, dependendo da fonte de eletricidade utilizada, lembrando que altas pressões são necessárias para garantir velocidade de reabastecimento em postos. Por exemplo, Staffel, Scamman, *et al.* (2019) estimam que a compressão para 900 bar teria uma penalidade energética média de 3,5 kWh por kg de H₂, enquanto a liquefação induziria um gasto energético adicional médio de 13 kWh por kg de H₂ (STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019).

O transporte também utiliza principalmente estas duas tecnologias e sofre das mesmas desvantagens, porém é importante apontar que o transporte em grandes quantidades e para longas distâncias se mostra desafiador pois as estruturas de transporte já existentes, como os gasodutos de gás natural podem apresentar problemas estruturais diante do uso do H₂, uma vez que este causa fragilização em aços com alto teor de carbono (RATH, KUMAR, *et al.*, 2019, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019). Além disso, ainda há a questão dos materiais utilizados na fabricação das pilhas a combustível poliméricas, como os caros catalisadores de platina (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022, XU, GUO, *et al.*, 2022). Por exemplo, a Toyota consumiria cerca de 30g de Platina por unidade construída (RATH, KUMAR, *et al.*, 2019).

Frente esses desafios, alguns representantes de grandes montadoras, como Audi (COLLIE, 2021) Volkswagen (MILLER, KEOHANE, 2021) e até mesmo a Daimler (AUTOMOTIVE NEWS EUROPE, 2020, HART, JONES, *et al.*, 2022), já disseram em entrevistas à veículos de mídia que as empresas pretendem seguir vias alternativas aos veículos leves movidos a hidrogênio, como investir nos veículos BEV e PHEV (veículos híbridos de tipo *plug-in*), ou investir em veículos pesados, como é o caso da Daimler. Por sua vez, outras montadoras ainda apostam no mercado (DAVID HART, JONES, *et al.*, 2022), como a BMW que apresentou seu novo BMW iX5 *Hydrogen* em 2023 ((BMW

GROUP, 2023), e a Jaguar Land Rover que anunciou o desenvolvimento de um protótipo FCEV em 2021 (JAGUAR LAND ROVER, 2021).

E mesmo frente os desafios, o mercado de carros de passageiros FCEV vem crescendo. Como citado anteriormente, o número de FCEVs quase duplicou de 2020 para 2021 (de 25932 para 42192 unidades), e o número de estações de abastecimento de hidrogênio, que também apresentaram um crescimento constante desde 2014, saltou de aproximadamente 560 em 2020 para 921 em 2023 (H2STATION, 2024).

Em relação a aplicação de pilhas a combustível em ônibus, houve uma maior adoção da tecnologia nas últimas duas décadas, sendo considerado, inclusive, o nível 7 em uma escala de *Technology Readiness Level*³ (TRL) (STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019, STRAUB, 2015). Isso está relacionado aos diferentes programas implementados em diversos países, tendo como destaque o programa CUTE (*Clean Urban Transporte for Europe*), o qual foi o primeiro teste em larga escala, através do qual 27 ônibus FCEVs operaram simultaneamente em 9 diferentes cidades europeias por 2 anos, sendo concluído em 2006 (SAXE, FOLKESSON, *et al.*, 2008). A tabela 6 apresenta alguns projetos que envolvem a utilização de ônibus com pilhas a combustível ao redor do mundo, demonstrando o progresso da tecnologia (RATH, KUMAR, *et al.*, 2019).

Tabela 6 - Projetos internacionais de ônibus com pilhas a combustível.

Manufaturante	Nº de ônibus planejados	Ano	Mercados de operação
JIVE 2	152	2018-2023	Sete países pela Europa
JIVE	Mais de 20	2017-2022	Nove países pela Europa
Toyota	De 100 a 200	Até 2020	Japão
Hyundai	Inicialmente para substituir 200 ônibus a GNC	Produção começará em 2020	Coreia do Sul
3Emotion	21	2015-2019	Seis cidades da Europa

³ A escala TLR foi criada para uso da NASA, mas foi adaptada para diferentes aplicações. Esta escala é dividida em 9 níveis e tem como objetivo descrever o estágio de desenvolvimento de determinada tecnologia. Inicia-se com uma tecnologia em estágio conceitual e vai até a plena operação (STRAUB, 2015).

High V.LO-City	14	2012-2019	Quatro regiões da União Europeia
HyTransit	6 em operação a partir de 2015	2013-2018	Aberdeen, Escócia
CHIC	54	Completo em 2016	Nove cidades na Europa e Canadá
Ballard	300	2015	China

Fonte: Adaptado de Rath, Kumar, et al. (2019).

Os programas JIVE e JIVE 2 são projetos nascidos do consórcio criado pela Comissão Europeia e a indústria do setor, a fim de expandir o uso de FCEVs e hidrogênio na Europa (DAVID HART, JONES, *et al.*, 2022). Estes e o H2Bus, consórcio de empresas como a Ballard e a Wrightbus, são alguns dos principais projetos da região, podendo destacar desse último a promessa de implementar até 600 ônibus FCEV até 2023 na primeira fase do programa (ANL, 2020, DAVID HART, JONES, *et al.*, 2022). Mas, apesar do grande investimento europeu, a China segue sendo o país que mais emprega ônibus FCEV no mundo, apresentando mais de 5500 unidades comercializadas no período de 2017-2021, segundo o levantamento da indústria de pilhas a combustível de 2021 (DAVID HART, JONES, *et al.*, 2022), ou com 4150 unidades, segundo o levantamento de Samsun, Rex, *et al.* (2022), e ambos com expectativa de crescimento nos próximos anos.

Já no caso brasileiro, houveram poucos projetos de implementação de ônibus a base de hidrogênio até então, mas pode-se destacar alguns desses. O programa Ônibus Brasileiro a Hidrogênio foi o primeiro do tipo no país, foi iniciado em 2006 e disponibilizaria até 5 ônibus híbridos de bateria e pilhas a combustível para operar em São Paulo (LUCAS, 2009). Há também o programa desenvolvido pelo Laboratório de Hidrogênio da COPPE/UFRJ, encabeçado pelo Professor Emílio Miranda, apresentando protótipos primeiramente em 2010, em 2012 na conferência Rio +20 e, nas Olimpíadas em 2016 (DE MIRANDA, CARREIRA, *et al.*, 2017).

Além destes, também é interessante citar o projeto “Tecnologia Nacional de Transporte Sustentável para Maricá: Desenvolvimento e Operação Assistida - Fase 1”, desenvolvido pelo Laboratório de Hidrogênio (LabH2) da COPPE/UFRJ em parceria com a prefeitura de Maricá no RJ. Tal projeto está desenvolvendo 3 protótipos de ônibus sustentáveis, um puramente elétrico, outro híbrido elétrico com pilhas a combustível a

hidrogênio e o terceiro, um ônibus híbrido elétrico a etanol (COPPE/UFRJ, 2022b, a, LABH2, 2022), os quais estão em fase de operação assistida desde maio de 2022 (DE MIRANDA, P. E. V., 2024). Esse tipo de projeto leva em consideração que para a realidade brasileira a utilização de etanol poderia ser mais interessante, em vista da capacidade e potencial nacional de produção do biocombustível, e a redução da emissão de poluentes, como óxidos e material particulado, emitidos por ICEs operando a diesel (SAMPAIO, ROSA, *et al.*, 2007).

Por sua vez, em relação a caminhões, a utilização de pilhas a combustível oferece uma opção pouco poluente, silenciosa, com alta autonomia e, possibilitaria o abastecimento mais rápidos do que BEVs (ANL, 2020). Todavia, o mercado para caminhões pesados é muito sensível a preços, e, até meados da década passada, poucos governos investiam na tecnologia FCEV, quando comparado com os ônibus FCEV, o que dificultou a expansão do mercado até então (CAMACHO, JURBURG, *et al.*, 2022, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019, YAN, ZHAO, 2022). A tabela 7 apresenta alguns dos sistemas disponíveis para caminhões médio e pesados, e, apesar do mercado apresentar majoritariamente grandes montadoras, como Volvo, Toyota, Daimler e Hyundai, também há destaque para empresas menores, como a Hyzon Motors, uma empresa nova, mas com grande potencial (ANL, 2020, DAVID HART, JONES, *et al.*, 2022).

Tabela 7- Exemplos de sistemas com pilhas a combustível disponíveis para caminhões pesados e médios (HDT/MDT).

Companhia	Produto	Especificações	Detalhes
Ballard	FCveloCity®	30, 85 e 100 kW	Extensor de autonomia de Classe MD/HD 4 - 8 e fonte primária
	FCmove™	70 kW	Fonte primária
	HyPM-HD	30 - 180 kW	Extensor de autonomia de Classe MD/HD 4 - 8 e fonte primária
Cummins/Hydrogenics	Celerity™	60 kW	Pronto para integração
	CelerityPlus™	60 kW	Instalação <i>Drop-in</i>
Loop Energy	Range extender	30 e 50 kW	Transporte portuário, caminhões contêineres e vocacionais
Nuvera	Nuvera® motor FC 45 kW	45 kW	Extensor de autonomia e fonte primária
Plug Power	ProGen	20 - 100 kW	Extensor de autonomia e fonte primária

PowerCell	MS-30	10 - 30 kW	Extensor de autonomia
	MS-100	100 kW	Extensor de autonomia
US Hybrid	FCe™ 10, 40, 50, 80, 100 e 150	10, 40, 50, 80, 100 e 150 kW	Extensor de autonomia e fonte primária
	Legacy UTCPOWER	120 kW	Fonte primária

Fonte: Adaptado de ANL (2020).

Mesmo frente as barreiras, o mercado para caminhões com pilhas a combustível vem crescendo e recebendo grandes investimentos. Por exemplo, a Volvo e a Daimler anunciaram um consórcio em 2020, nomeado “Cellcentric GmbH & Co KG”, para o desenvolvimento e manufatura de PaCMTP para mobilidade, onde em primeiro momento focará em desenvolvimento de sistemas para caminhões pesados. Além disso, a fim de impulsionar a utilização de caminhões de carga a hidrogênio, a Shell está investindo na criação de um corredor de recarga de H₂ de baixo carbono interligando os *hubs* de produção de Rotterdam, Colônia e Hamburgo, para atender até 5000 caminhões com PaCMTP até 2030 (DAVID HART, JONES, et al., 2022).

A Toyota apresentou dois modelos Kenworth T680 classe 8, Alpha e Beta, como parte do *Project Portal* para atuar na zona portuária americana, onde o primeiro apresentava uma pilha a combustível de 85 kW da Ballard e o outros dois possuíam os sistemas FCEV do Toyota Mirai, e, juntos já apresentaram mais de 22 mil km rodados (ANL, 2020). Outro exemplo é o programa *Zero and Near-Zero Emission Freight Facilities* (ZANZEFF), o qual inclui 11 projetos para o desenvolvimento de veículos pesados e médio com pilhas a combustível e, a infraestrutura de hidrogênio necessária, que totalizaria um investimento total, incluindo público e privado, de 400 milhões de dólares. Além disso, diversos países do IPHE declararam metas a serem atingidas quanto a comercialização desses caminhões, como a França com até 2000 unidades até 2028, Coreia do Sul com 30 mil até 2040 e Holanda com 3500 até 2025 (ANL, 2020, DAY, 2022). A tabela 8 apresenta alguns outros projetos de caminhões ainda em desenvolvimento.

Tabela 8 - Caminhões FCEV em desenvolvimento.

Companhia	Veículo	Tipo	Pilha a combustível	Manufaturante de equipamento original	Status
-----------	---------	------	---------------------	---------------------------------------	--------

Chereau	ROAD	Semi-trailer Refrigerado	H2SYS	Carrier Transcold	Testes iniciaram em Julho de 2019
Cummins		Caminhão Classe 8	90 kW, escalável com incrementos de 30 ou 45 kW até 180kW	Cummins	Apresentação de veículo demonstrativo em outubro de 2019
Daimler Truck & Buses	Vision F-Cell	Caminhão Classe 8	135 kW	Mitsubishi Fuso Truck and Bus Corporation	Apresentado em outubro de 2019 no Tokyo Show Motor. Daimler se compromete em serializar a produção até o fim da década de 2020
Horizon Fuel Cell Technologies/JMC		Caminhão Classe 8	150 kW	Ford Motor Company	Consórcio da Ford com a Jiangling Motors (JMC). Veículo demonstrativo apresentado em Setembro de 2019
Hyundai	HDC-6 NEPTUNE /Xcient	Caminhão Classe 8	190 kW	Hyundai	Em desenvolvimento
Nikola Motor	Nikola One	Caminhão Classe 8	PowerCell	Nikola	Modelo Sleeper marcado para lançamento em 2022 para América do Norte
	Nikola One	Caminhão Classe 8	Bosch	Nikola	Modelo Day Cab marcado para lançamento em 2020 para a Norte América
	Nikola One	Caminhão Classe 8	Bosch	Nikola	Lançamento para o mercado europeu em 2023
Scania	-	Caminhão de lixo FCEV	PowerCell	JOAB	Desenvolvido em parceria com a Agência Sueca de Energia e o Instituto Real de Tecnologia de Estocolmo. O caminhão é previsto de ser lançado em 2020
Toyota Motor Company	Project Portal	Alpha	Ballard	Kenworth T680	Em teste em POLA/POLB
		Beta	Toyota	Kenworth T680	
	H2Cargo TM	Furgão Plug-in	30 kW (Hydrogenics)	Workhorse ou FCCC MT-45	Em produção
	H2Ride TM	Ônibus Shuttle Plug-in	30 kW (Hydrogenics)	Modelo Eldorado Aero Elite 29	Em produção
US Hybrid	H2Truck TM	Caminhão Classe 8	80 kW	International, ProStar Day Cab	Em desenvolvimento
	H2Tug TM	Trator de Reboque FCEV Plug-in híbrido C-17	30 kW (Hydrogenics)	TUG Technologies modelo U30	Em desenvolvimento

Waterst of Net	Caminhão o de lixo FCEV	Size N/A (Hydrogeni cs)	E-trucks Europa	Apresentado em Abril de 2019 como parte do projeto piloto para testes em 10 cidades europeias
---------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-----------------	--

Fonte: Adaptado de ANL (2020).

No entanto, mesmo que haja um grande interesse no mercado de caminhões FCEV por países e empresas ocidentais, a China apresentava a maior dominância no mercado de caminhões pesados (HDT) e médios (MDT) com pilhas, até pelo menos o fim de 2021 (SAMSUN, REX, *et al.*, 2022).

O trabalho de Anselma e Belingardi (2022) apresentou uma avaliação e projeção de custos de propriedade de caminhões FCEV. Os autores destacaram que a adoção da tecnologia depende basicamente da diminuição de preços e superação das dificuldades logísticas do hidrogênio, mas que, em alguns cenários, em até 10 anos (até 2030) esta já seria uma opção mais viável do que caminhões BEV (ANSELMA, BELINGARDI, 2022).

Também há grande interesse na utilização de pilhas a combustível em navios e aeronaves, uma vez que esses são os subsetores mais difíceis de descarbonizar no setor de transporte (BALCOMBE, BRIERLEY, *et al.*, 2019, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019). Abordando primeiramente a aviação, há uma expectativa principalmente como *Auxiliary Power Unit* (APU), para dar partida nos motores principais, luz e ar condicionado, por exemplo, e, como fonte de potência para aviações não tripuladas (UAV). As pilhas a combustível se destacam por serem uma opção eficiente, compacta, silenciosa e possivelmente não poluente. Ademais, assim como nas demais aplicações, as PaCMTP são a principal tecnologia utilizada atualmente, todavia também enfrentam grandes barreiras relacionadas ao uso de hidrogênio (AFONSO, SOHST, *et al.*, 2023, RATH, KUMAR, *et al.*, 2019, STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019, WANG, Yun, RUIZ DIAZ, *et al.*, 2020).

Atualmente, a forma preferível de estoque do hidrogênio é na forma criogênica liquefeita, devido à baixa densidade energética volumétrica do combustível, o qual demandaria um volume maior do que o ocupado por outros combustíveis mais convencionais, além de demandar condições especiais de armazenamento que dificultam o design e a aerodinâmica mais tradicionais (AFONSO, SOHST, *et al.*, 2023, RATH, KUMAR, *et al.*, 2019). Dessa maneira, a utilização de PaCOS em aeronaves também se mostra interessante, em vista das altas eficiências e flexibilidade de combustíveis

(AFONSO, SOHST, *et al.*, 2023, SEYAM, DINCER, *et al.*, 2023). Na tabela 9 são apresentadas algumas características de sistemas UAVs movidos a pilhas a combustível.

Tabela 9 - UAVs movidos a pilhas a combustível.

Organização	Tipo de pilha a combustível	Combustível e Forma de armazenamento	Autonomia (estimada)
AeroVironment, Inc. (2005)	PaCMTP	H2 criogênico	24 h
Naval Research Lab (2006)	PaCMTP	H2 gasoso	3,3 h
CSLULA/OSU (2007)	PaCMTP	H2 gasoso	12 h
KAIST (2007)	PaCMTP	H2, Borohidrato de Sódio	10 h
AeroVironment, Inc. (2007)	PaCMTP	H2, Borohidrato de Sódio	9 h
UTRC (2009)	PaCMTP	H2 comprimido	20 min
AFL, Naval Research Lab (2010)	PaCMTP	Hidrato metálico	10 h
Energy or Technologies (2011)	PaCMTP	H2	10 h 4 min
Boeing, Lockheed Martin (2011)	PaCOS	Propano	8 h
Naval Research Lab (2013)	PaCMTP	H2 comprimido	48 h
H3 Dynamics (2016)	PaCMTP	H2	10 h

Fonte: Adaptado de Wang, Ruiz Diaz, et al. (2020).

Por fim, em relação ao transporte marítimo, há interesse tanto para veículos marinhos convencionais, como lanchas, navios e barcas, mas também nos veículos submarinos (UVs) e veículos submarinos não tripulados (UUVs) (CHEN, 2020, RATH, KUMAR, *et al.*, 2019). O setor de transporte marítimo representa mais de 80% do comércio internacional e, sozinho, aproximadamente 3% de toda emissão global dos GEE, e há a expectativa de sua intensificação até 2050 (BALCOMBE, BRIERLEY, *et al.*, 2019).

Assim como em outras aplicações, a tecnologia de pilha a combustível oferece uma maior eficiência, operação silenciosa e possivelmente menos poluidora, todavia, caso H₂ seja o combustível utilizado, os sistemas enfrentariam as mesmas dificuldades discutidas anteriormente. Entretanto, apesar do potencial da tecnologia, a alta demanda requerida por grandes embarcações ainda não é suficientemente atendida pelas pilhas a combustível, mas segue sendo um tópico de interesse em diferentes países (BALCOMBE, BRIERLEY, *et al.*, 2019, CHEN, 2020, RATH, KUMAR, *et al.*, 2019, STAFFELL,

SCAMMAN, *et al.*, 2019). A título de informação pode-se citar, por exemplo, a lista de projetos realizados na Europa nos últimos 20 anos, totalizando 23 projetos com diferentes tipos de combustíveis e pilhas, disponibilizada no relatório *Study on the use of Fuel Cells in Shipping* da Agência de Segurança Marítima Europeia, EMSA ((TONSTAD, ÅSTRAND, *et al.*, 2017).

Há também um crescente interesse na utilização de Amônia como um carregador de hidrogênio, porém a utilização de pilhas a combustível a base de amônia ainda enfrenta algumas dificuldades similares às dificuldades enfrentadas pelas pilhas a combustível com etanol, como questões materiais, para sua comercialização ((BALCOMBE, BRIERLEY, *et al.*, 2019, DEKEL, YASSIN, *et al.*, 2023, LIU, Yun, PAN, *et al.*, 2023, WANG, Bin, LI, *et al.*, 2022, WANG, Teng, ZHAO, *et al.*, 2022).

2.4. Síntese do Capítulo

As pilhas a combustível são aparelhos de alta eficiência energética, não emitem material particulado e conseguem operar sem a emissão de CO₂, são compactas, modulares, leves e, por isso, apresentam potencial de aplicação em diversas áreas como foi apresentado neste capítulo (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022, LINDORFER, ROSENFELD, *et al.*, 2020, RATH, KUMAR, *et al.*, 2019). Em especial para o setor de transporte, a tecnologia oferece o potencial de solucionar o desafio de autonomia energética (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022), a qual, associada às questões de infraestrutura da rede elétrica (SIMON, 2013), são barreiras que limitam a utilização de veículos puramente a baterias, o que será mais bem explorado na sessão 4.4.

As pilhas a combustível de membrana de troca protônica (PaCMTP) atualmente são o tipo de pilhas a combustível mais comercializadas. Essas se destacam das demais pilhas a combustível devido a sua maturidade tecnológica, operação em baixas temperaturas, utilização de um eletrólito não corrosivo e a alimentação de hidrogênio como combustível. O hidrogênio é reconhecido como sendo o combustível com a maior densidade energética, em termos de massa (TEIXEIRA, MENDES, *et al.*, 2022), e como seu consumo na maioria das pilhas a combustível não produz CO₂, o combustível se tornou foco para a descarbonização do setor de transporte.

Entretanto, algumas são as barreiras que limitam a expansão do mercado. Primeiramente, pode-se citar os altos preços dos sistemas e a sensibilidade à

contaminação por CO, o que encarece ainda mais a operação. E, o principal ponto, é a própria utilização do hidrogênio como combustível. O gás apresenta uma baixa densidade energética em termos de volume, ocasionando na necessidade de grandes volumes para aplicações mais demandantes energeticamente, o que é um empecilho para algumas aplicações, como em aeronaves, e, também há as questões relacionadas a infraestrutura de produção, armazenamento e transporte, como citado na sessão 2.3, assim como questões de segurança, devido ao inflamabilidade do combustível.

Assim, tipos alternativos de pilhas a combustível que permitem a utilização de outros combustíveis, apesar de ainda apresentarem barreiras operacionais, recebem destaque, como é o caso das tecnologias de PaCMD e PaCOS. As pilhas a combustível de injeção direta de metanol se destacam pela facilidade de conversão de metanol em hidrogênio, e vice e versa, vasta infraestrutura de produção e transporte global (LIU, Jing, ZHAO, *et al.*, 2024, SCHORN, BREUER, *et al.*, 2021), todavia utilizam catalisadores caros, apresentam problema de *crossover* do combustível e apresentam baixa eficiência devido a cinética desfavorável do álcool.

Outra opção à utilização do hidrogênio, por exemplo, seria a utilização de etanol em pilhas a combustível. O álcool apresenta menor toxicidade que o metanol (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015), e, no caso brasileiro, o país já apresenta uma infraestrutura existente e robusta de produção, armazenamento e transporte do combustível. Sua utilização em pilhas a combustível pode ocorrer de maneira direta, com a alimentação do combustível direto no sistema, ou de maneira indireta, com uma etapa prévia de reforma do álcool, seja externa ao veículo ou apenas em outro compartimento do mesmo. A via indireta evita as questões de baixa velocidade reacional e também evita a degradação do anodo por deposição de carbono, mas também há uma perda de eficiência por adicionar uma etapa extra ao processo (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015) e custos adicionais pela adição do equipamento.

Em relação à injeção direta de álcool, diferentes tecnologias de pilhas a combustível podem ser aplicadas nesse sentido, como versões similares às PaCMD. Tais aparelhos também utilizam eletrólitos de troca protônica e operam em temperaturas baixas, mas também sofrem com a cinética reacional de reforma do combustível (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015). Por sua vez, as pilhas a combustível de óxido sólido conseguem apresentar uma melhor taxa de reação devido às altas temperaturas de operação e por

operarem com eletrodos de níquel e céria, que apresentam boa ação catalítica na quebra do álcool (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015, XU, GUO, *et al.*, 2022)

Portanto, a utilização das pilhas a combustível de óxido sólido, apesar de ainda encontrar barreiras operacionais, relacionadas inclusive ao uso de biocombustíveis, se destaca pela alta eficiência elétrica, mesmo operando com outros tipos de combustíveis diferentes do H₂, utilização de catalisadores mais baratos do que as demais pilhas a combustível, e ainda possibilitar a operação em *net-zero*⁴, ao se considerar o ciclo produtivo da cana-de-açúcar.

⁴ A expressão “emissões *net zero*” se refere a zerar as emissões líquidas de GEE de um determinado sistema (POTENZA, QUINTANA, *et al.*, 2021).

Capítulo 3

Pilha a combustível de Óxido Sólido (PaCOS)

Neste capítulo será realizada uma revisão dos materiais dos componentes das pilhas a combustível de óxido sólido, seu design e condições de operação preferíveis, assim como as reações que regem o funcionamento da pilha a combustível. Além disso, também serão abordadas as suas possíveis aplicações, vantagens e desvantagens da utilização com etanol.

3.1. Fundamentos Eletroquímicos da PaCOS

Como dito anteriormente, as pilhas a combustível são aparelhos de conversão de energia química em energia elétrica e calor, tendo como um dos principais subprodutos a formação de água. No caso das PaCOS, como a maioria opera a base de eletrólitos condutores de íon de oxigênio (O^{2-}), a reação eletroquímica principal se baseia na redução de moléculas de oxigênio no catodo pela ação elétrons livres no eletrodo, sendo obtidos os íons O^{2-} , que são transportados pelo eletrólito até o anodo. No anodo, os íons reagem com hidrogênio para a formação de água e liberação de elétrons (ABDALLA, HOSSAIN, *et al.*, 2018, AFROZE, REZA, *et al.*, 2022, LINDORFER, ROSENFELD, *et al.*, 2020, MANOHARAN, HOSSEINI, *et al.*, 2019, SINGH, ZAPPA, *et al.*, 2021).

Todavia, para o melhor entendimento da operação da pilha a combustível, é necessária a introdução do conceito do Limite de Fase Tripla, ou fronteira trifásica (*Triple-phase boundary*, TPB). Os TPBs são regiões encontradas nas interfaces dos eletrodos com o eletrólito, e recebem esse nome por serem o encontro das fases condutora de íons, condutora de elétrons e da fase gasosa reativa. É na região TPB do catodo que o oxigênio é reduzido, e, é para a região de TPB do anodo que este íon é transportado para reagir eletroquimicamente com combustíveis e liberar elétrons, os quais serão captados por um circuito externo (interconexão) ligado ao catodo, para gerar eletricidade. Por exemplo, nas PaCOS consideradas atualmente como *state of the art*, constituídas de um anodo de Ni-YSZ, catodo LSM-YSZ e eletrólito de YSZ, as TPB são as áreas de interface

Ni/YSZ e LSM/YSZ expostas para o combustível e ar respectivamente (LI, Nanqi, LIU, *et al.*, 2023, XU, GUO, *et al.*, 2022). Estes materiais serão melhor abordados na seção 3.2 de revisão de materiais.

Logo, as reações que representam esse processo na PaCOS são descritas nas equações 1 a 3, onde a eq. 1 corresponde a reação no catodo, a eq. 2 a reação no anodo e a eq. 3 a reação geral do processo.



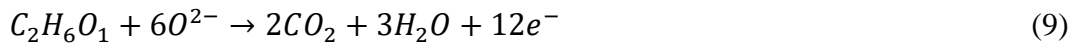
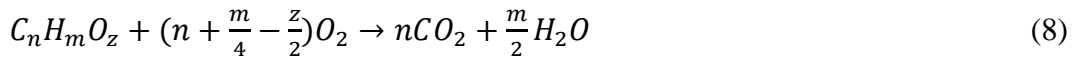
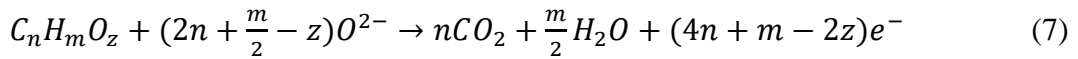
Porém, como citado anteriormente, uma das vantagens da utilização desse tipo de pilha a combustível é a possibilidade de utilização de diferentes combustíveis devido a capacidade de sua reforma interna. As equações 1, 2 e 3 são para representar a utilização direta do hidrogênio, porém, caso outro combustível seja utilizado, em um primeiro momento é necessária a conversão deste a H_2 . Além do balanceamento estequiométrico, não há mudança efetiva da reação que ocorre no catodo, porém no anodo sim. As principais reações que ocorrem devido a adição combustíveis com carbono são as chamadas Reforma a Vapor (equação 4), ou, a *water-gas shift* (equação 5). Além disso, ainda há a possibilidade da oxidação de CO no anodo para a formação de dióxido e elétrons (equação 6) (AFROZE, REZA, *et al.*, 2022, ELLEUCH, HALOUANI, 2019, LINDORFER, ROSENFELD, *et al.*, 2020, MANOHARAN, HOSSEINI, *et al.*, 2019, VENÂNCIO, DE MIRANDA, 2017).



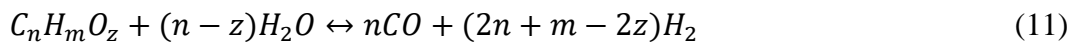
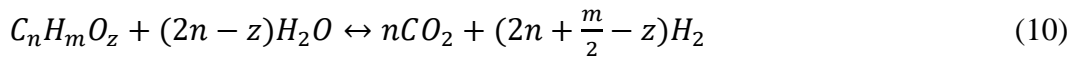
As reações de 4 a 6 representam a utilização de metano com combustível para representar cenários mais simples. Caso o combustível alimentado seja mais complexo, como é o caso do etanol, as reações são mais complexas devido a formação de diferentes compostos intermediários, como o eteno, muito associados a deposição de carbono nos sítios ativos do anodo. Portanto, quando etanol, ou outro biocombustível oxigenado, é

diretamente adicionado à pilha a combustível, algumas vias de reforma interna podem prevalecer.

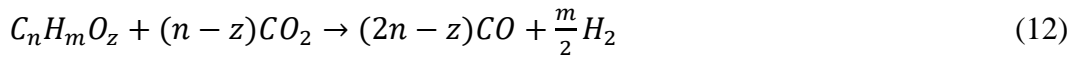
Uma delas é a oxidação eletroquímica completa do álcool na qual não há a conversão do álcool a espécies mais leves, sendo oxidado diretamente à H₂O e CO₂ (equação 7). A equação 8 representa a equação geral genérica da oxidação de biocombustíveis e a equação 9 é a oxidação completa de etanol que ocorre no anodo (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015, ELLEUCH, HALOUANI, 2019, LI, Nanqi, LIU, *et al.*, 2023, LYU, XIE, *et al.*, 2020).



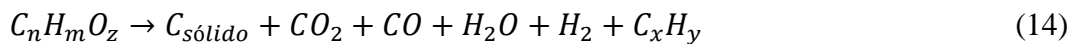
Outra via de reforma é a já mencionada Reforma a Vapor, na qual o álcool reage com água para formar hidrogênio. Essa via pode ocorrer de forma completa ou parcial, sendo representados nas equações 10 e 11 são respectivamente (ELLEUCH, HALOUANI, 2019, LI, Nanqi, LIU, *et al.*, 2023).



Além da reforma a Vapor, também ocorre a chamada Reforma Seca, na qual o agente oxidante é o CO₂, propiciando a formação de gás de síntese. Estas são demonstradas nas reações 12 e 13 abaixo (ELLEUCH, HALOUANI, 2019).



Por fim, a última das principais vias de reforma de biocombustíveis é o craqueamento térmico, decomposição térmica ou pirólise, que está representada na equação 14 (ELLEUCH, HALOUANI, 2019, LI, Nanqi, LIU, *et al.*, 2023).



Além das reações citadas aqui anteriormente, há diversas outras reações envolvendo espécies intermediárias, que não são tão importantes para a análise desse trabalho. Portanto, optou-se por focar nas principais encontradas na literatura. Todavia, além das já apresentadas, outras duas reações também são importantes no funcionamento de pilhas a combustível com biocombustíveis. A chamada Reação de Boudouard (equação 15) rege um dos mecanismos de deposição de carbono, e explica uma das vantagens de se operar a PaCOS em temperaturas $> 650^{\circ}\text{C}$, uma vez que nessas condições a formação de CO é favorecida. Além dela, também é descrita na literatura que parte do carbono depositado no anodo é oxidado durante a operação da pilha a combustível, e a equação 16 representa esta reação (ELLEUCH, HALOUANI, 2019, LI, Nanqi, LIU, *et al.*, 2023).



O entendimento dessas reações é fundamental para a operação eficiente da PaCOS e a figura 6 esquematiza e sintetiza parte das reações que ocorrem durante a operação da pilha a combustível. De maneira geral, é relatado na literatura que a conversão de etanol é afetada pela razão água/EtOH (A/E), a temperatura de operação e o tempo de contato do vapor com o catalisador. Por exemplo, em temperaturas inferiores a 600°C e uma razão $A/E < 2$, há a propensão a formação de coque (DENG, LI, *et al.*, 2023).

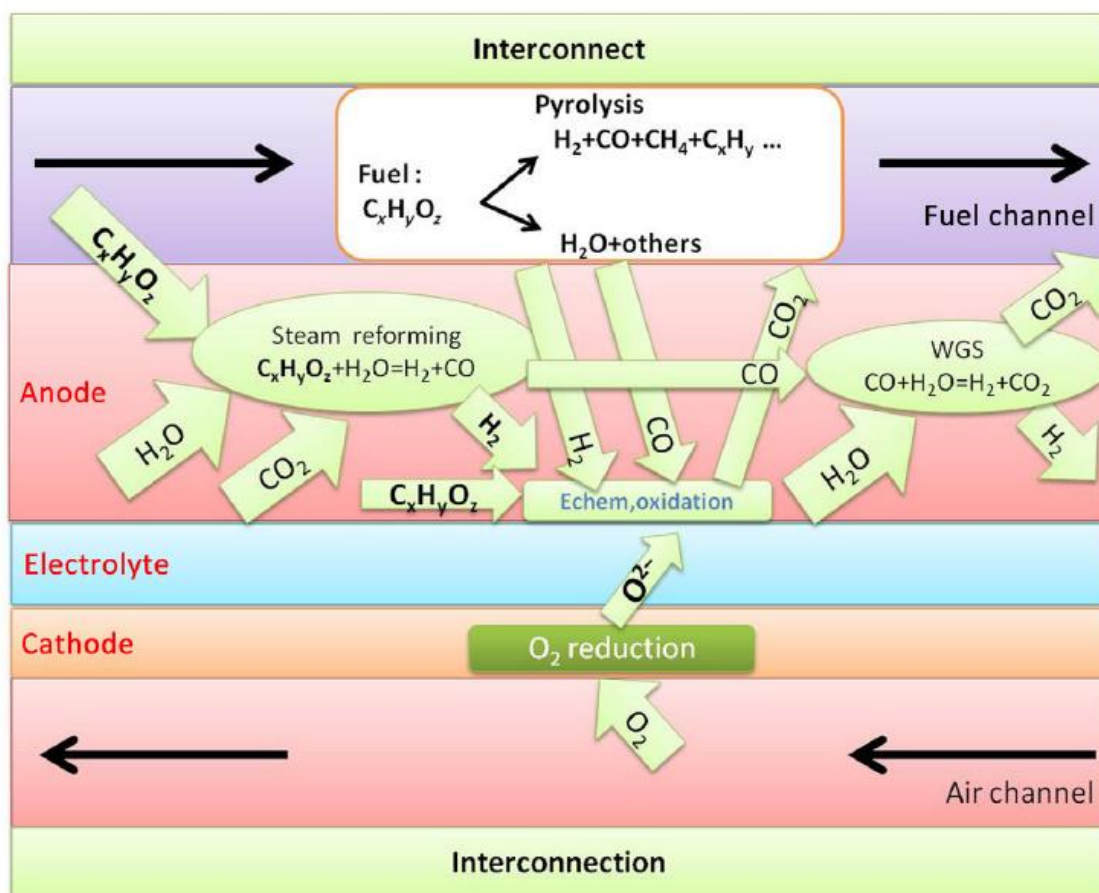


Figura 6 - Esquemática das reações envolvidas na operação de uma PaCOS com combustíveis oxigenados.

Fonte: Elleuch e Halouani (2019).

3.2. Componentes Materiais

As PaCOS são normalmente compostas por dois eletrodos, a interconexão e um eletrólito cerâmico sólido entre eles, e operam em temperaturas variando na faixa de 600-1000°C. Todavia estes não são os únicos designs concebidos da pilha a combustível. Alguns trabalhos relatam a utilização de nanocompostos para a formação de pilhas a combustível de um único componente ou apenas sem eletrólito (LYU, XIE, *et al.*, 2020). Porém, estes casos ainda são pouco estudados e, portanto, a revisão seguinte focará nos modelos convencionais de três componentes principais.

3.2.1. Eletrólitos

Ao se escolher o material a ser utilizado como eletrólito, algumas propriedades são necessárias. É preciso que o material tenha uma permeabilidade baixa, para que não haja o *crossover* do combustível da região do anodo, alta condutividade iônica e o mais fino possível, para diminuir a resistência ao transporte de íons, baixa condutividade eletrônica, para que os elétrons gerados nas reações escape apenas pelo sistema externo (interconexão) e não haja perda de tensão, e boa resistência às condições extremas a que o sistema é submetido (altas temperaturas e ambiente redutor/oxidante) (ABDALLA, HOSSAIN, *et al.*, 2018, HUSSAIN, Saddam, YANGPING, 2020, XU, GUO, *et al.*, 2022). A condutividade desejável é em uma faixa de 0,01 – 0,1 S/cm para a faixa de 1 – 100 μm de espessura do eletrólito (HUSSAIN, Saddam, YANGPING, 2020).

O eletrólito de Zircônia estabilizada com Ítria (YSZ ou *Y2O3-stabilized ZrO2*) é o material amplamente utilizado atualmente, sendo considerado *state of the art material*, devido as suas estabilidades química e térmica e boa condutividade iônica (LINDORFER, ROSENFELD, *et al.*, 2020, MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012), principalmente para temperaturas superiores a 850 °C. Outra opção de eletrólito seria utilizar Zircônia estabilizada com Escândio (ScSZ), o qual é mais estável e apresenta uma condutividade maior que o YSZ, mas são mais caros (HUSSAIN, Saddam, YANGPING, 2020). Por sua vez, em temperaturas inferiores, na faixa de 550 a 750 °C por exemplo, as cerâmicas com dopagem de Céria SDC ($\text{Sm}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_2$) e GDC ($\text{Gd}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_2$), e a perovskita LSGM (*Sr and Mg-doped LaGaO₃*) são interessantes por apresentarem maior condutividade iônica que o YSZ nessa faixa, mas a estabilidade mecânica, o custo e a disponibilidade dos materiais são ainda desafios para a utilização desses materiais (HUSSAIN, Saddam, YANGPING, 2020, LYU, XIE, *et al.*, 2020, XU, GUO, *et al.*, 2022).

Apesar de os eletrólitos condutores de íons de oxigênio serem os mais estudados, os demais tipos também oferecem interessantes possibilidades. Os eletrólitos protônicos cerâmicos apresentam uma alta eficiência em temperaturas intermediárias (400-600 °C), visto que a condutividade protônica é superior à do oxigênio, e isso aumenta o tempo de vida da pilha a combustível e possibilita a utilização de materiais mais baratos na estrutura externa do sistema. Porém, nessa faixa de temperatura há uma baixa ação catalítica de reforma interna de combustíveis hidro carbonáceos, o que, dependendo do combustível utilizado, causaria uma severa coqueificação, como no caso do etanol (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015, PARK, HAO, 2023). O trabalho de Park e Hao (2023) avalia a

operação de uma pilha a combustível com cerâmica protônica com etanol a 500°C, ao adicionar uma camada catalítica extra de Pt e CeO₂ ao anodo. Tal experimento foi concebido uma vez que os autores afirmam que, superando as limitações causadas pelo coqueificação, é possível intensificar a reforma do combustível. Os autores concluem que o coqueificação é eficientemente evitado e relatam um alto pico de potência em 500°C.

Por outro lado, a utilização dos eletrólitos compostos, ou eletrólitos de íons mistos, vem ganhando espaço, uma vez que a combinação de diferentes materiais resulta em um composto com alta condutividade iônica, permitindo a pilha a combustível atingir uma maior densidade de potência, podendo se aproximar da faixa de 0,01 – 0,1 S/cm operando em 400-600 °C. Todavia este tipo de eletrólito ainda é relativamente novo e, por isso, pouco estudado, quando comparado com os demais tipos. Logo, os mecanismos de transferência de íons ainda não são completamente conhecidos e, em certas temperaturas, é relatada uma queda grande da condutividade (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015, LYU, XIE, *et al.*, 2020).

3.2.2. Anodo

O anodo é um eletrodo poroso composto formado por um condutor elétrico e um iônico, onde ocorrem as reações de reforma do combustível e oxidação do hidrogênio. Atualmente os *cermets* com Níquel são os mais utilizados, uma vez que o metal é uma boa opção para a fase eletrônica do anodo devido ao seu baixo custo, alta condutividade elétrica, atividade eletrocatalítica e alta atividade catalítica na reforma de combustíveis carbonáceos. Por sua vez, para compor a fase iônica o YSZ é preferível, visto que o material tem uma boa condutividade e permite ajustar o coeficiente de expansão térmica do composto, mas a associação com as cerâmicas GDC, SDC e zircônia estabilizada com Sc₂O₃ (ScSZ) também são possíveis, dependendo das condições de operação (ABDALLA, HOSSAIN, *et al.*, 2018, LI, Nanqi, LIU, *et al.*, 2023, XU, GUO, *et al.*, 2022).

Os anodos de Níquel apresentam uma grande vantagem, ao se utilizar etanol como combustível. Eles apresentam uma alta ação catalítica para a clivagem das ligações O-H e C-C e também para a formação de H₂ a partir de átomos de H. Além disso, a via preferível de reforma de etanol é a Reforma a Vapor, e a utilização do Ni permitiria a alimentação direta do álcool, sem necessitar de destilação. Porém, alguns subprodutos

dessa via, como eteno e metano, são grandes causadores da formação de carbono nos catalisadores de Níquel, o que é ainda agravado em baixas temperaturas (VENÂNCIO, DE MIRANDA, 2017, XU, GUO, *et al.*, 2022). A deposição de carbono danifica o eletrodo por bloquear os sites ativos eletroquimicamente (na TPB), bloquear os poros do anodo, impedindo o fluxo necessário e aumentando a polarização na difusão, ou até mesmo danificar a estrutura de Ni, pulverizando a camada catalítica (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015).

Através de uma revisão da literatura, a adição de vapor (como oxidante) e a operação em altas temperaturas ($>800^{\circ}\text{C}$) se mostraram umas das principais maneiras de suprimir esse risco de desativação dos sítios do catalisador pela deposição de carbono (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015, XU, GUO, *et al.*, 2022). Mas, algumas outras medidas também podem ser tomadas. Uma opção seria a utilização de reformadores externos de combustível, mas esses deixariam o sistema mais complexo, caro e poderiam inviabilizar algumas aplicações, além de diminuir a eficiência, por adicionar um processo com penalidade energética (FARRELL, LINIC, 2016).

Outra opção seria a substituição do catalisador de níquel por opções resistentes à deposição, ou a modificação do anodo, adicionando camadas protetoras ou a formação de ligas com propriedades aperfeiçoadas. Alguns trabalhos citam, por exemplo, a utilização de anodos de Cobre e CeO_2 , onde o óxido apresenta a capacidade de reforma e o cobre oferece uma boa condutividade elétrica e resistência à deposição de carbono. Todavia, tais anodos ainda apresentam ação catalítica inferior aos convencionais de Ni e podem sofrer sinterização em altas temperaturas (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015, FARRELL, LINIC, 2016, LI, Nanqi, LIU, *et al.*, 2023).

Os trabalhos de Sarruf *et al.* (2018) e Sarruf *et al.* (2020), por exemplo, abordam a utilização de anodos a base de Cu e Ce, e ricos em Cobalto, para receber a alimentação direta de etanol, sendo estes respectivamente $\text{CeO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-CuO}$ e $\text{CeO}_2\text{-Co-Cu}$. Os autores concluem que os materiais escolhidos são possíveis de operar como anodos livres de níquel e demonstraram a capacidade de operar com combustíveis orgânicos, incluindo o etanol. Além disso, o trabalho de 2020 ainda reforça a importância da presença de Cobre nos materiais para que ocorra a oxidação do carbono depositado (SARRUF, HONG, *et al.*, 2018, 2020).

Os anodos de cerâmica, normalmente do tipo Perovskita, são outra opção para substituir os anodos de níquel (QIN, XIAO, *et al.*, 2021). Estes, todavia, apresentam baixa ação catalítica para a oxidação de combustíveis, e por isso são associados a metais, como o Cu, Ni, Co. Um exemplo de material desse tipo de eletrodo é o LSCM ($\text{La}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{Cr}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{O}_3$), o qual se mostrou um eficiente e estável anodo em alimentações com baixo vapor (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015). Porém, mesmo apresentando boa resistência à deposição, estes ainda apresentam baixa performance (LI, Nanqi, LIU, *et al.*, 2023, XU, GUO, *et al.*, 2022).

A formação de ligas também se mostra promissora, como demonstrado pelo trabalho de Farrel e Linic (2016), segundo os quais, a adição de estanho ao catalisador diminuiu a deposição de carbono no processo de oxidação eletroquímica de combustíveis de hidrocarbonetos oxigenados. Alguns trabalhos, como reportado em Badwall *et al.* (2015), também relatam a formação de ligas com Co, Cu, Fe, e verificaram o aumento da resistência à coqueificação, mas estes ainda estão em escala de laboratório e com pouco tempo de operação.

Outra opção muito estudada é a da adição de uma extra camada catalisadora protetora ao anodo de níquel. Este catalisador teria uma alta seletividade para reformar o combustível de hidrocarboneto e o transformaria em gás de síntese (ou *syngas*), o qual é menos propenso de causar o coqueificação que o combustível original (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015, ZHANG, LEI, *et al.*, 2022). Para esta função, diferentes materiais são estudados, entre os quais, óxidos a base de metais de transição, como Mo, Pd, Rh, Pt, Ir, e, inclusive o Ni, ou, cerâmicas do tipo Perovskita. Referindo-se as cerâmicas, é importante destacar os catalisadores cromados de lantânio dopado ($\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{Cr}_y\text{M}_{1-y}$, sendo M metais de transição), que apresentam uma boa ação catalítica e estabilidade redox (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015, CHANG, CHEN, *et al.*, 2019, ZHANG, LEI, *et al.*, 2022). Os óxidos com metais também apresentam boas ações catalíticas, todavia muitos são metais nobres ou seu preço e disponibilidade são empecilhos para seu uso. Assim, algumas opções com Ni são promissoras, pois apresentam boa atividade e baixo preço, e, ao diminuir o tamanho das partículas de Ni e associar estas a outros metais, como o Mo e Sn, é possível minimizar e retardar o coqueificação e sinterização (BKOUR, CHE, *et al.*, 2020).

Camadas a base de céria também demonstram boa atividade como catalisadores, como por exemplo uma camada de Cu-CeO₂ (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015, XU,

GUO, *et al.*, 2022, ZHANG, LEI, *et al.*, 2022). Os trabalhos de Da Silva *et. al.* (2017) e Da Silva *et. al.* (2021) avaliaram a utilização de camadas catalisadoras de níquel/céria dopada com metais de transição e apontaram que as camadas dopadas com nióbio (Nb) obtiveram as menores deposições de carbono durante o tempo de teste. Além disso, os autores também apontaram que as camadas catalisadoras de Ni/Ce dopada, em duas configurações de anodo diferentes, são efetivas para reforma interna de etanol (DA SILVA, BION, *et al.*, 2017, DA SILVA, STEIL, *et al.*, 2021).

3.2.3. Catodo

Assim como o anodo, o catodo também é um eletrodo poroso formado por um condutor elétrico e um iônico. Nessa região ocorre a reação de redução de oxigênio e, por isso, o foco da escolha dos materiais é voltada para materiais com melhor ação catalítica nessa redução, sem atrapalhar o transporte iônico e a estabilidade em sistemas ricos em oxigênio.

Atualmente, os materiais mais utilizados são os óxidos do tipo perovskita de LaMnO_3 dopado com estrôncio (LSM ou $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{MnO}_3$), principalmente pela seu efeito catalítico e alta condutividade na faixa de 800-1000°C, também podendo ser utilizados outros materiais para a dopagem, como Co e Ce. Para temperaturas medianas (500-700 °C), os materiais com Cobalto, conhecidos como MIEC (híbridos condutores eletrônicos/iônicos), são preferíveis pois apresentam uma maior região eletroquimicamente ativa (TPB) e maior condutividade iônica, como o BSCF ($\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$), LSC113 ($\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_{3-\delta}$) e o LSCF ($\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$) (ABDALLA, HOSSAIN, *et al.*, 2018, XU, GUO, *et al.*, 2022, YANG, JUNG, *et al.*, 2019).

3.2.4. Estrutura e interconexão

Além das classificações relacionadas à constituição material das pilhas a combustível, também há maneiras de se classificar a PaCOS dependendo de seu design.

Primeiramente, pode-se avaliar uma pilha a combustível pelo seu formato, como sendo tubular ou planar. As pilhas a combustível planares atingem densidades de potência maiores do que as tubulares, ajudam na minimização da temperatura de operação e são

de produção mais fácil que as tubulares (MOHD AFFANDI, OSMAN, 2022, PANTHI, HEDAYAT, *et al.*, 2019, SINGH, ZAPPA, *et al.*, 2021, TIMURKUTLUK, TIMURKUTLUK, *et al.*, 2016, VELANDIA VARGAS, SEABRA, 2021). Conseqüentemente, as pilhas a combustível planares recebem mais atenção atualmente e dominaram o mercado até pelo menos 2019 (ANDERSSON, FROITZHEIM, 2019, MOHD AFFANDI, OSMAN, 2022).

Por sua vez, as pilhas a combustível tubulares permitem um rápido *start-up*, ou desligamento do sistema, e alta resistência à ciclagem térmica (PANTHI, HEDAYAT, *et al.*, 2019, SINGH, ZAPPA, *et al.*, 2021). Além desses dois tipos, pode-se citar também as formas micro-tubulares e planar-tubular, as quais são designs mais novos e foram desenvolvidos para aprimorar a resistência a choques térmicos e densidade volumétrica energética das pilhas a combustível (WANG, Yuqing, SHI, *et al.*, 2024). A figura 7 apresenta a estrutura dos dois designs principais de pilhas a combustível.

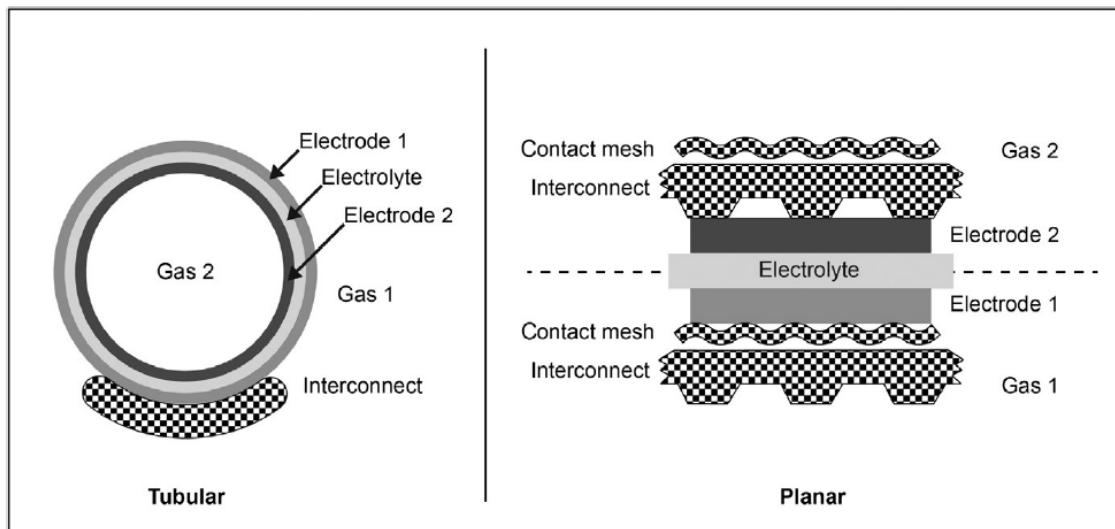


Figura 7 - Esquemática dos dois designs de uma pilha a combustível.

Fonte: Lenser *et al.* (2019).

A outra maneira de avaliação é relacionada ao elemento da pilha a combustível que é utilizado como suporte para o resto do sistema, sendo a “base” na qual os elementos são depositados. Normalmente são utilizadas bases de eletrólito, sendo YSZ o material mais utilizado. Todavia, isso implica em camadas mais grossas o que ocasiona em temperaturas de operação elevadas, superiores a 800°C e, conseqüentemente, necessitando do suporte de ligas termicamente resistentes e mais caras. Por sua vez, a alternativa é utilizar pilhas

a combustível onde o anodo é o suporte, como anodos de Ni/YSZ, o que diminui a espessura do eletrólito, a temperatura de operação e o preço dos materiais utilizados. Ainda há a opção de se utilizar metais porosos como base, que são mais baratos e também permitem a operação em temperaturas mais baixas, mas ainda sofrem com corrosão (ANDERSSON, FROITZHEIM, 2019, SINGH, ZAPPA, *et al.*, 2021). Essas são as principais 3 configurações encontradas na literatura, todavia o trabalho de Lenser *et. al.* (2020) cita que ainda há a possibilidade de se utilizar o Catodo como suporte ou até mesmo um inerte (LENSER, UDOMSILP, *et al.*, 2019). A figura 8 esquematiza a estrutura desses três tipos de pilhas a combustível e suas principais temperaturas de operação.

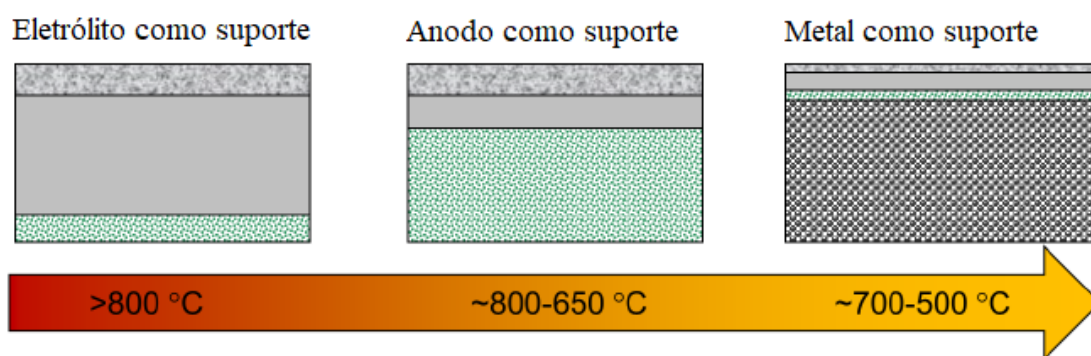


Figura 8 - Esquemática de diferentes suportes de pilhas a combustível.

Fonte: Adaptado de Andersson e Froitzheim (2019).

Outro componente importante de uma pilha a combustível é o sistema que conecta os eletrodos, para que haja o transporte de elétrons. Este é chamado de interconexão por Abdalla *et. al.* (2022) e, assim como outros elementos, deve ser resistente às condições extremas as quais o sistema é submetido, assim como ser um bom condutor elétrico e isolante iônico. Para os primeiros sistemas que operavam em temperaturas próximas aos 1000°C , eram utilizadas cerâmicas como terra alcalina dopada com LaCrO_3 ou outras perovskitas que contém Cr. Porém, com a utilização das pilhas a combustível com suporte pelo anodo e a possibilidade de se operar em temperaturas menores, foi possível se utilizar versões mais baratas e condutoras de ligas metálicas (ABDALLA, HOSSAIN, *et al.*, 2018).

Por fim, a figura 9 esquematiza os principais materiais dos componentes da PaCOS discutidos nesse capítulo.

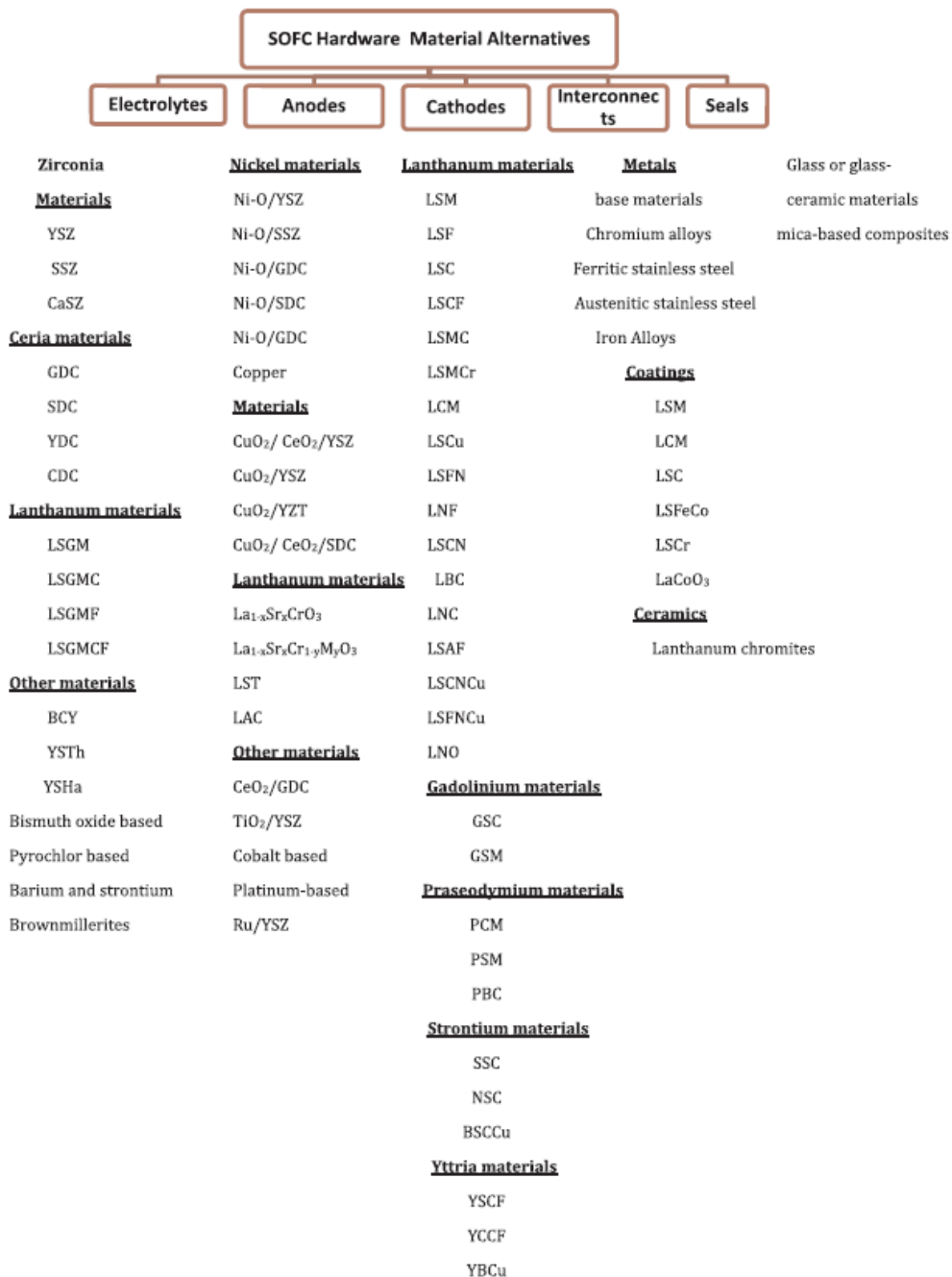


Figura 9 - Esquematização de principais materiais dos componentes de PaCOS.

Fonte: Abdalla *et al.* (2018).

3.3. Descarte e reciclagem

O principal problema que a tecnologia de pilhas a combustível, e mais especificamente a PaCOS, tenta sanar é a poluição proveniente da utilização de ICE com uso, sobretudo, de combustíveis fósseis, assim como a busca por processos mais eficientes. Portanto, ao se discutir as novas tecnologias no processo de transição

energética para sistemas de baixo carbono e, mais ambiental e socialmente sustentáveis, é de suma importância a discussão da extração de matéria prima, seu descarte, reutilização e reciclagem.

O trabalho de Sarnier *et al.* (2022) apresenta uma extensiva revisão de estratégias para reciclagem da PaCOS. Os autores apontam um grande potencial da utilização da tecnologia, tanto como pilhas a combustível, quanto como eletrolisador para a produção de hidrogênio (SOEC). Eles pontuam que frente uma expectativa de crescimento da produção em 60 GW de H₂ entre 2020 e 2030, haveria a possibilidade de necessitar de até 11 milhões de toneladas de pilhas a combustível desse tipo.

As diferentes estratégias apresentadas variam muito dependendo do material, estrutura e diferentes designs da pilha a combustível, e, apontam a necessidade de uma separação mecânica da pilha a combustível e, materiais para melhorar o rendimento dos processos de reciclagem. Todavia, mesmo diante das dificuldades, a reciclagem é mais do que tudo uma necessidade, dados o custo e a disponibilidade dos materiais utilizados. Os autores revelam que, em determinadas estratégias, foi possível obter até 90% de economia nos metais e cerâmicas utilizados, apontando o potencial dos processos (SARNER, SCHREIBER, *et al.*, 2022).

Outro trabalho interessante, foi o de Yenesew *et al.* (2023), que avaliou a separação de 2 PaCOS comerciais, e conseguiu recuperar até 92% do óxido de Níquel e YSZ utilizados. E, apesar da YSZ apresentar qualidade inferior a inicial, após tratamentos simples foi possível obter condutividades próximas as do produto primário (YENESEW, QUAREZ, *et al.*, 2023). Para maiores detalhamentos dos resultados encontrados pelos autores consulte o Anexo II ao fim do trabalho.

3.4. Aplicações, mercado e custos

As PaCOS ganham relativo destaque dentre as demais pilhas a combustível por possuírem alta eficiência de conversão de combustível, na faixa de 50-60% (ABDALLA, HOSSAIN, *et al.*, 2018, AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022), flexibilidade de combustíveis, não se restringindo apenas ao hidrogênio, mas também funcionando com a alimentação direta de metano, gás natural, biocombustíveis, entre outros (LI, Nanqi, LIU, *et al.*, 2023, SU, HU, 2020) e, dispensar catalisadores caros, como os de platina (MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012). Além disso, as altas temperaturas de operação da

pilha a combustível permitem a associação das pilhas com sistemas CHP, atingindo eficiências de geração de energia superiores a 90% (ABDALLA, HOSSAIN, *et al.*, 2018, AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022, MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012).

Apesar de ainda ser uma tecnologia cara, o mercado para as PaCOS vem crescendo e se diversificando (DAVID HART, JONES, *et al.*, 2022), e, frente as vantagens já discutidas até aqui, a tecnologia de pilha a combustível de óxido sólido vem se tornando uma solução para diferentes aplicações. Como reportado no relatório *Solid Oxide Fuel Cell - Global Market Outlook (2017-2026)* (CIGOLOTTI, GENOVESE, 2021a, DEGNAN, 2019), o mercado de PaCOS apresentou uma quota de US\$ 389,21 milhões em 2017 e, apresentava a projeção de crescimento de US\$1,35 bilhões até 2026 com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 14,9%. Além disso, os mercados de PaCOS dos EUA, da Europa, de países da região Ásia-Pacífico e da região da América do Sul, Oriente Médio e África apresentaram a projeção de um CAGR de 13, 15, 15 e 11%, respectivamente, até 2023 devido ao interesse e investimento em tecnologias de geração de potência eficientes.

Atualmente, a principal aplicação desse tipo de pilha a combustível é na geração estacionária de potência, principalmente para geração distribuída em larga escala, uma vez que dessa maneira as altas temperaturas que operam não são barreiras tão grandes, e o calor útil gerado pode ser aproveitado em sistemas com CHP (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022, MEKHILEF, SAIDUR, *et al.*, 2012). O atual líder do setor de larga escala é o EUA, e, grande parte deste é dominado pela PaCOS, com 300 MW de potência instalada (CIGOLOTTI, GENOVESE, 2021a). Além disso, tal tecnologia também se faz presente para micro geração. Por exemplo, a Europa com apenas o programa *Ene.field*, dentre seus 3 principais programas Callux, PACE e *ene.field*, possui 403 unidades de PaCOS micro-CHP. E o Japão, que domina o mercado de micro geração e CHP, apresenta quase 38% das suas 260000 unidades instaladas de PaCOS, e ainda apresenta políticas de subsídio, cobrindo até 50% do custo do aparelho, para que este fique competitivo com as demais tecnologias (CIGOLOTTI, GENOVESE, 2021a, b).

A tabela 10 apresenta alguns dados obtidos do *Annual Report 2018/2019: Advanced fuel Cells* do *Technology Collaboration Programme*. Neste relatório, os autores conjecturam sobre os esforços necessários para redução de custos de pilhas de sólido óxido e apontam a necessidade da produção em massa para tal. Por exemplo, para bater

as metas de custos até 2040, seria necessário um volume de produção mínimo de 250 MW/ano por fabricante (SIMADER, REUTER, *et al.*, 2019).

Tabela 10 - Custos de sistemas atuais e objetivos para uma comercialização bem sucedida.

	Atual	Objetivo
CAPEX	> 4000 €/kWe	< 1500 €/kWe
Custo de Manutenção	> 2,5 € Ct/kWh	< 2,5 € Ct/kWh
Tempo de vida (operando > 8500 h/ano)	> 10 anos	> 15 anos
Ciclagem térmica	> 100	> 300
Eficiência	> 85%	> 90%

Fonte: Simader *et al.* (2019).

O trabalho de Marocco *et al.* (2022) realiza uma avaliação da viabilidade tecno-econômica do emprego de sistemas de cogeração de energia e calor em empreendimentos medianos, como mercados, na Europa. Os autores concluíram que nas condições atuais, com preço de energia (eletricidade e gás), custo total do sistema de PaCOS (CAPEX e OPEX), eficiência do sistema e tempo de vida da pilha a combustível, este não seria economicamente conveniente, sendo os maiores influenciadores o CAPEX das pilhas a combustível e o *Spark Spread*, parâmetro que avalia a margem de lucro da geração de eletricidade a partir de gás natural. De maneira geral, com um alto *Spark Spread* o sistema seria rentável, em vista que a redução no custo da tecnologia já é esperada com o amadurecimento da mesma (MAROCCO, GANDIGLIO, *et al.*, 2022).

O trabalho de Souza *et al.* (2021), por sua vez, avalia a viabilidade econômica da geração de eletricidade no Brasil a partir do glicerol, subproduto da produção de biodiesel, onde o glicerol seria convertido em hidrogênio gasoso por reforma a vapor, e então alimentado a um sistema de PaCOS para gerar eletricidade. Os autores concluíram que a usina de geração seria autossustentável, obteria um H₂ com custos na faixa de 2,42 - 5,26 US\$/Kg, o que eles consideram barato e competitivo para o mercado, e que mesmo nas melhores condições o preço mais baixo de eletricidade obtido seria por volta de 0,265 US\$/kWh (frente a 0,116 US\$/kWh encontrado no mercado brasileiro), o qual é principalmente influenciado (de 41,8 a 65,1% do custo total) pelo custo de investimento em PaCOS (DE SOUZA, CORONADO, *et al.*, 2021).

Uma característica das PaCOS é que estas podem ser operadas no modo reverso, para a produção de hidrogênio (SIMADER, REUTER, *et al.*, 2019). Dessa maneira, a pilha a combustível é chamada de Eletrolisador de Sólido Óxido (ou no inglês, *Solid Oxide Electrolyser*, SOE) ou mesmo ReSOFC, e é utilizada para a produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água, e apresenta uma eficiência superior as demais tecnologias de eletrólise, o que acarretaria em um menor consumo de energia e conseqüentemente um hidrogênio de menor custo. Todavia, esta ainda não está em nível comercial (CIGIOTTI, GENOVESE, 2021b, LENSER, UDOMSILP, *et al.*, 2019, SHIVA KUMAR, LIM, 2022, SIMADER, REUTER, *et al.*, 2019).

Um exemplo desse tipo de aplicação é apresentado no trabalho de Lindorfer, Rosenfeld e Böhm (2020), no qual é descrita uma planta que utilizaria uma pilha a combustível reversa de sólido óxido (ReSOFC), a qual converteria o excedente elétrico do grid em hidrogênio. Este H₂ é então convertido em metano e dióxido de carbono e, estes são armazenados na forma sólida em cavernas. Este processo atinge eficiências de até 70% pela associação da pilha a combustível com um reator de metano (LINDORFER, ROSENFELD, *et al.*, 2020). A figura 10 esquematiza a operação desse sistema.

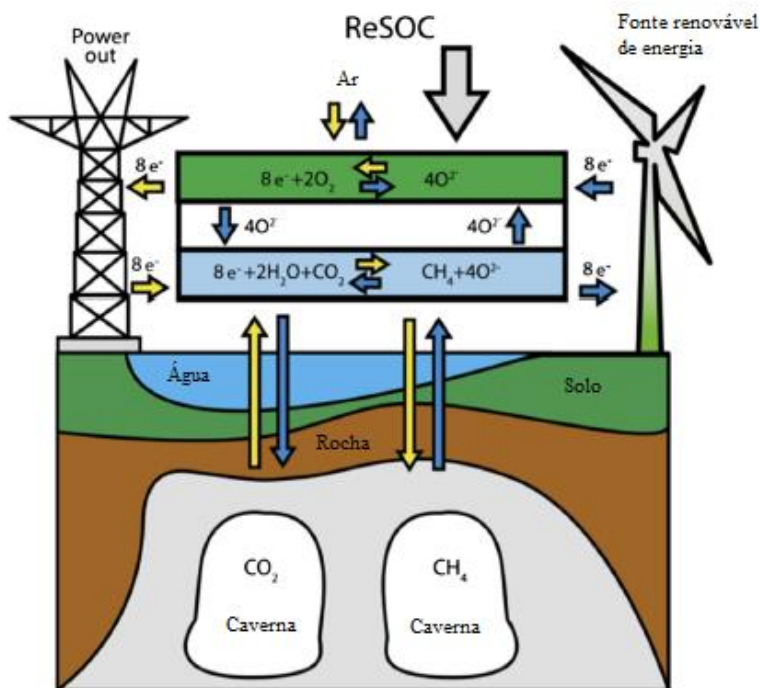


Figura 10 - Esquematização do sistema de estoque de eletricidade baseado em ReSOFC.

Fonte: Lindorfer, Rosenfeld e Böhm (2020).

Ademais, a flexibilidade de combustíveis também oferece uma oportunidade para o setor de transporte contornar em curto/médio prazo, as dificuldades logísticas da cadeia de hidrogênio, uma vez que a pilha a combustível poderia funcionar a base de combustíveis alternativos, como o etanol. A utilização da PaCOS com etanol se mostra promissora, pois além das vantagens associadas à utilização do biocombustível, o etanol produzido pela fermentação de biomassa apresenta grande quantidade de água e normalmente não há a presença de enxofre em quantidades significativas, podendo ser adicionado diretamente às pilhas a combustível com anodos de níquel (XU, GUO, *et al.*, 2022). Outras vantagens na utilização de pilhas a combustível com etanol, quando comparado a outros combustíveis de hidrocarbonetos, são que a decomposição térmica do etanol é capaz de produzir altas concentrações de H₂ e, o álcool, devido à presença do grupo OH e este enfraquecer as ligações C-H, é mais reativo do que as demais alternativas (VENÂNCIO, DE MIRANDA, 2017).

Todavia, até o momento poucos foram os protótipos de veículos com PaCOS a base de etanol. No Brasil, a primeira e única proposta encontrada até a publicação deste trabalho foi apresentada em 2016 pela Nissan, um furgão chamado de e-NV200 com uma pilha de PaCOS de 5 kW e com autonomia de mais de 600 km (FUEL CELL BULLETIN, 2016). Pode-se citar, no entanto, um caso similar a proposta avaliada neste trabalho. Por exemplo, o projeto do Laboratório de Hidrogênio da COPPE/UFRJ em parceria com a prefeitura de Maricá no RJ, onde dos 3 protótipos de ônibus sustentáveis apresentados, um deles é um híbrido elétrico operando com reforma de etanol (COPPE/UFRJ, 2022b, a, LABH2, 2022).

Até então, os principais protótipos de veículos com PaCOS foram como fonte de energia para sistemas auxiliares (*auxiliary power units*, APUs), alimentando luzes e sistemas de ar condicionado em caminhões. Isso está relacionado ao fato de o elevado tempo *start-up* favorecer a aplicação em veículos que estão operando na maior parte do tempo e, como fonte auxiliar de eletricidade (BOLDRIN, BRANDON, 2019, CHEN, 2020). O trabalho de Chen (2020) relata que em alguns testes com um caminhão da Volvo, chegou-se a reduzir em até 73% as emissões de CO₂ quando comparado a caminhões de combustão interna (CHEN, 2020).

Em navio e outros veículos marítimos, o uso de PaCOS são atualmente limitados, e são em sua maioria simulações, devido aos altos custos dos sistemas. Todavia há resultados positivos na utilização das pilhas a combustível como APUs, operando com turbinas a gás, e até mesmo de maneira híbrida com ICE a diesel para a propulsão de embarcações de superfície (CHEN, 2020). De maneira similar, a utilização de PaCOS em aeronaves também é vista com interesse devido à flexibilidade de combustível, e, diferentes trabalhos já abordam sistemas com PaCOS se aproveitando dessa característica como forma de contornar a baixa densidade volumétrica energética do hidrogênio, porém ainda sem atingir estado comercial (AFONSO, SOHST, *et al.*, 2023, CHEN, 2020, SEYAM, DINCER, *et al.*, 2023).

Ao se avaliar os custos de produção de uma PaCOS muitos fatores devem ser levados em consideração, como a finalidade da pilha a combustível, especificações, design, método de fabricação, materiais empregados e o volume de produção anual das pilhas a combustível, o que dificultam a estimativas de preço. Entretanto, com o intuito de melhor entender o mercado das PaCOS e suas prospecções, destacam-se alguns trabalhos.

O *Battelle Memorial Institute* em trabalhos conjuntos ao departamento de pilhas a combustível do DOE, apresentou em 2014 e 2016 dois relatórios com uma avaliação independente dos custos de manufatura das pilhas a combustível em diferentes volumes de produção e design de sistemas. O primeiro relatório apresentava os custos relacionados a produção de duas PaCOS para “unidades de poder auxiliares” (APU) com 1kW e 5kW com as produções anuais de 100, 1000, 10000 e 50000 unidades (BATTELLE, 2014).

O segundo relatório do grupo avaliou a utilização de PaCMTP de baixa temperatura e PaCOS para a geração contínua de potência (como fonte primária de poder) e, como fonte auxiliar de calor em um sistema CHP, em sistemas com 100 kW e 250 kW. Os autores apontam que as pilhas a combustível não são necessariamente as áreas mais críticas em relação a custo, mas que as partes eletrônicas também teriam um maior impacto na obtenção de custos iniciais atrativos, principalmente para as PaCOS (BATTELLE, 2016). Em ambos os trabalhos se observou uma expressiva redução do custo dos sistemas com pilhas a combustível com o aumento da produção.

De maneira similar, o laboratório nacional Lawrence Berkeley da Califórnia, em um trabalho conjunto com o DOE, apresentou em 2015 o relatório *A Total Cost of*

Ownership Model for Solid Oxide Fuel Cells in Combined Heat and Power and Power-Only Applications”. Neste trabalho os autores apresentam uma modelagem de custo de sistema PaCOS CHP e de geração estacionária de potência, com capacidade de geração na faixa de 1 kW até 250 kW ((SCATAGLINI, MAYYAS, *et al.*, 2015). Os autores concluíram que, mesmo frente a algumas incertezas e considerações, é possível a obtenção de unidades mais baratas que as faixas de preço estabelecidas pelo DOE (SCATAGLINI, MAYYAS, *et al.*, 2015).

Os trabalhos de Whiston *et al.* (2019) e Whiston *et al.* (2021) também realizaram avaliações de custos de sistemas SOFC para geração estacionária de potência e CHP, e conjecturam sobre a expansão do mercado de PaCOS. Os autores apontam que os sistemas médios (5-500 kW) e pequenos (0,5-5 kW) são os mais favoráveis ao crescimento do mercado, mas apontam as barreiras na falta de validação por projetos e algumas limitações tecnológicas. Além disso, citam os relatórios do *Battelle Memorial Institute* e comentam que as estimativas apresentadas por eles estariam abaixo do possível na realidade. Os autores apontaram os preços para sistemas PaCOS de 250 kW com os volumes de produção de 210, 4000 e 10000 unidades como sendo \$2400/kW, \$1909/kW e \$841/kW, respectivamente, e os preços de sistemas PaCOS de 1 kW, com volume de produção de 50000, 80000 e 175000 unidades como sendo \$11000/kW, \$7750/kW e \$5750/k (WHISTON, AZEVEDO, *et al.*, 2019, WHISTON, LIMA AZEVEDO, *et al.*, 2021).

O trabalho de Harboe *et al.* (2020) apresenta os custos de manufatura de duas pilhas a combustível de óxido sólido com suporte pelo anodo de 5 kW da *Forschungszentrum Jülich*, uma com design padrão e outra em uma versão mais leve. Os autores estimam que as pilhas a combustível custariam na faixa de 2737-1210 Euro/kW_{el} e 2170-580 Euro/kW_{el} para os designs normais e leves respectivamente, em um volume de produção anual na faixa de 1-25 MW_{el} (HARBOE, SCHREIBER, *et al.*, 2020).

Por fim, as pilhas a combustível de óxido sólido apresentam grande potencial para aplicação em diversos setores industriais e o setor de transporte, mas ainda são limitadas pelo custo elevado e barreiras operacionais. Todavia, estudos apontam um rápido barateamento na manufatura dos sistemas devido a ganhos de escala e aperfeiçoamento tecnológico, mas a utilização da pilha a combustível com etanol ainda carece de maiores estudos. Tal utilização, entretanto, poderia ser crucial para facilitar a transição energética brasileira no setor de transporte, frente a importância do setor para o país.

Capítulo 4

O setor brasileiro de cana e de transporte

4.1. Panorama da cadeia de cana-de-açúcar

O Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo (MENDIBURU, LAUERMANN, *et al.*, 2022) chegando a produzir 28,3 bilhões de litros em 2021, segundo Mendiburu *et al.* (2022), e 29,9 bilhões de litros em 2022, segundo dados da EPE (EPE, 2022a), a partir, principalmente, da cana de açúcar. Por sua vez, superando as condições climáticas adversas, como déficits hídricos e baixas temperaturas, que prejudicaram a produtividade da safra de 2021/22, a safra de 2022/23 apresentou ganhos de produtividade.

De acordo com o 4º relatório de Acompanhamento de Safra Brasileira de Cana de Açúcar, referente a safra 2022/2023, a área de produção estimada de cana foi de 8288,9 mil hectares. A produção de etanol estimada foi de 31,3 bilhões de litros, 4,9% maior que a anterior, sendo 13,13 bilhões de etanol anidro e 18,21 do hidratado. A produção de etanol a partir do milho também vem recebendo investimentos, principalmente na região centro oeste, crescendo a cada safra, atingindo 3,97 bilhões de litros, sendo 2,49 bilhões do hidratado e 1,48 bilhão do anidro (CONAB, 2023).

Ademais, a produção de açúcar também apresentou um aumento, devido a condições mercadológicas favoráveis, sendo estimada a produção de 37 milhões de toneladas (CONAB, 2023). Na figura 11 pode-se observar a evolução histórica da produção do álcool e na figura pode-se observar as principais áreas produtoras de cana de açúcar.

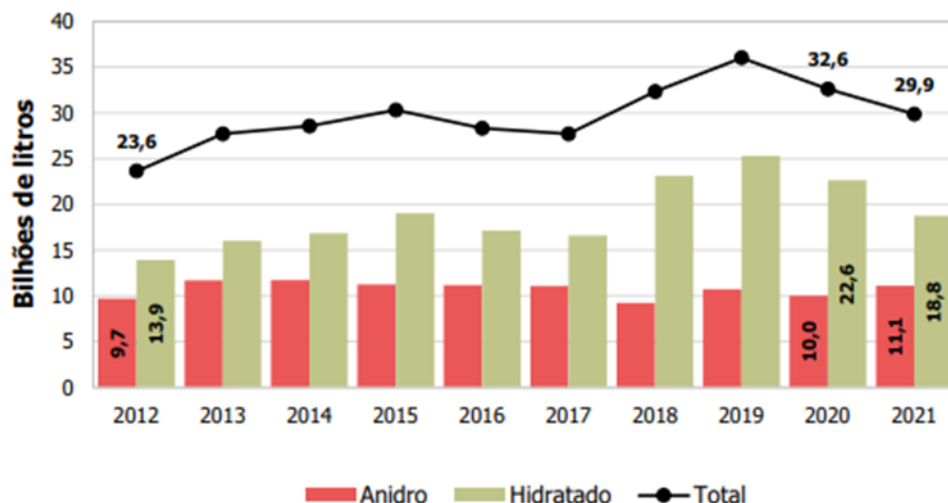


Figura 11- Evolução da produção brasileira de etanol.

Fonte: (EPE, 2022a)

Atualmente a expansão das plantações de canas são projetadas para ocorrerem na região Sudeste, onde SP e MG já correspondem a 61,9% da produção nacional (CONAB, 2022), e Centro-oeste. Todavia, essa expansão no centro-oeste brasileiro ocorre principalmente em locais de bioma de Cerrado, o qual é caracterizado por solos com capacidade de retenção de água mais baixa que os solos normalmente utilizados para plantio de cana, o que é alarmante, uma vez que o plantio desse tipo de planta é associado com um aumento da pegada hídrica verde, relacionada com a evaporação da água (DUDEN, VERWEIJ, *et al.*, 2021, OLIVEIRA, Kenny Delmonte, TOMASELLA, *et al.*, 2022, SANTIAGO, CHICO, *et al.*, 2017).

Em relação a infraestrutura de produção de etanol, ao fim de 2021 foram contabilizadas 361 unidades sucroenergéticas, com a capacidade de moagem efetiva de aproximadamente 735 milhões de toneladas por safra, todavia, durante o ano apenas 581 milhões de toneladas foram processadas, resultando em uma taxa de ocupação de 79%. Destas 361 unidades, 359 estavam aptas a comercializar etanol anidro e hidratado, cujas capacidades de produção eram de 132 mil e 246 mil m³/dia, respectivamente. Ademais, haviam 22 solicitações de construção de novas usinas que poderiam adicionar até 4.330 e 6.269 m³/dia de capacidade de produção de etanol anidro e hidratado respectivamente (EPE, 2022a). Na figura 12 observa-se as principais áreas de cultivo de cana atuais.

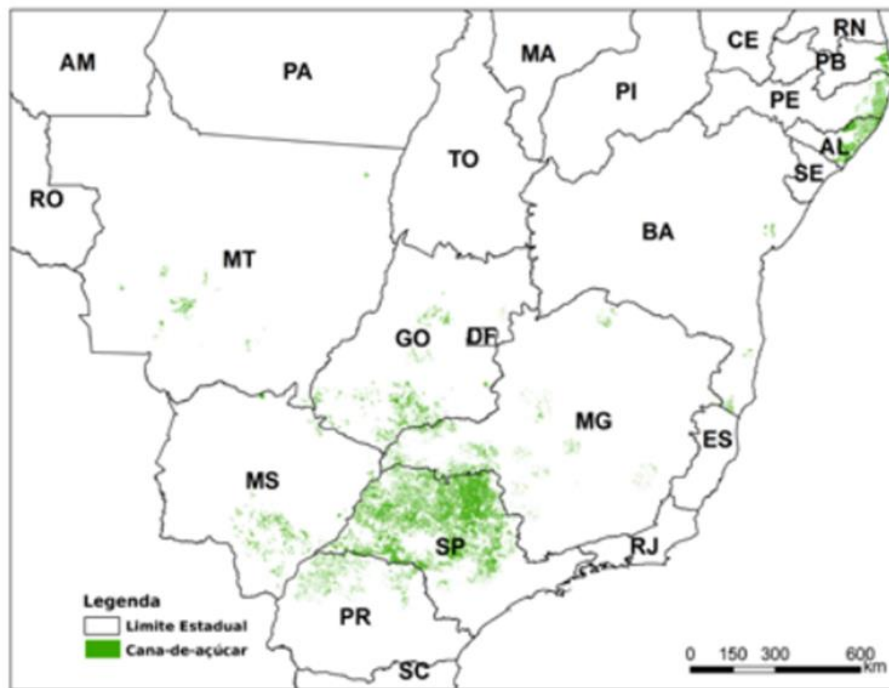


Figura 12 - Áreas de cultivo de cana-de-açúcar mapeadas por satélite.

Fonte: (CONAB, 2022).

Além de um grande produtor, o Brasil também é um grande consumidor de Etanol. Atualmente, mais de 80% da frota veicular brasileira é flex, ou seja, permite a utilização tanto de álcool quanto gasolina nos veículos. E, desde 2015, a alíquota obrigatória de mistura de álcool na gasolina passou a ser de 27%, aumentando o consumo do combustível em veículos leves (PALAZZI, MEIRA, *et al.*, 2022).

Ademais, o setor de biocombustíveis brasileiro ainda vem recebendo investimentos importantes. Em 2017 o governo brasileiro lançou o RenovaBio, um programa que prevê até R\$ 1 trilhão de investimentos no setor sucroenergético. A política atua através do estabelecimento de metas compulsórias de redução de emissões de GEE para a comercialização de combustíveis, as quais, quando batidas, gerariam “notas de eficiência energético-ambiental” que são utilizadas para calcular os CBIOs gerados. Estes são créditos de descarbonização que equivalem a 1 tonelada de CO₂ e podem ser comercializados. Com isso, o governo espera promover a expansão do setor de biocombustíveis e incentivar a redução de GEE no país (BARBOSA, SZKLO, *et al.*, 2022, BRASIL, 2020b).

4.2. Panorama do setor de transporte

O setor de transporte é essencial para o funcionamento de um país, sendo este a base do consumo e comércio interno e externo. O Brasil, em específico, é extremamente dependente do transporte rodoviário, sendo este responsável por 75% de toda movimentação de cargas no território brasileiro (BRASIL, 2024c), e pelo maior incremento de consumo energético entre os anos 2000 e 2020, de 219% (EPE, IEA, 2021). Segundo estimativas da Confederação Nacional de Transporte (CNT) de 2022, atualmente o país possui 1.720.909 km de malha rodoviária, sendo 121.240,3 km de rodovias federais e os 1.599.668,7 km restantes divididos entre estaduais transitórias, estaduais e municipais (CNT, 2023).

Em relação a frota veicular rodoviária, de acordo com um levantamento realizado pelo SENATRAN, em dezembro de 2022 haviam 115.116.532 veículos rodoviários emplacados, sendo 60.459.290 automóveis (52,5%), 3.022.315 caminhões (2,63%) e 688.880 ônibus (0,6%). Já em março de 2023, os dados mais recentes, haviam 115.996.093 veículos rodoviários emplacados, sendo 60.725.223 automóveis (52,35%), 3.040.778 caminhões (2,62%) e 694.748 ônibus (0,6%) (BRASIL, 2023d). Por sua vez, de acordo com as estimativas da ANFAVEA, em 2022 seriam 46.149.320 veículos, sendo 37.941.814 automóveis, 2.118.146 caminhões e 323.902 ônibus (ANFAVEA, 2023).

É importante apontar que, assim como descrito no relatório “Modelagem Setorial de Opções de Baixo Carbono para o Setor de Transporte”, publicado pelo Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) em 2017, há uma discrepância nos dados estimados pela Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) e de outras fontes, como os disponibilizados pela Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN), antiga DENATRAN, uma vez que na segunda são possivelmente contabilizados veículos não mais circulantes, mas que ainda estão registrados (RATHMANN, 2017).

O combustível mais consumido no Brasil é o óleo diesel, utilizado em ônibus e caminhões e outros veículos pesados, sendo este responsável por 46% do consumo energético do setor em 2021 (em toneladas equivalentes de petróleo, tep), com o biodiesel totalizando aproximadamente 5% do consumo do setor (EPE, 2022b). Os combustíveis como a gasolina, etanol anidro e hidratado também desempenham papéis importantes no

setor, e são responsáveis por 27,5%, 7,3% e 11,1%, respectivamente, do consumo energético do setor uma vez que são utilizados em veículos leves, como carros e motocicletas (EPE, 2022b). A tabela 11 apresenta os valores consumidos para os combustíveis do setor.

Tabela 11 - Consumo de combustíveis pelo setor de transporte rodoviário (em 10³ tep).

Fontes	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Gás	1.709	1.647	1.594	1.553	1.593	1.734	1.946	2.010	1.659	1.908
Natural										
Óleo Diesel	34.837	37.156	37.433	35.427	34.262	34.031	33.568	34.298	33.946	37.122
Biodiesel	1.696	1.795	2.080	2.434	2.409	2.679	3.369	3.694	4.007	4.279
Gasolina	24.454	24.393	25.682	23.257	24.181	24.816	21.558	21.453	20.136	22.100
Automotiva										
Álcool	4.144	5.172	5.882	5.842	5.928	6.446	5.454	5.636	5.222	5.894
Etílico										
Anidro										
Álcool	5.763	6.717	7.126	9.582	7.953	7.402	10.263	11.856	10.116	8.946
Etílico										
Hidratado										
Total	72.601	76.880	79.798	78.095	76.325	77.109	76.158	78.946	75.086	80.248

Fonte: Adaptado de EPE (2023b).

Além disso, como citado anteriormente, o setor de transporte é de central importância no enfrentamento das mudanças climáticas. De acordo com o mais recente relatório oficial do governo brasileira, a 6^o Edição do relatório do MCTI publicado em 2021, Estimativas Anuais de Emissões de Gases do Efeito Estufa, o total de emissões brasileiras em 2020 seria de 1,785 GtCO₂eq (GWP AR5). O maior emissor seria o setor de Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF) o qual representa 36,09% das emissões, com 655,456 MtCO₂eq, seguido pela Agropecuária com 31,08%, com 554,989 MtCO₂eq e então pelo setor de energia responsável por 21,97% das emissões totais, 392,222 MtCO₂eq (BRASIL, 2022).

Ao explorar as emissões do setor de energia, tem-se a divisão das emissões nos grupos: Atividades de queima de combustível, que incluem a Indústria de Energia, setor de Transporte e Outros setores e Não Especificados; e as Emissões Fugitivas, a partir de produção de combustíveis. As emissões se concentram no primeiro grupo, o qual é

responsável por 94,81% das emissões do setor energético total, tendo destaque para o setor de Transporte, o qual é responsável por 50,25% das emissões desse grupo e 47,64% das emissões totais do setor de energia, com 186,858 MtCO₂eq (BRASIL, 2022). As figuras 13 e 14 apresentam graficamente esses dados.

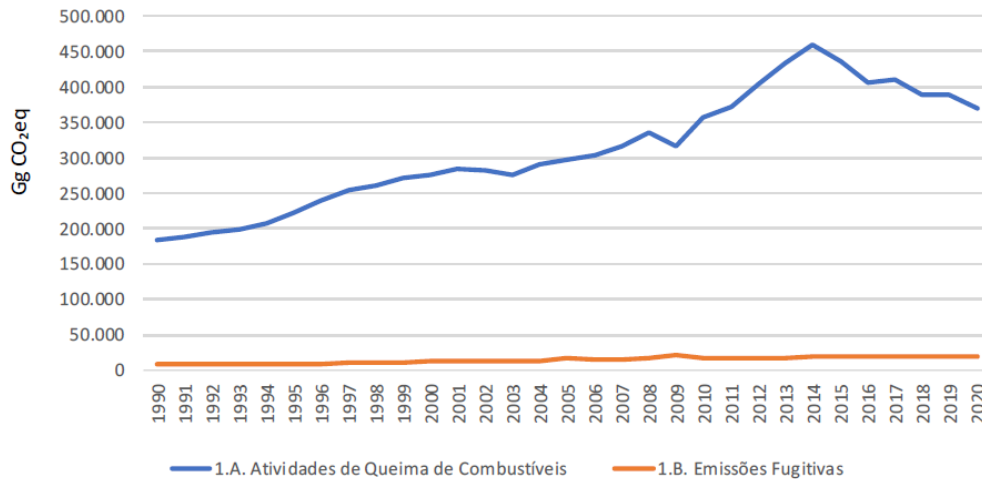


Figura 13 - Emissões totais para o setor de Energia, desagregada em subsetores.

Fonte: Brasil (2022).

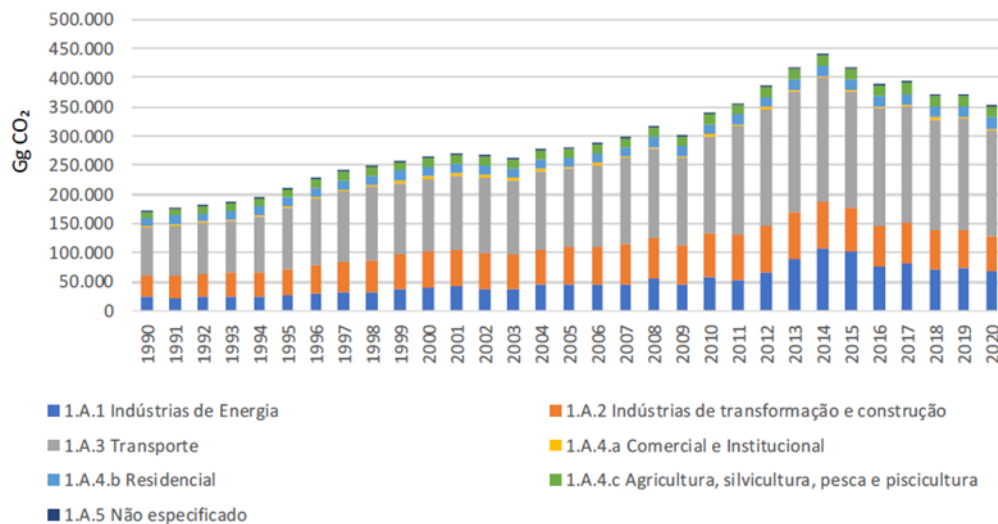


Figura 14 - Emissões de CO₂ desagregadas do subsetor de Queima de Combustíveis.

Fonte: Brasil (2022).

A figura 15 representa os tipos de combustíveis consumidos no transporte e é perceptível que o óleo diesel, utilizado, sobretudo, em ônibus e transportes de cargas é o principal responsável pelas emissões, seguidos pela gasolina e etanol, ambos utilizados em transportes individuais. É interessante apontar que a redução das emissões em transportes de carga diminuiu também pelo aumento de 10 para 11% de biodiesel misturado ao diesel comum, e este tem suas emissões consideradas neutras uma vez que as emissões são abatidas durante o cultivo das culturas utilizadas (POTENZA, QUINTANA, *et al.*, 2021).

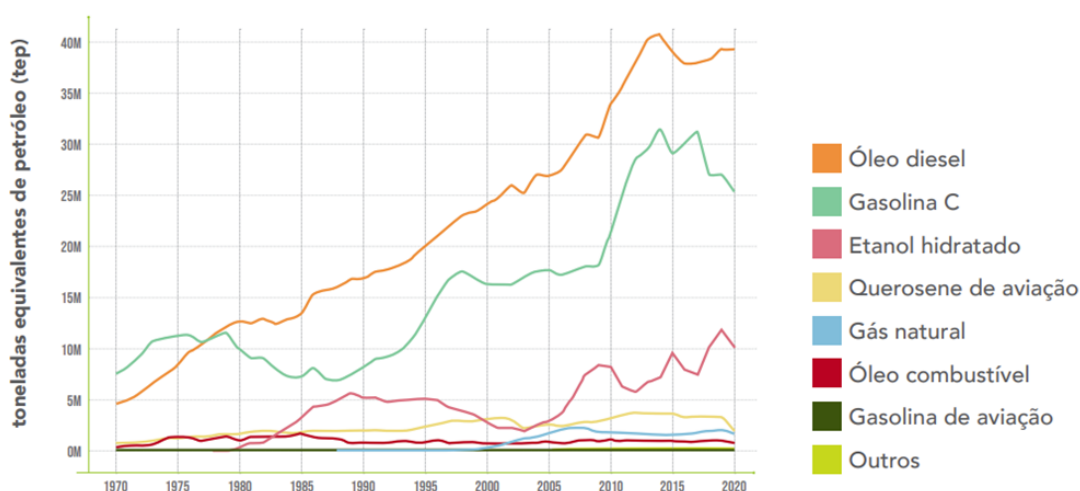


Figura 15 - Consumo de Combustível nos transportes.

Fonte: Potenza, et al., (2021).

Além das emissões do setor, também é importante apontar a influência do mercado internacional nos preços e mercado de combustíveis brasileiros. Há uma política de paridade de preços internacionais da Petrobras que associam o preço dos combustíveis à variação dos preços internacionais de derivados, e além disso, a própria produção de etanol é dependente da demanda de açúcar e preço desta commodity no mercado internacional (EPE, 2022a, PALAZZI, MEIRA, *et al.*, 2022).

A Análise de Conjuntura da EPE de 2021 (EPE, 2022a), por exemplo, apontou um crescimento na demanda de gasolina em detrimento do etanol hidratado de 2020 para 2021 e, aponta que essa variação é explicada pela maior atratividade do açúcar no mercado internacional e variação do preço *spot* do *Brent* que, dentre outros fatores, resultando em um aumento da relação Preço do Etanol (PE)/Preço da Gasolina (PG), favorecendo a utilização de álcool. A tabela 12 abaixo exemplifica a relação da gasolina e do etanol e como seus preços variaram nos últimos anos.

Tabela 12 - Preços médio anuais de etanol hidratado, gasolina C e relativo (PE/PG).

Ano	Hidratado (R\$dez21/l)	Var. (%) a.a.)	Gasolina C (R\$dez21/l)	Var. (%) a.a.)	PE/PG	Var. (%) a.a.)
2012	3,35	-6,3	4,78	-5,1	0,7	-1,1
2013	3,2	-4,3	4,7	-1,7	0,68	-2,6
2014	3,17	-1,1	4,61	-1,9	0,69	0,8
2015	3,17	0,1	4,76	3,2	0,67	-2,8
2016	3,42	8	4,82	1,3	0,71	6,3
2017	3,36	-2	4,75	-1,4	0,71	-0,4
2018	3,52	5	5,27	6,08	0,66	-6,7
2019	3,41	-3,3	5,14	-2,6	0,66	0,6
2020	3,36	-1,4	4,88	-5	0,69	4,2
2021	4,32	28,6	6,08	24,6	0,71	1,9

Fonte: Adaptado de EPE (2022a).

4.3. Novos desafios do setor sucroenergético

Contudo, ainda que o setor sucroenergético seja importante para o país, este vem enfrentando dificuldades nos últimos anos. Podem ser elencadas diversos fatores para tal, como por exemplo, escolhas econômicas, como a Política de Paridade da Petrobrás de 2015 (PALAZZI, MEIRA, *et al.*, 2022), condições climáticas adversas (CONAB, 2022), os efeitos da pandemia de Covid-19 (EPE, 2022a) ou mesmo o endividamento e falta de investimentos históricos do setor (BARBOSA, SZKLO, *et al.*, 2022). Ademais, o setor ainda pode vir a enfrentar novos desafios em médio a longo prazo (BARBOSA, SZKLO, *et al.*, 2022).

Na maioria dos cenários de mitigação consistentes com o Acordo de Paris, o uso em larga escala de biocombustíveis é considerado indispensável (MERCURE, PAIM, *et al.*, 2019, NAESS, HU, *et al.*, 2023). O trabalho de Mercure *et al.* (2019), por exemplo, projeta que a demanda global por esses combustíveis poderia facilmente aumentar em 5-10 EJ até 2050. Em um primeiro momento, tal crescimento de demanda poderia favorecer países produtores de biocombustíveis. O Brasil, por exemplo, como citado pelos autores, possuiria aproximadamente 37,8 Mha de terras disponíveis para o cultivo de biomassa (excluindo áreas protegidas e da floresta Amazônica), e, visto que os requisitos de terra

para a produção de etanol foram estimados aproximadamente como sendo 2,3 ha/1000 GJ, o país conseguiria atingir aproximadamente 37 EJ de biocombustível líquido (MERCURE, PAIM, *et al.*, 2019).

Porém, dependendo da estratégia para atingir as metas nacionais estabelecidas (NDCs), algumas vias podem ser prejudiciais para o setor sucroenergético (BARBOSA, SZKLO, *et al.*, 2022). Os trabalhos de Oliveira *et al.* (2021) e Köberle *et al.* (2020) cientificam que a eletricidade “limpa” brasileira seria um atrativo para a introdução de veículos elétricos (EV) no país e que isso poderia diminuir a demanda por biocombustíveis, inclusive em outros países, principalmente em veículos leves de passageiros, uma vez que os veículos pesados e de carga necessitam de outras tecnologias (DE OLIVEIRA, Camilla C.N., ANGELKORTE, *et al.*, 2021, KÖBERLE, ROCHEDO, *et al.*, 2020).

De acordo com Oliveira *et al.* (2021), o uso de etanol seria crescente até 2035, mas a partir de 2040, com o aumento da utilização de EVs, a produção do biocombustível cairia e/ou teria que ser escoada para outros fins, como a indústria petroquímica (DE OLIVEIRA, Camilla C.N., ANGELKORTE, *et al.*, 2021), ou escoar parte do suprimento para a produção de combustível de aeronaves (GELEYNSE, BRANDT, *et al.*, 2018). Um resultado similar é projetado nas simulações apresentadas no *World Energy Outlook 2022* publicado pela IEA, onde, a potencial demanda pelos biocombustíveis é menor devido a competição com veículos elétricos e há um deslocamento da demanda de biocombustíveis para a aviação (IEA, 2022).

Em acontecimentos recentes, a União Europeia estudou banir a venda de veículos a combustão interna, movidos a gasolina ou diesel, após 2035, todavia, devido à pressão alemã, foi acordado que mesmo após essa data serão permitidos veículos ICE contando que utilizem combustíveis sintéticos, neutros em CO₂, e possivelmente biocombustíveis (AEPET, 2023, QUINTANILHA, 2023). Mesmo que ainda haja uma sobrevida para o setor e previsão de crescimento por pelo menos uma década, muitas montadoras, como apresentado no capítulo sobre aplicações das pilhas a combustível nesse trabalho, estão apostando em veículos elétricos ou a hidrogênio, o que pode ser prejudicial para o futuro do mesmo.

4.4. O papel das pilhas a combustível e do álcool

Frente os desafios futuros que o setor sucroenergético possa a vir enfrentar, algumas soluções podem se tornar interessantes para auxiliar o setor e o país na sua transição energética, aproveitando seus recursos e vantagens já existentes. Como citado no capítulo 3, na secção de “Aplicações, mercado e custos”, a utilização de pilhas a combustível de óxido sólido com etanol é uma possibilidade e poderia permitir a descarbonização do difícil setor de transporte.

Em primeiro momento pode-se utilizar a tabela 13 para realizar uma comparação geral entre as tecnologias tradicionais (ICE), pilhas (porém nesse caso pilhas a hidrogênio) e dos veículos BEV. Apesar de apresentar um alto custo de capital para implementação, a utilização de pilhas a combustível possibilitaria a operação com baixas emissões, ou mesmo zerar as emissões líquidas, uma grande autonomia para os veículos, altas eficiências e rápida recarga de combustível em postos (STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019).

Tabela 13 - Comparação entre motores de combustão interna, elétricos com pilhas a combustível e elétricos a bateria.

		ICE	FCEV	BEV
	Custo capital atual	+	+++	++
	Custo do combustível	++	+++	+
Menor é melhor	Custo de manutenção	+++	+	+
	Necessidade de infraestrutura	+	+++	++
	Emissões	+++	+	+
	Eficiência	+	++	+++
	Autonomia	+++	+++	+
Maior é melhor	Velocidade de abastecimento	+++	+++	+
	Tempo de vida	+++	+++	++
	Aceleração	++	+++	+++

Fonte: Adaptado de Staffell et al. (2019).

Ao se utilizar o etanol invés do hidrogênio como combustível das pilhas a combustível, elimina-se as desvantagens das pilhas a combustível a hidrogênio de alto custo do combustível e da necessidade de investimentos na produção, distribuição e armazenamento de H₂. Além disso, em alguns países, como é o caso dos EUA, o uso do biocombustível como combustível principal do setor de transporte permitiria superar a chamada *Blendwall*, termo que se refere ao saturamento do mercado do etanol pelo limite

de mistura do álcool na gasolina, imposto legalmente, e ajudar na recuperação do setor (GELEYNSE, BRANDT, *et al.*, 2018).

Ademais, ao se tratar especificamente do cenário nacional, outras questões também se tornam relevantes. As principais a se tomar nota são a dependência do setor de transporte nacional das importações de diesel e gasolina, e, também, o quanto essa importação influencia o próprio preço do etanol. Como apontado seção 4.2, o setor e, conseqüentemente o país, é extremamente dependente de diesel e da gasolina (EPE, 2022b), os quais são largamente importados (EPE, 2022b, PALAZZI, MEIRA, *et al.*, 2022). Dessa maneira, o preço internacional desses combustíveis não só afeta o preço do etanol, por uma lógica de custo de oportunidade, mas também no preço de alimentos e outros produtos, dependentes da malha rodoviária para sua distribuição (PALAZZI, MEIRA, *et al.*, 2022). Sendo assim, utilizar o etanol como combustível principal para a frota, garantiria maior estabilidade ao mercado de combustíveis e menor dependência do país do mercado de petróleo internacional.

Ao comparar as pilhas a combustível à principal tecnologia alternativa encontrada no mercado com foco na redução de emissões, os veículos elétricos a bateria (BEV), destacam-se alguns pontos de vantagens para as pilhas a combustível. Em primeiro momento, o elevado custo dos sistemas é um problema em comum para as duas tecnologias, todavia os preços de FCEVs ainda são maiores. Contudo, com um aumento de produção desses veículos há a expectativa da diminuição de custos (STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019), ainda mais no caso de sistemas com PaCOS que não possuem a utilização de catalisadores caros, como os de platina empregados em PaCMTP (AMINUDIN, KAMARUDIN, *et al.*, 2022).

Ademais, pode-se pontuar a autonomia dos veículos, na medida em que, em média, os BEVs apresentam uma autonomia média de 400 km (ZHOU, CLEAVER, *et al.*, 2023), frente a autonomia de FCEVs, que já conseguem atingir autonomies de até 800 km (STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019). O protótipo da Nissan com PaCOS, por exemplo, já apresentava uma autonomia superior a 600 km (FUEL CELL BULLETIN, 2016). Associado a isso, é importante apontar a velocidade de recarga/abastecimento, onde para os FCEVs esse tempo seria equivalente ao de ICEs, de cerca de 3 minutos (STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019) e, para os BEVs, dependeria muito do estado atual da bateria e da sua potência, podendo necessitar de até 125 minutos para uma recarga completa (LIAO, TOZLUOĞLU, *et al.*, 2023).

Outras questões também devem ser levadas em consideração ao se avaliar a introdução de BEVs no mercado brasileiro. Como estes veículos devem ser recarregados e, esta recarga tende a ocorrer nas primeiras horas da noite, horário que já é considerado de pico de consumo elétrico, há a possibilidade de sobreconsumo de carga na ponta do sistema, podendo causar danos ao sistema de distribuição caso não readequado (SIMON, 2013).

A dissertação de Emanuel Cella Simon, publicada em 2013, realizou a simulação do impacto nos sistemas de distribuição brasileiros proveniente da adoção de veículos elétricos. O autor conclui que, com o aumento da penetração de veículos elétricos, começam a aumentar os problemas relacionados à sobrecarga de transformadores e uma degradação expressiva da vida útil dos equipamentos, chegando em alguns casos numa redução superior a 90% desta, quando são adotadas taxas de penetração de 50%. Foram também observadas baixas quedas e desbalanços de tensão, porém o autor pontua que alguns equipamentos já possuíam reguladores de tensão instalados. Em suma, pontua que as perdas resistivas, associadas a distribuição de correntes, apesar de apresentarem um aumento baixo, uma variação de 0,15% para 30% de taxa de penetração, os custos associados serão repassados para todos os consumidores, até os que não possuem os veículos elétricos (SIMON, 2013).

Retornando à discussão das pilhas a combustível como fonte de potência, além das vantagens que apresenta sobre a utilização de hidrogênio, a tecnologia de PaCOS também apresenta a uma das maiores eficiências energética dentre os diferentes tipos de pilhas a combustível, tendo ainda uma média de eficiência energética (>50%) significativamente maior que motores convencionais a diesel, de aproximadamente 35% (CHEN, 2020). Devido a sua alta eficiência, o consumo de combustível é reduzido, conseqüentemente reduzindo a emissão de CO₂, sendo possível inclusive, atingir emissões *net-zero* ao considerar a cadeia produtiva do etanol (GONÇALVES, SAVIOLI LOPES, *et al.*, 2021).

O trabalho de Gonçalves *et al.* (2021) realizou uma análise da viabilidade da utilização de PaCOS com etanol no Brasil, porém dando foco para veículos leves que utilizam gasolina. O autor destacou, além das vantagens já discutidas nesse texto, que a cadeia produtiva e de distribuição do etanol é menos emissora e, que o setor sucroenergético apresenta um maior impacto social, julgando pelo número de empregos gerados, uma vez que ele empregava em 2016, 794 mil pessoas, frente a

aproximadamente 700 mil da indústria petrolífera (GONÇALVES, SAVIOLI LOPES, *et al.*, 2021).

O trabalho de Vargas & Seabra (2021) fez uma quantificação dos impactos ambientais da utilização de veículos privados com PaCMTP e de PaCOS no cenário brasileiro, e concluíram que os veículos com as PaCOS se tornariam em 2030 opções competitivas para a mitigação de emissões (VELANDIA VARGAS, SEABRA, 2021). Outro trabalho que chegou a resultados similares foi o de Acar, Beskese & Temur (2022) que investigou a sustentabilidade de 5 tipos diferentes de pilhas a combustível, incluindo PaCOS e PaCMTP, considerando aspectos econômicos, ambientais, sociais e técnicos. Como demonstrado na figura 16, a PaCOS apresentou as melhores performances, praticamente perdendo apenas nos custos iniciais quando comparado com as demais pilhas a combustível (ACAR, BESKESE, *et al.*, 2022).

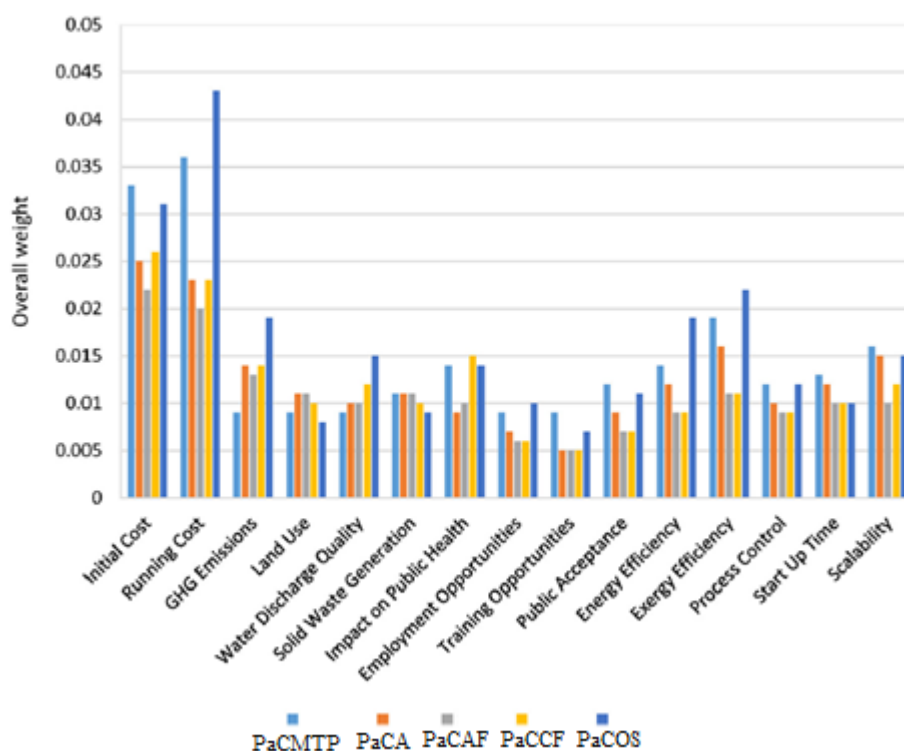


Figura 16 - Resultados de performance das pilhas a combustível.

Fonte: Acar, Beskese & Temur (2022).

E por fim, o investimento em pilhas a combustível e o uso do etanol poderiam ser uma oportunidade também para os setores de aviação e navegação. Como citado nos capítulos sobre aplicações de pilhas a combustível, o uso de pilhas a combustível permitiria atingir os objetivos de descarbonização com mais facilidade, os

biocombustíveis seriam aliados de um transporte “limpo” e a solução para os problemas relacionados à utilização do hidrogênio. Pode-se citar como exemplo alguns trabalhos que apresentam uma avaliação sobre tal uso, como o artigo “*Strategies towards a more sustainable aviation: A systematic review*” de Afonso et. al. publicado em 2023 sobre as mais avançadas soluções encontradas para uma aviação “verde” até então, e o capítulo 12 do livro “*Design and Operation of Solid Oxide Fuel Cells*” de Wenqian Chen, publicado em 2020, o qual resume o atual estado de desenvolvimento das aplicações navais e de aviação (AFONSO, SOHST, *et al.*, 2023, CHEN, 2020).

Capítulo 5

Metodologia

Este trabalho objetiva avaliar a introdução de uma nova tecnologia, de pilhas a combustível de óxido sólido a etanol para uso em veículos pesados, no país, de forma a auxiliar o Brasil a atingir suas metas climáticas nacionais estabelecidas, reduzir a dependência nacional de diesel e ampliar os usos do etanol, cuja combustão em motores em Ciclo Otto de veículos leves pode ser afetada pela eletrificação desses veículos no longo prazo. Portanto, propõe-se a construção de um *roadmap* tecnológico e o desenvolvimento de cenários de longo prazo para avaliar a penetração da eletrificação em caminhões pesados no país.

O *roadmap* tecnológico é um documento que discute a maturidade de dada tecnologia e apresenta os principais atores (públicos e privados) que podem auxiliar no seu desenvolvimento e introdução. Para tal, propõe-se a realização de uma revisão bibliográfica detalhada, a fim de avaliar o estágio de desenvolvimento das pilhas a combustível e seus componentes, para, em seguida, investigar a participação das PaCOS no mercado global de pilhas a combustível e registro de patentes. Ademais, faz-se ainda o levantamento dos principais centros de pesquisas e investidores na Pesquisa e Desenvolvimento de PaCOS no Brasil e utiliza-se a escala de TRL (*Technology Readiness Level*), com o intuito de propor um nível de maturidade para esse tipo de pilha a combustível.

Para a construção dos cenários, escolheu-se uma abordagem clássica na literatura da dinâmica de difusão tecnológica (GEELS, TURNHEIM, 2022), segundo a qual tais mudanças estruturais são vistas como o acúmulo de mudanças em nichos e, normalmente, as curvas de penetração apresentam um formato S (LOPES FERREIRA, RUFFONI, *et al.*, 2018), de curvas logísticas. Para tanto, três cenários foram propostos, conforme o grau de penetração tecnológica e em comparação com uma linha de base. Tais cenários serão melhor abordados na quarta seção deste capítulo. A metodologia deste trabalho está ilustrada no Fluxograma da figura 17.

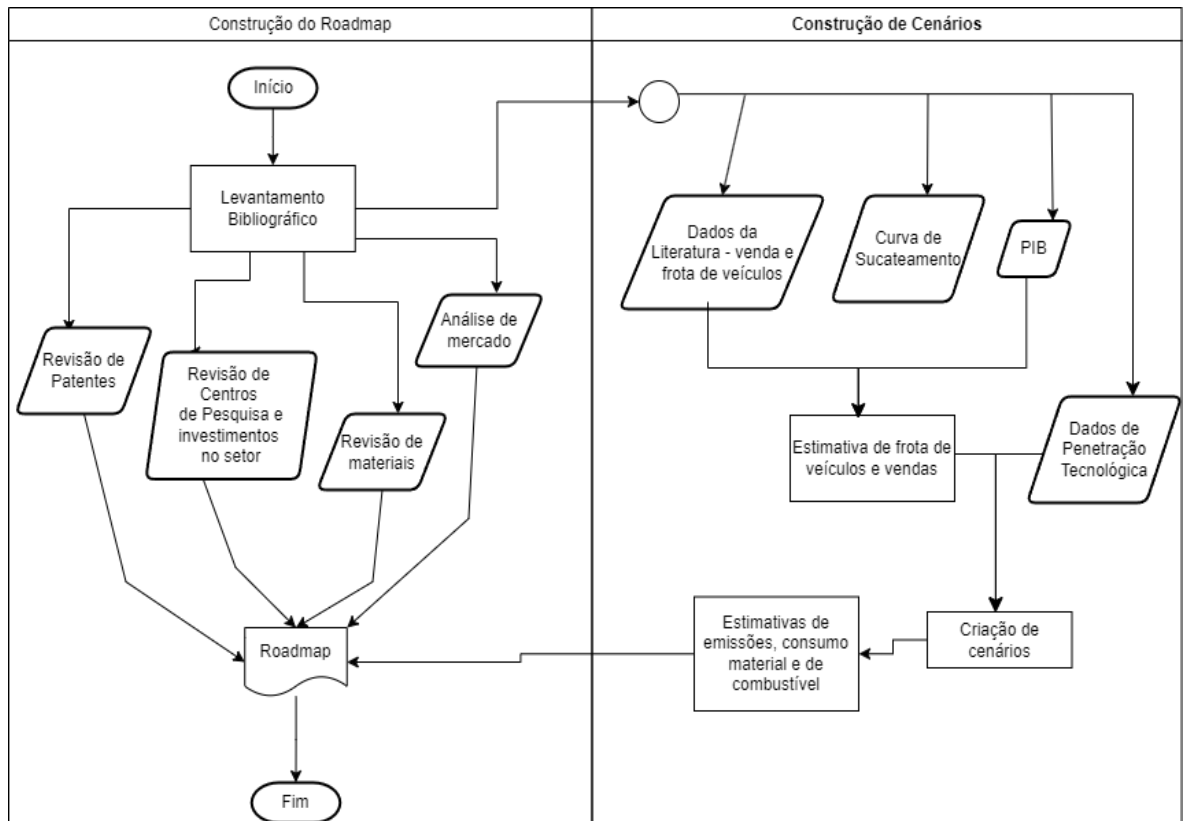


Figura 17 - Fluxograma com as principais etapas desse trabalho.

Fonte: Elaboração própria.

5.1 Roadmap

De acordo com o trabalho de Souza Cardoso (2017), a construção de um *roadmap* se divide em 3 etapas principais: Pré-prospectiva, Prospectiva e Pós-prospectiva. A primeira consiste no acúmulo de informações sobre o tema para a identificação do estado da arte. A segunda etapa consiste na organização das informações obtidas e busca por documentos sobre atuações (como serviços e produtos ofertados) recentes de empresas do ramo, patentes concedidas e solicitadas e artigos científicos sobre a tecnologia. Passada essa etapa, o *roadmap* é então estruturado (CARDOSO, 2017). A figura 18 representa essas etapas.

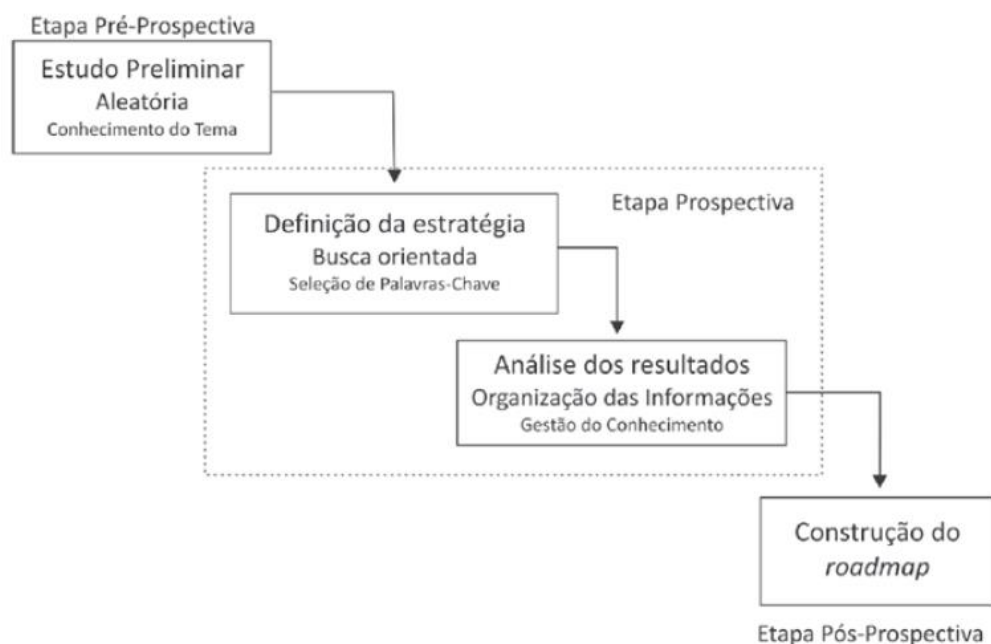


Figura 18 - Metodologia para a elaboração de *Roadmap* tecnológico.

Fonte: Cardoso (2017).

Seguindo a estrutura dessas 3 etapas, a primeira de acúmulo de informações foi realizada e apresentada nos capítulos iniciais, de revisão da literatura deste trabalho, enquanto as duas seguintes serão estruturadas e desenvolvidas a partir da metodologia aqui apresentada.

Durante a etapa de prospecção, optou-se por realizar pesquisas em bancos de dados de patentes, para melhor entender o estado e a maturidade da tecnologia de pilhas a combustível a etanol, buscar na literatura pelos principais atores do setor no país e centros de pesquisas, a fim de identificar oportunidades e apoiar a tomada de decisão para investimento em pesquisa e desenvolvimento, e posterior aplicação da tecnologia, e por fim, aplicar a avaliação de nível tecnológico a fim de consolidar a avaliação da tecnologia até tal ponto. A construção do *Roadmap* então, se dará baseada nos resultados encontrados e será estruturado com o intuito de superar as barreiras encontradas.

5.1.1. Patentes

Foram escolhidas bases internacionais de dados com acesso gratuito recomendadas pelo Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), sendo elas: LATIPAT, portal com informações de países da América Latina e Espanha, resultado da cooperação de

diferentes entidades; ESPACENET, base mantida pelo Escritório Europeu de Patentes (EPO); PATENTSCOPE, portal mantido pela Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI, ou, no inglês, WIPO) que inclui serviços relacionados ao Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes (PCT) (BRASIL, 2020a). Como as bases de dados são extensas, utilizou-se um formato query para realizar as buscas em cada um dos bancos, variando sua complexidade conforme a quantidade de resultados.

Para a pesquisa no LATIPAT, utilizou-se diretamente o nome da pilha a combustível na busca, “célula combustível de óxido sólido”, uma vez que foram encontrados poucos resultados e foi possível analisa-los sem aumentar a complexidade do query. Além disso, também se realizaram buscas com o termo “pilha combustível de óxido sólido”, por ser uma nomenclatura preferível para alguns autores. Em ambos os casos se realizou as buscas com a palavra-chave no “título” e “título ou resumo”.

Para a busca no ESPACENET, utilizou-se 8 queries para a busca: `nftxt = "solid oxide fuel cell"`, `nftxt = "ethanol" AND nftxt = "solid oxide fuel cell"`, `(nftxt = "solid oxide fuel cell") NOT nftxt = "reformer"` e `(nftxt = "ethanol" AND nftxt = "solid oxide fuel cell") NOT nftxt = "reformer"`, e os `ntxt = "solid oxide fuel cell"`, `ntxt = "ethanol" AND ntxt = "solid oxide fuel cell"`, `(ntxt = "solid oxide fuel cell") NOT ntxt = "reformer"` e `(ntxt = "ethanol" AND ntxt = "solid oxide fuel cell") NOT ntxt = "reformer"`.

E por fim, para a realização da busca no PATENTSCOPE, utilizaram-se também 8 queries diferentes, “`FP:(solid oxide fuel cell)`”, “`FP:(solid oxide fuel cell) NOT reformer`“, “`FP:ethanol AND (solid oxide fuel cell)`”, “`FP:ethanol AND (solid oxide fuel cell) NOT reformer`”, “`EN_ALLTXT:(solid oxide fuel cell)`”, “`EN_ALLTXT:(solid oxide fuel cell) NOT reformer`”, “`EN_ALLTXT:ethanol AND (solid oxide fuel cell)`” e “`EN_ALLTXT:ethanol AND (solid oxide fuel cell) NOT reformer`”.

5.1.2. Escala de prontidão tecnológica

Além da análise de documentos de patentes, para melhor descrever o atual estado da tecnologia, escolheu-se aplicar a metodologia de TRL neste processo de avaliação. Tal processo será realizado através de pesquisas na literatura sobre o estágio de desenvolvimento materiais e protótipos das pilhas a combustível de óxido sólido e de sua aplicação em veículos, assim como um levantamento sobre as barreiras atuais para o desenvolvimento da tecnologia e do mercado desta.

A escala de prontidão tecnológica (no inglês, *Technology Readiness Level*, TRL) é um conceito desenvolvido pela NASA na década de 1980 para auxiliar na avaliação da maturidade de um projeto, identificar elementos e processos do desenvolvimento de uma tecnologia que possam colocar em risco o seu sucesso (MAKEPEACE, 2009, STRAUB, 2015). Com o passar dos anos, diferentes entidades adotaram e adaptaram a escala para melhor atender suas necessidades. O DOE apresentou em 2009 um guia para auxiliar indivíduos e times envolvidos em avaliações de projetos para o DOE, e suas definições estão apresentados na tabela abaixo (MAKEPEACE, 2009). Devido ao escopo deste trabalho, optou-se por utilizar a escala apresentada neste guia, e recomenda-se o próprio guia publicado em 2009 pelo DOE, *Technology Readiness Assessment Guide*, e o trabalho de Straub (2015) para maiores detalhamentos de cada nível. A figura 14 apresenta um resumo dessa escala TRL.

Tabela 14 - Escala de prontidão tecnológica (TRL).

TRL relativo	TRL	Definição	Descrição
Pesquisa tecnológica básica	1	Pesquisa básica	Princípios básicos observados e reportados. Nesse nível há o começo da aplicação de R&D. Aqui há a apresentação dos princípios básicos da tecnologia em artigos científicos e trabalhos experimentais descritivos;
	2	Conceptualização	Conceito da tecnologia e/ou aplicação formulada. São apresentadas as aplicações da tecnologia, mesmo que ainda em fase especulativa, com pouca ou nenhuma prova analítica detalhada na literatura para apoiar as hipóteses. Se diferencia do nível anterior por não ser mais apenas ideias, mas haver pesquisa aplicada;
Pesquisa comprobatória de viabilidade	3	<i>Proof of Concept</i>	Avaliação analítica, experimentação e caracterização das provas do conceito;
	4	Demonstração	Validação de componentes/sistemas em laboratório e apresentação de design genérico. É o primeiro passo na integração de componentes;
Desenvolvimento tecnológico	5	Apresentação de protótipo e <i>design</i> conceptual; Escala laboratorial	Apresentação de protótipo em escala laboratorial, com maior fidelidade do sistema e ambiente para as condições reais;
	6	<i>Design</i> preliminar e validação do protótipo; Escala piloto	Os experimentos com sistemas protótipos ocorrem em ambientes que representam com maior similaridade o ambiente de operação real. Nessa etapa há uma escalada do nível laboratorial para um mais realista e que permitirá

			determinar parâmetros que habilitarão a operação do sistema;
Comissionamento do Sistema	7	<i>Design</i> detalhado e protótipo <i>Full-scale</i>	Nesse nível já ocorrem demonstrações do sistema, ainda protótipo, em campo com condições reais, com o <i>design</i> final virtualmente completo;
	8	Sistema completo através de testes e demonstrações	O sistema comprovadamente funciona em sua forma final nas condições esperadas. Nessa etapa há testes e avaliações de resíduos de operação;
Sistema operacional	9	Sistema operacional	O sistema em sua forma final já opera em toda a gama de condições esperadas.

Fonte: Adaptado de Makepeace (2009).

5.1.3. Proposições de ações

Por fim, passado o levantamento de patentes, as discussões acerca de investimentos, centro de pesquisas, TRL e, em vista dos resultados dos cenários construídos, propõe-se um *roadmap* a fim de auxiliar no planejamento estratégico de desenvolvimento e introdução da tecnologia. Nesta seção serão consolidadas as discussões levantadas neste trabalho e apresentadas recomendações para permitir alcançar a maturidade tecnológica e comerciável da tecnologia, levando em consideração os condicionantes, barreiras e *trade-offs* identificados pela análise de cenários.

5.2 Construção de cenários

Como citado no início desse capítulo, neste estudo serão construídos três cenários de penetração tecnológica, mais um cenário como linha de base. Nesse cenário de base, não ocorrem mudanças estruturais no setor nos próximos anos e a utilização de veículos pesados convencionais continua baseada no uso de motores de combustão interna a diesel. O segundo cenário, chamado de Baixa Penetração (BP), considera a adoção lenta da tecnologia de PaCOS em veículos pesados para transporte de cargas; no terceiro cenário, chamado de Alta Penetração (AP), ocorre a adoção mais rápida da nova tecnologia; e por fim, tem-se o cenário de Média Penetração (MP) no qual se adota uma penetração intermediária, relativa aos outros dois cenários. A figura 19 sumariza, através de um fluxograma, a metodologia descrita nesse capítulo, de forma a facilitar o seu entendimento.

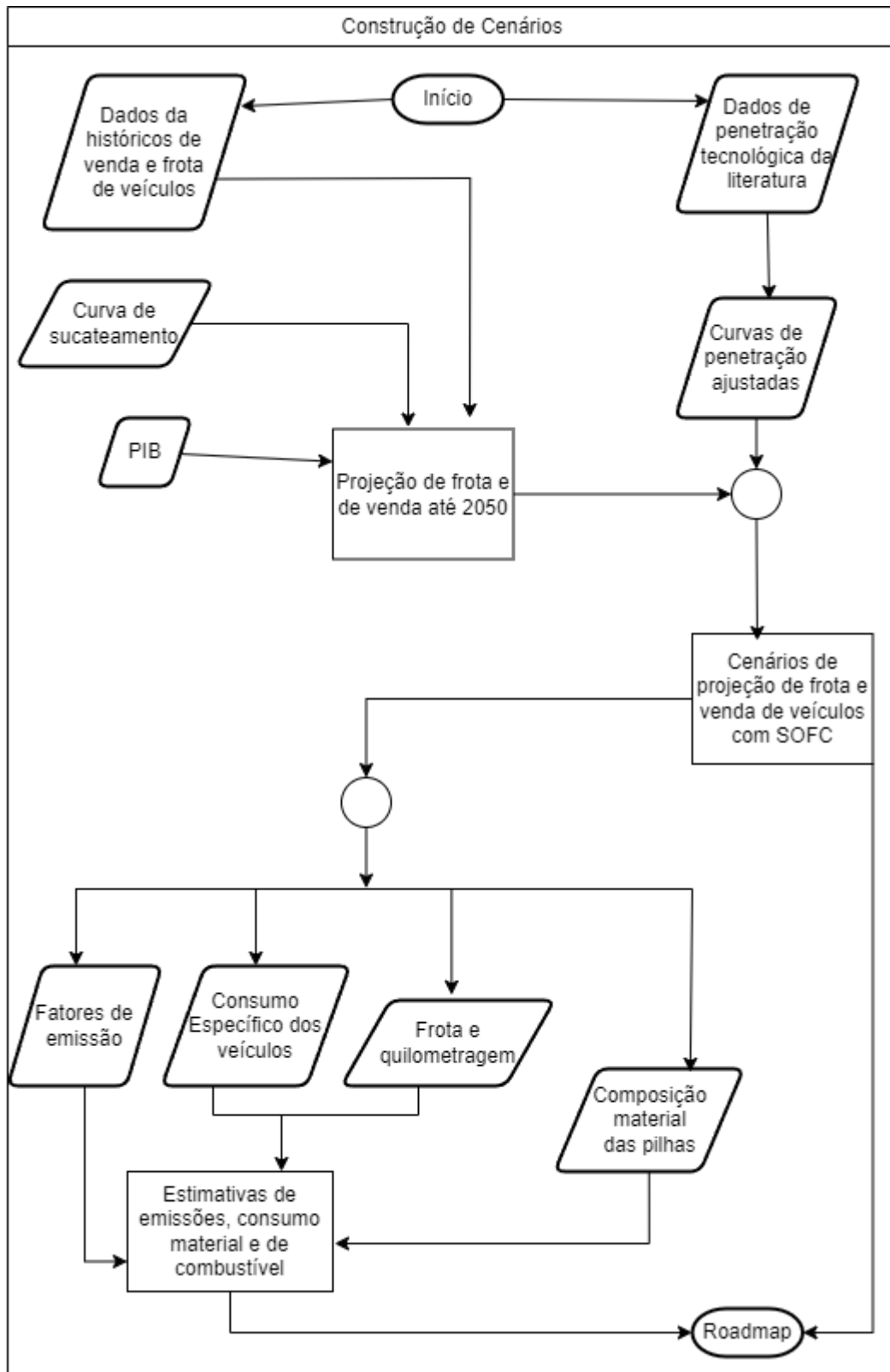


Figura 19 - Fluxograma com as principais etapas desse trabalho.

Fonte: Elaboração própria.

Este trabalho utiliza a classificação de veículos apresentada no relatório “Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários” de 2013 publicado pelo Ministério do Meio Ambiente, ilustrada na tabela 15 (BRASIL, 2013). Como o objetivo é avaliar a introdução da tecnologia no nicho de transporte de carga de veículos pesados, optou-se por tratar como “veículos pesados” tanto os caminhões pesados quanto os semipesados.

Tabela 15 - Categorização da frota de veículos.

Classificação	Peso Bruto Total (PBT)⁵
Comerciais	$PBT \leq 3,5t$
Caminhões semileves	$3,5t < PBT < 6t$
Caminhões leves	$6t \leq PBT < 10t$
Caminhões médios	$10t \leq PBT < 15t$
Caminhões semipesados	$15t \leq PBT < 40t$
Caminhões pesados	$PBT \geq 40t$

Fonte: Adaptado de Brasil (2013).

5.2.1. Ajuste de curvas de penetração e construção das curvas dos cenários

Uma vez que a PaCOS a etanol ainda não está comercialmente disponível, os três cenários alternativos propostos buscam avaliar possíveis narrativas de participação da tecnologia no Brasil. Considerou-se o início da introdução da tecnologia no país em 2030, e estimou-se a substituição da frota padrão pela nova até 2050.

Os cenários foram construídos com base em cenários da literatura de venda de caminhões elétricos, como proxy para a penetração da eletrificação e como limites inferiores da análise. Escolheu-se utilizar as projeções para caminhões semipesados/pesados elétricos apresentadas no caderno de Demanda Energética do Setor de Transportes (EPE, 2023b), os dados de projeções de fração de vendas de caminhões elétricos do IEA disponibilizados no *Global EV Data Explorer* (IEA, 2023) e os dados de projeção de fração de vendas de caminhões elétricos da ANFAVEA apresentados em um relatório de 2021 (ANFAVEA, 2021). Além disso, frente o sucesso dos veículos Flex no país como uma estratégia de penetração de etanol e substituição de combustíveis

⁵ Peso Bruto Total (PBT) é o peso do veículo somado ao peso da carroceria e da carga (MOURA, 2021).

fósseis, dados de vendas destes veículos foram utilizados como o limite superior da análise (ANFAVEA, 2023). A figura 20 apresenta esses dados compilados graficamente.

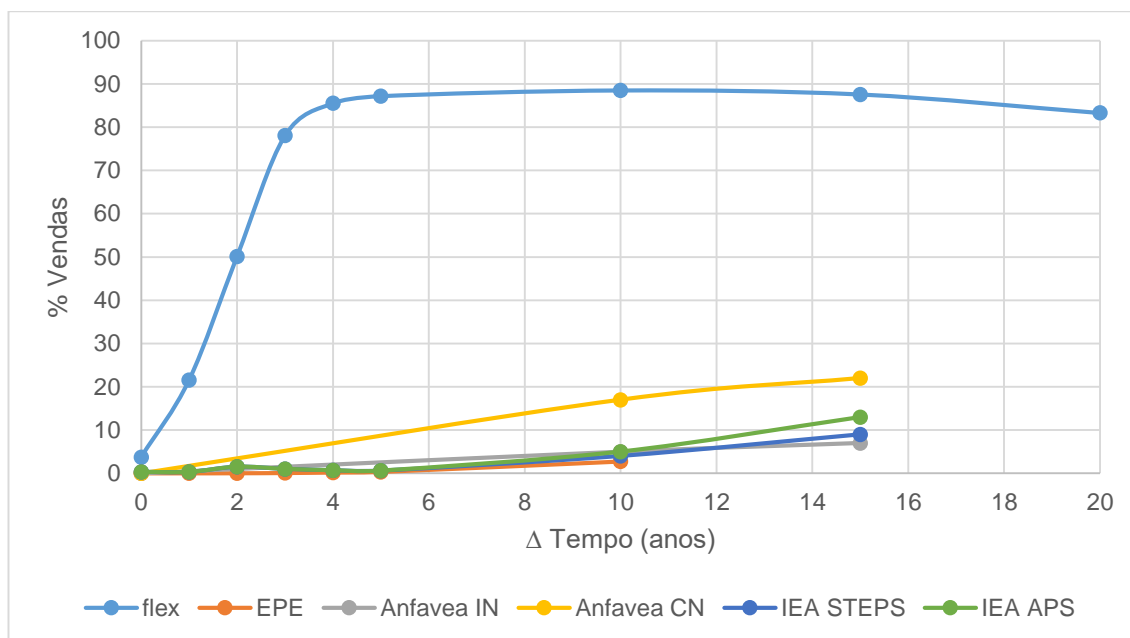


Figura 20 - Penetração tecnológica no licenciamento de veículos Flex, Elétricos leves e pesados/semipesados.

Nota: Os dados de Anfavea (2021) são projeções de veículos pesados, incluindo caminhões médios (6t <PBT<15t), pesados (PBT>15t) e ônibus, nos cenários Inercial (IN) e Convergência Global (CN), para veículos com motorização alternativa. Os dados de Anfavea (2023) são referentes aos dados históricos de veículos flex no país. Os dados de EPE (2023a) são referentes a caminhões pesados e semipesados elétricos (BEV) e híbridos elétricos (HEV) (com PBT >15t). Por fim, os dados de IEA (2023) são referentes a projeções para caminhões elétricos (com PBT >3,5t) nos cenários *Stated Policies Scenario* (STEPS) e *Announced Policies Scenario* (APS) do IEA.

Fonte: Adaptado de ANFAVEA (2021; 2023), EPE (2023a) e IEA (2023).

Esses dados de penetração tecnológica encontrados na literatura foram ajustados para curvas logísticas a fim de utilizar os parâmetros gerados para construir os cenários aqui propostos. Para tal, utilizou-se a equação 17 para realização dos ajustes,

$$F(t) = \frac{L}{1 + \delta \cdot e^{\frac{-k(t-t_0)}{\mu}}} \quad (17)$$

, onde os parâmetros L, K e t₀ representam, respectivamente, o valor máximo da curva, taxa de inclinação e o valor do tempo no ponto médio da curva. Por sua vez, δ e μ são

parâmetros ajustáveis para suavizar a curva. Suas soluções foram obtidas através da ferramenta Solver do Microsoft Excel utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) e, com isso, ajustou-se estatisticamente os parâmetros de curvas de penetração da literatura. A figura 21 apresenta as curvas ajustadas e a tabela 16 os parâmetros encontrados destas curvas.

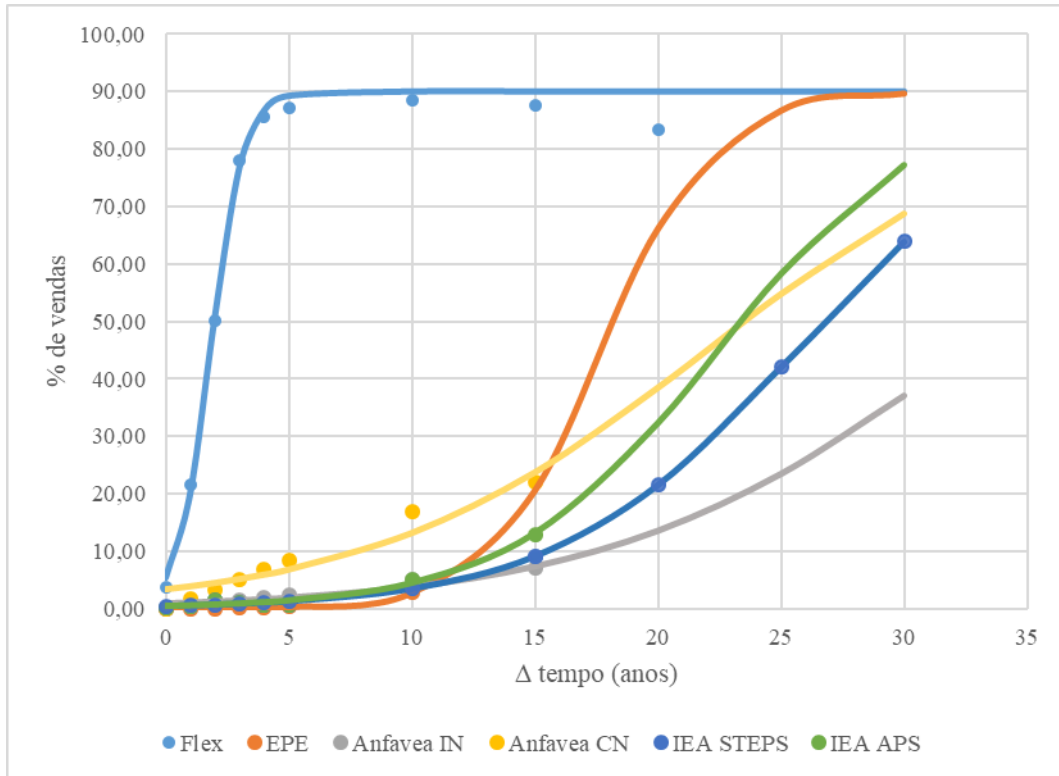


Figura 21 - Penetração tecnológica no licenciamento de veículos flex, EV e pesados/semipesados ajustada para curva logística.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 16 - Parâmetros de curvas logísticas de dados da literatura.

Parâmetros	Flex	EV EPE	EV Anfavea		EV IEA	
			Inercial	Convergência	STEPS	APS
L	90	90	90	90	90	90
K	1,50	8,56	0,14	0,15	0,21	0,24
t0	1,82	11,90	29,33	19,53	23,81	21,09
δ	1,00	13,52	1,53	1,37	1,42	1,33
μ	1,00	19,16	0,98	0,96	0,97	0,96

Fonte: Elaboração própria.

Com base nesses resultados, estipularam-se os parâmetros apresentados na tabela 17 para a construção dos cenários propostos, obtendo-se as curvas da figura 22. A saturação máxima (L) foi fixada em 90% para se igualar às curvas de penetração de carros flex no mercado brasileiro, variando entre os cenários, então, o tempo em que esses levariam para atingir o mesmo patamar. O K do cenário BP foi escolhido para se aproximar do valor encontrado para a curva IEA STEPS. O K do cenário MP foi escolhido para se ter um crescimento mais rápido que o cenário IEA APS, mas ainda próximo deste. E o cenário AP foi estipulado para ter uma convergência mais rápida que os outros dois.

Em relação aos t_0 , estipularam-se 10, 20 e 40 anos para os três cenários respectivamente. Atribuiu-se 10 anos para o cenário mais otimista, por considerar que a adoção da tecnologia neste seria mais rápida que nos demais, atrás apenas dos veículos Flex; 20 para o MP, uma vez que este teria um valor intermediário entre as curvas da literatura; e 40 para o BP ser o cenário mais conservador.

Tabela 17 - Parâmetros de curvas logísticas para os cenários propostos.

Parâmetros	Alta (AP)	Média (MP)	Baixa (BP)
L	90	90	90
K	0,30	0,25	0,20
t_0	10	20	40
δ	1,35	1,35	1,35
μ	0,95	0,95	0,95

Fonte: Elaboração própria

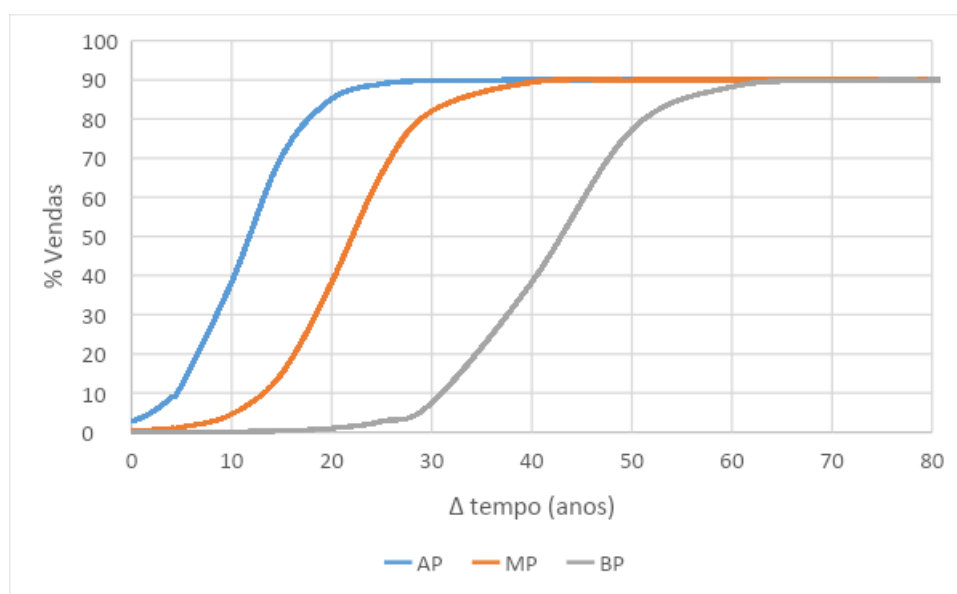


Figura 22 - Cenários de penetração de veículos pesados com pilhas a combustível de óxido sólido a etanol.

Fonte: Elaboração própria

Em suma, com as 6 curvas ajustadas, para construção da narrativa de cenários, diante da ausência de dados históricos para avaliação da taxa de penetração da tecnologia estudada, selecionaram-se curvas e valores de parâmetros para representar os 3 cenários de penetração. Considerou-se que os cenários aqui propostos teriam melhor penetração tecnológica que os cenários da literatura de introdução de veículos elétricos, mas ainda inferiores aos dos veículos flex. Portanto, adotou-se um L constante para os 3 cenários e selecionaram-se os parâmetros K e t0 com os dados dos veículos flex sendo o limite superior dos parâmetros, e os demais casos sendo os limites inferiores dos cenários.

5.2.2. Projeção de frota e venda de veículos

Em paralelo à construção dos 3 cenários, escolheu-se utilizar a metodologia para a projeção de crescimento de frota apresentada pelo relatório “Modelagem Setorial de Opções de Baixo Carbono para o Setor de Transporte”, publicado em 2017 pelo MCTI em cooperação com a ONU – Meio Ambiente (RATHMANN, 2017)]. A projeção apresentada no relatório seria para 2050 e, simula o setor de transporte de cargas considerando que haverá um aumento na taxa de crescimento médio anual das mercadorias transportadas. As equações e os parâmetros utilizados para tal são os seguintes:

$$F(t) = \sum_x^t Z(x) \cdot [1 - S(x)] \quad (18)$$

$$S(t) = \frac{1}{1 + e^{a(t-t_0)}} + \frac{1}{1 + e^{a(t+t_0)}} \quad (19)$$

A equação S (t) é a função de sucateamento de veículos, através da qual se calcula o percentual de veículos no ano “x” que foram sucateados, onde os parâmetros utilizados foram a = 0,10 e t0= 17. Por sua vez, a equação F(t) é a função de projeção de frota, sendo Z(t) é a venda acumulada dos veículos desde o ano “x” até o “t”, calculados com os valores históricos de vendas, a quantidade de veículos novos necessários devido ao sucateamento dos antigos e, considerando um crescimento da frota de veículos devido ao

crescimento da demanda de transporte de carga, utilizando para tal o PIB do país como proxy.

Essa relação do PIB com a da frota de caminhões pesados/semipesados considera que o crescimento da frota de veículos está diretamente ligado ao crescimento da demanda de transporte de mercadorias, a qual, conseqüentemente, está atrelada ao crescimento econômico do país (RATHMANN, 2017). Para tal, utilizaram-se os dados mais recentes de taxas de crescimento de PIB real para 2021, 2022 e 2023, dados históricos disponibilizados pelo Fundo Monetário Internacional (IMF, 2024), e, adotou-se uma taxa de crescimento fixa de 2,15% ao ano, para o período de 2024 a 2050, resultado da média do PIB de 2000-2020. Além desta, também se adotou uma segunda taxa, mais conservadora, de 0,36% ao ano, sendo esta a média das taxas de crescimento de PIB real dos anos 2011 a 2020, período no qual o Brasil apresentou seu menor crescimento recente. Esta segunda taxa foi aplicada apenas ao cenário MP como sensibilidade na análise.

Outra consideração importante é sobre a proporção dos caminhões pesados e semipesados em relação às demais categorias. O valor de entrada da frota de caminhões em 2020, utilizado para as projeções aqui discutidas, deriva do anuário da Anfavea (ANFAVEA, 2023), mas o anuário não discrimina em relação à categoria de peso dos caminhões. Sendo assim, com base na evolução desta proporção inferida pelos dados históricos de frota discriminada por tipo, apresentados no relatório “Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários” (BRASIL, 2013), optou-se por adotar um valor constante, no período de análise, de 60%.

Por fim, com os cenários e a projeção de frota de veículos concluídas, utilizaram-se as curvas de penetração tecnológica para calcular a quantidade de veículos elétricos com PaCOS, que seria comercializada em determinado ano para cada um dos casos, acumulando o montante até 2050, para determinar o tamanho da frota equipada com essa opção tecnológica, em cada uma das condições.

5.2.3. Cálculo do consumo de combustível, emissões de gases e de materiais

Para calcular o consumo de etanol necessário para atender a demanda da frota de 2050, utilizou-se a equação de consumo de combustível, apresentada na equação 20:

$$C = Frota \times Q \times CSm \quad (20)$$

, onde C representa o consumo de combustível em litros, Q é a distância média percorrida pela frota, em km/ano.veículo, e CSm é o consumo específico de combustível, dado em L/km. Utilizou-se um valor constante para a distância média percorrida pelos veículos de em 100.000 km/ano.veículo, com base nos valores de quilometragem para veículos pesados e semipesados apresentados por Maia (2015) (MAIA, 2015).

Para a estimação do consumo específico de combustível, algumas outras hipóteses precisaram ser assumidas. Primeiramente, até a confecção desse trabalho, não há um modelo em operação, ou, ao menos, um protótipo de caminhão a etanol que utilize PaCOS como principal fonte de potência elétrica para o motor do veículo (motor elétrico). Portanto, para determinação do consumo específico desses veículos tomou-se como base o consumo de um caminhão convencional ICE a diesel (RATHMANN, 2017), hidrogênio do caminhão FCEV Hyundai HYHD8-110 (HYUNDAI, 2023), do carro Hyundai Nexo (HYUNDAI, 2018) e da minivan e-NV200 com PaCOS a etanol (FUEL CELL BULLETIN, 2016). A tabela 18 apresenta esses parâmetros.

Tabela 18 - Dados de consumo específico para um caminhão a hidrogênio, veículo leve a hidrogênio e o protótipo da Nissan a etanol.

Veículo	Autonomia média (kJ/km)
e-NV200	1065,21
Hyundai Nexo	1136,67
Hyundai HYHD8-110	9272,83

Fonte: Elaboração própria.

Avaliaram-se a minivan da Nissan e o Hyundai Nexo como veículos leves e, após realizar as necessárias conversões, usando dados do poder calorífico inferior e densidade mássica volumétrica dos combustíveis, verificou-se que seus consumos específicos apresentavam uma diferença de aproximadamente 6,29%, sendo esta diferença associada à diferença de tecnologia utilizada, sendo o veículo a etanol mais eficiente por percorrer um maior espaço com a mesma quantidade de energia. Com essa informação, estipulou-se que uma futura tecnologia de caminhões com PaCOS também deveria ser mais eficiente que o HYHD9-110 e, portanto, adotou-se uma diferença de eficiência de 6,5%

para o consumo do caminhão com PaCOS em relação ao HYHD9-110, sendo esta tomada como o consumo desse veículo sem o auxílio de reformador.

Ademais, a fim de aferir um ganho de eficiência ao se utilizar uma pilha a combustível a etanol, sem o auxílio de um reformador, avaliou-se um segundo consumo específico, onde considerou-se uma perda de eficiência de conversão por adicionar essa etapa. Segundo Baptista (2020), o reformador apresentava em 2015 uma eficiência de 85%, portanto, no segundo caso utilizou-se um consumo específico 15% maior que o do HYHD9-110. A tabela 19 apresenta os valores de Consumo Específico utilizados.

Tabela 19 - Consumo específico (CS) dos veículos.

Veículo	kJ/km
CS sem reformador	8706,88
CS com reformador	10909,21

Fonte: Elaboração própria.

Sendo assim, utilizou-se a equação 20 e calculou-se o consumo de combustível por ano nos cinco casos citados, os três cenários de penetração e as duas variações do cenário de MP, com a menor taxa de crescimento e outra com o consumo específico alternativo.

Além da estimativa de consumo de combustível, também foram calculadas as emissões de CO₂ e outros poluentes em 2050. Para tal, utilizaram-se os fatores de emissão apresentados no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas, publicado em 2013 pelo MMA, considerando fatores médios para representar tanto os caminhões pesados e os semipesados. Para a estimação das emissões de CO₂ equivalente, utilizou-se os fatores de *Global Warming Potential* (GWP) de 21 para o CH₄ e 310 para o N₂O (BRASIL, 2013). A tabela 20 apresenta tais fatores.

Tabela 20 - Fatores de emissão de CO, NO_x, NMHC, MP, NO₂ e CO₂ para motores Diesel.

Fatores de emissão	
CO (g/km)	0,193
NO_x (g/km)	1,5945
NMHC (g/km)	0,0215

MP (g/km)	0,015
CH₄ (g/km)	0,06
NO₂ (g/km)	0,03
CO₂ (kg/L)	2,603

Fonte: Brasil (2013).

E por fim, em relação ao consumo de materiais para a produção das pilhas a combustível de óxido sólido necessárias para atender essa nova frota de veículos, utilizou-se o levantamento de materiais encontrados na literatura. Entretanto, como o intuito deste trabalho é apresentar uma estimativa de cenários em potencial, não foram discutidas as diferentes rotas produtivas das pilhas a combustível e utilizou-se um sistema de PaCOS genérico, com os atuais materiais *state of art*. Para tal utilizou-se o trabalho de Strazza *et al.* (2015) como fonte dos inputs materiais, onde o sistema apresentado é para geração estacionária, com uma pilha a combustível com potência de 270 kW, design tubular, com as pilhas a combustível constituídas de um anodo de Ni-YSZ, eletrólito de YSZ e catodo de LaMnO₃ e LaCrO₃, que opera na temperatura de 750 C° (STRAZZA, DEL BORGHI, *et al.*, 2015). A tabela 21 apresenta o *input* de materiais utilizados.

Tabela 21 - *Input* material para manufatura da PaCOS, por *stack*.

Material	Quantidade (kg)	Material	Quantidade (kg)
Níquel	0,02	Polivinilbutiral (PVB)	7
Óxido de níquel	18	Polietilenoglicol	3
Pó de LaMnO₃	979	Dibutilftalato	3
Pó de LaCrO₃	14	Ácido nítrico	1310
Pó de cloreto de zircônio	191	Cloro	156
Pó de cloreto de Ítrio	28	Coque de petróleo	26
Pó de óxido de zircônio	18	Ureia, como N	644

Fonte: Adaptado de Strazza *et al.* (2015).

Tal sistema foi escolhido pois, além de utilizar um sistema padrão com composição *state-of-the-art*, este opera em temperatura mais baixa que o usual para as PaCOS (800-1000 °C) e a potência do sistema é suficiente para alimentar um sistema análogo, como o sistema do caminhão FCEV Hyundai HYHD8-110 que opera com uma pilha a combustível de 180 kW (Hyundai, 2023).

E por fim, a tabela 22 apresenta uma síntese dos cenários e hipóteses utilizadas para a construção dos cenários aqui propostos.

Tabela 22 - Síntese dos cenários de penetração tecnológica

Período de análise	2030 a 2050
Objetos de análise	Caminhões pesados e semipesados
Limite inferior	Estimado com base em dados de penetração de caminhões elétricos do IEA, EPE e ANFAVEA
Limite Superior	Estimado com base em dados de penetração de veículos leves Flex no Brasil
Parâmetro L (valor máximo da curva ou saturação)	90% de vendas
Crescimento da frota	Estimado proporcionalmente ao PIB brasileiro; Maior taxa com média de 2000-2020 e menor taxa com média da década de 2011-2020.
Caminhão com PaCOS a etanol	Consumo de combustível estimado com base nos veículos leves e-NV200 e Hyundai Nexo, e no caminhão Hyundai HYHD8-110; Caminhão padrão com PaCOS a etanol e sem reformador
Emissões	Fatores de emissões da literatura
Material para manufatura das pilhas a combustível	Dados do trabalho de de Strazza <i>et al.</i> (2015)

Fonte: Elaboração própria.

Capítulo 6

Resultados e discussão

6.1. Levantamento de patentes

Os queries de buscas foram adaptados de acordo com os resultados obtidos nos bancos de dados, ao se buscar “*solid oxide fuel cell*”, ou em português, “célula combustível de óxido sólido”. Para o LATIPAT, por terem sido encontrados poucos resultados, optou-se trabalhar com um query simples, por já ser possível analisar todos os resultados e ter certeza de que se tratava da tecnologia de interesse. Por sua vez, para os outros dois bancos, tal análise seria inviável, e, por isso, utilizaram-se recursos específicos de cada uma das bases de dados para especificar patentes de sistemas gerais de pilhas a combustível PaCOS, de sistemas que trabalham sem auxílio de reformadores e de sistemas que trabalham com etanol, e suas possíveis combinações.

6.1.1. LATIPAT

As buscas no LATIPAT foram realizadas em novembro de 2023, e, foram obtidos 20 resultados para buscas com a palavra-chave no “título”, usando o termo “célula combustível de óxido sólido”. As patentes encontradas são todas referentes a sistemas de PaCOS e/ou componentes da pilha a combustível e processos de fabricação, com datas de prioridade começando em 1986, sendo a mais recente de 2016. A lista de requerentes inclui empresas grandes no setor, como a Nissan *Motors*, *Pirelli*, *Nanodynamics Energy Inc.*, *UT-Battelle*, *BTU International*, *Saint Gobain Ceramics* e *Rolls Royce*, além de outras como *Garret Corporation*, *WaikatoLink* e *Corning Inc.* Ou centros de pesquisas, como o *CNRS* e o *Alberta Research Council*, e universidades, como a Universidade de Boston, *Claude Bernard Lyon* e a *UFRGS*. Diferentemente dos demais bancos, não foram encontrados resultados com etanol.

Por sua vez, ao se buscar a palavra chave no “título ou resumo”, os resultados sobem para 39. Adicionam-se duas patentes para os anos de 2017 e 2018, a Nissan totaliza 14 patentes (na busca anterior eram 6) e são contabilizadas as patentes de sistemas com pilhas a combustível das empresas *Evogy Inc*, *Acumentrics Corp*, *AVL List GmbH*, *Quest-Air Technologies Inc*, *Shell Int Research*, *Praxxair Technology Inc* e da *CEE Distribuição* (junto da *UFRGS*).

Os resultados indicam que as empresas patenteando produtos relacionados à PaCOS são do setor de transporte, energia ou de fabricação de cerâmicas, com exceção da Praxair e *QuestAir* que produzem gases industriais. Os produtos envolvem os processos de manufaturas das pilhas a combustível, os componentes e os sistemas de utilização destas.

Ao alterar o query para “pilha combustível de óxido sólido”, sendo esta realizada em fevereiro de 2024, os resultados também se alteraram. Para as buscas com a palavra-chave no “título”, foram encontrados 6 resultados, dois deles da Corning Inc., um da Oxiteno, da *BTU International*, *Alberta Research Council* e outro do Laboratório de Hidrogênio (LabH2) da COPPE/UFRJ, tendo o professor Paulo Emílio de Miranda como inventor.

Esses resultados aumentam para 17 ao buscar a palavra chave no “título ou resumo”. Voltam a aparecer as empresas a Nissan Motors, Saint Gobain *Ceramics*, Corning Inc., Rolls Royce, Evogy Inc, Oxiteno e os centros de pesquisa *BTU International*, *Alberta Research Council* e o LabH2 da COPPE/UFRJ, liderado pelo professor Miranda. Como novos atores, aparecem a *Ceres Power*, *Ceramic Fuel Cells LTD*, e, as universidades Universidade Federal da Bahia (UFBA) e Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF). De maneira similar as buscas com o termo anterior, o foco dos produtos patenteados são os sistemas com pilhas a combustível do tipo óxido sólido, métodos de produção e elementos complementares aos sistemas de pilhas a combustível.

6.1.2. ESPACENET

As buscas no ESPACENET, também realizadas em novembro de 2023, resultaram em mais resultados, e, por isso, utilizaram-se estruturas mais complexas de queries. São dois grupos de queries diferentes, nftxt e ntxt, onde a diferença está em onde a busca é realizada no documento, sendo o primeiro considerado toda a parte textual deste, e, no segundo, apenas o título, resumo e nomes.

Além disso, escolheram-se esses queries em específico para entender através das patentes desse banco de dados, como a PaCOS está atualmente no mercado, sendo utilizada, ou não, com reformadores e/ou com etanol. Os dados relativos a esses resultados estão apresentados no Anexo III.

Para a busca geral, e, tratando-se do grupo nftxt, o Brasil aparece como 14° em número de patentes agrupadas por família, 27° em número de requerentes de patentes e em 31° em número de inventores, com o total de 26503 resultados. Por sua vez, no grupo ntxt, o país cai para 16° no agrupamento por família, sobe para 21° e 22° para requerentes e inventores por países respectivamente, e totaliza 6820 resultados. Dentre as principais empresas requerentes apontadas nessa busca, destaca-se a grande presença de empresas japonesas do setor energético, de fabricação de pilhas a combustível, de gás e mesmo do setor de transporte. Mesmo com o segundo *query* limitando as buscas, tal perfil se mantém.

Ao adicionar o termo de etanol na busca (mas ainda sem excluir “reformadores” no *query*), tratando-se do grupo nftxt, o Brasil aparece como 11° em número de patentes agrupados por família, com 120 resultados, 20° em número de requerentes de patentes, com 11, em 28° em número de inventores, com 8 apenas, e com o total de 5338 resultados. Por sua vez, no grupo ntxt, o país aparece em 10° no agrupamento por família com apenas 1 resultado, não foram encontrados resultados para requerente e inventores por países, e totaliza 28 resultados apenas.

Em comparação com o primeiro grupo de queries, nessa busca há uma grande redução no número de resultados. Para a busca geral, o perfil de atores japoneses e dos setores energético, de gás e automobilístico se mantém, apontando o interesse destes na exploração do potencial da pilha a combustível. Entretanto, para as buscas ntxt, as patentes requeridas se limitam basicamente às instituições de pesquisa e universidades, apontando uma imaturidade da tecnologia.

Ao se considerar apenas os resultados para a pilha a combustível e excluindo os de reformadores, e se tratando do grupo nftxt, o Brasil aparece como 15° em número de patentes agrupados por família, com 230 resultados, 27° em número de requerentes de patentes, com 20 resultados, em 29° em número de inventores, com 16 resultados, e a busca totalizou 19326 patentes. Por sua vez, no grupo ntxt, o país cai para 16° no agrupamento por família, com 53 resultados, sobe para 20° e 21° para requerente e inventores por países respectivamente, ambos com 11 resultados, e a busca totalizou 6346 patentes.

O perfil dos requerentes se mantém com predominância nipônica e interesse dos setores energéticos, de gás e automobilístico. Pode-se apontar, entretanto, que mesmo

havendo uma diminuição nos resultados gerais, ao se excluir reformadores do conjunto, a redução de resultados por países (top 10) é apenas de cerca de 27%, podendo significar que o foco de desenvolvimento da tecnologia é sem o auxílio de reformadores.

E na última busca, incluindo o etanol e excluindo os reformadores, e, se tratando do grupo nftxt, o Brasil aparece como 12º em número de patentes agrupados por família, com 67 resultados, 18º em número de requerentes de patentes, com 11 resultados, em 26º em número de inventores, com 8 resultados, e a busca totalizou 3796 patentes. Por sua vez, no grupo ntxt, o país aparece em 7º no agrupamento por família, empatando com outros 3 países com 1 resultado, em 3º para requerentes e inventores por países, empatado com outros 2 países com 4 resultados em ambos, e a busca totalizou 27 patentes.

Ademais, analisando os resultados encontrados, percebe-se que o perfil, tanto de países quanto de empresas e/ou centros de pesquisas, é similar aos apontados anteriormente. Além disso, ao nas buscas nftxt os resultados são muito próximos dos resultados ntxt para o query sem excluir reformadores, apontando que as pesquisas em torno da utilização das PaCOS com etanol envolvem a injeção direta do combustível na pilha a combustível, mas ainda em estágio de desenvolvimento acadêmico.

6.1.3. PATENTSCOPE

Por fim, a buscas no PATENTSCOPE foram realizadas em junho de 2023 e também resultaram em uma grande quantidade de resultados, sendo necessária a aplicação de diferentes queries para melhor filtrar a tecnologia desejada. A escolha dos campos de busca, FP e EN_ALLTXT, foram devido ao fato deles representarem, respectivamente, buscas na página inicial (Front Page) do documento, incluindo título, resumo, números e nomes das patentes, e, buscas em qualquer parte textual em inglês do documento, incluindo resumo, descrição, reivindicação, título, entre outros. Dessa maneira, buscou-se a construção de queries que permitissem entender melhor como as PaCOS são utilizadas no mercado atualmente, e por isso utilizaram-se queries que incluíssem e queries que excluíssem o uso de reformadores e a utilização de etanol. Os dados encontrados nesse banco de dados são apresentados no Anexo III.

Os resultados totais de patentes encontradas em cada um dos casos foram 13192, 9969, 2324 e 1787 para as buscas gerais de PaCOS, PaCOS excluindo reformadores, PaCOS com etanol e PaCOS com etanol excluindo reformadores, respectivamente.

Percebe-se também que a quantidade de registros de patentes vem se mantendo aproximadamente constante nos últimos 10 anos; entretanto, ao se considerar a associação de etanol com PaCOS, a quantidade vem diminuindo.

De maneira similar, percebe-se que, ao se adicionar etanol ao query de busca, há uma mudança no perfil de empresas requerentes de registro de patente. Em primeiro momento, a maioria são de montadoras, empresas produtoras de energia e de cerâmica, e, em sua maioria, empresas japonesas. Todavia, ao se adicionar o termo sobre o etanol, há o predomínio de empresas de biotecnologia e bioquímica. O Brasil não apareceu no top 10 de número de patentes em nenhuma das buscas.

Ao alterar o query de busca e considerar qualquer entrada textual das patentes, obteve-se um número muito maior de resultados encontrados, sendo estes 184.982, 151.981, 64.331 e 51.823 para as buscas gerais de PaCOS, PaCOS excluindo reformadores, PaCOS com etanol e PaCOS com etanol excluindo reformadores, respectivamente. E diferentemente das buscas anteriores, não se visualizou uma diminuição do número de patentes ao longo dos últimos 10 anos, apontando que a tecnologia e seus componentes ainda são de interesse do mercado.

Apesar de ainda apresentarem empresas requerentes em comum, algumas novas empresas surgem. Além disso, o perfil das empresas requerentes de patentes relacionadas a PaCOS muda em relação ao query com FP. Apesar de ainda ser possível notar um interesse maior de montadoras em patentes não relacionadas ao etanol, o registro de patentes de PaCOS, independentemente se associado a reformadores e/ou etanol, torna-se majoritariamente realizado por empresas do ramo da biotecnologia e bioquímica.

E por fim, ao se analisar os países requerentes de registros, poucas mudanças são visualizadas. Há apenas o aparecimento dos países Israel, Singapura e Nova Zelândia, no top 10 de número de patentes se tratando do query EN_ALLTXT e com etanol, em detrimento da China, Reino Unido e Coreia do Sul. E o Brasil permanece de fora deste ranking.

Ademais, comparando os resultados deste banco com os encontrados no banco ESPACENET, pode-se notar algumas semelhanças. Primeiramente, os países requerentes são quase sempre os mesmos, com destaque para EUA, China, Japão, Coreia do Sul e o grupo EPO. Além disso, nas queries que não explicitam etanol no seu enunciado, a

presença majoritária de empresas japonesas é marcante, principalmente do setor automobilístico.

6.2. Histórico de investimentos, principais atores e centros de pesquisa do país

Apesar de o foco deste trabalho ser o desenvolvimento de pilhas a combustível, mais especificamente as PaCOS, no Brasil, desde os primeiros investimentos e projetos envolvendo este tema, sempre houve a associação direta com tecnologias de hidrogênio. Dito isso, atualmente o Brasil é um dos principais países com destaque em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) na área de pilhas a combustível e hidrogênio da América Latina (LIMA, PINKOWSKI, *et al.*, 2021).

Em 2002, o então Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) lançou o “Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas Células a Combustível” (PROCaC). Porém, em 2005, este programa passou por uma reformulação e passou a ser chamar “Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio” - ProH2 (CHUM, 2002, EPE, 2021, LORENZI, 2012).

Ademais, alguns outros acontecimentos mais notórios para o setor de pilhas a combustível foram a entrada do país em 2003 na Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia – IPHE (*International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy*), a publicação em 2010 do “Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025” pelo CGEE, o qual recomendava ao MCTI incentivar o desenvolvimento tecnológico em pilhas a combustível (BRASIL, 2021), e em 2018, quando o hidrogênio passa a compor a estratégia energética brasileira no “Plano Nacional de Energia 2050”, onde é apontada a aplicação de pilhas a combustível para o setor de energia e transporte, para a produção de H₂ a partir de biocombustíveis e gás natural (EPE, 2021, TEIXEIRA, MENDES, *et al.*, 2022). Além disso, instituiu-se em 2021, através da resolução CNPE nº 7/2021, o Programa Combustível do Futuro, o qual tem como um de seus objetivos a avaliação das tecnologias da pilhas a combustível disponíveis para orientar pesquisa, desenvolvimento e inovação (BRASIL, 2023g).

Em 2017 foi criada a Associação Brasileira de Hidrogênio (ABH2), a qual, apesar de objetivar o fomento da cadeia da produção, armazenamento, distribuição e uso do hidrogênio, esta inclui atores do setor de pilhas a combustível e, portanto, impulsiona o desenvolvimento da indústria e pesquisa do setor (ABH2, 2024).

Segundo um levantamento realizado para o projeto *Energy Big Push*, entre 2013 e 2018, foram identificados 91 projetos associados a hidrogênio e pilhas a combustível, chegando ao montante de 34 milhões de reais em investimentos. Tendo como foco as instituições ANEEL, ANP e FNDCT, o relatório “Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio” publicado pela EPE em 2021, aponta que: *“percebe-se uma característica de projetos semelhantes nos programas da ANEEL e da ANP, tanto em termos de duração do projeto (~44 meses), quanto de volume financeiro acessado (média entre R\$1,5 e R\$1,9 milhão de reais). Já os financiamentos relacionados ao FNDCT são de menor prazo (~26 meses), mais numerosos (74 projetos), de menor porte financeiro (média de R\$76 mil) e mais vinculados à pesquisa básica”* (EPE, 2021).

Em novos desdobramentos, o Ministério de Minas e Energias (MME) publicou, em 24 de agosto de 2023, a nova etapa do Plano Nacional do Hidrogênio (PNH2), o Plano de Trabalho Trienal (2023-2025), com marcos temporais, estrutura de governança, planejamento e ações a serem desenvolvidas no país nos próximos anos para o desenvolvimento do setor de hidrogênio. Entre as ações, destacam-se as ações de esforço para capacitação de profissionais sobre pilhas a combustível e, a subvenção econômica dada a projetos de Hidrogênio através de Chamadas Públicas realizada em 2022 pelas organizações MCTI/FINEP/FNDCT (BRASIL, 2023f).

Destaca-se ainda a política lançada no início de 2024 pelo governo federal, Nova Indústria Brasil (NIB), a qual será implementada pelos próximos 10 anos (2024-2033). Tal programa prevê investimentos não-reembolsáveis e linhas de créditos a projetos de desenvolvimento da tecnologia de pilhas a combustível (BRASIL, 2024b). Podendo citar, por exemplo, a Chamada Pública de Fluxo Contínuo dos órgãos MCTI, FINEP e FNDCT, intitulada Mais Inovação Brasil – Energias Renováveis, a qual inclui na sua segunda linha temática o hidrogênio de baixo carbono e tecnologias para seu uso, podendo enquadrar aqui as pilhas a combustível (FINEP, 2024c).

Em relação aos centros de pesquisas brasileiros envolvidos em pesquisas com pilhas a combustível, podem-se destacar três. Primeiramente, o Instituto Alberto Luiz Coimbra

de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ) com o Laboratório de Hidrogênio (LabH2), o qual desenvolve pesquisas envolvendo pilhas a combustível de sólido óxido (LIMA, PINKOWSKI, *et al.*, 2021). Foi através de pesquisas desse laboratório, encabeçadas pelo Professor Emílio Miranda, que foram desenvolvidos ônibus elétricos híbridos, de bateria *Plug-in* e com pilhas a combustível, apresentados durante a reunião Rio+20, em 2012, e nos jogos Olímpicos de 2016, e que atualmente desenvolvem ônibus sustentáveis junto da prefeitura de Maricá, sendo um deles híbrido elétrico e etanol, e outro a hidrogênio com PaCMTP (COPPE/UFRJ, 2022b, a, DE MIRANDA, CARREIRA, *et al.*, 2017, LABH2, 2022). De acordo com os pesquisadores do laboratório (DE MIRANDA, P. E. V., 2023), um dos focos atuais deste é no desenvolvimento e manufatura de pilhas a combustível de óxido sólido para veículos eletrificados com injeção direta de etanol, ou seja, sem a utilização de um reformador externo ou interno ⁶.

Outro centro de destaque no setor é o Laboratório de Hidrogênio (LH2) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), o qual, entre outros, se dedica aos temas envolvendo a aplicação de pilhas a combustível e hidrogênio na mobilidade e geração distribuída (LIMA, PINKOWSKI, *et al.*, 2021). Esse foi o primeiro laboratório dedicado ao tema no país, criado na década de 1970 durante a crise mundial do petróleo (LORENZI, 2012), e é responsável pela criação do primeiro veículo movido a hidrogênio e pilha a combustível do tipo PaCMTP do Hemisfério Sul (LIMA, PINKOWSKI, *et al.*, 2021). Além deste, pode-se citar também o grupo de pesquisa *Brazilian Renewable Energies* (BRE), também localizado na UNICAMP, focado no desenvolvimento do armazenamento de energia e geração embarcada de energia por etanol, que atua na pesquisa, desenvolvimento e manufatura de baterias, supercapacitores e PaCOS, e seus respectivos componentes, já possuindo parcerias com diferentes entidades privadas (BRE, 2023).

A UNICAMP também já apresenta diversas parcerias firmadas com empresas do ramo para pesquisa e desenvolvimento, principalmente focada no desenvolvimento de pilhas a combustível a etanol, incluindo empresas como Volkswagen, Stellantis, Toyota, Ford, Shell, Bosch, AVL e Caea (MATEUS, 2021, TEIXEIRA, MENDES, *et al.*, 2022).

⁶ Durante o levantamento de patentes realizado, as patentes do professor Emílio Miranda foram as únicas que explicitamente indicam que os sistemas são de pilhas a combustível que permitem a reforma interna de combustível. Suas patentes apareceram no levantamento do LATIPAT e ESPACENET.

Segundo o relatório “Hidrogênio de baixo carbono” publicado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) em 2022, a parceria com a Volkswagen ainda incluiria a criação de um centro de P&D no Brasil, que lideraria os esforços mundiais em pesquisas com biocombustíveis (TEIXEIRA, MENDES, *et al.*, 2022). Ademais, a UNICAMP também apresenta patente de um micro reformador produzido por impressão 3D, o qual permitiria a produção embarcada de hidrogênio através da reforma de etanol. Tal tecnologia seria associada a uma pilhas a combustível para a transformação do combustível em eletricidade (MONTEIRO, 2022)

O relatório do BNDES ainda aponta que as empresa Shell Brasil, Raízen e Hytron, conjuntamente da Universidade de São Paulo (USP) e o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai) firmaram uma parceria para o desenvolvimento de tecnologias de reforma de etanol para a produção de hidrogênio. Esse acordo incluía a construção de uma estação-piloto de produção de hidrogênio para abastecimento de veículos de circulação interna ao campus da USP (TEIXEIRA, MENDES, *et al.*, 2022). Esta estação será a primeira planta de produção de hidrogênio pela reforma de etanol do mundo e estima-se que produzirá 4,5 kg de H₂/hora, devendo ser finalizada em julho de 2024 (ZIEGLER, 2023).

Por último, pode-se destacar o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), o qual apresenta como uma de suas linhas de pesquisa o desenvolvimento de PaCOS, com enfoque no desenvolvimento de materiais componentes, como condutores iônicos, condutores mistos, compósitos e nano-materiais (IPEN, 2023). O Instituto, por exemplo, apresenta uma parceria com a montadora Nissan, para aperfeiçoamento da tecnologia de PaCOS e do protótipo e-NV200, a fim da viabilização de sua comercialização (IPEN, 2021). Além desse, o IPEN também estabeleceu dois acordos com as montadoras Mercedes-Benz e Stellantis, e as empresas Bosch, Umicore e Ipiranga para o desenvolvimento de tecnologias para o uso de hidrogênio em veículos (TEIXEIRA, MENDES, *et al.*, 2022).

Esses são atualmente os principais centros que desenvolvem pesquisas com pilhas a combustível. Todavia, outras faculdades também estudam tal tecnologia, inclusive apresentam patentes de PaCOS. Por exemplo, durante o levantamento de patentes, encontrou-se trabalhos das universidades UENF, UFBA e UFRG relacionadas às PaCOS. Todas elas publicaram patentes sobre componentes e/ou processos de produção

relacionados à pilhas a combustível, com destaque para a UFBA com duas e a UFRGS com três (associada ao CEE Distribuição).

Em vista destes pontos, pode-se figurar o cenário nacional de desenvolvimento da tecnologia. Em primeiro momento o Brasil se encontra em um ponto chave na sua transição energética. Pela primeira vez o hidrogênio passa a compor a estratégia energética brasileira e o país passa a investir sistematicamente em tecnologias relacionadas a produção, transporte, armazenamento e uso, incluindo aqui as pilhas a combustível.

Ademais, montadoras como a Nissan, Volkswagen, Toyota, Fiat, Mercedes-Benz e Stellantis, e empresas do setor energético como a Shell, Raízen e Ipiranga, entre outras, demonstram o interesse no desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio e vias alternativas para expansão do uso do etanol, e já apresentam projeto para investimento para tal. Entretanto, o protótipo de veículo com uma PaCOS a etanol, mesmo com um reformador, segue sendo o caso mais avançado no desenvolvimento da tecnologia para mobilidade, e desde sua apresentação em 2016 não foram encontradas atualizações do projeto.

Dentre os centros de pesquisas que apresentam projetos com pilhas a combustível de óxido sólido, tanto o grupo da COPPE quanto o do IPEN demonstram interesse em sistemas sem reformadores, ocorrendo a injeção do etanol diretamente na pilha a combustível. E todos eles buscam o desenvolvimento de pilhas a combustível com temperatura de operação menores e composições materiais que ao menos diminuam a deposição de carbono no sítio-ativos das pilhas a combustível.

Portanto, o Brasil teria capacidade para o desenvolvimento da tecnologia, em visita da experiência dos centros de pesquisa, comprovada pelos projetos e parcerias já estabelecidas, assim como o investimento e interesse de grandes atores do mercado do setor de transporte e energia. A ponderação em relação a capacidade nacional de produção de etanol e das pilhas a combustível em território nacional será realizada ao apresentar os resultados dos cenários de projeção.

6.3. Nível de Prontidão Tecnológica (TRL)

Como apresentado nos capítulos anteriores, as PaCOS são reconhecidas por sua flexibilidade entre as pilhas a combustível, pois permitem a utilização de diferentes combustíveis, incluindo biocombustíveis, como metanol e etanol, e sua alta eficiência elétrica, a qual varia em uma faixa de 50-60%, podendo atingir até 90% de eficiência de 1ª Lei, na conversão de energia, quando associada a sistemas de cogeração – isto é, aproveitamento de eletricidade e calor útil.

Há um crescente interesse no uso deste tipo de pilhas a combustível e avanços significativos foram feitos nas últimas décadas. A condutividade e a densidade de potência máxima vêm aumentando gradualmente com os anos, chegando a atingir valores de condutividade do eletrólito de 1 S/cm e densidade de 1700 mW/cm² com eletrólitos de íons-mistos (LYU, XIE, *et al.*, 2020).

Atualmente a composição *state-of-the-art* de uma pilha a combustível de óxido sólido é composta de um eletrólito de Zircônia com Ítria estabilizada (YSZ), um anodo de *cermet* de Ni + YSZ e o catodo de LaMnO₃ dopado com estrôncio (LSM), porém esta utilização é acompanhada por desvantagens, principalmente pensando em sua aplicação em mobilidade. Este tipo de composição é comum em pilhas a combustível de altas temperaturas, que trabalham com temperaturas superiores a 800°C para uma operação otimizada. Dessa maneira, essa condição de operação restringe a aplicação da pilha a combustível, acarreta em um longo tempo de *start-up* e aumento na degradação do sistema. Além disso, apesar de não serem suscetíveis ao envenenamento por CO, como as PaCMTP, ainda o são para enxofre e deposição de carbono, o que ocasiona em uma perda de estabilidade e eficiência quando utilizadas com combustíveis como o etanol.

Em relação a degradação e estabilidade, por exemplo, segundo Golkhatmi *et. al.* (2022) até 2022, a pilha a combustível com melhor performance era a F1002-97, produzida por *Forschungszentrum Jülich GmbH*, a qual atingia até 93.000 horas de operação a 700°C sob a corrente de 0,5 A/cm² (GOLKHATMI, ASGHAR, *et al.*, 2022). E apesar de terem sido identificados durante a revisão bibliográfica diversos trabalhos na literatura envolvendo sistemas de pilhas a combustível com composição alternativa, alta eficiência e relativa baixa temperatura de operação, esses ainda estão distantes de um estágio comercial.

Portanto, os esforços atualmente se concentram no desenvolvimento de pilhas a combustível que operam com eficiência em temperaturas médias (500-600 °C), a fim de diminuir a degradação sofrida pelos sistemas e baratear a manufatura destes. Se tratando da aplicação das pilhas a combustível em mobilidade, a literatura aponta algumas tendências, como a utilização de suporte metálico, o qual apresenta uma alta resistência e condutividade térmica, ocasionando em um maior tempo de vida e diminuição do tempo de *start-up*, e a utilização de designs alternativos como os micro-tubulares, devido a sua compactidade, rápido *start-up* e alta densidade volumétrica energética (WANG, Yuqing, SHI, *et al.*, 2024).

Conforme a avaliação das patentes realizadas nesse trabalho, é perceptível um grande interesse em empresas do setor de transporte, energia e de biotecnologia. De maneira geral, a publicação de patentes sobre PaCOS globalmente se manteve constante nos últimos 10 anos, apontando o interesse do mercado no desenvolvimento da tecnologia. Todavia, também é perceptível uma diminuição das patentes das pilhas a combustível associadas à conversão do etanol, sendo essa aplicação mais associada à reforma do combustível. Tal fato aponta que a tecnologia ainda encontra barreiras importantes para sua aplicação em áreas mais diversas.

O foco dos registros ao se avaliar patentes gerais com o termo “Pilha a Combustível de Óxido Sólido”, aparenta ser nos diferentes arranjos de sistemas e composição material das pilhas a combustível, evidenciando que o estado atual de desenvolvimento da tecnologia ainda reside na validação de sistemas e comprovação da integração e funcionalidade de componentes. Todavia, ao se restringir as buscas para a aplicação com etanol, mais centros de pesquisas aparecem como maiores requerentes, aparentando um estágio desenvolvimento ainda em experimentação, mesmo com a existência de protótipos confirmados.

Além disso, ao se avaliar as patentes por países, repara-se que ao longo dos anos Japão, China e EUA são os principais publicadores de patentes sobre esse tipo de pilha a combustível, com destaque para empresas japonesas do setor energético e de transporte que predominaram no registro de patentes. O Brasil, por sua vez, não aparece no ranking das 10 maiores publicadores, como aparente nos dados obtidos pela PATENSCOPE, aparecendo com apenas 2 patente em alguns dos *queries* do ESPACENET. Ao se analisar as buscas realizadas pelo LATIPAT, mais patentes brasileiras podem ser encontradas, associadas a centros de pesquisa, como a COPPE/UFRJ e outros da UFRGS e UENF.

Isso aponta que a tecnologia ainda é insipiente e ainda não apresenta tanto apelo comercial no país, ou mesmo que os projetos em andamento ainda não produziram resultados suficientes para consolidar uma patente.

Além disso, como já pontuado nos capítulos 2 e 3 deste trabalho, apesar de existirem, poucos foram os protótipos de veículos com PaCOS, e, apenas um foi encontrado de veículo com PaCOS a etanol como fonte principal de potência desenvolvidos ou em desenvolvimento até a realização deste trabalho. A minivan apresentada pela Nissan em 2016 foi a primeira do tipo no mundo, a qual utilizava uma PaCOS associada a um reformador interno, tendo o etanol como combustível. Além desta experiência, a aplicação da PaCOS em veículos ainda se resume a unidades auxiliares (APU), mas também em escala laboratorial.

Por sua vez, mesmo que fuja um pouco do escopo desse trabalho, ao avaliar o desenvolvimento da tecnologia é importante pontuar sobre seu uso na geração estacionária de energia. Por conseguinte, a PaCOS apresenta uma crescente relevância, chegando a ter projeções de crescimento de mercado de US\$ 389,21 milhões, em 2017, para US\$1,35 bilhões até 2026 (CIGOLOTTI, GENOVESE, 2021a). E, mesmo assim, apesar da aplicação estacionária ser melhor desenvolvida, a expansão deste mercado também encontra barreiras. Como citado no artigo de Whiston et. al. (2019) o mercado de PaCOS ainda é mantido através de subsídios governamentais e os altos custos e a degradação por uso ainda freiam o crescimento do mercado (WHISTON, AZEVEDO, *et al.*, 2019).

Sendo assim, para avaliar o Nível de Prontidão Tecnológica das pilhas a combustível de óxido sólido como principal fonte de potência de veículos, em especial para veículos pesados, é necessário levar em consideração a subjetividade dos parâmetros da escala. Em primeiro momento, não há uma métrica objetiva para distinguir estágios de transição entre os níveis.

A avaliação do Nível de Prontidão Tecnológica de uma tecnologia, carece de uma métrica objetiva para distinguir estágios de transição entre os níveis. Em vista disso, é possível considerar que a tecnologia se encontraria no estágio intermediário do Desenvolvimento Tecnológico. Dessa maneira, apesar dos conceitos básicos da tecnologia já estejam consolidados e amplamente destrinchados na literatura, como pode

ser exemplificado pela sua aplicação estacionária, demonstrando tal maturidade, diversos aspectos de sua operação e composição ainda demonstram abertura para melhorias.

Ademais, ao se analisar a aplicação das pilhas a combustível em veículos, tais lacunas se tornam mais pronunciadas. As pesquisas se concentram em encontrar a melhor composição material e design que atenda as especificidades que a mobilidade exige. Apesar de um nível 5, de demonstração tecnológica, ser caracterizado pela existência de protótipos em escala laboratorial que já conseguem simular condições reais, como seria o caso do protótipo apresentado pela Nissan, e possivelmente do ônibus em desenvolvimento, tais sistemas ainda não apresentam dados de operação suficientes para consolidar seus sistemas. Mas mesmo assim, a existência destes protótipos, a literatura e as patentes avaliadas, apontam uma etapa de conceptualização concluída e figuram uma etapa de aprimoramento. Com isto posto, conforme o levantamento aqui discutido, a tecnologia se caracterizaria por um TRL em transição do estágio 4 para 5.

6.4. Cenários de penetração tecnológica

Como detalhado no capítulo metodológico, utilizaram-se dados da literatura para a construção das curvas dos três cenários de penetração tecnológicas de veículos pesados/semipesados com pilhas a combustível movidas a etanol. Assim, no cenário mais otimista, as vendas de veículos pesados com PaCOS alcançariam a saturação de 90% em aproximadamente 25 anos, enquanto nos cenários MP e BP essa saturação de 90% ocorreria em aproximadamente 40 e 60 anos, respectivamente.

Dando prosseguimento para a projeção, as figuras 23 e 24 apresentam o crescimento da frota de veículos pesados e semipesados no horizonte de 2050.

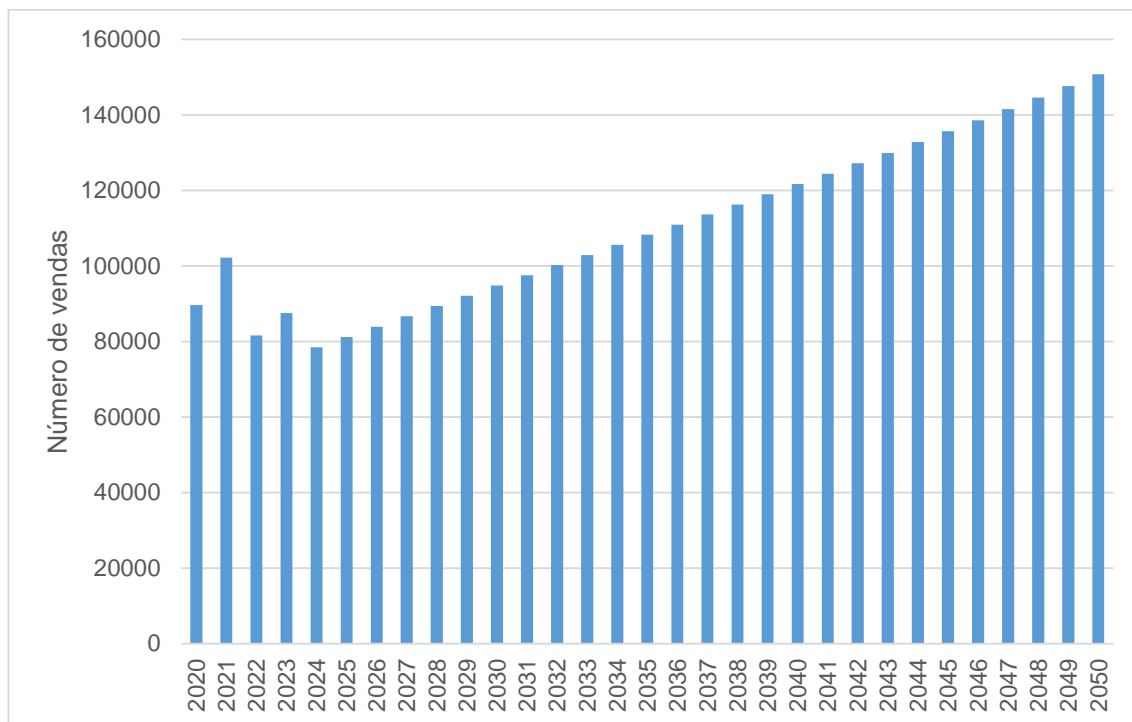


Figura 23 - Projeção do licenciamento de veículos pesados/semipesados de carga.

Fonte: elaboração própria.

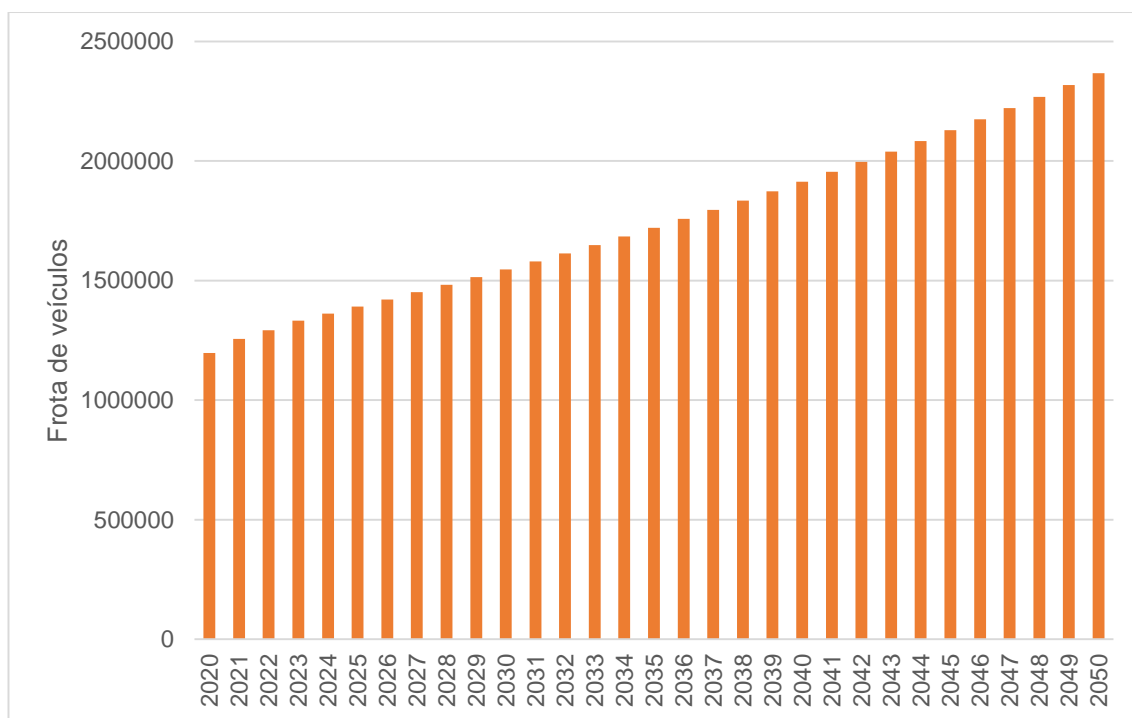


Figura 24 - Frota de veículos de carga pesados/semipesados.

Fonte: elaboração própria.

Dessa maneira, em comparação com as estimativas referentes a 2022 pela ANFAVEA (ANFAVEA, 2023), a frota de veículos pesados e semipesados parte de

1.270.888 veículos, considerando a proporção estabelecida anteriormente, para um montante de 2.367.106 veículos em 2050.

6.4.1. Cenário de referência

Com uma frota de 2.367.106 veículos estimados e, utilizando o consumo de veículos pesados ICE convencionais de 3,4 km/L (BRASIL, 2013), a projeção do consumo de diesel em 2050 relativo a esses modais seria de 69,62 bilhões de litros de diesel, ou 59,04 Mtep/ano. A título de comparação, segundo dados da ANP, a produção nacional de diesel em 2023 foi de 46,89 bilhões de litros e foram importados no mesmo ano, 14,49 bilhões de litros, totalizando um consumo 61,08 bilhões de litros (BRASIL, 2024a).

Considerando que as estimativas aqui realizadas só englobam os caminhões pesados e semipesados, a capacidade atual de oferta de diesel do país não cobriria toda a demanda prevista para o setor de transporte. Ademais, o diesel é o combustível mais importado do país, sendo os EUA o principal fornecedor deste (PALAZZI, MEIRA, *et al.*, 2022), e, levando em conta os dados da ANP, a nova demanda de diesel seria de 8,54 bilhões de litros, agravando a dependência nacional à commodities internacionais e a vulnerabilidade às flutuações do dólar.

Além disso, considerando esta estimativa de crescimento e consumo do combustível fóssil, há conseqüentemente a expectativa do crescimento das emissões do setor. A tabela 23 apresenta as estimativas de emissões totais para o cenário de referência.

Tabela 23 - Emissões de CO, NO_x, NMHC, MP, NO₂ e CO₂ para motores Diesel no cenário de referência.

Emissões	
Poluente	Mil tonelada/ano
CO	45,69
NO _x	377,44
NMHC	5,09
MP	3,55

CH₄	14,20
NO₂	7,10
Milhões de tonelada/ano	
CO₂	181,22
CO₂eq	183,72

Fonte: Elaboração própria.

A título de comparação, como pontuado na seção de Panorama do Setor de Transporte, os dados oficiais do MCTI apontaram que em 2021 o setor de transporte foi responsável pela emissão de 186,858 MtCO₂eq, o equivalente a 47,64% das emissões totais do setor de energia. Ou seja, segundo as projeções aqui realizadas, apenas o consumo de combustível da frota de veículos pesados e semipesados em 2050 já seria equivalente a toda emissão do setor de transporte em 2021. Tendo em vista o compromisso nacional de alcançar emissões líquidas neutras até 2050 como parte do acordo de Paris (BNDES, 2024c), a eletrificação da frota seria um grande aliado dessa transição.

Ademais, é importante destacar que o consumo de diesel considerado ainda é conservador, não apenas em relação a quilometragem por litro de diesel, mas também para as emissões desses veículos. Esses valores não necessariamente representam o consumo de veículos reais, considerando a idade elevada da frota de veículos pesados (AGÊNCIA CNT, 2019) e, que o rendimento dos sistemas decaí com o tempo, devido a deterioração por uso, assim como as emissões veiculares aumentam com o aumento da quilometragem do veículo (HAO, ZHAO, *et al.*, 2022). Por adotar um padrão de consumo conservador para a previsão de demanda do combustível como base, as estimativas podem estar subestimando a futura demanda e seu impacto.

Atualmente mais de 20% da demanda de diesel do país é abastecida por importações (BRASIL, 2024a) e, com esta estimativa de crescimento da demanda e sem grandes previsões de expansão da capacidade produtiva do combustível fóssil, a tendência é o agravamento da dependência nacional de importações.

Como aponta Borba *et. al* (2017), o setor de transporte de carga brasileiro é vulnerável às variações relacionadas ao diesel e, a economia brasileira é extremamente dependente dessa atividade, por ser baseada na exportação de commodities básicas e utilizar o transporte rodoviário como principal forma de movimentação de bens em seu

território (BORBA, LUCENA, *et al.*, 2017). Sendo assim, na eventualidade de desequilíbrios do mercado global, como ocorreu, por exemplo, nos anos recente com a invasão da Ucrânia pela Rússia, ou outros picos de demanda de diesel, a infraestrutura de produção nacional atual não conseguirá suportar tais variações e as atividades econômicas brasileiras estarão expostas à riscos (RAMALHO, 2022).

6.4.2. Cenários com PaCOS a etanol

Como explicitado anteriormente, a proposta de construção desses cenários é avaliar possibilidades para o setor de transporte e sua descarbonização. Dessa maneira, os 3 cenários propostos tentam delinear como seria a introdução de caminhões elétricos com PaCOS a etanol, a partir de 2030. Tal data foi determinada para possibilitar o amadurecimento da tecnologia e avaliar como se daria essa introdução até 2050. A tabela 24 apresenta as estimativas de frota e vendas dos caminhões FCEV para cada um dos cenários, e suas frações em relação ao total em 2050.

Tabela 24 - Projeção de frota e de vendas de veículos pesados com PaCOS em 2050.

	BP	MP	AP
Frota Elétrica em 2050	6.409	262.841	995.927
% da frota total	0,27	11,10	42,07
Vendas de Elétricos 2050	1.476	57.740	128.322
% das vendas totais	0,98	38,30	85,12

Fonte: Elaboração própria.

Além dos 3 cenários principais também foram realizadas as projeções para o cenário MP com uma taxa de crescimento de PIB mais conservadora, como análise de sensibilidade, para a estimativa de frota. A alteração da taxa de crescimento de 2,15% para 0,36% resultou na diminuição de 12,86% da frota e de 17,62% das vendas. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 25.

Tabela 25 - Projeção de frota e de vendas de veículos considerando a taxa de crescimento alternativa para o MP.

Frota Elétrica em 2050	229.039
% da frota total	9,36
Vendas Elétrica em 2050	47.566
% das vendas totais	38,30

Fonte: Elaboração própria.

A figura 25 sintetiza os resultados das projeções de frota e de vendas para todos os cenários.

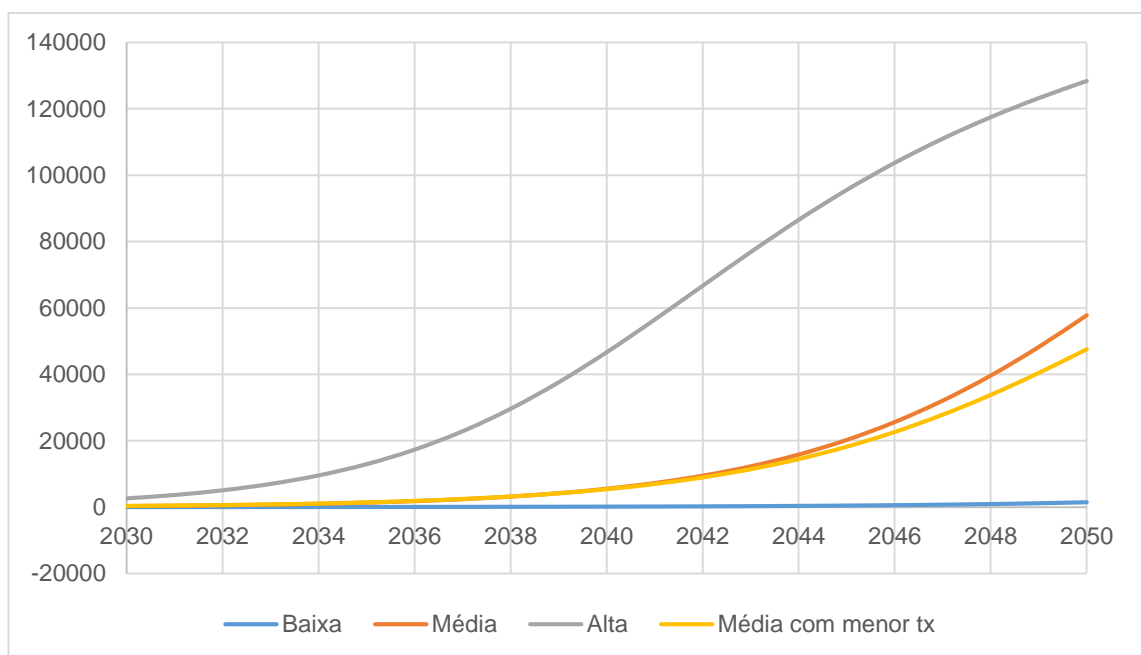


Figura 25 - Projeção de venda de caminhões FCEV para os 3 cenários.

Fonte: Elaboração própria.

A fim de comparação e estimativa do potencial de descarbonização do setor, calcularam-se as emissões de GEE em 2050 para cada um dos cenários, considerando a substituição da frota a diesel. A tabela 26 apresenta esses resultados.

Tabela 26 - Emissões de CO, NO_x, NMHC, MP, NO₂ e CO₂ para motores Diesel nos cenários propostos.

mil tonelada/ano			
BP	MP	MP (menor taxa)	AP

CO	45,56	40,61	41,26	26,46
NOx	376,41	335,53	340,91	218,63
NMHC	5,08	4,52	4,60	2,95
MP	3,54	3,16	3,21	2,06
CH4	14,16	12,63	12,83	8,23
NO2	7,08	6,31	6,41	4,11

Milhões tonelada/ano

CO2	180,73	161,10	163,69	104,98
CO2eq	183,23	163,32	165,95	106,42

Fonte: Elaboração própria.

Nessa comparação tem-se como base a referência de 183,72 MtCO₂eq, e observa-se reduções das emissões de GEE de 0,27%, 11,10%, 9,36% e 42,07% para os cenários BP, MP padrão, MP com menor taxa e AP respectivamente, sendo esta diretamente proporcional a redução da frota ICE. Em vista disso, quanto maior for a adoção da tecnologia, maior será as emissões evitadas. Destaque-se então, o potencial da tecnologia em descarbonizar o setor de transporte pesados e auxiliar o país a atingir suas metas nacionais de redução de emissão.

Por fim, estimou-se o consumo de etanol nos três cenários padrões de penetração, no cenário com taxa alternativa para o MP, e, no cenário MP com um consumo específico do caminhão com PaCOS com reformador. Os resultados encontrados estão apresentados na tabela 27. Comparando apenas a diferença do emprego do reformador ou não, é perceptível uma grande variação no consumo de combustível, observando um consumo extra de quase 3 bilhões de litros ao ano.

Tabela 27 - Consumo de etanol nos diferentes cenários.

	BP	MP			AP
		Sem reformador	Sem reformador + Menor taxa	Com reformador	
Consumo em 2050 (bilhão de l/ano)	0,26	10,74	9,36	13,46	40,70

Fonte: Elaboração própria.

Ademais, segundo os dados do 1º relatório de Acompanhamento de Safra Brasileira de Cana de Açúcar, referente a safra 2023/2024, a produção estimada para 2024 será de

33,17 bilhões de litros de etanol, de uma área total de 8410,3 mil hectares (CONAB, 2024). Por sua vez, segundo o Balanço Energético Nacional (2022), o consumo nacional de álcool etílico total em 2019, 2020 e 2021 foram, respectivamente, 34,91, 31,06 e 29,96 bilhões de litros. Sendo assim, ao considerar a capacidade atual do país de produção de etanol e as projeções deste trabalho, tanto as projeções para os cenários MP e o AP, é perceptível que atualmente o país não conseguiria absorver essa nova demanda (EPE, 2022b).

Por exemplo, comparando essas estimativas do 1º relatório com os do 4º relatório da safra 2022/2023 (CONAB, 2023), pode se considerar que há um acréscimo de 0,015 bilhões de litros por mil hectares, o que indicaria a necessidade de 649,2 mil hectares para suprir uma nova demanda de 10 bilhões de litros de etanol, considerando a mesma produtividade desse último ano.

Entretanto, segundo previsões de expansão da produção nacional e oferta de etanol para o Brasil realizadas pela EPE em 2023, tal demanda seria atendida já em meados da década de 30. Esses aumentos na produção seriam resultado de ganhos de produtividade, incentivos governamentais, novas unidades de produção, desenvolvimento do Etanol de Segunda Geração, entre outros fatores, ocasionando em emissões evitadas na faixa de 65,8 a 71,3 MtCO₂eq (EPE, 2023a). Em vista dessas previsões, o país conseguiria atender as novas demandas dos cenários MP até 2033, mas ainda necessitaria de mais investimentos para alcançar as estimativas do cenário AP.

Retomando a discussão da seção 4.4, “o papel das pilhas a combustível e do álcool”, o país se encontra em uma posição favorável para a expansão da sua capacidade produtiva de etanol. A implementação do programa RenovaBio oferece segurança para investimentos no setor, em consequência da receita adicional aos produtores (EPE, 2023a) e, o mundo atualmente busca cadeias produtivas com baixa emissão de carbono e o Brasil apresenta grande potencial devido a sua matriz energética com grande participação de renováveis e recursos naturais, atraindo investidores externos.

A título de exemplo, entre 2015 e 2022 o país liderou em investimentos internacionais no setor de energias renováveis, com um montante de US\$114,8 bilhões (UNCTAD, 2023). Ademais, além do interesse de grandes empresas internacionais no desenvolvimento de tecnologias no país, como citado na seção 6.2, grandes atores nacionais também demonstram otimismo com o setor para os próximos anos, como

demonstrou o presidente da Raízen em entrevista no começo de 2024 à revista Você S/A, onde ele afirma que a eletrificação do setor pode ser uma oportunidade para o etanol (MARTÍNEZ VARGAS, 2024).

Além disso, também é interessante pontuar que as análises de consumo de etanol foram feitas utilizando as propriedades físicas do etanol hidratado como referência, uma vez que a forma hidratada do combustível é preferível para sua aplicação direta na pilha a combustível. A principal via de reforma do etanol para o funcionamento da pilha a combustível é a Reforma a Vapor (equação 10 e 11), a qual inibe a deposição de carbono nos anodos com (XU, GUO, *et al.*, 2022). Em vista disso, as estimativas de consumo de etanol ainda podem ter sido superestimadas, já que dependendo das condições de operação de determinado sistema, a proporção etanol/água pode variar (BADWAL, GIDDEY, *et al.*, 2015).

Em relação ao material utilizado para a produção das pilhas a combustível, a tabela 28 apresenta a projeção de matéria prima para os cenários avaliados.

Tabela 28 - Matéria prima para manufatura das pilhas a combustível.

Material	Quantidade (tonelada)			
	BP	MP	MP menor taxa	AP
Níquel	0,13	5,26	4,58	19,92
Óxido de níquel	115,36	4.731,14	4.122,70	17.926,69
Pó de LaMnO3	6.274,41	257.321,34	224.229,18	975.012,53
Pó de LaCrO3	89,73	3.679,77	3.206,55	13.942,98
Pó de cloreto de zircônio	1.224,12	50.202,63	43.746,45	190.222,06
Pó de cloreto de Ítrio	179,45	7.359,55	6.413,09	27.885,96
Pó de óxido de zircônio	115,36	4.731,14	4.122,70	17.926,69
Etanol	275,59	11.302,16	9.848,68	42.824,86
Polivinilbutiral (PVB)	44,86	1.839,89	1.603,27	6.971,49

Polietilenoglicol	19,23	788,52	687,12	2.987,78
Dibutilftalato	19,23	788,52	687,12	2.987,78
Ácido nítrico	8.395,79	344.321,71	300.041,09	1.304.664,37
Cloro	999,80	41.003,20	35.730,08	155.364,61
Coque de petróleo	166,63	6.833,87	5.955,01	25.894,10
Ureia, como N	4.127,40	169.269,60	147.501,12	641.376,99

Fonte: Elaboração própria.

Apesar de todos esses componentes serem necessários no processo de manufatura da pilha a combustível, os principais elementos de cada uma das pilhas a combustível são referentes à composição *state-of-the-art*, ou seja, a composição do anodo de Ni-YSZ, do eletrólito de YSZ e catodo de LaMnO₃ e LaCrO₃. Sendo assim, focaremos nas quantidades de níquel, óxido de níquel, pó de LaMnO₃ e LaCrO₃, cloretos de zircônio e Ítrio e o óxido de zircônio para a discussão.

Não foram encontrados dados sobre a produção brasileira dos pós a base de Lantânio. No entanto, tais produtos podem ser comprados em empresas especializadas, como, por exemplo, a empresa chinesa TOB que exporta LaMnO₃ dopado com estrôncio (TOP NEW ENERGY, 2024).

Por sua vez, o Lantânio, um elemento considerado de Terras Raras (TR), é produzido a partir da mineral monazita, a qual é encontrada em diversas regiões do país. No entanto, as reservas de TRs do país ainda não são bem exploradas, sendo em 2016, o último dado de produção encontrado, sendo produzidas apenas 4.525 toneladas de monazitas, as quais foram exportadas para a China (BRASIL, 2019). Levando em consideração que a monazita apresenta uma composição mássica de 29,46% em óxido de lantânio (MARTINS, LIMA, *et al.*, 2014), o Brasil poderia no máximo, ter produzido 1.357,5 toneladas do bem mineral, bem distante de conseguir suprir a demanda projetada. Os demais componentes dos pós, Manganês (Mn) e Cromo (Cr₂O₃), apresentaram os valores de produção beneficiada de 627.735 e 1.426.058 toneladas, respectivamente, em 2021 (MEDEIROS, 2023).

De maneira similar ao Lantânio, o Ítrio também é considerado um elemento de TR, e ainda pouco explorado no país (MARTINS, LIMA, *et al.*, 2014). Também pode ser

encontrado na monazita, mas com uma distribuição mássica de 0,94% (MARTINS, LIMA, *et al.*, 2014). Portanto, levando em consideração as mesmas 4.525 toneladas de monazitas produzidas em 2016, o país poderia ter produzido em torno de 42,5 toneladas do elemento.

Em relação ao Níquel (Ni), foi produzido em 2021 a quantidade bruta de 12.448.552 toneladas e beneficiada de 342.268 toneladas (MEDEIROS, 2023). Considerando que o óxido de níquel utilizado seja o Ni(II)O, mesmo que o rendimento de uma reação de produção do material seja por volta de 10%, a produção nacional seria capaz de atender a demanda projetada.

O Brasil apresenta uma reserva lavrável do minério de zircônio estimada em 2.319 mil toneladas, correspondendo a 3,1% das reservas mundiais, e, sua produção beneficiada, do minério concentrado, atingiu 21.302 toneladas em 2016. No mesmo ano foram consumidas 31.213 toneladas do minério concentrado (BRASIL, 2019). O elemento pode ser encontrado na forma de óxido de zircônio, no minério badeleíta (BRASIL, 2019), e, levando em consideração a proporção estequiométrica do cloreto de zircônio, a capacidade produtiva do país ainda seria aquém da necessária para suprir a demanda para a produção das pilhas a combustível. Todavia, o país ainda apresenta reservas o suficiente para explorar e expandir sua capacidade produtiva.

6.5. Roadmap

A partir das análises prospectivas e resultados encontrados nesse trabalho, esta seção visa discutir as principais barreiras para se atingir a maturidade tecnológica e patamares de penetração similares aos propostos nos cenários de média/alta penetração aqui apresentados, uma vez que são os de maior impacto, e recomendar ações para superar os desafios aqui pontuados.

Assim, caso o país opte por desenvolver uma estratégia de descarbonização do setor de transporte via a utilização dos carros elétricos com pilhas a combustível do tipo PaCOS a etanol, com intuito de posicionar o Brasil como um ator importante na transição energética, são necessários esforços no desenvolvimento em todos os níveis da cadeia de valor.

Para as ações de curto prazo, será necessário enfatizar o desenvolvimento tecnológico da pilha a combustível de óxido sólido. Como analisado na seção 6.3, a pilha a combustível apresenta um TRL entre 4 e 5, indicando que o sistema e as pilhas a combustível ainda precisam de melhorias com foco em tornar a aplicação em mobilidade viável. Dessa maneira, este *roadmap* recomenda investimentos nos principais centros de pesquisas no tópico, destacando os trabalhos da COPPE e do IPEN, os quais já apresentam projetos em desenvolvimento com foco em sistemas com PaCOS para utilização em veículos, a fim de acelerar o processo de P&D.

Para esse fim, pode-se destacar, por exemplo, alguns programas do BNDES, ANP e FINEP. A ANP, conforme a Resolução ANP nº 918/2023, disponibiliza investimento em projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação, dentre outros, no tema de “Célula a Combustível” (área V, tema 1), para o desenvolvimento de protótipos ou mesmo pesquisa avançada, desenvolvida por empresas brasileiras, empresas petrolíferas ou instituições credenciadas (BRASIL, 2023h).

O BNDES também prevê o investimento através de recursos reembolsáveis, do Fundo Nacional sobre Mudança do Clima, no apoio ao “desenvolvimento tecnológico relacionados à redução de emissões de gases do efeito estufa e à adaptação às mudanças do clima e aos seus efeitos”. Dentre as modalidades, destaca-se “Logística de Transporte, Transporte Coletivo e Mobilidade Verdes”, o qual permite a solicitação de pessoas jurídicas públicas e privadas, com sede no país, para financiar o desenvolvimento tecnológico, entre outros, de caminhões elétricos e/ou movidos a biocombustíveis (BNDES, 2024b).

E por fim, a FINEP que possibilitaria o financiamento de projetos principalmente por três produtos: o FINEP Mais Inovação, que através de financiamento reembolsáveis objetiva apoiar projetos de empresas brasileiras em temas que incluem a transição energética e descarbonização (FINEP, 2024b); o Mais Inovação Brasil, que prevê subvenção econômica e linhas de créditos para empresas de todos os portes em cooperação com Institutos de Ciência e Tecnologia (ICT) através de chamadas públicas (BRASIL, 2024b, FINEP, 2024c); e o Apoio Direto à Inovação, que através de financiamento reembolsáveis financia atividades inovadoras de empresas brasileiras em projetos com elevado grau de inovação e/ou produtos e processos inovadores (FINEP, 2024a).

Desses programas citados, recomenda-se o programa da ANP para projetos de P&DI ainda em estágio de validação de componentes e sistemas. Os demais programas de financiamento necessitam da colaboração com empresas, ou pelo menos um produto/modelo de negócio finalizado, sendo então recomendável para projetos mais avançados, mais próximos de um TRL 5 e com protótipos melhor estruturados, como no caso da parceria INPEN e Nissan.

Em paralelo ao desenvolvimento tecnológico, também é necessário abordar a questão de combustível e matéria prima, como brevemente citado. Segundo as previsões de crescimento da capacidade de produção nacional de etanol da EPE (2023b), até meados da década de 2030, o país já apresentaria capacidade superior àquela demandada em 2050, nos cenários propostos, não necessitando de importações para suprir a quota. O excedente da produção de etanol, inclusive, poderia encontrar escoamento no mercado internacional, diante das previsões de crescimento de demanda internacional por biocombustíveis líquidos (MERCURE, PAIM, *et al.*, 2019), assim como na indústria petroquímica.

Tais previsões se basearam não apenas em cenários internacionais mais favoráveis, como o baixo preço do açúcar e um etanol mais competitivo frente à gasolina, mas também na permanência de políticas de incentivos, como as diferenciações na CIDE, no PIS/COFINS e no ICMS, incidentes sobre o etanol e a gasolina em alguns estados, assim como a disponibilização de linhas de financiamento para novos empreendimentos no setor (EPE, 2023a). Dessa maneira, é recomendável a expansão dessas isenções fiscais, linhas de créditos e de programas como o RenovaBio e Combustível do Futuro, os quais possibilitam assegurar novos investimento do setor privado.

De maneira similar, em relação a extração de minérios de TR, é necessário o mapeamento e implementação de projetos para extração dos recursos. É importante lembrar que os elementos de TR não são importantes apenas para baterias e pilhas a combustível, mas também para laptops, carros, geradores eólicos, catalisadores para refino de petróleo, entre outros (BRASIL, 2019, MARTINS, LIMA, *et al.*, 2014). Tais materiais são peça chave para a transição energética e por isso a escala de produção e consumo global vem aumentando vertiginosamente nas últimas décadas (IEA, 2021).

Em 2022 a produção global de TRs foi de 300 mil toneladas, sendo a China a maior produtora, com 70%, seguido dos EUA, 14%, e Austrália, com 4%. A China também

concentra a maior parte da capacidade global de processamento dos minerais, com 85% (LIU, Shuang Liang, FAN, *et al.*, 2023). Por sua vez, se tratando das reservas mundiais dos elementos, a China segue liderando, com cerca de 44 milhões de toneladas, (42,3%), seguida do Vietnã com 22 milhões (18,2%), Brasil, com reservas estimadas em 21 milhões (18,2%), e Rússia 18 milhões (14,8%) (BRASIL, 2019).

Atualmente, a produção e consumo de elementos de TR no Brasil é praticamente desprezível (BRASIL, 2019), o que coloca o país em uma posição vulnerável, não só pensando na estratégia de implementação da PaCOS, discutida nesse trabalho, mas também em um contexto geral, se tratando da transição energética e suas NDCs. Assim como ocorre em outras áreas industriais, caso o país busque desenvolver os setores que utilizam esse tipo de material, o Brasil estaria agravando sua dependência de importações e a vulnerabilidade à fatores referentes ao mercado internacional.

Todavia, segundo levantamentos da Agência Nacional de Mineração (ANM), o Brasil possui a terceira maior reserva de TR do mundo, de aproximadamente 21 milhões de toneladas (BRASIL, 2023b), a qual se bem desenvolvida, poderia diminuir a dependência brasileira da importação dos insumo e produtos manufaturados, assim como sua vulnerabilidade a eventos geopolíticos que poderiam afetar a cadeia de valor dos minérios, e burlar as taxas de exportações aplicadas por alguns países, como ocorre na China (MARTINS, LIMA, *et al.*, 2014).

De fato, algumas ações já estão em andamento. Por exemplo, frente a importância de determinados minerais, o MME definiu, através da Resolução nº 2/2021 pelo Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos (CTAPME) que 28 minerais serão classificados como minerais estratégicos para o Brasil. Dentre esses, e relevantes para esse estudo, pode-se citar: Lítio, Cobalto, Níquel, Manganês, Grafita, Cobalto e minérios de Terras Raras (BRASIL, 2023c).

Nos últimos anos o MME vem buscando conhecer mais a fundo o potencial produtivo, características ambientais e socioeconômicas de novos projetos de mineração de TR, a fim de expandir a produção nacional. Já existem alguns estudos de viabilidade de novos empreendimentos, como os de Araxá (MG), Morro do Ferro (MG), Serra Verde (GO), Pitinga (AM), Foxfire (BA) e Energy Fuels (BA), e alguns outros projetos em fases mais avançadas, como o Projeto Caldeira, em Poços de Caldas, com previsão de R\$1,5 bilhões de investimentos nos próximos três anos (BRASIL, 2023b).

Ademais, em 2024 o MME anunciou o Programa Mineração Para Energia Limpa, o qual objetiva “desenvolver a indústria de transformação mineral e fortalecermos o conhecimento geológico e a pesquisa mineral” (AGÊNCIA GOV, 2024, SGB, 2024). Esse programa terá como um dos focos a transição energética, buscando o desenvolvimento da cadeia produtiva dos minerais estratégicos, investindo em pesquisa e extração (CHIAPPINI, 2023).

Em novos desdobramentos, a fim de impulsionar os esforços brasileiros e reposicionar o país na corrida para transição energética, o BNDES e o MME anunciaram o Fundo de Investimento em Participações (FIP) Minerais Estratégicos. O fundo promete investir em projetos de minerais considerados estratégicos para a transição energética, descarbonização e produção sustentável de alimentos. Ao todo o Banco espera movimentar R\$ 1 bilhão, sendo R\$ 250 milhões investidos diretamente pela entidade (BNDES, 2024a). O fundo atuará em paralelo com os investimentos não-reembolsáveis previstos pelo Plano de Ação do programa Nova Indústria Brasil, o qual busca estimular a produção de minerais estratégicos e materiais avançados no país (BRASIL, 2024b).

Ademais, apesar de não ser o foco desse trabalho, é importante incluir nessa discussão também a questão de produção de baterias de última geração, uma vez que os veículos com pilhas a combustível também utilizarão baterias. Os principais elementos componentes destas são Lítio, Cobalto, Níquel, Manganês e Grafita (IEA, 2021), e além do Níquel e Manganês que foram citados na secção anterior, os demais precisam ser melhor abordados. A tabela 29 sumariza as principais informações desses elementos.

Tabela 29 - Dados de produção e reservas de Cobalto, Lítio e Grafita.

	Cobalto	Lítio	Grafita (Natural)
Produção Nacional (t/ano)	-	4.900 ⁶	73.000 ⁶
Reservas Nacionais (t)	70.000 ¹	1.230.000 ⁵ /390.000 ⁶	74.000.000 ⁶
Reservas Globais (t)	11.000.000 ⁶	91.000.000 ⁶	280.000.000 ⁶
Principais Reservas	República Democrática do Congo (54,5%) ^{2,6}	Argentina e Chile (aprox. 46%) ⁶	China e Brasil (54,3%) ⁶

	República		
Principal produtor	Democrática do Congo (54%) ^{2,6}	Austrália (52,2%) ⁴	China (77%) ⁶
Capacidade de Processamento e Refino	China (48%) ²	China (90%) ³	-

Nota: As reservas são reservas medidas e indicadas, o que seria equivalente a reservas 2P.

Fonte: Elaboração própria a partir de ¹ (AGÊNCIA GOV, 2023), ² (BRASIL, 2019), ³ (CHIAPPINI, 2024), ⁴ (CHIAPPINI, 2022), ⁵ (BRASIL, 2023a) e ⁶ (USGS, 2024).

A extração de Cobalto no Brasil está paralisada desde 2017, devido à queda de preços do Níquel no período, o que inviabilizou a continuidade de sua extração uma vez que o cobalto é um subproduto de minas de níquel (BRASIL, 2019). Em relação à Grafita, o Brasil apresenta a segunda maior reserva do mundo, porém a produção nacional ainda é aquém do seu potencial (USGS, 2024). Por fim, o Lítio brasileiro, apesar de ainda não ser muito explorado, apresenta um crescente interesse nos últimos anos, com novos projetos de mineração (CHIAPPINI, 2022), incluindo projetos pioneiros, como o “Lítio Verde” da empresa *Sigma Lithium* (CHIAPPINI, 2024).

Por fim, apesar de já existirem projetos de mapeamento que visam melhor conhecer as reservas nacionais, poucos prazos ainda foram de fato definidos para ações mais contundentes sobre a cadeia de valor desses minerais estratégicos. Sendo assim, é necessária a ponderação de qual rota o país optará por seguir ao estruturar a cadeia.

Uma opção, por exemplo, seriam parcerias internacionais com países como a China, através de acordos de longo prazo, que possibilitem condições mais favoráveis às praticadas no mercado internacional, o qual está mais suscetível a questões geopolíticas e às cotas de exportação determinadas por estados. Tais parcerias poderiam se estender além de acordos comerciais de matéria prima, mas incluir também o investimento no desenvolvimento conjunto da tecnologia de PaCOS, podendo destacar nesse caso, países como os EUA e Índia, grandes produtores de etanol, ou mesmo Japão e Coréia, os quais apresentam grande número de patentes de PaCOS.

Outra via seria fechar a cadeia de valor nacional e focar no desenvolvimento e exploração das reservas nacionais, necessitando assim, além da conclusão do

mapeamento proposta pelas ações já em andamento, a determinação de empreendimentos de extração e beneficiamento dos minérios. Nesse último caso, uma possível via poderia ser permitir a importação de componentes com tributações reduzidas, frente a maiores taxas para sistemas completos de pilhas a combustível, o que incentivaria a indústria de manufatura nacional, mas sem colocar como condicionante o desenvolvimento dessa cadeia de matéria prima. Independente da escolha de como produzir esses componentes básicos, é importante que o país tenha uma participação ativa no desenvolvimento da tecnologia e cadeia de valor, a fim de garantir sua soberania nacional.

Por outro lado, também é necessário o apoio da esfera privada. Como destacado nas sessões 6.1 e 6.2, diversas empresas do setor de transporte e de energia investiram no desenvolvimento da pilha a combustível nos últimos anos, demonstrando assim o interesse desses atores no desenvolvimento de veículos desse tipo, ou mesmo a utilização alternativa do combustível. Sendo assim, não só é necessário a busca por mais parcerias entre os centros de pesquisa e esses atores, como também é necessário o desenvolvimento de um ambiente regulatório favorável, como já é citado no Plano Nacional de Hidrogênio (PNH2), que priorize investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, além de estabelecer políticas públicas como subsídios e incentivos fiscais.

Como tais iniciativas necessitam de grande investimento inicial, e países em desenvolvimento como o Brasil, carecem de estruturas financeiras maduras para financiá-los, uma ferramenta para fomentar essas parcerias, por exemplo, seria o financiamento misto, o qual combina fundos públicos e privados. Tal ferramenta de financiamento consiste na utilização de fundos públicos em projetos arriscados, como no caso no desenvolvimento de uma nova tecnologia, a fim de alterar o perfil de risco financeiro, atraindo investidores privados, mesmo com relativos pequenos investimentos públicos (HUSSAIN, Mustafa Zakir, 2013).

O governo federal anunciou ao fim de 2023, o programa Mobilidade Verde e Inovação – MOVER, o qual objetiva incentivar o desenvolvimento tecnológico e descarbonização do setor de transporte brasileiro. O programa incentiva a realocação de plantas industriais de outros países no Brasil, através de créditos para a reinstalação e abatimentos no IRPJ e na CSLL, e, cobrará determinadas alíquotas de Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) dependendo das características do veículo, a partir de um sistema de recompensa/penalização, dependendo de indicadores de sustentabilidade do veículo. O MOVER também concederá incentivos fiscais às empresas, em proporção aos

investimentos em P&D, assim como, a redução de impostos de importação (de produtos sem similar nacional) contanto que haja um investimento das empresas em P&D (AGÊNCIA SENADO, 2023, BRASIL, 2023e). Este programa poderia ajudar a viabilizar projetos de empresas que já investem na pesquisa dos veículos com pilhas a combustível no país e na arrecadação de investimentos para avançar com o desenvolvimento tecnológico das pilhas a combustível.

Além disso, em vista dos custos elevados de veículos com pilhas a combustível, em primeiro momento é interessante a disponibilidade de incentivos para atrair *early-adopters*, os primeiros consumidores da tecnologia nessa fase que concentra os maiores riscos no desenvolvimento de projetos com uma nova tecnologia. Recomenda-se por exemplo, a isenção de impostos, como IPVA e ICMS, e no licenciamento dos caminhões, assim como isenções fiscais e tributárias incidentes na compra de matérias prima e fabricantes.

A disponibilização de subsídios e linhas de financiamento por instituições como a FINEP e BNDES, com foco na aquisição de equipamento/infraestrutura de produção, poderia permitir também o desenvolvimento da tecnologia e adoção desses novos veículos por empreendimentos menores. Pode-se citar nesse caso, as já comentadas chamadas públicas disponibilizadas pela FINEP em 2024 para projetos de hidrogênio, que permitem o custeamento de atividades como obras e instalações, equipamento e pagamento de pessoal, e poderiam incluir investimentos em pilhas a combustível (FINEP, 2024c).

Em paralelo, e apesar de não ser um instrumento financeiro, uma maneira de angariar confiança de consumidores e investidores seria a substituição da frota governamental por veículos com essa tecnologia de pilhas a combustível. Tal medida não só demonstraria confiança com os veículos desenvolvidos, mas também protegeria órgãos públicos de problemas de desabastecimentos influenciados por eventos geopolíticos.

Outro mecanismo que poderá ajudar na difusão do uso desses veículos com pilhas a combustível seria a consolidação de um mercado de crédito de carbono nacional. Tal mecanismo poderia contribuir para a equiparação de custos da tecnologia frente às alternativas, promovendo um aumento de competitividade dos veículos, assim como a angariação de recursos para maiores investimentos no setor, ajudando na expansão do mercado e escalonamento das operações.

Capítulo 7

Considerações finais

A necessidade de adaptação de sistemas frente a emergência climática implica em diferentes desafios de cunho energético, econômico e industrial. Neste trabalho, destacou-se o setor de transporte como um setor energético e carbono-intensivo e avaliou-se uma possível alternativa de descarbonização do setor de transporte, com foco na eletrificação de veículos pesados de transporte de carga.

A tecnologia avaliada foi a das pilhas a combustível de sólido óxido (*solid oxide fuel cell*, SOFC) alimentadas com o biocombustível etanol. Para tal, elaboraram-se diferentes cenários de penetração tecnológica e avaliaram-se o consumo de combustível, redução de emissões de GEE e consumo de materiais para a construção das pilhas a combustível. Em paralelo, também se realizou o levantamento bibliográfico sobre a maturidade tecnológica e comercial das pilhas a combustível, seu funcionamento, aplicações, mercado global, investimentos e pesquisas nacionais. E, por fim, propôs-se um *roadmap*, uma análise que busca recomendar como os desafios identificados poderiam ser superados.

Atualmente as PaCOS apresentam como principais componentes os eletrólitos cerâmicos de YSZ, os anodos de *cermet* de níquel com YSZ e, catodos de perovskita LSM, os quais apesar de apresentarem alta ação catalítica, também necessitam operar em temperaturas superiores a 800°C, e são muito suscetíveis à deposição de carbono no anodo. Composições alternativas, como a utilização de eletrólitos compostos, anodos com cerâmicas a base de cério ou mesmo catodos do tipo MIEC, apesar de apresentarem potencial para superar os problemas dos componentes associados à operação a menores temperaturas e com etanol, ainda estão em estágios de prontidão tecnológica mais baixos, ou, ainda, buscam a sua validação analítica e caracterização das provas de conceito.

O levantamento de patentes apontou que o interesse no desenvolvimento e a aplicação das pilhas a combustível se concentra em empresas dos setores de transporte, energia e biotecnologia. Globalmente, nos últimos 10 anos o número geral de publicações sobre PaCOS se manteve constante, todavia também foi perceptível a diminuição nas patentes das PaCOS quando associadas ao etanol. Ademais, em relação ao tipo de

tecnologia patenteada, há uma predominância de diferentes arranjos de sistemas e patentes de composição material das pilhas a combustível, evidenciando que o estado atual de desenvolvimento da tecnologia se encontra na validação de sistemas e comprovação da integração e funcionalidade de seus componentes.

Em relação ao desenvolvimento da tecnologia no Brasil e investimentos na área, desde os primeiros eventos no setor em 2003, com a entrada do país no IPHE, a tecnologia de pilhas a combustível esteve sobretudo associada à cadeia de valor do hidrogênio. Entretanto, houve menção e recomendação de desenvolvimento das PaCOS a etanol em específico, em estudos derivativos do programa Combustível do Futuro em 2022, e no relatório de Avaliação de Necessidades Tecnológicas publicada pelo MCTI em 2021.

Este trabalho também identificou três principais centros de pesquisa no setor, destacando o LabH2 da COPPE/UFRJ, a UNICAMP com os grupos de pesquisas do LH2 e BRE, e o IPEN. Foi possível identificar o interesse e investimento nesses centros de pesquisa, de empresas como Shell, Toyota, Volkswagen, Stellantis, Ford, Bosch, Mercedes-Benz e a Nissan, a qual desenvolve no IPEN o protótipo e-NV200, protótipo de veículo de PaCOS a etanol. Ademais, há o destaque para as universidades UENF, UFBA e UFRG, que apresentaram patentes sobre componentes e/ou processos de produção relacionados a PaCOS.

Apesar do estado insipiente da tecnologia para mobilidade, as pilhas a combustível também encontram aplicações para a geração estacionária de energia elétrica, mas ainda encontram barreiras para sua expansão, devido aos seus altos custos e a degradação de seus componentes.

O estudo desenvolvido neste trabalho apontou que a tecnologia se caracteriza por um TRL em transição do estágio 4 para 5, porquanto ainda não apresenta uma quantidade de testes e dados de operação suficientes para garantir sua consolidação e ainda carece de aperfeiçoamentos para superar suas barreiras operacionais e altos custos de manufatura.

Em relação à simulação de cenários, constatou-se que as vendas de veículos pesados com PaCOS poderiam alcançar cerca de 90% das vendas totais em aproximadamente 25 anos no cenário AP, enquanto, para os cenários MP e BP, esse patamar seria alcançado em cerca de 40 e 60 anos, respectivamente. Para tal, foi considerado o ano de 2030 como marco introdutório da tecnologia no mercado brasileiro, em vista da necessidade do amadurecimento tecnológico dos equipamentos. Também foram realizadas análises de

sensibilidade que atrasaram até 2040 a introdução da tecnologia, considerando potenciais dificuldades para seu desenvolvimento e ganho de escala. Todavia, apesar da constatação da falta de maturidade tecnológica, também foram estimadas reduções potenciais de até 40% das emissões de GEE e consumo de diesel, assim como o potencial do fortalecimento do setor sucroenergético nacional, diante da nova demanda prevista, que necessitaria de uma capacidade adicional de produção de até 40 bilhões de litro/ano de etanol.

Assim, caso o país opte por desenvolver uma estratégia de descarbonização do setor de transporte de carga de longa distância, rodoviário, através de veículos com PaCOS a etanol, destacar que, primeiramente, há a necessidade da parceria dos centros de pesquisa com os principais atores do setor de transporte/energia para o aperfeiçoamento da tecnologia. Atualmente, as pilhas a combustível ainda operam a altas temperaturas e sofrem com a deposição de carbono nos eletrodos, quando alimentadas com etanol, o que reduz seu tempo de vida. Ademais, há a necessidade de estruturar a cadeia de valor das pilhas a combustível. Um dos seus principais componentes são minerais associados aos elementos das Terras Raras, para as quais o país ainda não apresenta produção capaz de absorver a nova demanda potencial. Dessa maneira, para evitar a dependência de importação dessa matéria prima e dos sistemas, é necessário desenvolver uma estrutura nacional de processamento dos recursos, assim como uma indústria de manufatura no país.

A abordagem escolhida para esse trabalho foi de caráter prospectivo, cujas incertezas derivam da ainda reduzida maturidade tecnológica da pilha a combustível e das hipóteses de curvas de penetração da nova tecnologia veicular. Assim, sugerem-se trabalhos adicionais no tema.

Primeiramente, interessa investigar os impactos associados a utilização das PaCOS. Nesse trabalho foram apontadas as dificuldades para desenvolvimento da cadeia de valor das pilhas a combustível relacionadas a minerais estratégicos. Apesar do potencial brasileiro de produção destes minerais ter sido abordado, não foram contabilizados os impactos sociais e ambientais, por exemplo, associados à exploração mineral e muito menos à capacidade econômica e técnica do país de extrair e beneficiar a matéria prima.

Ainda se faz necessária a estimativa de custos e competitividade dos sistemas, a fim de apontar tal estratégia como viável para o cenário brasileiro. Por exemplo, durante a revisão bibliográfica identificou-se que diversos países identificam, na cadeia de

hidrogênio de baixo carbono, a solução para a descarbonização de setores de difícil abatimento. Dessa maneira, seria interessante estimar e comparar os impactos e custos associados à implementação dessa cadeia de valor, frente a cadeia proposta neste trabalho.

Por fim, também é sugerido o estudo de abordagens similares à apresentada aqui, como a aplicação de outras pilhas a combustível. Pode-se citar como exemplo a utilização de PaCMTP, associadas à produção de hidrogênio a partir de etanol em reformadores externos, como é a proposta do piloto em teste na USP, a fim de contornar as dificuldades associadas com o desenvolvimento tecnológico das PaCOS, mas ainda expandindo o uso do etanol. Ademais, em vista da versatilidade de combustível e alta eficiência da pilha a combustível, também é interessante incluir na análise os ônibus, pela mesma lógica utilizada aqui para veículos de carga, e as embarcações marítimas, as quais são críticas para a descarbonização do comércio global.

Por fim, podem-se propor estudos piloto de avaliação de projetos de veículos híbridos a pilha a combustível, bateria e mesmo com uso de motores de combustão interna.

A título de conclusão, a tecnologia apresentou características promissoras para descarbonização do setor de transporte, e, apesar do baixo nível de prontidão tecnológica, o investimento no desenvolvimento da cadeia de valor e esforços na P&D das pilhas a combustível, podem beneficiar a balança comercial, auxiliar no alcance das metas nacionais determinadas em acordos internacionais e garantir uma nova oportunidade de mercado para o setor sucroalcooleiro.

Referências bibliográficas

- ABDALLA, A. M., HOSSAIN, S., AZAD, A. T., *et al.* "Nanomaterials for solid oxide fuel cells: A review", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. August 2017, p. 353–368, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.046. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.046>.
- ABH2. **Sobre a ABH2**. 2024. Disponível em: <https://abh2.org/sobre>.
- ACAR, C., BESKESE, A., TEMUR, G. T. "Comparative fuel cell sustainability assessment with a novel approach", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 1, p. 575–594, 2022. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.034. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.034>.
- AEPET. "Europa, dividida, aprova banir automóveis a combustíveis fósseis". **Associação dos Engenheiros da Petrobrás (AEPET)**, 2023. Disponível em: <https://aepet.org.br/noticia/europa-dividida-aprova-banir-automoveis-a-combustiveis-fosseis/>.
- AFONSO, F., SOHST, M., DIOGO, C. M. A., *et al.* "Strategies towards a more sustainable aviation: A systematic review", **Progress in Aerospace Sciences**, v. 137, n. January, p. 100878, 2023. DOI: 10.1016/j.paerosci.2022.100878. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2022.100878>.
- AFROZE, S., REZA, M. S., AMIN, M. R., *et al.* "Progress in nanomaterials fabrication and their prospects in artificial intelligence towards solid oxide fuel cells: A review", **International Journal of Hydrogen Energy**, n. xxxx, 2022. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.335. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.335>.
- AGÊNCIA CNT. **Perfil dos Caminhoneiros: idade média da frota de caminhões passa dos 15 anos**. 2019. Confederação Nacional do Transporte (CNT). Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/idade-media-frota-caminhoes-passa-15-anos-cnt-perfil-caminhoneiros>.
- AGÊNCIA GOV. **Da turbina do avião ao motor elétrico, cobalto é mais um mineral estratégico para o Brasil**. 2023. Empresa Brasileira de Comunicação (EBC). Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202311/da-turbina-do-aviao-ao-motor-eletrico-cobalto-e-mais-um-mineral-estrategico-para-o-brasil>.

AGÊNCIA GOV. **MME anuncia programa Mineração para Energia Limpa**. 2024. Empresa Brasileira de Comunicação (EBC). Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202402/alexandre-silveira-anuncia-o-programa-mineracao-para-energia-limpa-em-seminario-sobre-mineracao-sustentavel-e-transicao-energetica>.

AGÊNCIA SENADO. **Medida Provisória cria o Programa Mover para descarbonizar veículos brasileiros**. 2023. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/01/02/medida-provisoria-cria-o-programa-mover-para-descarbonizar-veiculos-brasileiros>.

AMINUDIN, M. A., KAMARUDIN, S. K., LIM, B. H., *et al.* "An overview: Current progress on hydrogen fuel cell vehicles", **International Journal of Hydrogen Energy**, 2022. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.156. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.156>.

ANDERSSON, M., FROITZHEIM, J. **Technology review – Solid oxide cells 2019:601**. **Energiforsk**. [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <https://energiforsk.se/media/26740/technology-review-solid-oxide-cells-2019-energiforskrappport-2019-601.pdf>.

ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2023**. . [S.l: s.n.], 2023.

ANFAVEA. **O caminho da descarbonização do setor automotivo no Brasil**. . [S.l: s.n.], 2021. Disponível em: <https://anfavea.com.br/docs/apresentacoes/APRESENTAÇÃO-ANFAVEA-E-BCG.pdf>.

ANL. **2019 Fuel cell technologies market report**. Argonne National Laboratory (ANL), U.S. Department of Energy (DOE). [S.l: s.n.], 2020. Disponível em: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/2011_market_report.pdf.

ANSELMA, P. G., BELINGARDI, G. "Fuel cell electrified propulsion systems for long-haul heavy-duty trucks: present and future cost-oriented sizing", **Applied Energy**, v. 321, n. May, p. 119354, 2022. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119354. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119354>.

AUTOMOTIVE NEWS EUROPE. "Daimler will end development of fuel cell cars". **Automotive News Europe**, 2020. Disponível em: <https://europe.autonews.com/automakers/daimler-will-end-development-fuel-cell-cars>.

BADWAL, S. P. S., GIDDEY, S., KULKARNI, A., *et al.* "Direct ethanol fuel cells for transport and stationary applications - A comprehensive review", **Applied Energy**, v. 145, p. 80–

103, 2015. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.02.002. .

BALCOMBE, P., BRIERLEY, J., LEWIS, C., *et al.* "How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies", **Energy Conversion and Management**, v. 182, n. January, p. 72–88, 2019. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.080. .

BARBOSA, P. I., SZKLO, A., GURGEL, A. "Sugarcane ethanol companies in Brazil: Growth challenges and strategy perspectives using Delphi and SWOT-AHP methods", **Biomass and Bioenergy**, v. 158, n. September 2021, p. 106368, 2022. DOI: 10.1016/j.biombioe.2022.106368. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106368>.

BATTELLE. **Manufacturing Cost Analysis of 1, 100 and 25 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications.** Battelle Memorial Institute. [S.l: s.n.], 2016.

BATTELLE. **MANUFACTURING COST ANALYSIS OF 1 KW AND 5 KW SOLID OXIDE FUEL CELL (SOFC) FOR AUXILLIARY POWER APPLICATIONS.** Battelle Memorial Institute. [S.l: s.n.], 2014.

BKOUR, Q., CHE, F., LEE, K. M., *et al.* "Enhancing the partial oxidation of gasoline with Mo-doped Ni catalysts for SOFC applications: An integrated experimental and DFT study", **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 266, n. January, 2020. DOI: 10.1016/j.apcatb.2020.118626. .

BMW GROUP. "BMW Group brings hydrogen cars to the road: BMW iX5 Hydrogen pilot fleet launches". **BMW Group**, 2023. Disponível em: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0408839EN/bmw-group-brings-hydrogen-cars-to-the-road:-bmw-ix5-hydrogen-pilot-fleet-launches?language=en>.

BNDES. **BNDES e MME lançam fundo de R\$ 1 bi para investimentos em projetos de minerais estratégicos para a transição energética.** 2024a. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-e-mme-lancam-fundo-de-1-bilhado-de-reais-para-investimentos-em-projetos-de-minerais-estrategicos-para-a-transicao-energetica>.

BNDES. **Fundo Clima.** 2024b. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/fundo-clima>.

BNDES. **Painel NDC - nossa contribuição para as metas de redução de emissões do Brasil.**

2024c. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/desenvolvimento-sustentavel/resultados/emissoes-evitadas#:~:text=A NDC brasileira%2C atualizada em,relação às emissões de 2005.>

BOLDRIN, P., BRANDON, N. P. "Progress and outlook for solid oxide fuel cells for transportation applications", **Nature Catalysis**, v. 2, n. 7, p. 571–577, 2019. DOI: 10.1038/s41929-019-0310-y. .

BORBA, B. S. M. C., LUCENA, A. F. P., CUNHA, B. S. L., *et al.* "Diesel imports dependence in Brazil: A demand decomposition analysis", **Energy Strategy Reviews**, v. 18, p. 63–72, 2017. DOI: 10.1016/j.esr.2017.09.006. .

BRASIL. **Bases de patentes online**. 2020a. Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/assuntos/informacao/bases-de-patentes-online>.

BRASIL. **Brasil exporta a primeira remessa de lítio verde**. 2023a. Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-exporta-a-primeira-remessa-de-litio-verde>.

BRASIL. **Brasil pode se tornar um dos cinco maiores produtores de terras raras do mundo nos próximos anos**. 2023b. Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-pode-se-tornar-um-dos-cinco-maiores-produtores-de-terras-raras-do-mundo-nos-proximos-anos>.

BRASIL. **Conheça os minerais estratégicos e como eles fazem parte do seu dia a dia**. 2023c. Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/conheca-os-minerais-estrategicos-e-como-eles-fazem-parte-do-seu-dia-a-dia>.

BRASIL. **Dados Estatísticos**. 2024a. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos>.

BRASIL. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil - 6º Edição**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). [S.l: s.n.], 2022.

BRASIL. **Frota de Veículos – 2022**. 2023d. Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN). Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2022>.

BRASIL. **INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR**

VEÍCULOS AUTOMOTORES RODOVIÁRIOS - 2013. Ministério do Meio Ambiente (MMA). [S.l: s.n.], 2013.

BRASIL. **Mover: Programa de Mobilidade Verde é lançado.** 2023e. Planalto. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/12/mover-novo-programa-amplia-acoes-para-mobilidade-verde-e-descarbonizacao>.

BRASIL. **Plano de Ação para a Neindustrialização 2024-2026. Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial (CNDI), Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços Presidente (MDIC).** [S.l: s.n.], 2024b.

BRASIL. **Plano de Trabalho Trienal 2023-2025. Ministério de Minas e Energia (MME).** [S.l: s.n.], 2023f.

BRASIL. **PNH2 - Programa Nacional do Hidrogênio: Proposta de diretrizes. Ministério de Minas e Energia (MME).** [S.l: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrognioRelatriodiretrizes.pdf>.

BRASIL. **Programa Combustível do Futuro.** 2023g. Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro>.

BRASIL. **RenovaBio.** 2020b. Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio%3E>.

BRASIL. **Resolução ANP Nº 918, de 10 de março de 2023 - DOU de 14/03/2023.** 2023h. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-918-2023-regulamenta-o-cumprimento-da-obrigacao-de-investimentos-decorrente-da-clausula-de-pesquisa-desenvolvimento-e-inovacao-dos-contratos-para-exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas-natural?origin=instituica>.

BRASIL. **Sumário Mineral - 2017. Agência Nacional de Mineração (ANM).** [S.l: s.n.], 2019.

BRASIL. **Transporte Rodoviário de Cargas - TRC.** 2024c. Ministério do Transporte. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transporte-terrestre/transporte-rodoviario-de-cargas>.

BRE. **Brazilian Renewable Energies: Quem somos.** 2023. Brazilian Renewable Energies (BRE). Disponível em: <https://www.brenergies.org/sobre>.

CAMACHO, M. de las N., JURBURG, D., TANCO, M. "Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: Review of main research topics", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n.

68, p. 29505–29525, 2022. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.271. .

CARDOSO, F. de S. **Elaboração de Roadmaps Tecnológicos da Produção de Biogás a partir de Palha e Vinhaça**. 2017. 328 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

CHANG, H., CHEN, H., YANG, G., *et al.* "Enhanced coking resistance of a Ni cermet anode by a chromates protective layer", **Journal of Energy Chemistry**, v. 37, p. 117–125, 2019. DOI: 10.1016/j.jechem.2018.12.007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2018.12.007>.

CHEN, W. **Mobile applications: Cars, trucks, locomotives, marine vehicles, and aircraft**. [S.l.], Elsevier Inc., 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-815253-9.00012-4>.

CHIAPPINI, Gabriel. "ENTREVISTA: Governo vai lançar plano para agilizar exploração de minerais estratégicos". **Agência epbr**, 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/governo-vai-lancar-plano-para-agilizar-exploracao-de-minerais-estrategicos/>.

CHIAPPINI, Gabriel. "Montadoras disputam lítio no Brasil; entenda o que está em jogo". **Agência epbr**, 2024. Disponível em: <https://epbr.com.br/montadoras-disputam-litio-no-brasil-entenda-o-que-esta-em-jogo-na-venda-da-sigma-lithium/>.

CHIAPPINI, Gabriel. "Opep do Lítio? América Latina se movimenta por mineral crítico para a transição". **Agência epbr**, 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/opep-do-litio-america-latina-se-movimenta-por-mineral-critico-para-a-transicao/>.

CHUM, H. **Proposta para Progama Brasileiro de Células a Combustível**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). [S.l: s.n.], 2002.

CIGOLOTTI, V., GENOVESE, M. **2021 Tracking Market Trends Stationary Fuel Cell Applications: Tracking Market Trends**. . [S.l: s.n.], 2021a.

CIGOLOTTI, V., GENOVESE, M. **STATIONARY FUEL CELL APPLICATIONS: CURRENT AND FUTURE TECHNOLOGIES - COSTS, PERFORMANCES, AND POTENTIAL**. **Stationary Fuel Cells**. [S.l: s.n.], 2021b.

CNT. **Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas – 2022**. 2023. Confederação Nacional do Transporte (CNT). Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/Inicial>.

COLLIE, Scout. "Audi writes off hydrogen for cars and SUVs". **CarExpert**, 2021. Disponível em: <https://www.carexpert.com.au/car-news/audi-writes-off-hydrogen-for-cars-and-suvs>.

CONAB. **Acompanhamento Brasileira de Cana-de-açúcar Safra 2023/2024 - 1º**

levantamento. CONAB. [S.l: s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana de Açúcar / Safra 2022/23 - 4º Levantamento.** CONAB. [S.l: s.n.], 2023.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira - Cana de açúcar / Safra 2021/2022 4º Levantamento.** Companhia Nacional de Abastecimento – Conab. [S.l: s.n.], 2022.

COPPE/UFRJ. **Ônibus elétrico a etanol é apresentado em Maricá.** 2022a. COPPE/UFRJ. Disponível em: <https://coppe.ufrj.br/planeta-coppe/onibus-eletrico-a-etanol-e-apresentado-em-marica/#:~:text=A Coppe%20UFRJ e a,cidade em fase de testes>.

COPPE/UFRJ. **Ônibus elétrico a etanol será apresentado em Maricá onde circulará em fase de testes.** 2022b. COPPE/UFRJ. Disponível em: <https://coppe.ufrj.br/planeta-coppe/onibus-eletrico-a-etanol-sera-apresentado-em-marica-onde-circulara-em-fase-de-testes/>.

DA SILVA, A. A. A., BION, N., EPRON, F., *et al.* "Effect of the type of ceria dopant on the performance of Ni/CeO₂ SOFC anode for ethanol internal reforming", **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 206, p. 626–641, 2017. DOI: 10.1016/j.apcatb.2017.01.069. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.01.069>.

DA SILVA, A. A. A., STEIL, M. C., TABUTI, F. N., *et al.* "The role of the ceria dopant on Ni / doped-ceria anodic layer cermets for direct ethanol solid oxide fuel cell", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 5, p. 4309–4328, 2021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.155. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.155>.

DAY, Paul. "Hydrogen fuel cells seek transport niches EVs can't reach". **Reuters**, 2022. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/energy/hydrogen-fuel-cells-seek-transport-niches-evs-cant-reach-2022-11-09/>.

DE MIRANDA, P. E. V., CARREIRA, E. S., ICARDI, U. A., *et al.* "Brazilian hybrid electric-hydrogen fuel cell bus: Improved on-board energy management system", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 19, p. 13949–13959, 2017. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.12.155. .

DE MIRANDA, P. E. V. Contato Pessoal, 2023.

DE MIRANDA, P. E. V. Contato Pessoal, 2024.

DE OLIVEIRA, C. C. N., ANGELKORTE, G., ROCHEDO, P. R. R., *et al.* "The role of

biomaterials for the energy transition from the lens of a national integrated assessment model", **Climatic Change**, v. 167, n. 3–4, 2021. DOI: 10.1007/s10584-021-03201-1. .

DE SOUZA, T. A. Z., CORONADO, C. J. R., SILVEIRA, J. L., *et al.* "Economic assessment of hydrogen and electricity cogeneration through steam reforming-SOFC system in the Brazilian biodiesel industry", **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123814, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123814. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123814>.

DEGNAN, Tom. "Focu on Catalysts - May". **Elsevier**, 2019. , v. 2019, n. 5, p. 2–3.

DEGNAN, Tom. "Focus on Catalysts". **Elsevier**, 2023. , v. 2023, n. 5, p. 1–8.

DEKEL, D. R., YASSIN, K., RASIN, I. G., *et al.* "Modeling direct ammonia anion-exchange membrane fuel cells", **Journal of Power Sources**, v. 558, n. October 2022, p. 232616, 2023. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2022.232616. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232616>.

DELAZERI, L. M. M., DA CUNHA, D. A., VICERRA, P. M. M., *et al.* "Rural outmigration in Northeast Brazil: Evidence from shared socioeconomic pathways and climate change scenarios", **Journal of Rural Studies**, v. 91, n. March 2022, p. 73–85, 2022. DOI: 10.1016/j.jrurstud.2022.03.004. .

DENG, Y., LI, S., APPELS, L., *et al.* "Steam reforming of ethanol by non-noble metal catalysts", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 175, n. January, p. 113184, 2023. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113184. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113184>.

DOE. "Hydrogen and Fuel Cell Technologies Program: Fuel Cells Fuel". **U.S. Department of Energy (DOE)**, 2010. Disponível em: <http://www.hydrogenandfuelcells.energy.gov>.

DUDEN, A. S., VERWEIJ, P. A., KRAAK, Y. V., *et al.* "Hydrological impacts of ethanol-driven sugarcane expansion in Brazil", **Journal of Environmental Management**, v. 282, n. June 2020, p. 111942, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.111942. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111942>.

ELLEUCH, A., HALOUANI, K., "Chapter 13 - Intermediate-temperature solid oxide fuel cell fueled by biofuels". **Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Electrolytes, Electrodes and Interconnects**, [S.l.], INC, 2019. p. 427–476. DOI: 10.1016/B978-0-12-817445-6.00007-7. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-817445-6.00007-7>.

EPE. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis - Ano 2021. Ministério de Minas e Energia - NOTA TÉCNICA EPE/DPG/SDB/2022/02**. [S.l: s.n.], 2022a.

- EPE. **Balanco energético nacional. Empresa de Pesquisa Energética (EPE).** [S.l: s.n.], 2022b.
- EPE. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. Empresa de Pesquisa Energética (EPE).** [S.l: s.n.], 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrogenio_23Fev2021NT\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrogenio_23Fev2021NT(2).pdf).
- EPE. **Cenários de oferta de etanol e demanda de ciclo otto 2024-2033. Empresa de Pesquisa Energética (EPE).** [S.l: s.n.], 2023a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>.
- EPE. **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032: Demanda Energética do Setor de Transportes. Empresa de Pesquisa Energética (EPE).** [S.l: s.n.]. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-591/Caderno de Demanda de Transportes_PDE_2031_2022.02.09.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-591/Caderno_de_Demanda_de_Transportes_PDE_2031_2022.02.09.pdf) ., 2023b
- EPE, IEA. **Transporte Rodoviário de Cargas - Brasil |2021 Benchmarking Internacional. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), International Energy Agency (IEA).** [S.l: s.n.], 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-626/IEA-EPE_Brazilian_Road_Freight_Transport_Benchmarking-2021.09.09 %5BPT%5D.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-626/IEA-EPE_Brazilian_Road_Freight_Transport_Benchmarking-2021.09.09%5BPT%5D.pdf).
- ERDOĞAN, A., GEÇICI, E., GÜLER, M. G. "Design of a future hydrogen supply chain: A multi-objective model for Turkey", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 8, 2023. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.071. .
- FARRELL, B., LINIC, S. "Direct electrochemical oxidation of ethanol on SOFCs: Improved carbon tolerance of Ni anode by alloying", **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 183, p. 386–393, 2016. DOI: 10.1016/j.apcatb.2015.11.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.11.002>.
- FINEP. **Apoio Direto à Inovação.** 2024a. Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). Disponível em: <http://www.finep.gov.br/apoio-e-financiamento-externa/programas-e-linhas/apoio-direto-a-inovacao>.
- FINEP. **Finep Mais Inovação.** 2024b. Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). Disponível em: <http://www.finep.gov.br/apoio-e-financiamento-externa/programas-e-linhas/finep-mais-inovacao>.
- FINEP. **Mais Inovação Brasil – Energias Renováveis.** 2024c. Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). Disponível em: <http://www.finep.gov.br/chamadas>

publicas/chamadapublica/726.

FUEL CELL BULLETIN. "Nissan unveils world's first FCEV with SOFC running on bioethanol", **Fuel Cells Bulletin**, v. 2016, n. 9, p. 3, 2016. DOI: 10.1016/s1464-2859(16)30231-0. .

GEELS, F. W., TURNHEIM, B. **The Great Reconfiguration - A Socio-Technical Analysis of Low-Carbon Transitions in UK Electricity, Heat and Mobility Systems**. [S.l.: s.n.], 2022. v. 87. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/167638/341506.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8314/LOEBLEIN%2C%20LUCINEIA%20CARLA.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://antigo.mdr.gov.br/saneamento/proeas> .

GELEYNSE, S., BRANDT, K., GARCIA-PEREZ, M., *et al.* "The Alcohol-to-Jet Conversion Pathway for Drop-In Biofuels: Techno-Economic Evaluation", **ChemSusChem**, v. 11, n. 21, p. 3728–3741, 2018. DOI: 10.1002/cssc.201801690. .

GIORDANO, E., BERRETTI, E., CAPOZZOLI, L., *et al.* "Boosting DMFC power output by adding sulfuric acid as a supporting electrolyte: Effect on cell performance equipped with platinum and platinum group metal-free cathodes", **Journal of Power Sources**, v. 563, n. October 2022, p. 232806, 2023. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2023.232806. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232806>.

GOLKHATMI, S. Z., ASGHAR, M. I., LUND, P. D. "A review on solid oxide fuel cell durability: Latest progress, mechanisms, and study tools", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 161, n. February, p. 112339, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112339. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112339>.

GONÇALVES, F. de O., SAVIOLI LOPES, E., SAVIOLI LOPES, M., *et al.* "Evaluation of the feasibility of ethanol and gasoline in solid oxide fuel cell vehicles in Brazil", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 73, p. 36381–36397, 2021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.165. .

GOODARZI, G. A., HAYES, J. G. **Electric powertrain: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles**. vol. 5 ed. [S.l.], Wiley, 2018.

GRUBB, M., OKEREKE, C., ARIMA, J., *et al.* **Chapter 1: Introduction and Framing. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [S.l.:

s.n.], 2021.

H2STATION. **Statistics: Hydrogen Infrastructure**. 2024. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. Disponível em: <https://www.h2stations.org/statistics/>.

HAO, L., ZHAO, Z., YIN, H., *et al.* "Study of durability of diesel vehicle emissions performance based on real driving emission measurement", **Chemosphere**, v. 297, n. December 2021, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134171. .

HARBOE, S., SCHREIBER, A., MARGARITIS, N., *et al.* "Manufacturing cost model for planar 5 kWel SOFC stacks at Forschungszentrum Jülich", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 15, p. 8015–8030, 2020. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.082. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.082>.

HART, D., JONES, S., HOUGHTON, T., *et al.* **The Fuel Cell Industry Review 2021**. E4tech. [S.l: s.n.], 2022. Disponível em: <http://www.fuelcellindustryreview.com/FCIRarchive.html>.

HUSSAIN, M. Z. **Financing Renewable Energy: Options for Developing Financing Instruments Using Public Funds (76556)**. World Bank Group. Washington, D.C., [s.n.], 2013. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/196071468331818432/Financing-renewable-energy-options-for-developing-financing-instruments-using-public-funds>.

HUSSAIN, S., YANGPING, L. "Review of solid oxide fuel cell materials: cathode, anode, and electrolyte", **Energy Transitions**, v. 4, n. 2, p. 113–126, 2020. DOI: 10.1007/s41825-020-00029-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41825-020-00029-8>.

HYUNDAI. **All-New Hyundai NEXO – Driving performance**. 2018. Hyundai. Disponível em: <https://www.hyundai.news/eu/models/electrified/nexo/press-kit/all-new-hyundai-nexo-driving-performance.html>.

HYUNDAI. **XCIENT Fuel Cell Catalog**. Hyundai. [S.l: s.n.], 2023. Disponível em: <https://ecv.hyundai.com/resources/assets/file/XCIENT-Fuel-Cell-Truck-Catalog-Single-EN.pdf>.

IEA. **Global EV Data Explorer**. 2023. International Energy Agency (IEA). Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>.

IEA. **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. IEA. Paris, [s.n.], 2021.

IEA. **World Energy Outlook 2022**. International Energy Agency (IEA) Publications International. [S.l: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy->

outlook-2022.

IMF. **Real GDP Growth – Annual percent change**. 2024. International Monetary Fund (IMF). Disponível em: https://www.imf.org/en/Search#q=brazil_gdp&sort=relevancy.

IPEN. **Célula a Combustível de Óxido Sólido (SOFC)**. 2023. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=748&campo=1429.

IPEN. **Nissan acelera projeto de carro elétrico com célula de etanol**. 2021. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=39&campo=15935.

JAGUAR LAND ROVER. "JAGUAR LAND ROVER TO DEVELOP HYDROGEN-POWERED DEFENDER FUEL CELL PROTOTYPE". **Jaguar Land Rover**, 2021. Disponível em: <https://media.jaguarlandrover.com/news/2021/06/jaguar-land-rover-develop-hydrogen-powered-defender-fuel-cell-prototype>.

KIRUBAKARAN, A., JAIN, S., NEMA, R. K. "A review on fuel cell technologies and power electronic interface", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2430–2440, 2009. DOI: 10.1016/j.rser.2009.04.004. .

KÖBERLE, A. C., ROCHEDO, P. R. R., LUCENA, A. F. P., *et al.* "Brazil's emission trajectories in a well-below 2 °C world: the role of disruptive technologies versus land-based mitigation in an already low-emission energy system", **Climatic Change**, v. 162, n. 4, p. 1823–1842, 2020. DOI: 10.1007/s10584-020-02856-6. .

LABH2. **Ônibus Sustentável - Tecnologia Nacional de Transporte Sustentável para Maricá: Desenvolvimento e Operação Assistida**. 2022. COPPE/UFRJ. Disponível em: <https://onibussustentavel.labh2.coppe.ufrj.br/index.php/pt/>.

LENSER, C., UDOMSILP, D., MENZLER, N. H., *et al.* **Solid oxide fuel and electrolysis cells**. [S.l.], Elsevier Ltd., 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-102726-4.00009-0>.

LI, N., LIU, B., JIA, L., *et al.* "Liquid biofuels for solid oxide fuel cells: A review", **Journal of Power Sources**, v. 556, n. September 2022, p. 232437, 2023. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2022.232437. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232437>.

LI, Y., PANG, Y., TU, H., *et al.* "Impact of syngas from biomass gasification on solid oxide fuel cells: A review study for the energy transition", **Energy Conversion and Management**, v. 250, n. August, p. 114894, 2021. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114894. Disponível

em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114894>.

LIAO, Y., TOZLUOĞLU, Ç., SPREI, F., *et al.* "Impacts of charging behavior on BEV charging infrastructure needs and energy use", **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 116, n. August 2022, p. 103645, 2023. DOI: 10.1016/j.trd.2023.103645. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103645>.

LIMA, L. von G., PINKOWSKI, A., CHAVES, N. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde. GIZ GmbH.** [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf.

LINDORFER, J., ROSENFELD, D. C., BÖHM, H. **Fuel cells: Energy conversion technology.** [S.l.], Elsevier Ltd, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00023-2>.

LIU, J., ZHAO, J., WEI, H., *et al.* "Comparative environmental assessment of methanol production technologies: A cradle-to-gate life cycle analysis", **Energy Conversion and Management**, v. 302, n. February, p. 118128, 2024. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118128. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118128>.

LIU, S. L., FAN, H. R., LIU, X., *et al.* "Global rare earth elements projects: New developments and supply chains", **Ore Geology Reviews**, v. 157, n. March, p. 105428, 2023. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2023.105428. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105428>.

LIU, Y., PAN, Z., ESAN, O. C., *et al.* "Development and performance evaluation of a direct ammonia fuel cell stack", **Journal of Power Sources**, v. 570, n. 233057, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233057>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233057>.

LOPES FERREIRA, J., RUFFONI, J., MARIAN CARVALHO, A. "Dinâmica da difusão de inovações no contexto brasileiro", **Revista Brasileira de Inovação**, v. 17, n. 1, p. 175–200, 2018. DOI: 10.20396/rbi.v16i4.8650852. .

LORENZI, B. R. **Em busca de alternativas energéticas : estudo sobre as pesquisas em células combustíveis no Brasil.** 2012. 101 f. Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/1090>.

LUCAS, L. "Brazil launches first fuel cell bus, with hydrogen station", **Fuel Cells Bulletin**, v.

2009, n. 9, p. 2, 2009. DOI: 10.1016/s1464-2859(09)70273-1. .

LUCIA, U. "Overview on fuel cells", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 164–169, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.025. .

LYU, Y., XIE, J., WANG, D., *et al.* "Review of cell performance in solid oxide fuel cells", **Journal of Materials Science**, v. 55, n. 17, p. 7184–7207, 2020. DOI: 10.1007/s10853-020-04497-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04497-7>.

MAIA, V. C. **Análise do Potencial de Eficiência Energética no Setor de Transporte Rodoviário de Cargas Brasileiro**. 2015. 97 f. COPPE/UFRJ, 2015.

MAKEPEACE, J. **Technology readiness assessment guide**. U.S. Department of Energy. [S.l: s.n.], 2009. Disponível em: https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0413.3-EGuide-04a/@_@images/file.

MANOHARAN, Y., HOSSEINI, S. E., BUTLER, B., *et al.* "Hydrogen fuel cell vehicles; Current status and future prospect", **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 11, 2019. DOI: 10.3390/app9112296. .

MAROCCO, P., GANDIGLIO, M., SANTARELLI, M. "When SOFC-based cogeneration systems become convenient? A cost-optimal analysis", **Energy Reports**, v. 8, p. 8709–8721, 2022. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.06.015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.015>.

MARTÍNEZ VARGAS, I. "CARRO ELÉTRICO “A ETANOL”": UM DIA VOCÊ VAI TER UM", **Você S/A**, v. 12, n. 308, p. 24–27, 2024. Disponível em: vocesa.com.br.

MARTINS, C., LIMA, P. C. R., TEIXEIRA, L. da S., *et al.* **Minerais estratégicos e terras-raras - Série estudos estratégicos n° 3**. \aaasaCâmara dos Deputados, Edições Câmara. [S.l: s.n.], 2014.

MATEUS, F. **Volkswagen e Unicamp firmam parceria para apoio a pesquisas sobre etanol e veículos eletrificados**. 2021. UNICAMP. Disponível em: <https://www.unicamp.br/unicamp/noticias/2021/09/27/volkswagen-e-unicamp-firmam-parceria-para-apoio-pesquisas-sobre-etanol-e#:~:text=A Unicamp e a Volkswagen,etanol no carregamento de baterias.>

MEDEIROS, K. A. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas**. Agência Nacional de Mineração (ANM). [S.l: s.n.], 2023.

MEHMETI, A., MCPHAIL, S. J., PUMIGLIA, D., *et al.* "Life cycle sustainability of solid oxide fuel cells: From methodological aspects to system implications", **Journal of Power**

Sources, v. 325, p. 772–785, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.06.078>.

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. DOI: 10.1016/j.rser.2011.09.020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.020>.

MENDIBURU, A. Z., LAUERMANN, C. H., HAYASHI, T. C., *et al.* "Ethanol as a renewable biofuel: Combustion characteristics and application in engines", **Energy**, v. 257, p. 124688, 2022. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124688. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544222015912>.

MERCURE, J. F., PAIM, M. A., BOCQUILLON, P., *et al.* "System complexity and policy integration challenges: The Brazilian Energy- Water-Food Nexus", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 105, n. January, p. 230–243, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.045. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.045>.

MIKLAUTSCH, P., WOSCHANK, M. "A framework of measures to mitigate greenhouse gas emissions in freight transport: Systematic literature review from a Manufacturer's perspective", **Journal of Cleaner Production**, v. 366, n. October 2021, p. 132883, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132883. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132883>.

MILLER, Joe, KEOHANE, David. "Car groups throw spanner in works of EU's hydrogen drive". **The Financial Times**, 2021. Disponível em: <https://www.ft.com/content/a1325d48-6c76-4b6f-81e8-2be504c21791>.

MOHD AFFANDI, N. S., OSMAN, N. "Short review on global trends in SOFC scenario and future perspective", **Materials Today: Proceedings**, v. 66, n. P10, p. 3981–3984, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.824. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.824>.

MONTEIRO, E. A. **Tecnologia inédita da Unicamp usa etanol em carros elétricos**. 2022. Inova - UNICAMP. Disponível em: <https://www.inova.unicamp.br/2022/08/tecnologia-inedita-da-unicamp-usa-etanol-em-carros-eletricos/#:~:text=Pesquisadores criaram microrreator que%2C a partir do combustível%2C produz hidrogênio&text=Pesquisadores da Universidade Estadual de,o futuro da in.>

MOURA. **PBT: vamos entender sobre caminhões?** 2021. Moura. Disponível em: <https://www.moura.com.br/blog/pbt-vamos-entender-sobre-caminhoes>.

- NAESS, J. S., HU, X., GVEIN, M. H., *et al.* "Climate change mitigation potentials of biofuels produced from perennial crops and natural regrowth on abandoned and degraded cropland in Nordic countries", **Journal of Environmental Management**, v. 325, n. 116474, 2023. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116474. .
- OLIVEIRA, K. D., TOMASELLA, J., CARAM, R. de O., *et al.* "Impacts of sugarcane expansion on water availability in a river basin in southeastern Brazil", **Catena**, v. 216, n. PB, p. 106437, 2022. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106437. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106437>.
- PALAZZI, R. B., MEIRA, E., KLOTZLE, M. C. "The sugar-ethanol-oil nexus in Brazil: Exploring the pass-through of international commodity prices to national fuel prices", **Journal of Commodity Markets**, n. February 2021, p. 100257, 2022. DOI: 10.1016/j.jcomm.2022.100257. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcomm.2022.100257>.
- PANTHI, D., HEDAYAT, N., WOODSON, T., *et al.* "Tubular solid oxide fuel cells fabricated by a novel freeze casting method", **Journal of the American Ceramic Society**, v. 103, n. 2, p. 878–888, 2019. DOI: 10.1111/jace.16781. .
- PARK, J. S., HAO, N. H. "Direct ethanol-fueled protonic ceramic fuel cell with reforming layer operating at low temperature", **International Journal of Hydrogen Energy**, n. xxxx, 2023. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.02.014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.014>.
- POTENZA, R. F., QUINTANA, G. d. O., CARDOSO, A. M., *et al.* **Análise das emissões brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 –2020.** . [S.l: s.n.], 2021. Disponível em: [http://energiaeambiente.org.br/produto/analise-das-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-e-suas-implicacoes-para-as-metas-climaticas-do-brasil-1970-2020#:~:text=O total de emissões brutas,de Efeito Estufa \(SEEG\).](http://energiaeambiente.org.br/produto/analise-das-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-e-suas-implicacoes-para-as-metas-climaticas-do-brasil-1970-2020#:~:text=O total de emissões brutas,de Efeito Estufa (SEEG).)
- QIN, M., XIAO, Y., YANG, H., *et al.* "Ru/Nb co-doped perovskite anode: Achieving good coking resistance in hydrocarbon fuels via core-shell nanocatalysts exsolution", **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 299, n. July, p. 120613, 2021. DOI: 10.1016/j.apcatb.2021.120613. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120613>.
- QUINTANILHA, Sérgio. "União Europeia abre brecha para motores a combustão em 2035". **UOL**, 2023. Disponível em: <https://www.terra.com.br/carros-motos/uniao-europeia-abre-brecha-para-motores-a-combustao-em-2035,74326f94968467ea8bb92cdb30a0c1324sdb0o9s.html>.

- RAMALHO, André. "E se faltar diesel no Brasil? Saiba em que estados os riscos são maiores". **Agência epbr**, 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/e-se-faltar-diesel-no-brasil-saiba-em-que-estados-os-riscos-sao-maiores/>.
- RATH, R., KUMAR, P., MOHANTY, S., *et al.* "Recent advances, unsolved deficiencies, and future perspectives of hydrogen fuel cells in transportation and portable sectors", **International Journal of Energy Research**, v. 43, n. 15, p. 8931–8955, 2019. DOI: 10.1002/er.4795. .
- RATHMANN, R. **Modelagem Setorial de Opções de Baixo Carbono para o Setor de Transportes**. MCTIC, ONU Meio Ambiente. [S.l: s.n.], 2017.
- SAMPAIO, M. R., ROSA, L. P., DAGOSTO, M. de A. "Ethanol-electric propulsion as a sustainable technological alternative for urban buses in Brazil", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 7, p. 1514–1529, 2007. DOI: 10.1016/j.rser.2005.11.007. .
- SAMSUN, R. C., REX, M., ANTONI, L., *et al.* "Deployment of Fuel Cell Vehicles and Hydrogen Refueling Station Infrastructure: A Global Overview and Perspectives", **Energies**, v. 15, n. 14, p. 34, 2022. DOI: 10.3390/en15144975. .
- SANTIAGO, A. D., CHICO, D., SOARES, A., *et al.* "Pegada hídrica da cana-de-açúcar e etanol produzidos no estado de Alagoas , Brasil", **Agrometeoros**, p. 209–216, 2017. .
- SARNER, S., SCHREIBER, A., MENZLER, N. H., *et al.* "Recycling Strategies for Solid Oxide Cells", **Advanced Energy Materials**, v. 2201805, 2022. DOI: 10.1002/aenm.202201805. .
- SARRUF, B. J. M., HONG, J. E., STEINBERGER-WILCKENS, R., *et al.* "CeO₂–Co₃O₄–CuO anode for direct utilisation of methane or ethanol in solid oxide fuel cells", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 12, p. 6340–6351, 2018. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.192. .
- SARRUF, B. J. M., HONG, J. E., STEINBERGER-WILCKENS, R., *et al.* "Ceria-Co-Cu-based SOFC anode for direct utilisation of methane or ethanol as fuels", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 8, p. 5297–5308, 2020. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.075. .
- SAXE, M., FOLKESSON, A., ALVFORS, P. "Energy system analysis of the fuel cell buses operated in the project: Clean Urban Transport for Europe", **Energy**, v. 33, n. 5, p. 689–711, 2008. DOI: 10.1016/j.energy.2008.01.001. .
- SCATAGLINI, R., MAYYAS, A., WEI, M., *et al.* **A Total Cost of Ownership Model for Solid**

Oxide Fuel Cells in Combined Heat and Power and Power- Only Applications.
LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. [S.l: s.n.], 2015.

SCHORN, F., BREUER, J. L., SAMSUN, R. C., *et al.* "Methanol as a renewable energy carrier: An assessment of production and transportation costs for selected global locations", **Advances in Applied Energy**, v. 3, n. June, p. 100050, 2021. DOI: 10.1016/j.adapen.2021.100050. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100050>.

SEYAM, S., DINCER, I., AGELIN-CHAAB, M. "Environmental impact assessment of a newly developed solid oxide fuel cell-based system combined with propulsion engine using various fuel blends for cleaner operations", **Sustainable Materials and Technologies**, v. 35, n. August 2021, p. e00554, 2023. DOI: 10.1016/j.susmat.2022.e00554. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00554>.

SGB. **“Programa Mineração para Energia Limpa” é lançado durante seminário sobre minerais estratégicos para a transição energética.** 2024. Serviço Geológico Brasileiro (SGB), Ministério de Minas e Energias (MME). Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/publicue/Noticias/%22Programa-Mineracao-para-Energia-Limpa%94-e-lancado-durante-seminario-sobre-minerais-estrategicos-para-a-transicao-energetica-8611.html#:~:text=“Lançaremos o Programa Mineração para,serão cruciais”%2C disse Silve>.

SHI, J., WANG, B., HU, S. "From photo-assisted methanol catalytic oxidation to direct methanol fuel cells: Applications of semiconductors-based electrode", **Surfaces and Interfaces**, v. 46, n. January, p. 103970, 2024. DOI: 10.1016/j.surfin.2024.103970. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.103970>.

SHIVA KUMAR, S., LIM, H. "An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production", **Energy Reports**, v. 8, p. 13793–13813, 2022. DOI: 10.1016/j.egy.2022.10.127. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.127>.

SIMADER, G., REUTER, S., KOVAC, A., *et al.* **Annual report 2018/2019. Technology Collaboration Programme on Advanced Fuel Cells.** [S.l: s.n.], 2019.

SIMON, E. C. **AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DA RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO** Emanuel. 2013. 149 f. UFRJ/COPPE, 2013.

SINGH, M., ZAPPA, D., COMINI, E. "Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 54,

p. 27643–27674, 2021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.020>.

STAFFELL, I., SCAMMAN, D., VELAZQUEZ ABAD, A., *et al.* "The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system", **Energy and Environmental Science**, v. 12, n. 2, p. 463–491, 2019. DOI: 10.1039/c8ee01157e. .

STRAUB, J. "In search of technology readiness level (TRL) 10", **Aerospace Science and Technology**, v. 46, p. 312–320, 2015. DOI: 10.1016/j.ast.2015.07.007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2015.07.007>.

STRAZZA, C., DEL BORGHI, A., COSTAMAGNA, P., *et al.* "Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of a SOFC system for distributed power generation", **Energy Conversion and Management**, v. 100, p. 64–77, 2015. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.04.068. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.068>.

SU, H., HU, Y. H. "Progress in low-temperature solid oxide fuel cells with hydrocarbon fuels", **Chemical Engineering Journal**, v. 402, n. April, p. 126235, 2020. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126235. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126235>.

TEIXEIRA, C. A. N., MENDES, AMARAL, A. P. do, *et al.* **Hidrogênio de baixo carbono : oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa. BNDES**. [S.l: s.n.], 2022.

TIMURKUTLUK, B., TIMURKUTLUK, C., MAT, M. D., *et al.* "A review on cell/stack designs for high performance solid oxide fuel cells", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 1101–1121, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.034. .

TONSTAD, T., ÅSTRAND, H. H., HAUGOM, G. P., *et al.* **Study on the Use of Fuel Cells in Shipping. DNV GL – Maritime**. [S.l: s.n.], 2017. Disponível em: <https://www.coursehero.com/file/29089792/EMSA-Study-on-the-use-of-Fuel-Cells-in-Shippingpdf/>.

TOP NEW ENERGY. **Lantânio Estrôncio Manganita LSM Pó Para Pulverização De Plasma**. 2024. TOP New Energy. Disponível em: https://pt.tobmachine.com/lanthanum-strontium-manganite-lsm-powder-for-plasma-spraying_p1039.html.

UNCTAD. **World Investment Report 2023: Investing in sustainable energy for all. United Nations Publication**. [S.l: s.n.], 2023.

USGS. **Mineral commodity summaries 2024. U.S.G. Survey, U.S. Department of the Interior**. [S.l: s.n.], 2024.

- VELANDIA VARGAS, J. E., SEABRA, J. E. A. "Fuel-cell technologies for private vehicles in Brazil: Environmental mirage or prospective romance? A comparative life cycle assessment of PEMFC and SOFC light-duty vehicles", **Science of the Total Environment**, v. 798, p. 149265, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149265. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149265>.
- VENÂNCIO, S. A., DE MIRANDA, P. E. V. "Direct utilization of carbonaceous fuels in multifunctional SOFC anodes for the electrosynthesis of chemicals or the generation of electricity", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 19, p. 13927–13938, 2017. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.02.051. .
- WANG, B., LI, T., GONG, F., *et al.* "Ammonia as a green energy carrier: Electrochemical synthesis and direct ammonia fuel cell - a comprehensive review", **Fuel Processing Technology**, v. 235, n. April, p. 107380, 2022. DOI: 10.1016/j.fuproc.2022.107380. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107380>.
- WANG, T., ZHAO, Y., SETZLER, B. P., *et al.* "A high-performance 75 W direct ammonia fuel cell stack", **Cell Reports Physical Science**, v. 3, n. 4, p. 100829, 2022. DOI: 10.1016/j.xcrp.2022.100829. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.100829>.
- WANG, Yun, RUIZ DIAZ, D. F., CHEN, K. S., *et al.* "Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – A review", **Materials Today**, v. 32, n. February, p. 178–203, 2020. DOI: 10.1016/j.mattod.2019.06.005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.06.005>.
- WANG, Yuqing, SHI, J., GU, X., *et al.* "Toward mobility of solid oxide Fuel cells", **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 102, n. December 2023, p. 101141, 2024. DOI: 10.1016/j.pecs.2023.101141. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101141>.
- WHISTON, M. M., AZEVEDO, I. L., LITSTER, S., *et al.* "Meeting Solid Oxide Fuel Cell Cost and Degradation Rate Targets", **Joule**, v. 3, n. 9, p. 2060–2065, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.07.018> Meeting. .
- WHISTON, M. M., LIMA AZEVEDO, I. M., LITSTER, S., *et al.* "Paths to market for stationary solid oxide fuel cells: Expert elicitation and a cost of electricity model", **Applied Energy**, v. 304, n. December 2020, 2021. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117641. .
- XU, Q., GUO, Z., XIA, L., *et al.* "A comprehensive review of solid oxide fuel cells operating on various promising alternative fuels", **Energy Conversion and Management**, v. 253, n. December 2021, p. 115175, 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.115175. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115175>.

- YAN, J., ZHAO, J. "Willingness to pay for heavy-duty hydrogen fuel cell trucks and factors affecting the purchase choices in China", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 58, p. 24619–24634, 2022. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.252. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.252>.
- YANG, G., JUNG, W., AHN, S. J., *et al.* "Controlling the oxygen electrocatalysis on perovskite and layered oxide thin films for solid oxide fuel cell cathodes", **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 5, 2019. DOI: 10.3390/app9051030. .
- YENESEW, G. T., QUAREZ, E., LE GAL LA SALLE, A., *et al.* "Recycling and characterization of end-of-life solid oxide fuel/electrolyzer ceramic material cell components", **Resources, Conservation and Recycling**, v. 190, n. November 2022, 2023. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106809. .
- ZHANG, P., LEI, Z., ZHANG, X., *et al.* "High-stable power generation from low concentration ethanol by catalyst layer modified solid oxide fuel cells", **Journal of Alloys and Compounds**, v. 916, p. 165448, 2022. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165448. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165448>.
- ZHOU, W., CLEAVER, C. J., DUNANT, C. F., *et al.* "Cost, range anxiety and future electricity supply: A review of how today's technology trends may influence the future uptake of BEVs", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 173, n. September 2022, p. 113074, 2023. DOI: 10.1016/j.rser.2022.113074. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113074>.
- ZIEGLER, M. F. **Primeira planta de conversão de hidrogênio a partir do etanol do mundo será construída na USP.** 2023. Agência FAPESP. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/primeira-planta-de-conversao-de-hidrogenio-a-partir-do-etanol-do-mundo-sera-construida-na-usp/42107/>.

Anexo I

Nesta seção são apresentadas as tabelas com custos de *Capital Expenditure* (CAPEX) e *Operational Expenditure* (OPEX) para diferentes sistemas de pilhas a combustível.

Tabela 30 - Comparação de custos e performances de pilhas a combustível para uso estacionário.

	Micro-CHP (PaCMTP, PaCOS)	Mini- CHP (PaCOS)	CHP Comercial (PaCOS)	Fonte primária 1,0 MW (PaCOS, PaCMTP)	CHP com GN (PaCCF, PaCOS, PaCAA)	CHP com Biogás para aplicação industrial (PaCCF, PaCOS)
OPEX (k€/kW)	0,5	0,85	6	60	800	30
CAPEX (k€/kW)	34	18,4	16,5	4,36	4,028	5,187
Instalação, controle e auxílio (k€)	6,15	12,7	70,3	1200	1000	700
Sistema adicionado (k€)	13,5	48,5	290	2500	2200	500
Pilha a combustível (k€)	11,5	43,9	535,1	1500	2400	900
Manutenção (k€)	0,5	0,8	6	60	800	30
Substituição da pilha a combustível (k€)	6,7	24	135,5	850	2150	790

Fonte: Adaptado de Cigolotti e Genovese (2021b).

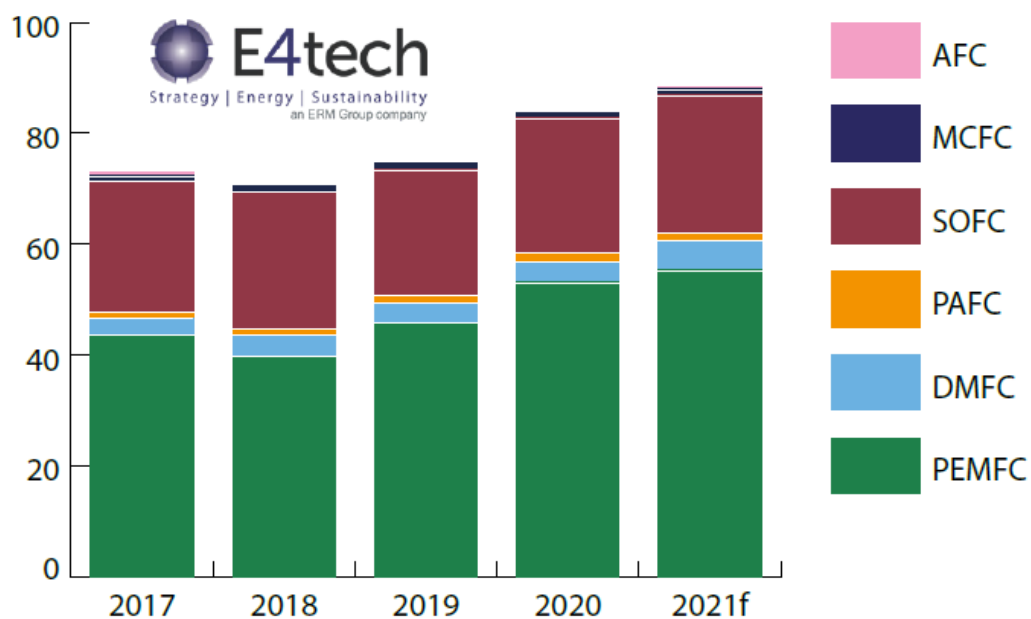


Figura 26 - Quantidade total (em 1000 unidades) de pilhas a combustível comercializadas em 2017-2021 por tipo de pilha a combustível.

Fonte: (HART, JONES, *et al.*, 2022).

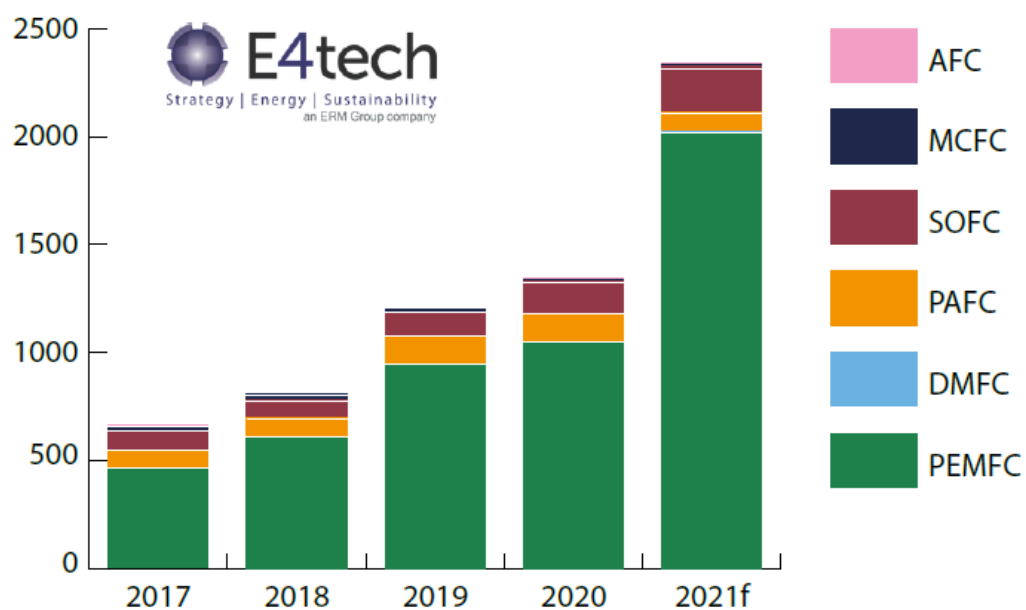


Figura 27- Capacidade total em MW de pilhas a combustível comercializadas em 2017-2021 por tipo de pilha a combustível.

Fonte: (HART, JONES, *et al.*, 2022).

Tabela 31 - Resumo de custos de um sistema APU de 1kW com PaCOS.

Descrição	100 unidades	1000 unidades	10000 unidades	50000 unidades
Custo total da produção da pilha a combustível	\$590	\$511	\$481	\$473
Custo capital anualizado da produção	\$4,757	\$495	\$69	\$43
BOP	\$9597	\$8204	\$7383	\$7383
Montagem do sistema, teste e condicionamento	\$475	\$451	\$448	\$448
Custo total do sistema, pré-markup	\$15419	\$9661	\$8381	\$8347
Custo do sistema/kW, pré-markup	\$15419	\$9661	\$8381	\$8347
Markup de vendas	50,00%	50,00%	50,00%	50,00%
Custo total do sistema com markup	\$23129	\$14491	\$12571	\$12520
Custo do sistema/kW com markup	\$23129	\$14491	\$12571	\$12520

Fonte: Adaptado de Battelle (2014).

Tabela 32 - Resumo de custos de um sistema APU de 5kW com PaCOS.

Descrição	100 unidades	1000 unidades	10000 unidades	50000 unidades
Custo total da produção da pilha a combustível	\$1476	\$1327	\$1267	\$1257
Custo capital anualizado da produção	\$4757	\$495	\$82	\$73
BOP	\$11323	\$9802	\$8738	\$8738
Montagem do sistema, teste e condicionamento	\$481	\$456	\$454	\$454
Custo total do sistema, pré-markup	\$18037	\$12080	\$10541	\$10522
Custo do sistema/kW, pré-markup	\$3608	\$2416	\$2108	\$2104
Markup de vendas	50,00%	50,00%	50,00%	50,00%
Custo total do sistema com markup	\$27056	\$18120	\$15812	\$15783
Custo do sistema/kW com markup	\$5411	\$3624	\$3162	\$3157

Fonte: Adaptado de Battelle (2014).

Tabela 33 - Resumo de custos de um sistema PaCOS de 100 kW para CHP.

Descrição	100 unidades/a no	1000 unidades/a no	10000 unidades/a no	50000 unidades/a no
Custo de manufatura da pilha a combustível	\$ 48191	\$ 32005	\$ 28537	\$ 28273
Componentes da alimentação de ar e combustível	\$ 10108	\$ 8306	\$ 7465	\$ 6956

Componentes do processador de combustível	\$ 8245	\$ 5693	\$ 5247	\$ 4962
Componentes da Recuperação de calor	\$ 21057	\$ 19698	\$ 18430	\$ 17621
Componentes eletrônicos, de controle e de instrumentação de potência	\$ 52988	\$ 43627	\$ 35622	\$ 30213
Montagem e estimativa de trabalho adicional	\$ 11105	\$ 10080	\$ 9055	\$ 8175
Custo total do sistema, pré-markup	\$ 151694	\$ 119410	\$ 104354	\$ 96200
Custo do sistema/kW, pré-markup	\$ 1516,94	\$ 1194,10	\$ 1043,54	\$ 96200
<i>Markup de vendas</i>	50,00%	50,00%	50,00%	50,00%
Custo total do sistema com markup	\$ 227541	\$ 179115	\$ 156532	\$ 144300
Custo do sistema/kW com markup	\$ 2275,41	\$ 1791,15	\$ 1565,32	\$ 1443,00

Fonte: Adaptado de Battelle (2016).

Tabela 34 - Resumo de custos de um sistema PaCOS de 250 kW para CHP.

Descrição	100	1000	10000	50000
	unidades/an	unidades/an	unidades/an	unidades/an
	o	o	o	o
Custo de manufatura da pilha a combustível	\$ 94814	\$ 73566	\$ 70452	\$ 70113
Componentes da alimentação de ar e combustível	\$ 18298	\$ 15700	\$ 14309	\$ 13556
Componentes do processador de combustível	\$ 14347	\$ 9797	\$ 8604	\$ 8253
Componentes da Recuperação de calor	\$ 33857	\$ 31718	\$ 29718	\$ 28470
Componentes eletrônicos, de controle e de instrumentação de potência	\$ 117962	\$ 95050	\$ 75453	\$ 62217
Montagem e estimativa de trabalho adicional	\$ 19110	\$ 17410	\$ 15710	\$ 14180
Custo total do sistema, pré-markup	\$ 298389	\$ 243241	\$ 214244	\$ 196789
Custo do sistema/kW, pré-markup	\$ 1193,56	\$ 972,96	\$ 856,98	\$ 787,16
<i>Markup de vendas</i>	50,00%	50,00%	50,00%	50,00%
Custo total do sistema com markup	\$ 447583	\$ 364861	\$ 321367	\$ 295184
Custo do sistema/kW com markup	\$ 1790,33	\$ 1459,45	\$ 1285,47	\$ 1180,74

Fonte: Adaptado de Battelle (2016).

Tabela 35 - Resumo de custos de sistemas PaCOS com CHP em 2015 e 2020.

Tipo de sistema	Alvo de 2015	Alvo de 2020
Sistema CHP de 10 kWe	\$ 1900/kWe	\$ 1700/kWe
Sistema CHP de 100-240 kWe	\$ 2300/kWe	\$ 1000/kWe
Custo das pilhas a combustível em alto volume de produção	\$ 238/kWe	

Fonte: Adaptado de Scataglini et al. (2015).

Tabela 36 - Resultados de custos diretos para as pilhas a combustível de óxido sólido (\$/kW).

	1 kWe	10 kWe	50 kWe	100 kWe	250 kWe
100 unidades/ano	5386,89	1039,32	477,59	339,06	249,12
1000 unidades/ano	1195,51	342,34	214,77	194,38	180,52
10000 unidades/ano	451,38	196,66	176,42	170,86	167,25
50000 unidades/ano	322,04	178,33	169,71	167,24	165,88

Fonte: Adaptado de Scataglini et al. (2015).

Tabela 37 - Resultados de custos totais, considerando custos do BOP e mark-up de 50%, para as pilhas a combustível de óxido sólido (\$/kW).

Sistema (kWe)	Custo direto total			
	Volume anual de manufatura			
	100	1000	10000	50000
1	\$ 14681	\$ 8313	\$ 6504	\$ 5750
10	\$ 2677	\$ 1584	\$ 1224	\$ 1103
50	\$ 1480	\$ 941	\$ 788	\$ 707
100	\$ 1171	\$ 759	\$ 650	\$ 589
250	\$ 942	\$ 669	\$ 587	\$ 530
	Preço com <i>markup</i> corporativo			
1	\$ 22022	\$ 12470	\$ 9756	\$ 8625
10	\$ 4016	\$ 2376	\$ 1836	\$ 1655
50	\$ 2220	\$ 1412	\$ 1182	\$ 1061
100	\$ 1757	\$ 1139	\$ 975	\$ 884
250	\$ 1413	\$ 1004	\$ 881	\$ 795
	Preço com <i>markup</i> corporativo e custo de instalação			
1	\$ 29290	\$ 16584	\$ 12976	\$ 11471
10	\$ 5341	\$ 3160	\$ 2441	\$ 2201
50	\$ 2952	\$ 1877	\$ 1572	\$ 1410
100	\$ 2337	\$ 1514	\$ 1297	\$ 1176

250	\$ 1879	\$ 1334	\$ 1170	\$ 1058
------------	---------	---------	---------	---------

Fonte: Adaptado de Scataglini et al. (2015).

Anexo II

Nesta seção são apresentadas tabelas referentes aos impactos de produção de pilhas a combustível e sua reciclagem.

Tabela 38 - Estimativas de reciclabilidade e potencial de economia de materiais.

Componentes do Jülich FESC	Custos Materiais do F ^{III} 20 (%)	Custos Materiais do CS ^V (%)	Custos de frações da PaCOS	Reciclabilidade adotada	F ^{III} 20 (%)		CS ^V (%)	
					Min	Máx	Min	Máx
Crofer22APU	82	53	-	90-100	73,8	82,0	47,7	53,0
Ni mesh	4	4	-	90-100	3,6	4,0	3,6	4,0
8YSZ, Ni	5	14	82	90-100 YSZ, 20-80 Ni	2,2	3,7	6,1	10,3
8YSZ (eletrólito)	-	-	2	90-100	0,1	0,1	0,3	0,3
LSC/LSCF	-	-	9	-	-	-	-	-
GDC	-	-	7	90-100	0,3	0,4	0,9	1,0
Selante	9	29	-	0	0	0	0	0
Revestimento	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	100	100	100	-	80-90		58-69	

Fonte: Adaptado de Sarner *et al.* (2022).

Tabela 39 - Impactos da construção de uma planta de SOEC de 150 kW sem e com a reciclagem de materiais.

Categoria de Impacto	Unidade	Impacto s/ reciclagem	Impacto do uso de material reciclado	Benefícios da reciclagem (%)
Acidificação	mol de H ⁺ eq	79,6	18,3	-77
Mudança Climática - Total	kg CO2 eq	6,76	3,02	-55
Ecotoxicidade, água doce - Total	CTU _e	1.78E+06	3,11E+05	-83
Eutrofização, água doce	kg P eq	4,94	3,34	-32
Eutrofização, marítima	kg N eq	14,5	3,77	-74
Toxicidade Humana, câncer - Total	CTU _h	4,15E-05	8,66E-06	-80
Destrução de Ozônio	kg CFC-11 eq	3,80E-04	1,40E-04	-64
Material particulado	incidência de doenças	5,70E-04	1,20E-04	-80
Formação fotoquímica de ozônio, Saúde Humana	kg NO _x eq	30,40	16,7	-45
Uso de recurso, fóssil	(MJ)	1,13E+05	5.08E+04	-55
Uso de recurso, metais e minerais	kg Sb eq	0,15	0,0548	-64

Uso de água	m ³ mundial eq	3,35	1,19	-64
--------------------	---------------------------	------	------	-----

Fonte: Adaptado de Sarner *et al.* (2022).

Tabela 40 - Quantidade de matéria prima produzida e evitada por ano, e, o impacto ambiental por ano ao se utilizar materiais reciclados.

Material	t primário de produção evitado	GWP (kg CO2 eq) evitado	FD (MJ) evitado
		Stack	
Crofer22APU	3220		
Aço (baixa liga)	2484	3,90E+06	6,00E+07
Cromo	705	1,60E+07	2,80E+08
Manganês	171	8,10E+04	1,20E+06
Cobalto	9	3,60E+05	8,10E+06
Lantânio	2,9	1,80E+06	2,60E+06
Titânio	2,2	1,10E+05	1,50E+06
Níquel (meshes)	119	1,50E+06	2,40E+07
Soma da pilha a combustível		2,40E+07	3,80E+08
		Unidade	
Óxido de manganês	2,0	5,20E+03	6,20E+04
Hidróxido de óxido de cobalto	2,2	6,90E+04	1,60E+06
Óxido de Zircônio	86	2,90E+05	4,40E+06
Óxido de Ítrio	14	4,10E+05	5,50E+06
Carbonato de Estrôncio	1,9	4,60E+03	6,70E+04
Hidróxido de óxido de Ferro	2,2	1,30E+03	2,90E+04
Óxido de Cobre	0,8	4,70E+03	6,90E+04
Óxido de Lantânio	11,4	4,80E+05	6,30E+06
Óxido de Cério	1,2	2,00E+04	2,40E+05
Níquel	92	1,20E+06	1,80E+07
Óxido de Gadolínio	0,3	2,70E+04	3,50E+05
Soma da pilha a combustível		2,50E+06	3,70E+07

Fonte: Adaptado de Sarner *et al.* (2022).

Anexo III

Nesta seção são apresentadas as tabelas com os resultados encontrados pelo levantamento de patentes nos bancos ESPACENET e PATENTSCOPE.

- Dados do ESPACENET:

Tabela 41 - Dados do ESPACENET obtidos com a query nftxt = "solid oxide fuel cell".

Família de patentes (por país)		Requerente		Requerentes (por país)		Inventores (por país)	
Japão	14731	KYOCERA CORP	1255	EUA	10046	EUA	9431
EUA	7372	TOTO LTD	735	Japão	8293	Japão	7860
China	7311	NISSAN MOTOR	702	Coréia do Sul	5800	Coréia do Sul	4779
WIPO	5331	TOYOTA MOTOR CORP	639	Alemanha	1631	Alemanha	1669
Coréia do Sul	4741	NGK INSULATORS LTD	572	Reino Unido	1107	Reino Unido	1132
EPO	4322	mitsubishi heavy IND LTD	567	Dinamarca	842	China	893
Canadá	1594	TOKYO GAS CO LTD	528	China	769	Canadá	874
Alemanha	1283	NGK SPARK PLUG CO	454	França	764	Dinamarca	704
Austrália	958	OSAKA GAS CO LTD	416	Canadá	729	França	703
Taiwan	739	AISIN SEIKI	407	Taiwan	501	Taiwan	507

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 42 - Dados do ESPACENET obtidos com a query ntxt = "solid oxide fuel cell".

Família de patentes (por país)		Requerente		Requerentes (por país)		inventores (por país)	
Japão	2794	TOTO LTD	316	EUA	2356	EUA	2235
China	2608	DAINIPPON PRINTING CO LTD	157	Coréia do Sul	1880	Japão	1697
EUA	1737	NISSAN MOTOR	157	Japão	1669	Coréia do Sul	1618
Coréia do Sul	1371	NIPPON TELEGRAPH & TELEPHONE	148	Reino Unido	374	Reino Unido	365
WIPO	1113	OSAKA GAS CO LTD	123	China	303	China	345
EPO	988	mitsubishi materials CORP	113	Taiwan	250	Canadá	273
Canadá	391	POSCO	113	Canadá	246	Taiwan	255
Alemanha	255	KYOCERA CORP	104	Alemanha	216	Alemanha	224
Austrália	218	KANSAI ELECTRIC POWER CO	101	Dinamarca	207	Dinamarca	180
Taiwan	182	TOKYO GAS CO LTD	101	França	72	China	87

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 43 - Dados do ESPACENET obtidos com a query nftxt = "ethanol" AND nftxt = "solid oxide fuel cell".

Família de patentes (por país)		Requerente	Requerentes (por país)		inventores (por país)		
Japão	2608	SAMSUNG SDI CO LTD	200	EUA	2756	EUA	2655
China	1774	NISSAN MOTOR	199	Japão	1751	Japão	1694
EUA	1763	JX NIPPON OIL & ENERGY CORP	162	Coréia do Sul	1726	Coréia do Sul	1434
Coréia do Sul	1307	NIPPON CATALYTIC CHEM IND	149	França	242	China	250
WIPO	1306	BLOOM ENERGY CORP	128	China	221	Reino Unido	217
EPO	975	NGK SPARK PLUG CO	111	Dinamarca	216	Canadá	197
Canadá	408	TOTO LTD	93	Canadá	159	Dinamarca	181
Austrália	252	NIPPON OIL CORP	90	Reino Unido	158	França	176
Taiwan	216	LG CHEMICAL LTD	79	Alemanha	153	Alemanha	155
Alemanha	154	MURATA MANUFACTURING CO	67	Holanda	72	Índia	100

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 44 - Dados do ESPACENET obtidos com a query ntxt = "ethanol" AND ntxt = "solid oxide fuel cell".

Família de patentes (por país)		Requerente	Requerentes (por país)		inventores (por país)		
China	21	UNIV FOSHAN	3	Dinamarca	9	Dinamarca	9
Coréia do Sul	6	HALDOR TOPSOE AS	2	Coréia do Sul	8	Coréia do Sul	7
EPO	3	HEFEI COLLEGE	2	Japão	5	Japão	5
EUA	3	KOREA ENERGY RESEARCH INST	2	Brasil	4	Brasil	4
WIPO	3	NINGBO INST MATERIALS TECH & ENG CAS	2	China	4	China	4
Japão	2	UNIV CHINA MINING	2			Alemanha	2
Áustria	1	UNIV SHANDONG SCIENCE & TECH	2				
Austrália	1	DAHL SOEREN	1				
Brasil	1	DALIAN INST CHEM & PHYSICS CAS	1				
Canadá	1	DE MIRANDA HUGO VILELA	1				

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 45 - Dados do ESPACENET obtidos com a query (nftxt = "solid oxide fuel cell") NOT nftxt = "reformer".

Família de patentes (por país)		Requerente	Requerentes (por país)		inventores (por país)		
Japão	10137	KYOCERA CORP	672	EUA	6257	EUA	5932
China	5989	NGK INSULATORS LTD	530	JP	5096	Japão	4846
EUA	5256	MITSUBISHI HEAVY IND LTD	516	Coréia do Sul	4172	Coréia do Sul	3387

WIPO	3753	NISSAN MOTOR	508	Alemanha	1027	Alemanha	1089
Coréia do Sul	3524	TOYOTA MOTOR CORP	445	Reino Unido	751	China	775
EPO	2999	NGK SPARK PLUG CO	382	DK	739	Reino Unido	721
Canadá	1227	TOTO LTD	304	China	691	França	635
Alemanha	942	TOKYO GAS CO LTD	261	França	657	DK	622
Austrália	690	NIPPON TELEGRAPH & TELEPHONE	253	Canadá	521	Canadá	606
Taiwan	580	MITSUBISHI MATERIALS CORP	226	Taiwan	431	Taiwan	440

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 46 - Dados do ESPACENET obtidos com a query (ntxt = "solid oxide fuel cell") NOT ntxt = "reformer".

Família de patentes (por país)		Requerente		Requerentes (por país)		inventores (por país)	
Japão	2530	TOTO LTD	233	EUA	2185	EUA	2068
China	2469	DAINIPPON PRINTING CO LTD	157	Coréia do Sul	1804	Coréia do Sul	1551
EUA	1633	NISSAN MOTOR	147	Japão	1455	Japão	1482
Coréia do Sul	1318	NIPPON TELEGRAPH & TELEPHONE	135	Reino Unido	353	Reino Unido	344
WIPO	1044	POSCO	113	China	297	China	337
EPO	912	MITSUBISHI MATERIALS CORP	103	Taiwan	241	Canadá	270
Canadá	373	NGK INSULATORS LTD	98	Canadá	240	Taiwan	246
Alemanha	244	KANSAI ELECTRIC POWER CO	94	Dinamarca	205	Alemanha	205
Austrália	214	LG CHEMICAL LTD	93	Alemanha	201	Dinamarca	178
Taiwan	175	OSAKA GAS CO LTD	92	França	70	França	76

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 47 - Dados do ESPACENET obtidos com a query (nftxt = "ethanol" AND nftxt = "solid oxide fuel cell") NOT nftxt = "reformer".

Família de patentes (por país)		Requerente		Requerentes (por país)		inventores (por país)	
Japão	1803	NIPPON CATALYTIC CHEM IND	147	EUA	1350	EUA	1298
China	1426	NGK SPARK PLUG CO	105	Coréia do Sul	1087	Japão	998
EUA	1098	NISSAN MOTOR	97	Japão	1039	Coréia do Sul	861
WIPO	849	LG CHEMICAL LTD	76	China	214	China	229
Coréia do Sul	823	TOTO LTD	73	Dinamarca	189	Dinamarca	156
EPO	621	BLOOM ENERGY CORP	72	França	175	Reino Unido	148
Canadá	267	MURATA MANUFACTURING CO	67	Reino Unido	120	França	141

Austrália	151	DAINIPPON PRINTING CO LTD	53	Canadá	109	Canadá	125
Taiwan	135	KANSAI ELECTRIC POWER CO	45	Alemanha	82	Alemanha	93
Alemanha	101	DENSO CORP	44	Taiwan	33	Índia	72

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 48 - Dados do ESPACENET obtidos com a query (ntxt = "ethanol" AND ntxt = "solid oxide fuel cell") NOT ntxt = "reformer".

Família de patentes (por país)		Requerente	Requerentes (por país)		inventores (por país)		
China	20	UNIV FOSHAN	3	Dinamarca	9	Dinamarca	9
Coréia do Sul	6	HALDOR TOPSOE AS	2	Coréia do Sul	8	Coréia do Sul	7
EPO	3	HEFEI COLLEGE	2	Brasil	4	Brasil	4
EUA	3	KOREA ENERGY RESEARCH INST	2	China	4	China	4
WIPO	3	NINGBO INST MATERIALS TECH & ENG CAS	2	Japão	4	Japão	4
Japão	2	UNIV SHANDONG SCIENCE & TECH	2			Alemanha	2
Áustria	1	DAHL SOEREN	1				
Austrália	1	DALIAN INST CHEM & PHYSICS CAS	1				
Brasil	1	DE MIRANDA HUGO VILELA	1				
Canadá	1	DE MIRANDA PAULO EMILIO VALADAO	1				

Fonte: Elaboração própria.

- Dados do PATENTSCOPE:

Tabela 49 - Dados da PATENTSCOPE com a query “FP:(solid oxide fuel cell)”.

Países	Requerente	Data de publicação
Japão	3414	TOTO LTD 571 2014 639
China	2481	NISSA MOTORS CO LTD 295 2015 561
EUA	2200	NGK INSULATORS LTD 276 2016 526
PCT	1303	KYOCERA CO 261 2017 507
Coréia do sul	1154	OSAKA GAS CO LTD 249 2018 649
EPO	1147	mitsubishi material co 208 2019 558
Canadá	445	NIPPON TELEGR AND TELEPH CO 188 2020 573
Austrália	277	BLOOM ENERGY CO 184 2021 567
Índia	174	TOKYO GAS CO LTD 179 2022 560

Reino Unido	129	NGK SPARK PLUG CO LTD	177	2023	510
--------------------	-----	------------------------------	-----	-------------	-----

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 50 - Dados da PATENTSCOPE com a query “FP:(solid oxide fuel cell) NOT reformer”.

Países	Requerente		Data de publicação		
Japão	2966	TOTO LTD	316	2014	441
China	2203	NISSA MOTORS CO LTD	238	2015	418
EUA	1169	NGK INSULATORS LTD	231	2016	385
Coréia do sul	1072	KYOCERA CO	199	2017	403
PCT	882	NGK SPARK PLUG CO LTD	169	2018	514
EPO	683	NIPPON TELEGR AND TELEPH CO	162	2019	437
Canadá	230	DAINIPPON PRINTING CO LTD	161	2020	469
Austrália	176	MITSUBISHI MATERIAL CO	158	2021	443
Índia	105	TOKYO GAS CO LTD	149	2022	450
Reino Unido	86	OSAKA GAS CO LTD	146	2023	390

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 51 - Dados da PATENTSCOPE com a query “FP:ethanol AND (solid oxide fuel cell)”.

Países	Requerente		Data de publicação		
EUA	937	XYLECO INC	250	2014	144
PCT	476	NOVOZYMES A/S	95	2015	167
Canadá	243	DANISCO US INC	67	2016	118
EPO	210	DSM IP ASSETS BV	61	2017	98
Austrália	201	LALLEMAND HUNGARY LIQUIDITY MANAGEMENT LLC	57	2018	100
Índia	126	LANZATECH NEW ZEALAND LIMITED	38	2019	89
Reino Unido	37	E I DU PONT DE NEMOURS AND COMPANY	37	2020	81
China	34	API INTELLECTUAL PROPERTY HOLDINGS LLC	33	2021	85
Nova Zelândia	13	SHELL INTERNATIONALE RESEARCH MAATSCHAPPIJ BV	33	2022	65
Coréia do sul	11	MEDOFF MARSHALL	28	2023	67

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 52 - Dados da PATENTSCOPE com a query “FP:ethanol AND (solid oxide fuel cell) NOT reformer”.

Países	Requerente		Data de publicação		
EUA	708	XYLECO INC	97	2014	117
PCT	393	NOVOZYMES A/S	95	2015	140
Canadá	186	DANISCO US INC	67	2016	94
EPO	168	DSM IP ASSETS BV	61	2017	69

Austrália	129	LALLEMAND HUNGARY LIQUIDITY MANAGEMENT LLC	57	2018	68
Índia	96	E I DU PONT DE NEMOURS AND COMPANY	37	2019	70
China	29	API INTELLECTUAL PROPERTY HOLDINGS LLC	33	2020	68
Reino Unido	28	SYNGENTA PARTICIPATIONS AG	26	2021	67
Nova Zelândia	10	MASCOMA CO	25	2022	52
Coréia do Sul	9	UNIVERSITY OF FLORIDA RESEARCH FOUNDATION INC	23	2023	52

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 53 - Dados da PATENTSCOPE com a query “EN_ALLTXT:(solid oxide fuel cell)”.

Países		Requerente		Data de publicação	
EUA	86000	TOYOTA JIDOSHI KABUSHIKI KAISHA	2490	2014	9018
PCT	32613	HONDA MOTOR CO LTD	2116	2015	8309
EPO	21798	PIONEER HI BRED INTERNATIONAL INC	1486	2016	8428
Canadá	15681	THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA	1395	2017	8137
Austrália	8270	NISSAN MOTORS CO LTD	1384	2018	8430
Índia	6128	MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECH	1015	2019	8581
Japão	4676	NGK INSULATORS LTD	1000	2020	8807
Reino Unido	2862	3M INNOVATIVE PROPERTIES COMPANY	969	2021	8864
China	2811	EXXONMOBIL RESEARCH AND ENGINEERING COMPANY	916	2022	9220
Coréia do sul	1436	XYLECO INC	893	2023	8307

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 54 - Dados da PATENTSCOPE com a query “EN_ALLTXT:(solid oxide fuel cell) NOT reformer”.

Países		Requerente		Data de publicação	
EUA	70920	TOYOTA JIDOSHI KABUSHIKI KAISHA	2107	2014	7526
PCT	26761	HONDA MOTOR CO LTD	1654	2015	7041
EPO	17529	PIONEER HI BRED INTERNATIONAL INC	1475	2016	7189
Canadá	13464	THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA	1223	2017	7050
Austrália	6564	NISSAN MOTORS CO LTD	1128	2018	7426
Índia	5065	NGK INSULATORS LTD	874	2019	7517
Japão	4151	NOVOZYMES A/S	866	2020	7715
China	2519	3M INNOVATIVE PROPERTIES COMPANY	854	2021	7798
Reino Unido	2469	LG CHEM LTD	795	2022	7959
Coréia do sul	1280	MS TECH LLC	793	2023	7200

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 55 - Dados da PATENTSCOPE com a query "EN_ALLTXT:ethanol AND (solid oxide fuel cell)".

Países		Requerente	Data de publicação		
EUA	30093	PIONEER HI BRED INTERNATIONAL INC	949	2014	3816
PCT	12880	XYLECO INC	874	2015	3307
EPO	7766	NOVOZYMES A/S	789	2016	3485
Canadá	6037	THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA	771	2017	3258
Austrália	3827	NOVOZYMES INC	585	2018	3140
Índia	2430	DANISCO US INC	573	2019	3219
Reino Unido	393	MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECH	555	2020	3262
Nova Zelândia	204	GENOMATICA INC	543	2021	3105
Israel	197	DSM IP ASSETS BV	461	2022	2954
Singapura	162	SHELL OIL COMPANY	442	2023	2608

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 56 - Dados da PATENTSCOPE com a query "EN_ALLTXT:ethanol AND (solid oxide fuel cell) NOT reformer".

Países		Requerente	Data de publicação		
EUA	24209	PIONEER HI BRED INTERNATIONAL INC	938	2014	3143
PCT	10460	NOVOZYMES A/S	789	2015	2727
EPO	6298	THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA	712	2016	2908
Canadá	4813	NOVOZYMES INC	583	2017	2781
Austrália	3035	DANISCO US INC	555	2018	2775
Índia	1960	XYLECO INC	511	2019	2770
Reino Unido	314	DSM IP ASSETS BV	383	2020	2795
Nova Zelândia	160	GENOMATICA INC	374	2021	2635
Israel	156	LG CHEM LTD	336	2022	2494
Singapura	137	3M INNOVATIVE PROPERTIES COMPANY	329	2023	2165

Fonte: Elaboração própria.