UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE

NÚCLEO DE GESTÃO

CURSO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS

JOSÉ ADRIEL DA SILVA LEAL

SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO: O PAPEL DAS CÉLULAS À COMBUSTÍVEL DE HIDROGÊNIO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA BRASILEIRA

Caruaru

2023

JOSÉ ADRIEL DA SILVA LEAL

SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO: O PAPEL DAS CÉLULAS À COMBUSTÍVEL DE HIDROGÊNIO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA BRASILEIRA

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado ao curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Área de concentração: Economia Industrial

Orientador: Prof. Me. José Cícero de Castro

Caruaru

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Leal, José Adriel da Silva.
Sustentabilidade e inovação: o papel das células à combustível de hidrogênio na transição energética brasileira / José Adriel da Silva Leal. - Caruaru, 2023.
66 : il., tab.

Orientador(a): José Cícero de Castro
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Ciências Econômicas, 2023.
10.

1. Energia. 2. Hidrogênio. 3. Células à combustível. 4. Economia Industrial. 5. Transição Energética. I. Castro, José Cícero de. (Orientação). II. Título.

330 CDD (22.ed.)

JOSÉ ADRIEL DA SILVA LEAL

SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO: O PAPEL DAS CÉLULAS À COMBUSTÍVEL DE HIDROGÊNIO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA BRASILEIRA

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado ao curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Aprovado em: 18/08/2023

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Me. José Cícero de Castro – UFPE/CAA

(Orientador)

_____

Prof. Dr. Marcio Miceli Maciel de Sousa – UFPE/CAA

(Examinador Interno)

_____

Prof. Dr. José Valdecy Guimarães Junior – UFPE/CAA

(Examinador Interno)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, que sempre me apoiou e soube como ninguém suportar a minha ausência no tempo que passei longe.

Para Cione, minha mãe, a mulher a quem mais amo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, pela força e coragem para superar tantos desafios que a mudança de cidade e estado me trouxeram, bem como à minha família pelo apoio ao longo desta caminhada. Agradeço também aos professores, técnicos e terceirizados por terem me recebido tão bem no campus agreste, lugar que se tornou minha casa no decorrer de quase 5 anos. Um obrigado muito especial vai para o meu orientador, Cicero Castro pela paciência e prontidão em aceitar esse tema, no mínimo inusitado para o curso de ciências econômicas. Por fim, mas não menos importante, agradeço a uma pessoa que me ajudou muito quando comecei a graduação e que esteve comigo em boa parte desta caminhada, a professora Danyella Brito, muito obrigado pelos conselhos, correções e por poder ter trabalhado com a senhora por 4 períodos na monitoria.

“O hidrogênio, a essência das estrelas e do próprio Sol, está sendo capturada pelo engenho do homem e processado para fins de benefício humano.”

(Jeremy Rifkin).

RESUMO

A lacuna de pesquisa abordada neste trabalho é a falta de discussão da transição energética e células a combustível hidrogênio dentro da área de ciências econômicas. O objetivo geral desta pesquisa é apresentar o papel do hidrogênio verde no processo de descentralização da matriz energética Brasileira, bem como a importância das células de combustível no processo de descarbonização de setores intensivos em combustíveis fósseis. Para alcançar o objetivo proposto, foi feito um corte estratégico, onde as células de combustível à hidrogênio foram focalizadas, bem como o seu combustível. A metodologia adotada será mista, combinando uma ampla revisão bibliográfica sobre o tema com uma pesquisa documental em relatórios empresariais ainda não amplamente divulgados, aliada a uma pequena parcela de cunho exploratório, tendo em vista as inferências feitas com base nas iniciativas em curso. O principal resultado desta pesquisa indica que a matriz energética brasileira, ou seja, a geração de energia primária é majoritariamente não renovável, com mais de 50% de origem fóssil, ao passo que a matriz elétrica conta com quase 90% das fontes renováveis. A análise dos setorial da economia indicou que o setor mais intensivo em combustível fóssil é o de transportes, que corresponde a 60% de toda a demanda por petróleo e derivados. Contudo, quando tratamos dos setores intensivos em eletricidade, o quadro muda um pouco, a composição do consumo de energia pelo setor industrial em 2021 foi de 27,5% para combustíveis fósseis e 21,4% para eletricidade, o setor residencial consumiu 26,4% de toda a eletricidade disponível. Tal quadro deixa margem para o emprego de células de combustíveis como proposta para descarbonizar setores intensivos em combustíveis poluentes, como o de transportes, ao passo que contribui para a geração de eletricidade para setores intensivos desta. A presente pesquisa contribui para a literatura ao suscitar uma discussão sobre a importância das células a combustível na descarbonização da matriz energética, ao passo que contribui para a matriz elétrica. Bem como, por apresentar as principais iniciativas de hidrogênio verde em curso no período de escrita deste trabalho.

Palavras-chave: Matriz Energética. Hidrogênio Verde. Energias Renováveis. Transição Energética.

ABSTRACT

The research gap addressed in this study is the lack of discussion on energy transition and hydrogen fuel cells within the field of economics. The overall objective of this research is to present the role of green hydrogen in the process of decentralizing the Brazilian energy matrix, as well as the significance of fuel cells in the decarbonization of sectors heavily reliant on fossil fuels. To achieve the proposed objective, a strategic focus was applied, specifically targeting hydrogen fuel cells and their fuel. The adopted methodology will be mixed, combining an extensive literature review on the subject with documentary research on relatively undisclosed business reports, coupled with a small exploratory component, considering inferences drawn from ongoing initiatives. The primary outcome of this research indicates that the Brazilian energy matrix, i.e., primary energy generation, is predominantly non-renewable, with over 50% deriving from fossil sources, while the electrical matrix relies on nearly 90% renewable sources. Sectoral analysis of the economy revealed that the most fossil fuel-intensive sector is transportation, accounting for 60% of the total demand for oil and its derivatives. However, when considering electricity-intensive sectors, the picture changes slightly. The energy consumption composition of the industrial sector in 2021 was 27.5% for fossil fuels and 21.4% for electricity, while the residential sector consumed 26.4% of all available electricity. This scenario allows for the deployment of fuel cells as a proposition to decarbonize sectors heavily burdened by polluting fuels, such as transportation, while contributing to electricity generation for similarly intensive sectors. This research contributes to the literature by stimulating a discussion on the significance of fuel cells in the decarbonization of the energy matrix, as well as their contribution to the electrical matrix. Additionally, it presents key initiatives related to green hydrogen in progress during the writing of this study.

Keywords: Energy Matrix. Green Hydrogen. Renewable Energies. Energy Transition.

LISTA DE ILUSTRAÇÔES

Figura 1 -	Esquema ilustrativo do funcionamento de uma célula a combustível	27
Gráfico 1 -	Oferta interna de energia elétrica por fonte - 2021	30
Gráfico 2 -	Participação das fontes na capacidade instalada - 2021	31
Gráfico 3 -	Crescimento e composição da geração fotovoltaica - 1970 até 2022	32
Gráfico 4 -	Comparativo entre fontes renováveis e não renováveis para Brasil - 2012 até 2021	32
Gráfico 5 -	Dependência Externa de Energia (em %)	33
Figura 2 -	Possíveis rotas para a produção e utilização do hidrogênio como vetor energético	42
Figura 3 -	Localização do Porto de Pecém - CE	43
Figura 4 -	Estrutura do complexo de portuário de Pecém - CE	44
Gráfico 6 -	Estimativa da produção de H2V da planta do Porto de Pecém - CE	45
Gráfico 7 -	Estimativa da demanda de eletricidade pela planta de eletrólise em (MW/ano)	46
Gráfico 8 -	Estimativa da produção de amônia (NH3)	47
Gráfico 9 -	Comparativo entre a produção de hidrogênio verde e amônia	47
Figura 5 -	Localização estratégica do Porto de Suape	48
Figura 6 -	Infraestrutura do Porto de Suape	49
Figura 7 -	Localização do projeto no Porto de Suape	50
Figura 8 -	Localização das Zonas A e B	50
Figura 9 -	Ilustração das instalações da Zona B	52
Gráfico 10 -	Comparação entre as fontes renováveis e não renováveis	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Capacidade instalada de geração de energia por região do Brasil (em %) - 2021	37
Tabela 2 -	Cronograma do projeto QAIR em SUAPE	51
Tabela 3 -	Comparação entre a composição da matriz energética com a matriz elétrica Brasileira	54
Tabela 4 -	Composição da demanda do setor de transportes	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL -	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP -	Agência Nacional de Petróleo
BEN -	Balanço Energético Nacional
BNDES -	Banco Nacional do Desenvolvimento
CENEH -	Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio
CEPEL -	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CGEE -	CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CIPP -	Complexo Industrial e Portuário de Pecém
CNPq -	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EPE -	Empresa de Pesquisa Energética
FIEC -	Federação das Indústrias do Estado do Ceará
GEE -	Gases do Efeito Estufa
H2V -	Hidrogênio Verde
INMETRO -	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPHE -	International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy
MCTI -	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MWh -	Magawatt-hora
MME -	Ministério de Minas e Energia
NDC -	Nationally Determined Contribution
NH3 -	Amônia
OCDE -	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ODS -	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PAFC -	Phosphoric Acid Fuel Cell
PEMFC -	Proton Exchange Membrane Fuel Cell

PIB -	Produto Interno Bruto
PNE 2050 -	Plano Nacional de Energia 2050
PROCAC -	Programa Brasileiro de Células a Combustível
PROH2 -	Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio
SOFC -	Solid Oxide Fuel Cell
TWh -	Terawatt-hora
UFC -	Universidade Federal do Ceará
UNFCCC -	United Nations Framework Convention on Climate Change
UNIDO -	United Nations Industrial Development Organization
ZIP -	Zona Industrial Portuária

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14
2. METODOLOGIA 18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
3.1 REFERENCIAL TEÓRICO 19
3.1.1 David Ricardo 19
3.1.2 Jeremy Rifkin 19
3.1.3 Joseph Schumpeter 19
3.1.4 Albert Hirschman 20
3.1.5 Jevons Perroux 21
3.2 DISCUSSÃO INICIAL 21
3.3 HISTÓRICO DE PROGRAMAS DE FOMENTO AO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL 23
3.4 DISCUSSÃO ACERCA DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL 26
3.4.1 Componentes 27
3.5 TIPOS DE CÉLULAS 28
3.5.1 Célula a Combustível de Membrana de Eletrólito de Polímero (PEMFC) 28
3.5.2 Célula a combustível de ácido fosfórico (PAFC) 28
3.5.3 Célula a Combustível de Óxido Sólido (SOFC) 29
3.6 ANÁLISE DA GERAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL 30
3.6.1 Matriz Elétrica 30
3.6.2 Crises hídricas e o modelo hidrelétrico 34
3.6.3 Hidrogênio Verde 37
4. PROJETOS DE IMPLANTAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE EM CURSO NO BRASIL 40
4.1 O HUB DO PORTO DE PECÉM – CE 42
4.1.1 Localização 42
4.1.2 Projeto 44
4.1.3 Estimativas de Produção 45
4.2 O HUB DO PORTO DE SUAPE – PE 48
4.2.1 Localização 48
4.2.2 Projeto 49
4.2.3 Estimativas de Produção 52
5. RESULTADOS 53
6. CONCLUSÃO 58
REFERÊNCIAS 59

1. INTRODUÇÃO

Os mistérios do hidrogênio já são conhecidos desde o século XVIII, quando o cientista britânico Henry Cavendish descreve à Real Sociedade de Londres um experimento no qual sintetiza água através de uma combinação de gases, aos quais chamou de “ar sustentador da vida” e “ar inflamável". Posteriormente, somente com o químico francês Antoine Lavoisier que o “ar inflamável de Cavendish” passou a ser conhecido como hidrogênio, e o “ar sustentador da vida” como oxigênio (HOFFMANN, 2012).

Os estudos sobre um gás inflamável que é obtido a partir da quebra da molécula de água se constitui como um terreno fértil para autores de ficção científica do século XIX. O famoso escritor francês Júlio Verne escreveu, em 1873, uma obra intitulada “A ilha misteriosa”, através da qual narra uma aventura de cinco prisioneiros durante a Guerra Civil Americana. Após caírem de um balão em que estavam fugindo, os prisioneiros tentam sobreviver em uma ilha desconhecida, no Oceano Pacífico. Neste cenário, ocorre um memorável diálogo entre o marinheiro Pencroff, o jornalista do New York Herald, Gideon Spillet, e o líder do grupo, o engenheiro ferroviário Cyrus Smith (VERNE, 2015, p. 250-251):

> Um dia, Gedeon Spilett chegou a lhe dizer:
>
> — Mas, afinal, caro Cyrus, não acha que todo esse movimento industrial e comercial, para o qual prevê uma progressão constante, corre o risco de um dia ser interrompido?
>
> — Interrompido?! E por quê?
>
> — Ora essa, pela falta de carvão, o qual podemos considerar, indubitavelmente, o mais valioso de todos os minérios!
>
> [...]
>
> — E o que será queimado no lugar do carvão?[1]
>
> — Água — respondeu Cyrus Smith.
>
> [..]
>
> - Sim[2], amigos, creio que um dia água será empregada como combustível, que o hidrogênio e o oxigênio que a compõem, utilizados isolada ou simultaneamente, fornecerão uma fonte de calor e luz inesgotáveis e de uma intensidade de que o carvão seria incapaz.
>
> [...]
>
> - Dito isso, creio que, quando se esgotarem as jazidas de carvão mineral, nos aqueceremos com água. A água é o carvão do futuro.

[1] Indagou o Marinheiro Pencroff.
[2] Fala do engenheiro Cyrus Smith.

A escassez do carvão, matéria prima altamente utilizada na época, já era uma preocupação entre o meio intelectual. Vale ressaltar que o carvão mineral foi gradualmente sendo substituído pelos derivados do petróleo, ainda no século XIX. A problemática ganhou proporção a partir da invenção dos motores de combustão interna movidos a gasolina e diesel (RIFKIN, 2003).

O ouro negro do século XX não é eterno, como se achava antes da segunda metade do século XX, após os EUA atingirem seu pico de produção, em 1970. Neste período, metade das reservas de petróleo exploráveis havia se exaurido. Três anos depois, em 1973, houve o primeiro grande choque do petróleo, cenário este que acendeu um sinal de alerta para os EUA e para grande parte do mundo – o fim da era do petróleo estava próximo (RIFKIN, 2003).

Nosso desenvolvimento como sociedade continua ascendendo a necessidade de discussões em torno da nossa relação com o meio ambiente. Segundo Dunn (2002), outro fator crucial sobre a aproximação do fim das reservas de petróleo de extração mais barata é que após esse ponto serão utilizados óleos não-convencionais para gerar energia, como o óleo de Xisto e Areia de Alcatrão por volta de 2050, uma vez que se projeta que a demanda por energia quadruplicará entre 2000 e 2100 (DUNN, 2002). Isso implica em triplicar a emissão de dióxido de carbono, de 6 bilhões de toneladas de carbono por ano, a partir do ano 2000, para 20 bilhões de toneladas, em 2100. Dessa maneira, estima-se que, se o uso de óleos pesados para 2050 se concretizar, viveremos efeitos climáticos sombrios até o fim do século (HOFFMANN, 2012).

Em relatório apresentado à ONU, em 2017, observou-se que os países pobres e de renda média correspondem a aproximadamente 50% do total de dióxido de carbono emitido no mundo, fração esta que pode aumentar, à medida que avança o processo de industrialização (WEO, 2017). Dessa maneira, cenários altamente desenvolvidos ganham destaque quanto a essas problemáticas. De acordo com Pala (2020), somente as nações que compõem o G20, grupo formado por ministros de finanças e chefes dos bancos centrais dos maiores estados-nações do mundo, fundado em 1999 e que abrange atualmente 19 países e a União Europeia, correspondem a 85% da produção econômica mundial. Além disso, 80% do consumo energético e das emissões de gases do efeito estufa se relaciona a esse grupo. Nesse horizonte, a demanda por energia é uma realidade frente ao crescimento das atividades econômicas em que o mundo se insere. Para Weo (2017), espera-se um crescimento de 48% da demanda mundial por energia de 2017 a 2040.

Dessa maneira, a exploração desenfreada dos recursos naturais nos últimos séculos causou sérios problemas em cadeia, como o desmatamento, a escassez de água, mudanças

climáticas, avanço das emissões de carbono e aquecimento global (DANISH, et al., 2019). Destacamos que essas problemáticas ambientais vêm causando um movimento dentro do campo das políticas públicas, no tocante a como gerir a oferta de energia mundial frente ao ritmo de crescimento global.

E para deixar o quadro ainda mais complexo, temos o vigoroso aumento da população mundial, projetada até o fim do século pela Organização das Nações Unidas em 2019. Onde os 7,7 bilhões de habitantes em 2019 passariam a ser 9,7 bilhões em 2023, projeta-se ainda que a população mundial alcance os 11 bilhões até 2100 (ONU, 2019). Diante desta problemática, surgem questionamentos: como alimentar e abastecer de energia essa massa habitacional quando os recursos mundiais já estão se exaurindo? Como gerir essa demanda crescente de modo a suprir uma atividade econômica cada vez mais globalizada e dependente de energia, de modo intermitente? Sem que, com isso, aumente a emissão de poluentes em um meio ambiente que já sofre com os prejuízos de séculos de descaso. A resposta para esse questionamento pode residir nos trópicos, em países com grandes capacidades de produção de energias limpas, como a eólica, solar e a mais nova aposta mundial para o futuro: o hidrogênio.

Assim, diante do exposto acima, consideramos a importância de reflexões sobre o emprego do hidrogênio como uma forma de gerar energia de alto poder calorífico (cerca de 4 vezes maior que os derivados de petróleo), com baixas ou mesmo zero emissões de dióxido de carbono. Atualmente, o hidrogênio é sintetizado majoritariamente para a indústria de fertilizantes. A produção desse elemento químico é feita de forma mais barata a partir de processos químicos com gás natural. Todavia, mesmo sendo um processo mais eficiente, no sentido ecológico, do que os demais combustíveis à base de petróleo, o hidrogênio emite gases do efeito estufa (EPE, 2022a). Um possível caminho a ser considerado é retomarmos as discussões proporcionadas por Júlio Verne, no século XIX, quando ele sugeriu a produção de hidrogênio através da eletrólise da água.

Contudo, um dos principais desafios existentes na síntese do hidrogênio verde por eletrólise é a disponibilidade de insumos, como: água destilada, minérios para os eletrodos e, principalmente, energia elétrica em abundância, entre outros. Além disso, outros empecilhos para a produção se localizam no campo da logística e armazenamento do hidrogênio molecular (H_2) ou mesmo em forma de amônia (NH_3) (EPE, 2022a). Contudo, tais problemas estão sendo contornados devido aos maciços investimentos realizados depois da grande crise do petróleo de 1973.

As ideias sobre as quais vimos explorando nos fazem questionar: como um elemento de tão difícil logística pode ser um forte candidato para substituir o petróleo em um futuro breve? De acordo com Rifkin (2003), através de células à combustível, as quais tem a capacidade de converter hidrogênio em eletricidade. O autor descreve um dispositivo que pode ser a chave para a geração de eletricidade, que será distribuída para as casas e empresas através de um gerador, caso haja excesso de eletricidade, este será lançado à rede pública, cortando assim os custos de expandir a linha de distribuição tradicional. As células à combustível podem representar um largo passo em direção à sustentabilidade e à autossuficiência energética do consumo doméstico, mas também do industrial, amparado em energias limpas (LINARDI, 2022).

Nesse sentido, a presente trabalho de conclusão de curso tem como objeto de estudo as células à combustível de hidrogênio, mais precisamente voltadas para geração estacionária e transportes, como peça fundamental para contribuir para a transição energética em setores intensivos em carbono. Acreditamos que realizar discussões do tipo pode ser importante para suscitar mais debates sobre a transição energética na área de Economia, uma vez que as publicações são majoritariamente em forma de relatórios técnicos ou na área de engenharia, sem esquecer que contribui com a análise da matriz energética à luz de ferramentas econômicas.

Em síntese, o debate acerca do fim da disponibilidade dos combustíveis à base de petróleo, o aumento da demanda por eletricidade e a transição energética, bem como a formação de uma matriz de recursos renováveis menos dependente da matriz hidroelétrica, suscitou motivação para o presente trabalho. O objetivo geral da presente pesquisa é avaliar o papel do hidrogênio verde no processo de descentralização da matriz energética Brasileira, bem como a importância das células de combustível no processo de descarbonização de setores intensivos em combustíveis fósseis. Ao passo que almeja, como objetivos específicos: analisar a matriz energética brasileira com base nos balanços energéticos nacionais (BEN); comparar a matriz energética brasileira com a matriz elétrica para o ano de 2021; apresentar a cadeia de insumos do H2V de modo a explicitar as vantagens competitivas do Brasil; expor as principais iniciativas em curso (ou em projeto) para o H2V no nordeste brasileiro.

A metodologia empregada na pesquisa se classifica como revisão bibliográfica e documental, se propondo a apresentar o papel do hidrogênio verde no processo de descentralização da matriz energética brasileira, de modo a tirar paulatinamente o foco da fonte hidrelétrica, ao passo que contribui para a descarbonização de alguns setores chave da economia nacional.

2. METODOLOGIA

Tendo em vista a vastidão do assunto que compõe essa discussão, faremos um recorte estratégico neste trabalho. Estudaremos o quadro geral da matriz energética brasileira, ao passo que destacamos seus componentes e o papel que deverá ser cumprido pelo hidrogênio e suas células a combustível nos próximos anos. Serão apresentadas as iniciativas para produção de Hidrogênio Verde (H2V) localizadas no nordeste brasileiro, bem como a cadeia de insumos para sua produção, uma vez que esse é o principal diferencial competitivo da geração da região nordeste em relação ao restante do país. Por fim, será apresentado os principais setores, onde as células a combustível serão empregadas, pelo menos nesta primeira etapa da transição energética brasileira.

O estudo será majoritariamente do tipo bibliográfico com fontes secundárias, uma vez que faz uso de dezenas de textos já publicados na área, bem como relatórios de empresas públicas e privadas. Tal técnica é caracterizada, segundo Marconi e Lakatos (2003), pelo emprego de fontes secundárias, ou seja, baseada em documentos que já foram tornados públicos sobre o tema estudado, desde publicações avulsas até teses. De acordo Manzo (1971), a pesquisa bibliográfica não serve apenas para resolver problemas já conhecidos, como também explorar áreas ainda não estudadas ou não suficientemente resolvidas sobre um dado tema. Assim, não se trata de uma simples reprodução do que já é conhecido, mas uma releitura sob novos olhares, podendo até trazer conclusões inovadoras (MARCONI; LAKATOS, 2003).

Por outro lado, parte dela pode ser enquadrada como pesquisa documental, pois faz uso de documentos primários, como editais de concessões e dados estatísticos trabalhados pelo autor. Esse tipo de pesquisa se caracteriza pela coleta de dados apenas em fontes documentais primárias, ou seja, fontes compiladas pelo autor, como estatísticas, publicações parlamentares e documentos privados (MARCONI; LAKATOS, 2003).

Contudo, uma parcela do estudo pode ser de cunho exploratório, uma vez que faz projeções de possibilidades futuras que estão em curso, mas que não se concretizaram ainda. Os estudos desta natureza têm como objetivo conhecer com maior profundidade um determinado problema, de modo a explicita-lo ou construir hipóteses sobre seu funcionamento, assim o ponto chave de pesquisas deste tipo é o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições de forma pioneira, sendo comum o uso de dados primários em pesquisas que envolvem amostras populacionais (GIL, 2002).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção será apresentado todas as teorias e argumentações econômicas empregadas nesta pesquisa, de modo a proporcionar um melhor entendimento das ideias aqui expressas.

3.1.1 David Ricardo

Uma das contribuições mais notáveis do célebre economista inglês, David Ricardo, foi sua teoria das vantagens comparativas. Ele argumenta que as nações devem especializar-se na produção dos bens que são relativamente mais eficientes e comercializar com outras nações (exportam), ao passo que importam aqueles bens que são mais ineficientes na produção (RICARDO, 1996). Tal teoria foi uma das precursoras dos estudos sobre comércio internacional.

3.1.2 Jeremy Rifkin

O economista e escritor americano, Jeremy Rifkin, apresenta o conceito de economia do hidrogênio em sua obra, de mesmo nome, publicado inicialmente em 2003. Neste conceito temos a inserção do hidrogênio como uma promessa futura para solucionar o problema energético mundial, e paulatinamente um meio para substituir o petróleo como principal fonte de energia (RIFKIN, 2003). A economia mundial passaria por uma intensa transição energética, onde esse novo vetor energético seria completamente limpo e renovável. O Rifkin defende que a transição representa mais do que um avanço, mas também uma mudança de paradigma, pois as energias fósseis, como o petróleo, já foram motivos de guerras e grandes desestabilizações da economia internacional (os choques do petróleo da década de 1970), e o hidrogênio surge como uma fonte abundante e acima de tudo mais democrática de geração de energia (RIFKIN, 2003).

3.1.3 Joseph Schumpeter

Um dos maiores economistas do século XX, o austríaco Joseph Schumpeter, trouxe dois conceitos fundamentais para se entender a dinâmica do capitalismo e suas contradições, a destruição criadora e a teoria dos ciclos econômicos. O fenômeno da destruição criadora ocorre quando um conjunto de tecnologias novas entra em operação no mercado, fazendo com que as tecnologias anteriores se tornem obsoletas e sejam esquecidas (SCHUMPETER, 1961). Por

isso o termo, a novidade leva a um processo de destruição das tecnologias anteriores. Outro ponto importante das contribuições de Schumpeter é a teoria dos ciclos econômicos de inovação, onde se pode observar três momentos fundamentais, de acordo com Nogami (2019):

a) Fase inicial: momento onde a inovação distingue os empreendedores inovadores daqueles que seguem fazendo uso das tecnologias tradicionais. É nesta etapa que temos as maiores taxas de lucros.
b) Fase de instabilidade: nesta etapa os lucros caem naturalmente, pois a maioria das empresas já se adequou às novas tecnologias, aumentando assim o seu nível de competitividade.
c) Fase descendente: neste momento as tecnologias inicialmente inovadoras se tornaram tradicionais, as taxas de lucro caem vigorosamente, anunciando assim que o fim deste ciclo está próximo.

E assim segue o fluxo de inícios e fins de ciclos, tal movimento é conhecido como o movimento evolucionista do mercado oriundo do processo de destruição criativa das inovações técnicas (NOGAMI, 2019).

3.1.4 Albert Hirschman

Outro grande expoente das ciências econômicas do século XX foi o alemão Albert Hirschman, o qual foi um importante teórico da escola desenvolvimentista da América Latina entre as décadas de 1960 e 1970. Hirschman trouxe em sua obra a ideia de uma estratégia de desenvolvimento desequilibrada, onde ele defendia que o problema da industrialização em nações atrasadas não urgia por medidas simultâneas, como defendiam os defensores da teoria do desenvolvimento equilibrado, mas sim de medidas sequenciais em setores chave (BIANCHI, 2007). Ou seja, ao invés de gastar energia em problemas complexos e generalizados, como concentração fundiária, falta de poupança e instabilidade administrativa, estes deveriam buscar meios de canalizar as forças de modo a induzir o desenvolvimento. Estas medidas simultâneas são chamadas de encadeamentos (BIANCHI, 2007). Um encadeamento para trás implica em enviar estímulos para os setores que produzem insumos para a dada indústria, e encadeamentos para frente induzem a criação de setores que demandem os produtos da dada indústria (BIANCHI, 2007). Por isso, a importância de setores que podem gerar um elevado grau de encadeamento, principalmente para trás, pois inicia um processo de barateando dos insumos.

3.1.5 Jevons Perroux

A relevância dos centros tecnológicos para o desenvolvimento de uma economia encontra respaldo na Teoria dos Polos de Crescimento e Desenvolvimento, proposta pelo renomado economista francês François Perroux. (ALMEIDA; YAMASHITA, 2014). Esta teoria defende que o crescimento econômico não nasce de forma difusa em um dado espaço, mas sim irradia de certos pontos, chamados polos de crescimento (ANDRADE, 1987). De acordo Perroux (1964), os polos de crescimento são oriundos de uma indústria motriz, a qual concentra capital e mão de obra em uma área delimitada, o que acaba atraindo outras industrias e aumentando assim o dinamismo da vida regional. De acordo com Souza (1993), a indústria classificada como motriz deve ter três requisitos fundamentais, que são:

a) Crescer a uma taxa superior à taxa média da indústria nacional.

b) Possui inúmeras ligações de compra de insumos com outras indústrias chave.

c) Apresenta-se como uma atividade inovadora, geralmente de grande dimensão e estrutura oligopólica.

Com base nestas teorias podemos fazer uma analise no cenário energético brasileiro.

3.2 DISCUSSÃO INICIAL

No início do século XXI, Rifkin (2003) faz uma análise da entropia[3] para comparar o Império Romano com a nossa Era Industrial. Paulatinamente, Rifkin (2003) observa que nos últimos séculos foram criadas enormes e complexas estruturas tecnológicas e institucionais, que dependem de recursos abundantes, mas não diversificados. Assim, conforme há um aumento do gasto de energia aumenta-se também a conta da entropia, ou seja, mais energia é demandada e mais energia é perdida, até que se chega a um ponto de colapso, onde há a falta de combustível de modo abrupto e as complexas estruturas modernas começam a ruir (RIFKIN, 2003).

Assim, uma das possíveis saídas para fugir desta catástrofe anunciada é a redução da entropia por meio das energias renováveis, porém estas ainda não têm representatividade suficiente para ocupar o espaço das fontes fósseis. Portanto, o emprego das energias alternativas

[3] Entropia é um conceito da termodinâmica que se refere a perda de parte da energia útil durante o processo de transformação de um estado para outro, por exemplo: o motor de combustão interna transforma combustível à base de petróleo em propulsão para movimentar o carro, contudo parte desta energia útil se perde em calor.

em maior escala pode surtir um efeito de amortecimento durante o processo de transição entre a matriz fóssil e a matriz zero carbono (TASCA, 2018).

Deste modo, se faz necessário o crescente investimento em fontes de energia alternativas para substituir o petróleo de médio prazo. De acordo com Prestes et al. (2019), os investimentos em infraestrutura energética são de fundamental importância, uma vez que refletem tanto o ritmo dos setores industriais, comerciais e o de serviços, quanto a capacidade de aumentar o produto nacional. Estes estão estreitamente relacionados com o processo produtivo, uma vez que o consumo de energia é um indicador do aquecimento da economia.

O consumo de energia elétrica tem registrado aumento nos últimos anos, sendo o setor industrial um dos principais responsáveis por esse resultado, juntamente com a região mais densamente povoada e industrializada – o sudeste do Brasil (EPE, 2021a). No setor industrial, a demanda por insumos energéticos é algo positivo, uma vez que ele possui um papel crucial e necessita de investimento contínuo, dado que sua estrutura reflete diretamente na aceleração do crescimento econômico de uma região ou país (GOTARDO; BARCHET; PIFFER, 2016; PRESTES et al., 2019).

Destacamos que 70% de toda a produção de energia gerada no ano de 2017 foi originada de fontes limpas, das quais 65% advém de hidrelétricas. Dessa forma, a nação brasileira se encontra em uma posição dependente do regime pluviométrico para a sua produção energética. Consequentemente, em períodos de forte estiagem, tal qual ocorreu na região sudeste, em 2014, são acionadas as termelétricas. Diante disso, se enfrenta desafios quanto ao elevado custo do combustível para o abastecimento desta forma de produção (EPE, 2021a). Além disso, esse procedimento causa um aumento considerável nas contas de luz (bandeira vermelha) das residências, ao passo que encarecem os produtos industriais devido ao aumento dos custos, tal processo acarreta perda de competitividade.

Diante desta problemática, consideramos imperativos estudos sobre a aplicação do hidrogênio como vetor energético, pois o seu alto poder calorífero e suas baixas (ou mesmo zero) emissões de gases do efeito estufa guardam o potencial de gerar profundas mudanças na matriz energética, sendo avaliado como tecnologia disruptiva no Plano Nacional de Energia para 2050 do governo federal (EPE, 2022a).

Contudo, uma tecnologia avaliada como disruptiva não pode ser implantada de um momento para outro. De acordo com o Rifkin, (2003), por meio de uma gradual substituição do petróleo e de seus subprodutos. A priori, uma sugestão seria o uso de células de combustíveis (dispositivo que transforma hidrogênio em eletricidade) e a geração distributiva de produção de

energia (uso de pequenos ou médios geradores domésticos movidos a hidrogênio conectados à rede principal de energia da cidade). O autor ainda argumenta que democratizar este tipo de energia implicaria no pilar da sustentabilidade industrial amparado em sólidas bases de tecnologias cooperativas e renováveis (RIFKIN, 2003).

O hidrogênio entra na pauta de discussão mundial como um vetor para a transição energética. De acordo com Reis (2021), a eficiência energética se baseia em quatro pilares fundamentais:

a) O incremento da eficiência energética, de modo a entregar o mesmo nível de riqueza com um menor consumo energético.
b) Substituição de fontes energéticas não renováveis por fontes renováveis, de modo a diminuir a emissão de gases do efeito estufa.
c) Eletrificação da economia, isto é, a substituição de combustíveis à base de petróleo por eletricidade gerada de fontes renováveis.
d) A atualização do setor elétrico às novas tecnologias, de modo a melhor se posicionar frente às novas condições climáticas impostas pelo aquecimento global.

Assim, a eficiência energética traz vantagens já confirmadas, com ganhos de competitividade, redução das emissões de poluentes e uso mais consciente dos recursos naturais. Ao passo que, representa profundas mudanças nos padrões de consumo, nas tecnologias de captura e gestão dos gases do efeito estufa (REIS, 2023). Portanto, acreditamos que o hidrogênio empregado em conjunto com as células a combustível pode cumprir todos os requisitos dispostos acima, de modo a representar uma luz para a geração elétrica limpa, confiável e acima de tudo eficiente.

3.3 HISTÓRICO DE PROGRAMAS DE FOMENTO AO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL

A seguir será apresentada a seguir uma breve linha do tempo dos programas voltados ao desenvolvimento de Hidrogênio no Brasil.

As primeiras iniciativas da aplicação do hidrogênio como fonte energética no Brasil remontam da década de 1990, mais precisamente no ano de 1995. Este período, ficou marcado pelo início da atuação do Ministério da Ciência e Tecnologia na temática do hidrogênio. O primeiro grande marco diz respeito à criação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH), em 1998 (ANDRADE, LORENZI, 2014). No início do novo século, em

2002, foi criado o Programa Brasileiro de Células a Combustível (ProCaC), que se tratou de um projeto para promover a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico com a parceria da iniciativa privada (BRASIL, 2002).

Em 2003, o Brasil se vinculou como membro da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia – IPHE (Do inglês - *International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy*). Esta parceria internacional visava um intercâmbio de informações industriais e governamentais, bem como uma cooperação acadêmica sobre o hidrogênio e células de combustível (ANDRADE; LORENZI, 2014). Em 2005, a ProCaC mudou seu nome para Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH2). Este foi um momento que contou com uma maior participação de empresas e universidades.

De acordo com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE (2010), após dois anos, o Ministério de Minas e Energia divulgou o Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil. Este documento apresenta metas a serem cumpridas no prazo de 20 anos, as quais se destacam:

a) Exploração de diferentes eixos tecnológicos nos quais o Brasil possua vantagens comparativas.
b) Papel do gás natural na transição energética até o emprego em massa do hidrogênio verde.
c) Distribuição dos mercados de geração distribuída.

No ano de 2010, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE (2010), publicou um trabalho intitulado "*Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025*", através do qual expôs diretrizes para o incentivo à economia do hidrogênio, com o apoio de ministérios (MCTI, MME), agências governamentais (ANEEL, CNPq, BNDES e Inmetro) e instituições de pesquisa (Cepel e Lactec) para ações de curto, médio e longo prazo. Entre os principais pontos podemos destacar:

a) Incentivo ao desenvolvimento tecnológico em processos, de eletrólise de água, reforma de hidrocarbonetos e gaseificação de biomassa.
b) Incentivo ao desenvolvimento tecnológico, em células a combustível, com a finalidade de redução de custos de membranas separadoras, o conjunto membrana-eletrodos (MEAs), catalisadores com maior tolerância a contaminantes e eletrônica de potência.

No entanto, os projetos do hidrogênio foram postos de lado, tendo em vista a mudança de prioridades da agenda da política energética. Parte disso ocorreu devido à descoberta de reservas de petróleo e gás natural na camada geológica do pré-sal, em 2006 (BRASIL, 2021).

Em 2017, foi criada a Associação Brasileira de Hidrogênio - ABH2. Seu objetivo era organizar, de forma mais eficiente, as ações e recursos financeiros, com uma ação coordenada com os Ministérios e algumas agências governamentais, como: ANP, ANEEL, Eletrobrás, entre outros (ABH2, 2022).

O Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis nos aponta que:

> O uso de energias renováveis no Brasil representa uma oportunidade para a produção de hidrogênio por eletrólise quando houver excesso de oferta de energia elétrica de origem intermitente. O hidrogênio possibilita o armazenamento eficiente de energia por longos períodos e pode ser utilizado para mobilidade e geração distribuída de energia. Além do uso direto do hidrogênio, o domínio de sua produção também agrega a geração de gás de síntese (H2 + CO) necessário para o desenvolvimento de rotas alternativas para produção sintética e renovável de combustíveis, aproveitando a infraestrutura existente, melhorando o acesso a combustíveis em regiões remotas, com resultados locais diretos no desenvolvimento social, econômico e ambiental (BRASIL, 2018. p. 10).

Como vimos argumentando, o interesse na produção de energia a partir do hidrogênio vem ganhando destaque nas discussões. Em 2020, foi lançado o Plano Nacional de Energia - PNE 2050. Nele, o hidrogênio foi mencionado como tecnologia divisora de águas no contexto da descarbonização da matriz energética. O documento elenca diversas aplicações e usos, bem como traz recomendações para a política energética e a criação do arcabouço jurídico-regulatório, para incentivar a cadeia logística (armazenamento, transporte, produção e consumo) do hidrogênio (EPE, 2020). Diante disto, o Ministério de Minas e Energia e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) se viram pressionados a criar um roteiro tecnológico para o desenvolvimento do hidrogênio.

Embora as discussões pontuadas até aqui venham atravessando diversos contextos, foi somente em 2021 que a EPE tornou público o documento "As *Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio*". O objetivo deste trabalho foi expor de forma geral o mercado, os custos, a rota tecnológica e o papel do hidrogênio na transição energética. Ou seja, a EPE lançou os fundamentos da estratégia brasileira para o hidrogênio, a fim de melhor explorar suas vantagens comparativas (EPE, 2021a). O Ministério de Minas e Energia também deu um passo importante ao proporcionar a parceria Brasil-Alemanha, com o estudo "*Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o*

Hidrogênio Verde". Este trabalho serviu para traçar um panorama geral dos agentes da indústria e das tecnologias disponíveis. Foram consultadas mais de 100 personalidades para compor essa obra, de modo a situar nosso país em relação aos países pioneiros do hidrogênio (GIZ, 2021).

Vale salientar que, neste mesmo ano, o Brasil foi atraído à coliderança do Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia, que teve uma forte relação com o pacto energético sobre o hidrogênio. Este movimento firmou relações com os compromissos voluntários a partir da meta 7 do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que apresenta objetivos para atingir um emprego universal das energias limpas.

Por fim, vale salientar que existe um tipo de célula a combustível mais indicada para cada aplicação, seja pela sua capacidade de geração ou pelas suas características físicas de operação. Neste primeiro momento, as tecnologias de células que estão mais recorrentemente em evidência são as voltadas para aplicações em mobilidade urbana e as de geração estacionária para uso em geração distribuída. No tópico seguinte, será apresentado brevemente as principais tecnologias deste cunho, bem como suas principais vantagens e desvantagens.

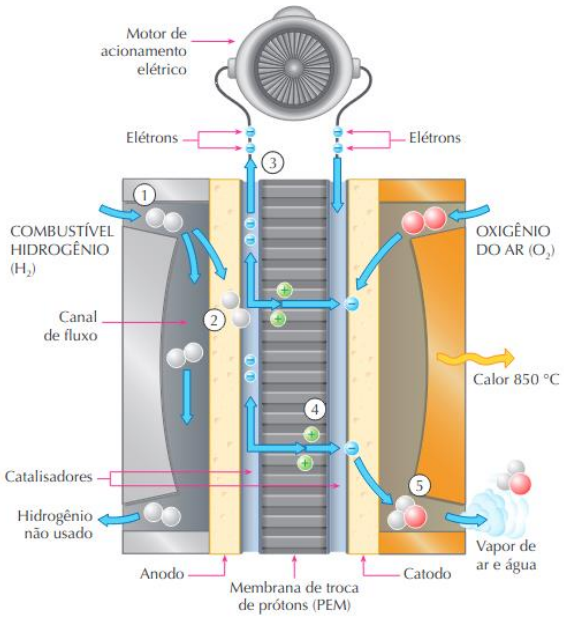
3.4 DISCUSSÃO ACERCA DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

As células a combustível se assemelham às baterias, devido a ambas transformarem energia química em elétrica e calor. Contudo, as baterias armazenam energia química para ser convertida em eletricidade quando necessário, enquanto que as células a combustível se diferenciam pelo seu funcionamento contínuo[4]. Isto acontece pela produção da corrente elétrica a partir da combustão eletroquímica a frio de um combustível (LINARDI, 2022).

As células à combustível são dispositivos aperfeiçoados para a utilização de hidrogênio como combustível, para a geração de eletricidade e calor, de modo eficiente e sem emissão de gases do efeito estufa (FELTRE, 2004). O princípio do seu funcionamento foi postulado por William Robert Grove, em 1839, ao fazer uma experiência de quebra da molécula da água. Através de um processo de eletrólise, conseguiu-se obter os elementos hidrogênio e oxigênio em um curto espaço de tempo, por meio da passagem de uma corrente elétrica espontânea entre os eletrodos da célula (Figura 1) (HOOGERS, 2002).

[4] Para ilustrar essa diferença pense na pilha como uma vela, que se consome para gerar luz, já a célula a combustível seria um lanterna à bateria que ao consumir toda a sua energia gerando luz basta recarregar a bateria e o processo se reinicia.

Figura 1. Esquema ilustrativo do funcionamento de uma célula a combustível



Fonte: Feltre, 2004.

3.3.1. Componentes

Os principais componentes das células a combustível são:

a) Ânodo: eletrodo do combustível (de carga negativa), onde ocorre a oxidação do combustível, ou seja, faz uma ponte entre o combustível e o eletrólito causando a perda de elétrons e a criação de íons positivos (REIS, 2016).

b) Cátodo: eletrodo do oxidante (de carga positiva), onde ocorre a redução do oxidante, ou seja, faz uma ponte entre o oxigênio e o eletrólito e recebe os elétrons liberados no ânodo e formam íons ou moléculas de gás (o hidrogênio se forma aqui) (REIS, 2016).

c) Membrana eletrolítica: também conhecida como camada de difusão, consiste em uma camada porosa que se situa entre o eletrodo e o eletrólito, tal componente permite a reação entre o combustível e o oxidante no eletrodo para a geração de eletricidade (FELTRE, 2004).

d) Eletrólito: é um componente químico capaz de se dissociar em íons carregados, de modo a ser capaz de conduzir eletricidade. Em geral, as células a combustível são denominadas conforme o eletrólito empregado (REIS, 2016).

3.5 TIPOS DE CÉLULAS[5]

3.5.1. Célula a Combustível de Membrana de Eletrólito de Polímero (PEMFC)

As células do tipo PEMFC consistem em uma tecnologia que emprega uma membrana de troca iônica como eletrólito. Nesta célula, o único líquido presente é a água, desta forma, o gerenciamento dela é um assunto crítico para um bom desempenho, pois a água do subproduto não deve evaporar mais rápido do que é produzida, para que a membrana não resseque (JACINTO JUNIOR et al., 2022). Ainda de acordo com Jacinto Junior et al. (2022), devido a essa limitação, as células deste tipo operam em temperaturas abaixo dos 100 °C (mais precisamente entre 60°C e 80°C). A aplicação deste tipo de tecnologia é, em sua grande maioria, para fins automotivos e portáteis (AMINUDIN et al., 2023; LINARDI, 2022).

a) Vantagens das PEFC: Residem principalmente no fato da PEFC possuir uma baixa temperatura de operação que permite um *start* rápido e a ausência de agentes corrosivos dispensa o uso de materiais exóticos que encarecem o dispositivo (como ocorre com outros tipos) (LINARDI, 2022). Testes demonstram que as PEFC são capazes de entregar uma alta densidade de corrente ao ser abastecida com hidrogênio puro (GANG; KWON, 2018).
b) Desvantagens das PEFC: Os principais gargalos desta tecnologia residem na difícil tarefa do gerenciamento térmico, uma vez que a temperatura de operação da célula é relativamente baixa e para aplicações automotivas ainda há a dificuldade de operar uma célula à base de água em locais com temperaturas negativas (como Rússia e parte da Europa) (JIAO; LI, 2011).

3.5.2. Célula a combustível de ácido fosfórico (PAFC)

Este tipo de célula emprega um ácido fosfórico concentrado como eletrólito, e sua temperatura de operação varia entre 150-220 ºC (CAMPARIN et al., 2007). Em temperaturas mais baixas do que a especificada, a célula do tipo PAFC tem perdas significativas de desempenho (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004). O ácido fosfórico é relativamente estável se comparado com outros tipos de ácidos, de modo que as células do tipo PAFC são capazes de operar em temperaturas acima do estabelecido para o ácido (MARUYAMA et al., 2002). Devido a essas características, sua principal aplicação é para geração de energia estacionária (CAMPARIN et al., 2007).

[5] Neste trabalho não foi mencionado as células do tipo álcool direto (DAFC), que embora possa ser abastecida com etanol (componente de fácil produção no Brasil) apresenta fortes ineficiências. Deste modo, o uso do etanol será tratado apenas na sua conversão para hidrogênio e não no uso direto pelas razões acima mencionadas.

a) Vantagens das PAFC: De acordo com Maruyama et al., (2002) uma das principais vantagens desta tecnologia é sua maturidade, tendo em vista que as PAFC foram os projetos pioneiros de células à combustível, sendo a única tecnologia comercial desde 1994. Outro ponto é a sua temperatura de operação que permite o uso de materiais mais simples, barateando assim o seu custo. Sem esquecer que o sistema oferece uma eficiência de 37 a 42% quando abastecido com gás natural, bem como o calor residual gerado por sua operação pode ser usado em processos industriais de cogeração (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004).
b) Desvantagens das PAFC: Embora as células do tipo PAFC possuam uma complexidade estrutural equivalente às células do tipo PEFC, elas requerem procedimentos rigorosos de refino dos combustíveis, bem como peças adjacentes para funcionar de forma eficiente (CAMPARIN et al., 2007). Por fim, devido às suas características altamente corrosivas, o ácido fosfórico requer materiais caros empregados em pilhas (principalmente placas separadoras de grafite) (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004).

3.5.3. Célula a Combustível de Óxido Sólido (SOFC)

Nesta tecnologia é empregado um óxido de metal sólido e não poroso como eletrólito, o qual opera em um intervalo de 600 até 1000°C, em que os íons de oxigênio geram uma condução iônica (LINARDI, 2022). Este tipo de célula trabalha com ânodos cerâmicos especiais (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004). Com os recentes avanços, foram desenvolvidos SOFC compactos e de alto desempenho, utilizando materiais de custo relativamente baixo, fazendo com que suas principais aplicações desta tecnologia sejam: geração estacionária, energia móvel, energia auxiliar para veículos e aplicações especiais (AMINUDIN et al., 2023).

- Vantagens das SOFC: devido ao seu eletrólito sólido, as SOFC têm a flexibilidade de serem moldadas em várias formas, sem contar que elimina (ou atenua) problemas crônicos existentes em outros tipos de células, como corrosão, inundação dos eletrodos e movimento do eletrólito (LINARDI, 2022). Além disso, devido a sua alta temperatura de operação, o combustível empregado é convertido em hidrogênio dentro da célula, sem necessitar do uso de transformadores externos (HACKER; MITSUSHIMA, 2018). Outro ponto positivo é o fato dos materiais empregados nas SOFC serem relativamente

modestos em custo, sem esquecer que o uso de metais nobres como catalisadores (como platina e ródio) são dispensados devido a temperatura do eletrólito (PENG et al., 2021). Por fim, a temperatura de operação permite a aplicação do calor excedente em processos de cogeração (LINARDI, 2022).

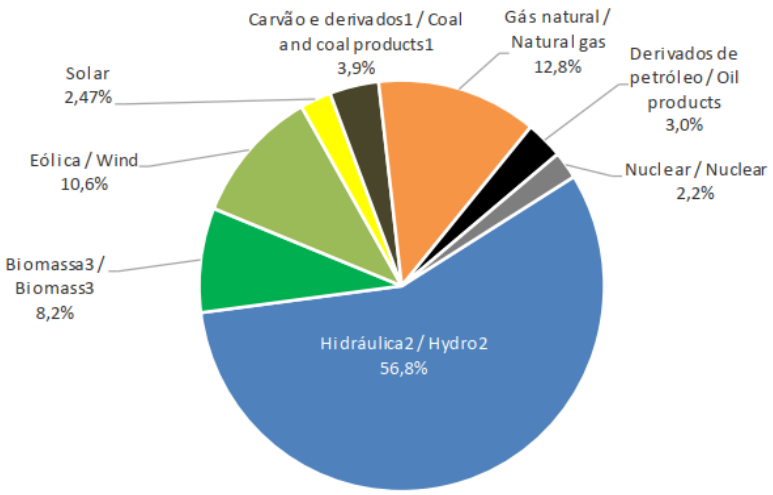
- Desvantagens das SOFC: a principal dificuldade desta tecnologia vem dos diferentes graus de expansão térmica dos componentes da estrutura das células, de modo que a vedação em arranjos mais compactos se torna difícil (AMINUDIN et al., 2023). Mesmo que os materiais empregados em seu arcabouço não sejam os mais caros, o processo de fabricação é mais sofisticado, o que implica em custos mais elevados (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004). Outro problema é a corrosão dos componentes metálicos devido a exposição a altas temperaturas, mesmo minimizada pelos componentes cerâmicos ainda representa um ponto de atenção (PENG et al., 2021). Por fim, tais fatores implicam em uma redução da vida útil do dispositivo.

3.6 ANÁLISE DA GERAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

3.6.1 Matriz Elétrica

A matriz elétrica brasileira é predominantemente limpa, cerca de 87,9% de toda a energia produzida é de origem renovável (EPE, 2023b). A fonte hidrelétrica ainda é predominante, com 57% do total da geração (já com as importações), contudo seu percentual reduziu bastante, se comparado com a marca de 90% do final da década de 1990 (EPE, 2022b; SOUZA et al, 2004). No gráfico 1, observamos a participação de cada fonte na matriz elétrica em 2021.

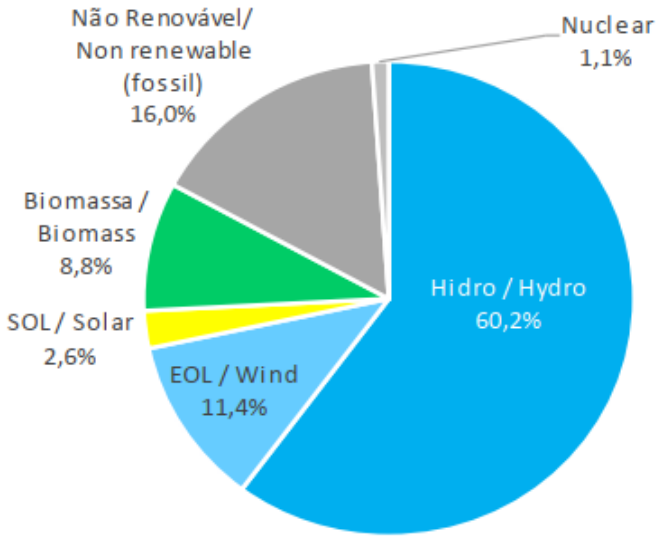
Gráfico 1. Oferta interna de energia elétrica por fonte - 2021



Fonte: EPE, 2022.

Ao longo da última década, outras fontes de energia se tornaram significativas e ainda devem ganhar mais espaço na matriz energética, como é o caso da energia eólica, a qual atingiu uma geração de 81,6 TWh em 2022, representando um aumento de 12,9% em relação ao ano anterior. Ao passo que a planta nacional instalada alcançou uma geração de 23.761 MW, expansão de 14,3% em relação a 2021 (EPE, 2023b). Outro caso de igual destaque é a energia solar fotovoltaica, a qual em 2022 somou uma geração de 30,1 TWh, um crescimento de 79,8%. A sua capacidade instalada também saltou, alcançando 24.453 MW, expansão de 82,4% em relação a 2021. No gráfico 2, observamos a distribuição da capacidade instalada por fonte.

Gráfico 2. Participação das fontes na capacidade instalada - 2021

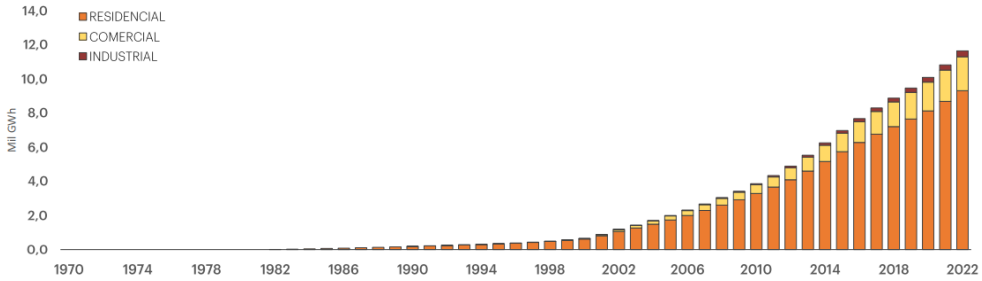


Fonte: EPE, 2022.

A produção de energia elétrica em 2021 no Brasil atingiu a marca de 656,1 TWh, tal resultado inclui centrais públicas e autoprodutores. As empresas de geração pública contribuíram com 82,6% da geração total, a geração de fonte hídrica reduziu sua participação em 8,6% em comparação com o ano anterior, mas ainda sim é a maior fonte geradora (EPE, 2022b). A autogeração, aquela compreendida como a eletricidade gerada pelo próprio consumidor ou empresa para o seu consumo, correspondeu a 65,9 TWh, o que representa 17,4% do total de eletricidade produzido, resultado puxado pelo crescimento da mini e micro geração, reflexo da crescente popularização dos painéis fotovoltaicos (LOMBARDI, 2023). O gráfico 3, aborda bem essa composição do uso da energia solar, nela observamos o vertiginoso

crescimento da implantação de painéis de 2002 até 2022, com especial destaque para o uso esmagador desta tecnologia de geração para fins residenciais[6].

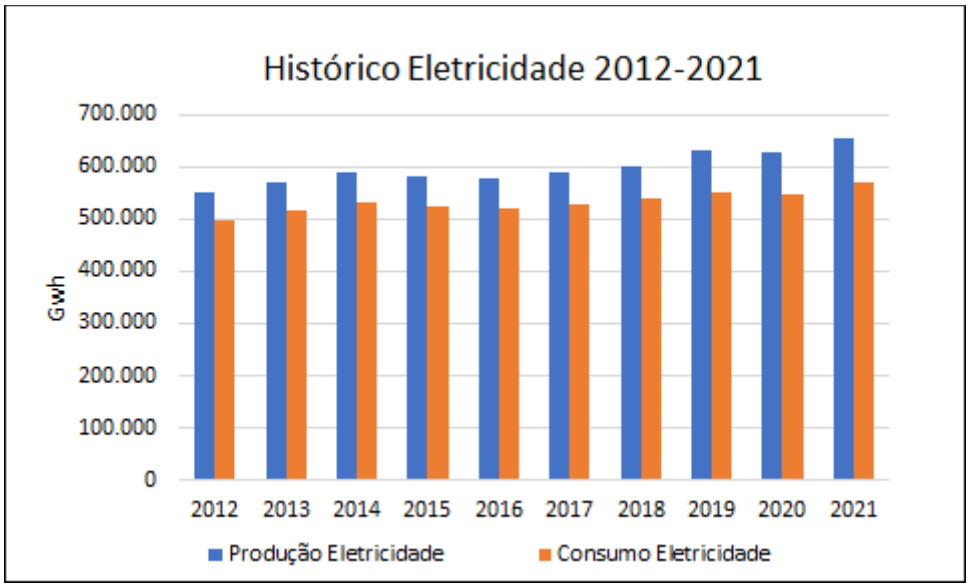
Gráfico 3. Crescimento e composição da geração fotovoltaica - 1970 até 2022



Fonte: EPE, 2023.

Já a geração de fontes não renováveis representou 22,6% do total nacional, contra 16,8% em 2020, com destaque para o gás natural, mas vale ressaltar que parte deste resultado se deve ao acionamento das termelétricas como medida emergencial em resposta à crise hídrica de 2021 (EPE, 2022b; SANTOS; FIGER, 2022). As importações são na ordem de 23,1 TWh que somados a geração interna corresponde a um montante de 679,2 TWh disponível para consumo, quanto a demanda por energia ficou na ordem de 570,8 TWh, um aumento de 5,7% em relação a 2020 (EPE, 2022b). A seguir, no gráfico 4, observamos a distribuição atual da produção e consumo de eletricidade para o 2021.

Gráfico 4. Comparativo entre fontes renováveis e não renováveis para Brasil - 2012 até 2021

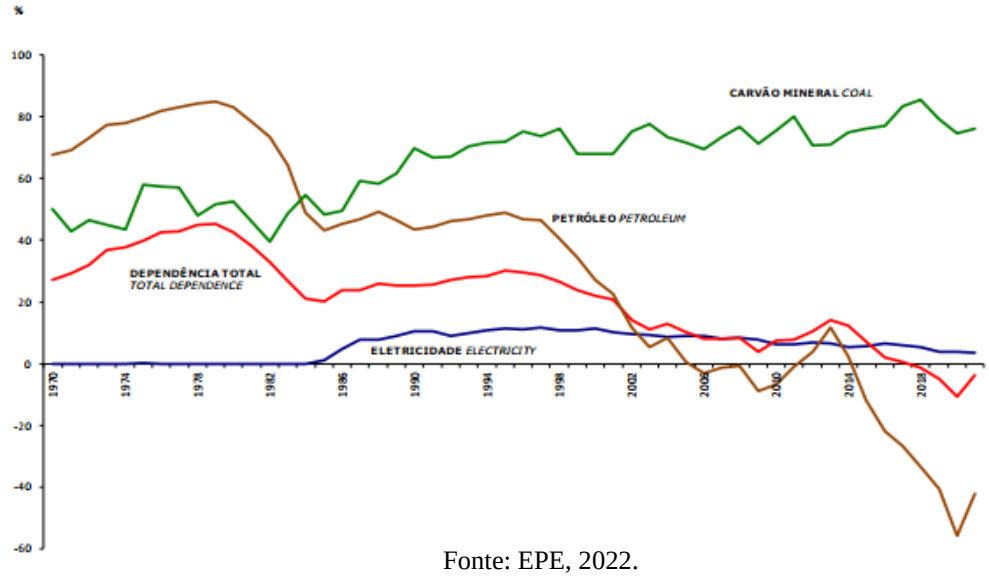


Fonte: Elaboração própria com dados da EPE, 2022.

[6] A fonte fotovoltaica é comumente utilizada em mini e microgeração distribuída para fins domésticos.

Após a crise hídrica de 1999-2001, a matriz energética brasileira tem se diversificado, aumentando a sua capacidade de geração, ao passo que reduz a sua dependência energética histórica, com esclarece os estudos da EPE (2022b), o gráfico 5 mostra a redução da dependência energética ao longo da segunda metade do século XX até meados de 2018, respectivamente.

Gráfico 5. Dependência Externa de Energia (em %)



Fonte: EPE, 2022.

De acordo com a EPE (2023b), os setores da economia (mais intensivos em eletricidade) que mais consumiram energia em 2022 foram os transportes e o setor industrial, com 33% e 32% do total disponível, respectivamente.

Sobre a questão da participação brasileira no cenário energético internacional, representamos 14,1% da produção renovável mundial em 2020 e cerca de 11,5% da matriz limpa da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) também em 2020, como deixa claro o relatório da EPE (2023b). Quando tratamos exclusivamente de eletricidade o cenário muda um pouco, em 2019 o Brasil correspondeu a 2,3% da geração mundial, ao passo que nações como a China correspondem a 27,7%, contudo no mesmo ano o Brasil obteve a marca de terceiro maior importador de energia elétrica do mundo, perdendo apenas para os Estados Unidos e a Itália (EPE, 2022b). Vale ressaltar que a importação brasileira é majoritariamente oriunda do Paraguai através da usina hidrelétrica binacional de ITAIPU, a qual opera desde 2007 com uma capacidade de geração instalada de 14 GWh, com

produção anual de 103,098 milhões de MWh, energia elétrica suficiente para alimentar a demanda mundial por 1 dia e 17h respectivamente (ITAIPU BINACIONAL, 2017).

3.6.2 Crises hídricas e o modelo hidrelétrico

A economia brasileira, no período compreendido entre 1970 até 1999, obteve um crescimento médio de 4,2% ao ano, ao passo que a oferta de energia crescia a taxas semelhantes, cerca de 4,3% ao ano (SOUZA et al, 2004). Contudo, o padrão de vida do final do século XX tinha incorporado vários novos produtos, algo que fez com que a demanda por eletricidade entre os anos de 1990 e 2000 crescesse 49%, superando assim a oferta que ficou na casa dos 35%, no período, algo que já poderia qualificar um estado de racionamento de energia, caso o Brasil estivesse sob a égide do sistema termoelétrico (TOLMASQUIM, 2000).

Com o passar das décadas observou-se a mudança da participação da eletricidade na matriz energética, de modestos 16% em 1970 para 39,5% em 1999, reflexo da mudança de consumo de alguns setores, como a indústria, que passou de 31% para 39% no período (SOUZA et al, 2004). A intensa crise econômica vivida pelo Brasil no final dos anos 80 e começo dos anos 90 colaborou com o colapso do sistema monopolista estatal que correspondia a 80% da geração na época (FILHO et al, 2001).

A época de ouro para os investimentos no setor elétrico foi entre os anos de 1975 e 1990, com especial destaque para o período das grandes obras hidrelétricas de Itaipu e Tucuruí entre 1977 e 1982, com dois momentos de ligeira queda, em 1983 a 1984 (crise da dívida externa) e entre 1989 e 1990 (FILHO et al, 2001). Contudo, após o ano de 1990 a situação do setor mudou radicalmente. Para Souza et al (2003), o estado se encontrava na década de 1990 descapitalizado e, portanto, sem capacidade de fazer novos investimentos. A solução seria, portanto, buscar em parcerias com o mercado privado uma saída para suprir o crescimento da demanda por eletricidade.

Contudo, Tolmasquim (2000), discorda desta visão de falta de recursos governamentais, argumentando que as empresas estatais tinham sim condições de investir, contudo o governo não permitiu a realização dos investimentos, uma vez que a política da época era reduzir o déficit público e os investimentos das estatais era tido como despesa, estima-se que as estatais deixaram de investir 17 bilhões de outubro de 1998 até junho de 2000. Assim, o bastão passou para a iniciativa privada, que também não investiu.

O governo esperava que as empresas privadas construíssem usinas termelétricas com gás natural importado da Bolívia. Contudo, as instabilidades institucionais, a possibilidade de comprar usinas prontas através das privatizações e a questão da desvalorização cambial de 1999 acabaram com qualquer resquício de esperança (TOLMASQUIM, 2000). Deste modo, o setor energético do fim da década de 90 já vivia os momentos finais de uma crise anunciada.

Uma alternativa viável para a energia hidrelétrica disponível na década de 1970 era a energia nuclear, contudo o projeto nuclear brasileiro sofreu intensa oposição político-partidário e pressões diplomáticas vindo dos EUA, que mesmo com as parcerias com o governo Alemão firmadas em 1975, não houve um repasse da tecnologia necessária, nem tampouco o envio facilitado do material radioativo para o Brasil para os projetos das Usinas Nucleares de Angra I e II localizadas no sudeste do país (KURAMOTO; APPOLONI, 2000).

Um dos principais problemas do modelo hidroelétrico, é a centralização, uma vez que no Brasil os centros de geração se concentram ao sul e ao norte, ficando distantes dos principais centros de consumo (sudeste), causando uma crescente dependência do sistema elétrico nacional a um sistema de transmissão eficiente e confiável (MACEDO et al, 2014). Problema este que encarece a energia devido aos gastos com linhas de distribuição muito longas, ao passo que a Nuclear poderia gerar eletricidade em locais muitos mais próximos do seu destino de consumo, mas que necessitam de estudos detalhados para não pôr em risco a população, como no caso de Angra dos Reis (KURAMOTO; APPOLONI, 2000).

Muito embora o começo do século XXI já dispusesse de uma capacidade instalada de 68.200MW de energia hidrelétrica, suficiente para gerar uma sobra da ordem de 15.000MW em condições normais, foi boicotada pela estiagem iniciada em 1999 aliada ao crescimento do PIB que elevou a demanda por energia, tal condição anulou as reservas técnicas dos reservatórios de geração (SOUZA et al., 2004). Sem contar que na época houve ainda agravantes para as condições energéticas, entre as quais destaca Souza et al., (2004):

a) Presença de 26 hidrelétricas e 2 termelétricas em construção paradas desde 1996 com potência projetada para 8.903MW, um incremento de 13% na disponibilidade de energia nacional, algo que poderia ter amortecido a crise.
b) O atraso e a burocracia na obtenção das licenças ambientais necessárias para as obras.
c) Falta de prioridade política na pauta de energia, deixando a área à deriva.

Contudo, devemos fazer uma ressalva, a crise energética impactou as diferentes regiões e setores da economia de forma heterogênea, uma vez que, as regiões norte e sul estavam bem, pois eram autossuficientes na geração, mas não podiam transferir a eletricidade para o Sudeste (onde a situação estava no vermelho), bem como há setores da economia (como o siderúrgico) intensivos em eletricidade que sofreram mais do que outros setores com bem mais flexibilidade para mudar os insumos ou mesmo os importar, em caso de necessidade.

Assim, em 30 anos, a energia hidrelétrica de posse estatal se consolidou como o padrão mais empregado nas terras tupiniquins, neste período a capacidade de geração instalada quintuplicou, chegando à virada do século (ano 2000) com uma capacidade de 68.200MW em operação (incluindo cogeração), contudo a matriz energética ficou gravemente dependente deste tipo de geração, cerca de 90% de hidroelétricas e somente 10% de termelétricas e nucleares (SOUZA et al., 2004).

Assim, o modelo energético deste período se caracterizou como Estatal-monopolista, aliado a lenta e desarticulada transição do modelo estatal para o modelo privado, ao aumento dos riscos regulatórios deste novo modelo e a falta de flexibilidade durante a implementação das reformas do setor energéticos, bem como a crise fiscal dos anos 80 e 90 foi o prelúdio das crises do começo do século XXI, a qual foi prevista desde 1999 (FILHO et al., 2001). Deste modo, a crise hídrica e o racionamento da eletricidade dos anos 2000 serviram para romper a inércia política da época, levando as questões energéticas a posição de principal pauta do período e levantando uma sinalização para a necessidade de investimento em novas fontes energéticas, como a eólicas e a solar com intuito de diversificar a matriz energética e reduzir a vulnerabilidade que os longos períodos de estiagem causaram.

Em 2021 o país voltou a passar por uma crise hídrica. Os reservatórios do Sudeste e Centro Oeste, responsáveis por aproximadamente 70% do armazenamento do país, se encontravam no menor nível histórico de 26%, em meio aos efeitos econômicos da pandemia co Covid-19 o governo teve que arranjar meios para não elevar muito o preço da energia, contudo os preços atingiram o teto de curto prazo em junho de 2021, devido a atividade emergencial das termelétricas (SANTOS; FIGER, 2022). Problemas de escassez hídrica tem se tornado cada vez mais agudos e recorrentes, devido à ação climática, algo que torna a pauta da descentralização da matriz energética brasileira cada vez mais urgente SANTOS; FIGER, 2022).

3.6.3 Hidrogênio Verde

O nordeste brasileiro é uma região composta por 9 estados, famoso pelas belas praias, poucas chuvas e clima sempre quente, de agora em diante será conhecido também pelo caráter determinante para a geração energética. A tabela[7] 1, mostra a distribuição percentual da capacidade de geração instalada nas regiões do Brasil, como podemos ver o Nordeste apresenta destaque na geração de todos os tipos de energia (menos a hidroelétrica e a nuclear), os dados são do relatório da EPE (2022b) sobre o ano de 2021.

Tabela 1. Capacidade instalada de geração de energia por região do Brasil (em %) - 2021

REGIÃO	HIDRO *HYDRO*			TERMO *THERMAL*			EÓLICA *WIND*			SOLAR *SOLAR*			NUCLEAR *NUCLEAR*	TOTAL *TOTAL*			*REGION*
	SP	APE	TOTAL	SP	APE	TOTAL	SP	APE	TOTAL	SP	APE	TOTAL	SP	SP	APE	TOTAL	
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	*TOTAL*
NORTE	30,3	7,5	29,2	13,4	2,2	8,2				0,2	12,0	0,4		22,4	3,3	19,6	*NORTH*
NORDESTE	10,6	10,4	10,6	37,7	11,1	25,4	89,7	91,9	89,7	72,8	59,7	72,6		27,0	11,1	24,8	*NORTHEAST*
SUDESTE	22,4	39,5	23,2	29,8	60,3	43,9	0,1	8,0	0,1	26,7	11,6	26,5	100,0	21,7	56,1	26,6	*SOUTHEAST*
SUL	22,9	34,4	23,4	12,6	9,1	11,0	10,2	0,1	10,2	0,2	7,1	0,3		18,6	14,0	18,0	*SOUTH*
CENTRO-OESTE	13,8	8,3	13,6	6,5	17,4	11,5				0,0	9,7	0,1		10,3	15,6	11,0	*CENTER-WEST*

Nota: Não inclui Micro e Mini Geração Distribuída. / *Note: Does not include Distributed Generation.*

Fonte: EPE, 2022.

Essa região será o palco de grandes transformações na matriz energética, operado pelas plantas de hidrogênio que serão implantadas em alguns dos seus estados. Como vemos na tabela anterior 89,7% da capacidade eólica instalada se encontra nesta região, bem como 72,8% das plantas fotovoltaicas, lembrando que essa estatística não inclui micro e minigeração, ou seja, o setor residencial não é representado aqui, apenas a geração comercial.

Tais valores são muito favoráveis para a região, pois o principal insumo para o processo de eletrólise da água para geração de hidrogênio do tipo verde é justamente a eletricidade, uma região que dispõe de energia elétrica em boa quantidade, baixo preço e de procedência confiável torna-se um destino dos principais investidores internacionais interessados no ouro verde do século XXI (BEZERRA, 2021). O protagonismo desta região se ampara na teoria das vantagens comparativas de Ricardo (1996), a qual pode ser empregada para justificar o plano de especialização do Nordeste na produção de hidrogênio verde, pois sua estrutura de produção de energia limpa permite isso, o que repercute na eficiente produção de hidrogênio.

[7] Grifo do autor.

Uma evidência que valida esse argumento está relacionada com o preço estimado do quilograma do hidrogênio verde produzido em solo nordestino, especificamente nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Bahia. O qual varia entre US$ 2 a US$7 dólares por kg, apresentando o melhor custo de produção entre os estados brasileiros (CASTRO et al, 2023a). Fazendo um comparativo com as projeções de preços mundiais, temos que a média mundial [8]orbita os US$ 2,9 dólares por kg de H2 em 2020, no futuro espera-se atingir a ambiciosa meta de reduzir os custos de produção para US$ 1,2 dólares por kg de H2 até 2030 (HYDROGEN COUNCIL, 2020). Na América Latina o país que lidera as estimativas de custo de produção até 2030 é o Chile[9], com um valor estimado de US$ 1,5 dólares por kg de H2V, tal façanha se deve, sobretudo as fontes de energia elétrica abundantes, vindas das usinas solares no deserto do Atacama e das eólicas na região de Magallanes (CASTRO et al, 2023b).

Contudo, para a instalação de uma tecnologia dessa envergadura, para fazer frente os preços mundiais, faz-se necessário uma boa infraestrutura regional e uma política significativa de investimentos nos primeiros anos dos projetos. Tais investimentos, quando voltados para a eficiência energética geram diversos benefícios, os quais podemos citar: prevenção ao esgotamento dos recursos naturais; melhorar a qualidade do meio ambiente, podendo reduzir as emissões de gases do efeito estufa; reduzir a dependência da matriz energética dos combustíveis fósseis; aumentar a competitividade das plantas industriais ao reduzir os custos; redução dos déficits de eletricidade; e melhorar a segurança energética (EUROPEAN COMMISSION, 2016).

As políticas nacionais de desenvolvimento sustentável têm forte amparo na busca de eficiência energética. A principal finalidade dessas políticas é reduzir as emissões de carbono, à medida que cumpre as metas ambientais. Historicamente vemos que há uma degradação do meio ambiente nos estágios iniciais do processo de crescimento econômico, e uma consequente tendência de melhoria à medida que a renda de um país atinge certos patamares, como foi o caso da industrialização da Inglaterra do século XVIII (RIFKIN, 2003).

Em relatório, a *United Nations Industrial Development Organization* (UNIDO, 2011) faz uma estimativa que aponta que 65% dos investimentos de retorno real em tecnologia energética estão em nações em desenvolvimento. Os programas de geração de energias renováveis em países em desenvolvimento destacam-se de forma pioneira para a redução das

[8] Nestas estimativas são computadas diversas fontes de produção de hidrogênio, não apenas a fonte por eletrólise que origina o tipo de hidrogênio verde.
[9] O hidrogênio do Chile é do tipo verde, o classificando como o principal concorrente do Brasil dentro da América do Sul.

lacunas de emissão de gases (WEO, 2017). Isso nos leva a considerar como o incentivo a essas políticas pode colocar nações no caminho do desenvolvimento.

O Acordo de Paris, um documento elaborado com o fim de monitorar o aquecimento global, foi celebrado entre as principais nações do mundo (BRASIL, 2015). Este documento foi a pedra angular para a redução das emissões de Carbono, assinado em dezembro de 2015 pelas nações que compõem a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC, no inglês). O Acordo de Paris marcou a 21ª Conferência das Partes (COP21), tendo por pauta propor medidas para a redução das emissões de dióxido de carbono, que teve início previsto para 2020. O objetivo principal foi estar diante das ameaças de mudança do clima, além de fortalecer a capacidade dos países membros (BRASIL, 2015).

A proposta do acordo era criar um comprometimento entre as nações, de modo a manter o aumento da temperatura média mundial em no máximo 1,5 ºC em relação aos níveis pré-industriais. Desta forma, as nações membros oficializaram seu compromisso em relação à redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e ações de enfrentamento às mudanças climáticas através da chamada Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, acrônimo em inglês) (BRASIL, 2015).

O documento confirma o compromisso do Brasil em reduzir sua parcela nas emissões dos gases do efeito estufa em 37% até 2025, e em 50% até 2030, tendo por referência o Brasil do ano de 2005. A longo prazo, a expectativa é alcançar a neutralidade climática até 2050. Por fim, a NDC prevê um processo de transição, onde serão implantadas diversas mudanças e adaptações nos setores econômicos (BRASIL, 2022).

Paralelamente a essa discussão, há um intenso debate acerca da crescente demanda por energia elétrica. De acordo com levantamentos realizados pela Empresa de Pesquisas Energéticas - EPE (2023), essa demanda crescente foi liderada pelas regiões Sudeste e Norte do país, com taxas de 4,6% e 2,8%, respectivamente. A região Sudeste é a maior consumidora de eletricidade, correspondendo a 48,7% do total em 2022, onde o setor industrial responde à maior fatia do bolo, com 36,2% (EPE, 2023).

Os principais setores industriais consumidores de energia elétrica da região Sudeste, de acordo com o estudo da EPE (2023), são os de metalurgia, fabricação de produtos químicos e o setor de fabricação de produtos minerais não metálicos. A condição setorial da demanda exposta anteriormente é justificável, pois são estes setores os responsáveis por ofertar a maior parte dos insumos básicos demandados por outros setores da economia, tais como construção civil e produção de máquinas e equipamentos (JÚNIOR, et al. 2018).

4. PROJETOS DE IMPLANTAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE EM CURSO NO BRASIL

A evolução da tecnologia empregada em novas fontes de energia renováveis em detrimento das antigas fontes não-renováveis é uma tendência natural do sistema capitalista. Onde uma inovação disruptiva surge para substituir os meios tradicionais de produção, tal processo foi amplamente estudado nas obras do economista austríaco Joseph Schumpeter, sendo denominada por ele como destruição criadora (SCHUMPETER, 1961). Trazendo esta ferramenta para o contexto do hidrogênio verde, temos que o investimento na sua produção se encaixa perfeitamente dentro da lógica da destruição criadora, pois estima-se que em algumas décadas o petróleo venha a ser substituído pelo hidrogênio, ao passo que toda a cadeia de hidrocarbonetos instalada será gradualmente extinta.

A produção de hidrogênio em solo nacional ocorrerá em centros industriais especiais, chamados de hubs, os quais podem ser entendidos mais precisamente como ambientes de inovação tecnológica abertos, ou seja, buscam por meio de parcerias colaborativas gerar oportunidades para o desenvolvimento de soluções inovadoras (SEBRAE, 2021). Esses centros podem ser abarcados dentro do paradigma Schumpeteriano devido à sua contribuição nos ciclos econômicos, especialmente na fase inicial caracterizada pela inovação disruptiva. Essa etapa se cria lucros substanciais e um impulso competitivo significativo, liderados pelas empresas que estão na vanguarda desse movimento (NOGAMI, 2019).

A relevância desses centros encontra respaldo na literatura econômica através da Teoria dos Polos de Crescimento e Desenvolvimento, proposta pelo economista francês François Perroux (ALMEIDA; YAMASHITA, 2014). Em conformidade com Andrade (1987), podemos classificar os hubs de hidrogênio verde como polos de crescimento. Tais polos, são oriundos de uma indústria motriz que se caracteriza por concentrar capital e mão de obra qualificada em um dado espaço, algo que acaba mudando o dinamismo econômico da região onde é instalada e impulsionando a economia local (PERROUX,1964). Deste modo, podemos vislumbrar a indústria motriz Perrouxiana nos projetos de HUB de hidrogênio no Nordeste, onde a tecnologia necessária para a produção é importada e deve ser ponta para garantir uma produção eficiente.

Outro fator que fortalece a justificativa dos esforços em favor da implantação dos hubs de hidrogênio verde encontra-se sob a égide da teoria da industrialização por encadeamento,

proposta pelo economista alemão Albert Hirschman. De acordo com sua teoria, deve ser dado fomento prioritariamente para as indústrias que promovam um forte processo de encadeamento tanto para trás, enviando estímulos para os setores produtores insumos, quanto para frente, incentivando os setores que demandam os bens produzidos por essa indústria (BIANCHI, 2007). Os hubs instalados no Nordeste podem ser enquadrados dentro da teoria de Hirschman, pois seu encadeamento para trás fomenta a produção sustentável de energia elétrica através de fontes renováveis, à medida que o seu encadeamento para frente incentiva a criação de indústrias que empregam o hidrogênio na produção de amônia e outros compostos derivados.

Dentro dos hubs a produção de hidrogênio ocorre de modo integrado, de modo a gerar uma cooperação produtiva entre países para a construção de plantas industriais eficientes e inovadoras especializadas neste tipo de atividade. Contudo, existe mais de um tipo deste gás, cada um recebe uma cor que remete a sua origem e nível de poluição gerado para a sua síntese, quanto mais claro for a cor melhor. O hidrogênio pode ser sintetizado de diversas maneiras, de acordo com Bezerra (2021), podemos ter quatro fontes principais:

a) Hidrogênio Marrom: sintetizado a partir do carvão mineral sem a captura de carbono. Tal processo torna o seu produto muito poluidor em comparação com os demais tipos de hidrogênio.

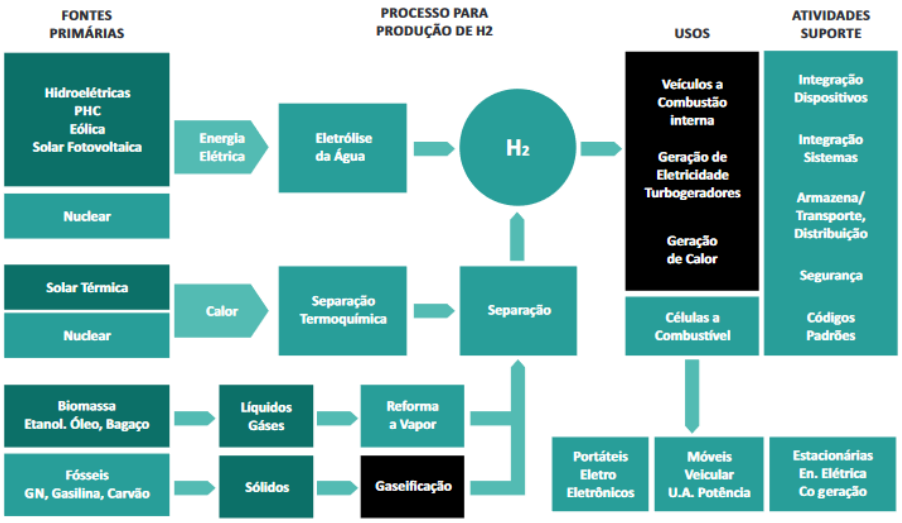
b) Hidrogênio Cinza: é sintetizado a partir de combustíveis fósseis, principalmente o gás natural, mas não faz uso da técnica de sequestro de carbono. Algo que o torna poluente, mas a níveis inferiores ao do tipo marrom.

c) Hidrogênio Azul: é o hidrogênio cinza, mas que emprega a captura de carbono, portanto, é mais limpo em relação aos anteriores, embora polua também.

d) Hidrogênio Verde: É o tipo renovável produzido por eletrólise, para gerar um diferencial competitivo na produção a energia elétrica usada no processo deve vir de fontes limpas, como: eólica, solar, biomassa e etc.

Na Figura 2, vemos um esquema que representa as rotas de produção do hidrogênio, bem como seus possíveis usos.

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



Fonte: Bezerra, 2021.

Existem muitos argumentos dentro da teoria econômica que respalda a produção de um vetor energético limpo, como o hidrogênio. O economista estadunidense Jeremy Rifkin (2003), exemplifica essa ideia em forma comparativa com as energias fósseis, o ferramental empregado é a chamada curva em sino de Hubbert[10], onde as fontes fósseis estão neste modelo que cresce à medida que as reservas baratas e abundantes de energia aumentam, chegam ao pico e depois decrescem devido a redução das reservas e aumentos dos custos de exploração. Já as energias renováveis não tem um pico de produção, ou seja, entram na lógica de economias de escalas, onde a tecnologia de ponta empregada causa um vertiginoso aumento da produção, o que causa um barateamento considerável dos custos (SZWARCFITER; DALCOL, 1997). Assim, a curva de Hubbert para essas energias se comporta como uma linha reta crescente (RIFKIN, 2023).

Por fim, veremos a duas importantes exemplos de iniciativas de implantação de hubs voltados para a geração de hidrogênio no nordeste brasileiro, ambos situados em portos.

4.1 O HUB DO PORTO DE PECÉM – CE

4.1.1 Localização

O local escolhido (Figura 3) para a implantação do empreendimento Hidrogênio Verde Pecém (H2V Pecém), de acordo com MRS AMBIENTAL (2023), está situado entre os

[10] A curva em sino de Hubbert é um ferramental analítico, consistindo em uma função côncava que cresce à medida que a produção é abundante e barata, até que chega a um pico de produção e depois decresce devido a redução da produção e aumentos dos custos. Tal abordagem é muito comum quando tratamos de combustíveis fosseis.

municípios de São Gonçalo do Amarante, no litoral norte Cearense e Caucaia, na região metropolitana de Fortaleza (Figura 3). A área propriamente dita é pertencente à zona industrial do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), a qual está situada a aproximadamente 55 km de distância da capital – Fortaleza, como observado no mapa abaixo (CAVALCANTE, 2019).

Figura 3. Localização do Porto de Pecém - CE

Fonte. CAVALCANTE, 2019.

O estado do Ceará possui dois importantes portos: o Porto de Mucuripe, conhecido como porto de Fortaleza, localizado na capital do estado; e o Porto de Pecém, que é situado na região metropolitana, mais precisamente no município de São Gonçalo do Amarante (ADECE, 2014). O Porto de Pecém começou a operar em 1995, já sob a égide do Complexo Industrial e Portuário de Pecém, somente em novembro de 2001 (CAVALCANTE, 2019). Sua infraestrutura é formada, de acordo com MRS AMBIENTAL (2023), por instalações portuárias, duas áreas urbanas, área de proteção ambiental e quatro setores de ocupação industrial e de serviços, como visto na imagem a seguir. A zona industrial e a zona de processamento de exportação do Ceará são geridas pela Companhia de Desenvolvimento do Complexo Industrial e Portuário do Pecém - CIPP S/A (CEARÁ, 2017).

Figura 4. Estrutura do complexo de portuário de Pecém - CE

Fonte: CIPP, 2023.

O Complexo de Pecém dispõe de 13.337 hectares para a implantação de indústrias. Sua infraestrutura (Figura 4) se destaca por possuir retroáreas destinadas para processamento de exportações, bem como, um píer específico para a descarga de múltiplos cargas, denominado, Terminal de Múltiplas Cargas - TMUT, facilitando assim o desembarque de peças/cargas de maior peso e dimensão, algo que tem chamado a atenção de empresas do setor petroquímico e siderúrgico (MRS AMBIENTAL, 2023). Outro fator determinante para o sucesso deste empreendimento é a sua localização geográfica, uma vez que o CIPP está próximo dos Estados Unidos, Europa e Norte da África, tratando-se de uma Joint venture formada pela parceria entre o estado do Ceará e o Porto de Roterdã, nos Países Baixos (CIPP, 2022a). Um dos mais ambiciosos e recentes projetos do Porto de Pecém é a instalação de um HUB tecnológico para a produção de hidrogênio Verde, lançado em 2021, com parcerias com a Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC) e a Universidade Federal do Ceará (UFC) (CIPP, 2022a).

4.1.2 Projeto

O Complexo Portuário de Pecém se tornou pauta no mundo devido a sua abertura para a instalação de HUBs, até dezembro de 2022, o Porto já havia assinado 3 pré-contratos e 24 memorandos de entendimento (MoUs) com empresas Brasileiras e estrangeiras, como a White Martins, EDP Renováveis, Casa dos Ventos, Engie, Eren do Brasil, Qair, AES Brasil, Linde, Fortescue Future Industries e a TransHydrogen (EPBR, 2022). Quando terminados, esses projetos somam 8 GW em capacidade de geração por eletrólise para produzir 1,3 milhões de toneladas de hidrogênio verde por ano, possuindo potencial para suprir cerca de 25% da demanda de importação de Roterdã até 2030 (CASTRO et al, 2023a).

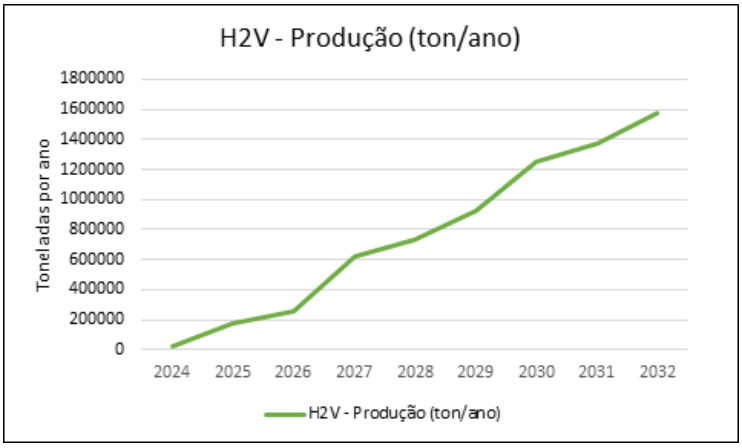
Um dos projetos já em estado piloto é o dirigido pela empresa de energia Portuguesa EDP (Energias de Portugal), a qual planeja implantar um projeto piloto com uma usina solar de 3 MW e uma unidade de módulo eletrolisador de 1,25 MW com média de produção de 22,3 kg/h de H2, servindo como norte para os projetos da economia do hidrogênio brasileiro (EDP BRASIL, 2021). A obra iniciada em junho de 2021 e prevista para ser concluída em junho de 2024 prevê um investimento total de R$41,9 milhões de reais.

A EDP Brasil, em janeiro de 2023, comunicou o lançamento da primeira molécula de hidrogênio verde produzida em solo cearense (CIPP, 2022b). O evento contou com a presença do Ministro da pasta de Minas e Energia, Alexandre Silveira, que marcou o início do desabrochar dos projetos deste cunho no Nordeste (MME, 2023).

4.1.3 Estimativas de Produção

De acordo com MRS AMBIENTAL (2023), as estimativas de produção de hidrogênio verde em solo cearense são bastante otimistas, como vemos no gráfico 6.

Gráfico 6. Estimativa da produção de H2V da planta do Porto de Pecém - CE

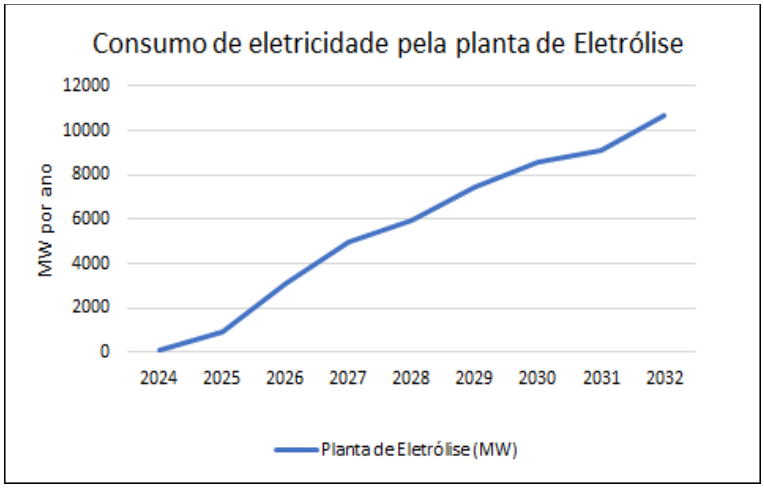


Fonte: Elaboração própria com dados da MRS AMBIENTAL, 2023.

A produção estimada de hidrogênio verde deve passar de 200 mil toneladas já em 2025, superando a casa de 1 milhão e 600 mil toneladas já em 2032, um crescimento de 800%. Evidência clara do ganho em escala gerado pela tecnologia, aliado a isso temos o fato que o hidrogênio produzido em solo nordestino é aquele que possui o mais baixo custo de produção em comparação com o Brasil, cerca de US$2 a US$7 dólares por quilo, como mencionado anteriormente (CASTRO et al, 2023a). Outro ponto importante é a planta de eletrólise, esta é responsável pela quebra da molécula de água em hidrogênio e gás oxigênio, contudo neste

processo é consumido muita energia elétrica, a seguir o gráfico 7 acompanha o aumento do consumo de eletricidade por ano no porto de Pecém.

Gráfico 7. Estimativa da demanda de eletricidade pela planta de eletrólise em (MW/ano)

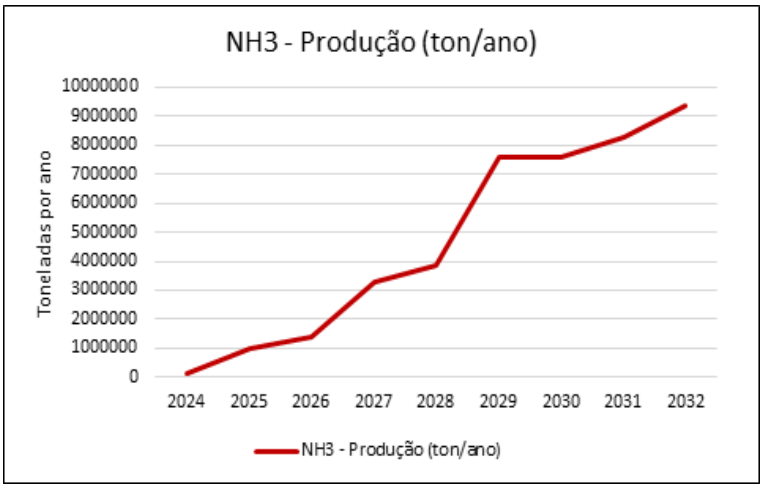


Fonte: Elaboração própria com dados da MRS AMBIENTAL, 2023.

Como podemos observar, tal atividade é intensiva em energia elétrica, uma vez que a demanda anual se aproxima de 4000 MW já para 2026. E supera 10 mil MW em 2031, assim justifica-se o pesado investimento em geração de eletricidade por meios renováveis que ocorre paralelamente aos projetos do H2V.

Outrossim, temos outro ponto que merece atenção, até do tópico da eletricidade, a questão do armazenamento, uma vez que o hidrogênio é um gás que pode ser transformado em líquido mediante a um processo de compressão e refrigeração, contudo tal processo tem custos muito elevados, assim uma solução proposta é transformá-lo em amônia (NH3) para melhorar a logística de armazenamento e transporte, o gráfico 8 mostra uma estimativa da produção de amônia em Pecém (MRS AMBIENTAL, 2023).

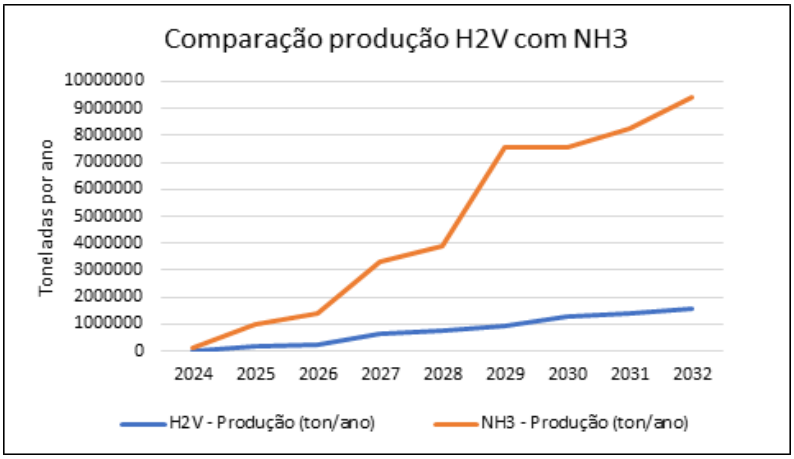
Gráfico 8. Estimativa da produção de amônia (NH3)



Fonte: Elaboração própria com dados da MRS AMBIENTAL, 2023.

Até o ano de 2028 espera-se atingir a marca de 4 milhões de toneladas de amônia, ao passo que se estima superar, antes de 2032, a casa das 9 milhões de toneladas, o que corresponde a um crescimento de 225% em 5 anos.

Gráfico 9. Comparativo entre a produção de hidrogênio verde e amônia



Fonte: Elaboração própria com dados da MRS AMBIENTAL, 2023.

Por fim, observa-se no gráfico 9 o comparativo entre a síntese de hidrogênio e a produção de amônia, vemos um significativo distanciamento já a partir de 2026, algo que se torna bem mais expressivo em 2032, tal estimativa sustenta a aposta do Porto de Pecém ser tornar futuro player muito significativo na síntese de amônia.

4.2 O HUB DO PORTO DE SUAPE - PE

4.2.1 Localização

Outra importante iniciativa de criação de um HUB de hidrogênio verde em curso no Nordeste encontra-se no Complexo Industrial Portuário de Suape, o qual é classificado como o porto público mais estratégico do Nordeste, uma vez que 90% do PIB (Produto Interno Bruto) de toda a região se encontra a 800 Km do porto (SUAPE, 2020a). Outro ponto que merece destaque é a localização estratégica do porto em relação às principais rotas de navegação comercial do porto, bem como as conexões com os principais portos do mundo, como observado na Figura 5.

Figura 5. Localização estratégica do Porto de Suape

Fonte: QAIR BRASIL, 2023.

O Complexo Industrial Portuário de Suape, atualmente administrado pela empresa estatal SUAPE (Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros) desde 1978 com vínculo com a Secretaria de Desenvolvimento Econômico de Pernambuco desde 1992, é um projeto de desenvolvimento regional fundamental para a economia do país, uma vez que o empreendimento atrai diversos investimentos de diferentes setores para o estado de Pernambuco e a região nordeste (SUAPE, 2020b).

Figura 6. Infraestrutura do Porto de Suape

Fonte: EPBR, 2021.

Outro fator que merece destaque é o fato do Porto de Suape estar entre os 10 melhores portos públicos do Brasil em opção de conexão marítima, sendo o que apresenta o maior tráfego de escalas de contêineres da região Norte e Nordeste, como visto na Figura 6 (SUAPE, 2020b). Tendo em vista tamanho destaque, não foi surpresa o anúncio do interesse do porto em sediar um HUB de hidrogênio Verde e Azul em suas imediações. O edital número 002/2022 estabelece a forma e as diretrizes que a administração do porto exige, como veremos a seguir (SUAPE, 2022).

4.2.2 O projeto

O local destinado para a planta de produção de Hidrogênio Verde de Pernambuco, está situado no município de Ipojuca, litoral sul do estado, em uma área da Zona Industrial Portuária (ZIP) do Porto de Suape, a qual está localizada a aproximadamente 40 km de distância da capital - Recife, como observado na Figura 7 (SUAPE, 2022).

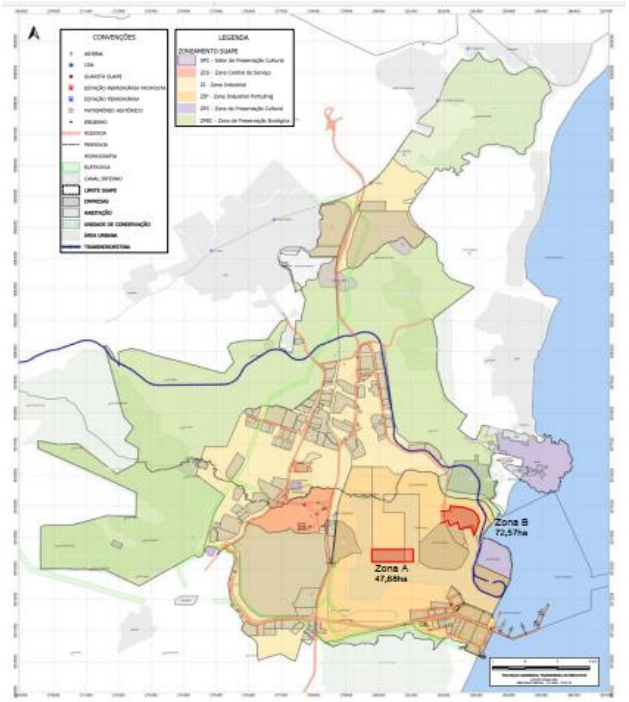
Figura 7. Localização do projeto no Porto de Suape

Fonte: SUAPE, 2022.

O edital do chamado público do Porto de SUAPE (2022), ainda destaca que a área reservada para a implantação do projeto é dividida em duas partes, como descrito abaixo e a seguir na Figura 8:

1) Zona A: contempla uma área de 47,68 ha.
2) Zona B: contempla uma área de 72,57 ha.

Figura 8. Localização das Zonas A e B



Fonte: SUAPE, 2022.

O edital prevê a implantação de 1 indústria produtora de hidrogênio verde, a partir da dessalinização da água do mar, 2 unidades produtoras de hidrogênio azul, a partir de reforma do gás metano, bem como está previsto mais 2 outras indústrias para a fabricação futura de amônia a partir dos insumos gerados pelas anteriores (SUAPE, 2022).

A vencedora do edital do porto de SUAPE foi a subsidiária Qair H2 Brasil, empresa pertencente ao grupo francês QAIR. O grupo conta com mais de 30 anos de experiência na produção independente de energia em 20 países e 4 continentes (QAIR BRASIL, 2022). A missão da Qair é contribuir para a transição energética mundial, a partir de fontes renováveis. A produção de hidrogênio é voltada para exportação, principalmente para a América do Norte e União Europeia (QAIR H2, 2022).

O projeto a ser desenvolvido no porto de Suape está dividido em 4 fases dispostas na tabela 2 abaixo:

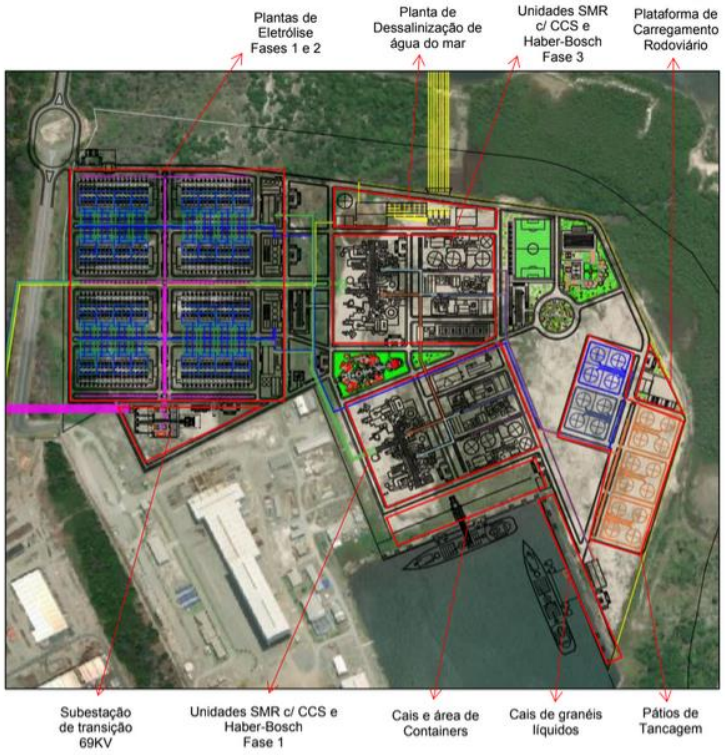
Tabela 2. Cronograma do projeto QAIR em SUAPE

FASES DO PROJETO	PRAZO PREVISTO
FASE I	JUN/24 ATÉ DEZ/25
FASE II	DEZ/25 ATÉ DEZ/27
FASE III	DEZ/27 ATÉ DEZ/29
FASE IV	DEZ/29 ATÉ DEZ/31

Fonte: Elaboração própria com dados da QAIR, 2022.

O edital prevê a disponibilidade de duas zonas para a implantação do projeto, a Zona A com 47,68 ha e a Zona B com 72,57 ha (SUAPE, 2022). De acordo com o projeto da subsidiária QAIR H2 BRASIL apresentado à administração do porto na Zona A está previsto a instalação de duas subestações elétricas para uso exclusivo do projeto e duas plantas de produção de hidrogênio verde (QAIR H2, 2022). Contudo o coração do projeto se encontra na área Zona B, como mostra a Figura 9.

Figura 9. Ilustração das instalações da Zona B



Fonte: QAIR, 2022.

Na Zona B o projeto é mais ambicioso, planeja-se construir uma série de estruturas que são precisamente: 2 plantas de hidrogênio verde, 2 plantas de hidrogênio azul, 2 plantas de produção de amônia, bom como estruturas de bombeamento, tancagem, dessalinização, docas portuárias, instalações administrativas e de convivências (QAIR H2, 2022). A imagem a seguir, retirada do memorando da QAIR BRASIL, mostra a posição das principais estruturas na Zona B.

4.2.3 Estimativas de Produção

De acordo com o memorando oficial, a potência total do projeto H2'Suape é de 2.240MW divididos em 16 prédios com potência de 140MW cada, a previsão é a instalação de 4 prédios por etapa. A planta final terá a capacidade de produção anual estimada em 296.000 toneladas de hidrogênio verde. 192.000 toneladas de hidrogênio azul e 1.680.164 toneladas de amônia verde (QAIR H2, 2022).

A planta de abastecimento de eletricidade deve ser bem dimensionada, pois a demanda de eletricidade para eletrólise será de 18.760 GWh/ano, por isso a vantagem do nordeste em relação às outras regiões do Brasil, a própria QAIR BRASIL dispõe de parques de geração elétrica renovável (solar e eólica) disponível para ser empregada em um projeto desta

envergadura QAIR H2, 2022; QAIR BRASIL, 2022). Por fim, a produção de hidrogênio será convertida em amônia, tendo em vista que é a forma mais barata e eficiente de armazenar e transportar esta substância. Até a conclusão do projeto será investido cerca de US$ 3,80 bilhões de dólares, onde 75% será na zona B, a receita prevista órbita os US$ 900 milhões de dólares por ano, ao passo que evitar a emissão anual de 4,3 milhões de toneladas de CO2 na atmosfera, o equivalente a uma área de 316,5 mil hectares de floresta adulta (QAIR H2, 2022).

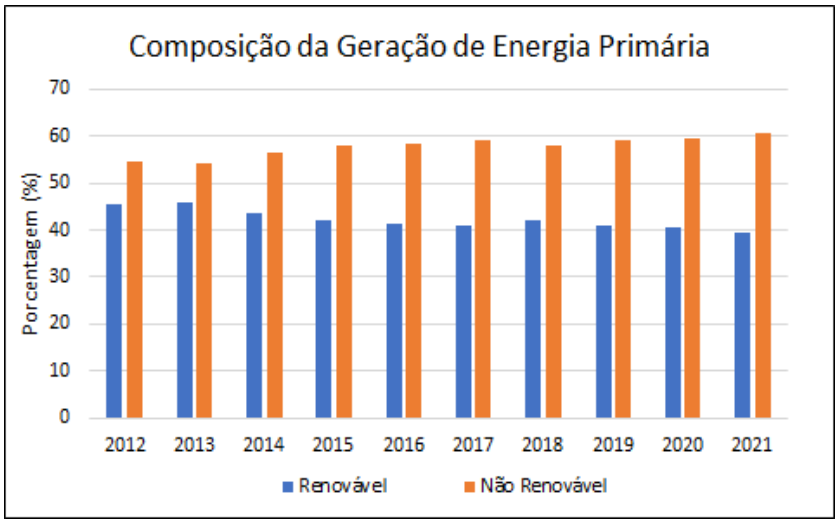
5. RESULTADOS

Diante do exposto acima, será apresentado a seguir os principais resultados obtidos com base na revisão bibliográfica realizada.

O hidrogênio é tido como uma das grandes promessas para o futuro da humanidade, pois se trata do composto químico mais abundante do mundo. Seu emprego maciço como vetor energético se intensificou depois dos choques do petróleo da década de 1970 (RIFKIN, 2003). Assim, a partir do balanço energético de 2022 elaborado pela EPE vamos discutir a inserção do hidrogênio na matriz elétrica brasileira, através das células a combustível, e seu potencial uso para descarbonizar outros setores intensivos em combustíveis fósseis.

De acordo com o levantamento realizado no balanço energético de 2022, os combustíveis de origem não renovável correspondem a 60,5% da geração total de energia primária de 2021, contra 39,5% das fontes renováveis (EPE, 2022). No gráfico 10 acompanhamos a variação da diferença entre as fontes de energia primária, observa-se uma tendência de distanciamento entre elas no decorrer dos anos, alcançando 10 pontos percentuais em 2021.

Gráfico 10. Comparação entre as fontes renováveis e não renováveis



Fonte: Elaboração própria com dados da EPE, 2022.

Desagregando a oferta interna de energia, como observado na tabela a seguir, nos deparamos com a composição do setor. Apenas petróleo, gás natural e derivados compõem 47,7% da oferta interna, ao passo que a fonte hidráulica e a eletricidade correspondem a apenas 11% (EPE, 2022). A tabela 3 a seguir apresenta um comparativo entre a oferta interna total e a oferta interna de eletricidade para 2021.

Tabela 3. Comparação entre a composição da matriz energética com a matriz elétrica Brasileira

Oferta interna de Energia Total (em %) - 2021	Participação
Petróleo, Gás Natural e Derivados	47,70%
Produtos de Cana	16,40%
Hidráulica e Eletricidade	11,00%
Lenha e Carvão Vegetal	8,70%
Outras	8,00%
Carvão Mineral e Derivados	5,60%
Eólica	2,10%
Solar	0,50%

Oferta interna de Energia Elétrica (em %) - 2021	Participação
Hidráulica	56,8%
Gás Natural	12,8%
Eólica	10,6%
Biomassa	8,2%
Carvão e derivados	3,9%
Derivados de petróleo	3,0%
Solar	2,5%
Nuclear	2,2%

Fonte: Elaboração própria com dados da EPE, 2022.

Neste ponto reside uma importante constatação do presente estudo, a matriz energética brasileira é majoritariamente fóssil, contudo, a matriz elétrica é em sua grande maioria renovável. Deste modo, a transição energética no caso brasileiro deve focar em duas frentes inicialmente: a descarbonização de setores intensivos em combustíveis fósseis e a geração de energia elétrica limpa, barata e em escala para os setores intensivos em eletricidade. Sob esse viés, o balanço energético de 2022 pontua que os dois setores que mais demandam energia elétrica foram, o setor industrial que consumiu 37,4% da energia elétrica disponível em 2021, seguido pelo setor residencial[11] com 26,4% do total (EPE, 2022).

Por outro lado, ao analisarmos de forma mais aprofundada o tema do petróleo e seus derivados, podemos observar que, de acordo com a segmentação do consumo por setores, o

[11] O setor residencial na atualidade é melhor suprido pela mini e microgeração, baseada majoritariamente em painéis solares, A escolha se dá em virtude do seu baixo custo, fácil manutenção e geração adequada para a demanda domiciliar e pequenas empresas.

consumo final[12] representa a parcela mais significativa, correspondendo a 84,6% do total. (EPE, 2022). Ainda dentro desta estatística do consumo final, temos que o setor de transportes corresponde a aproximadamente 60% deste consumo e o setor industrial a outros 10%, ambos os setores já mantêm essa fatia de participação desde 2012, aponta o balanço energético (EPE, 2022).

Assim, os setores alvo da atenção das primeiras fases da transição são os intensivos em energias fósseis, que no caso brasileiro é o setor de transportes e parte do setor industrial. Bem como os setores intensivos em energia elétrica, que são os setores industrial e residencial. No ano de 2020, o Brasil já contava com uma frota ativa de mais de 46 milhões de veículos (incluindo veículos leves e pesados), além de quase 13 milhões de motocicletas, totalizando cerca de 59 milhões de veículos (SINDIPEÇAS, 2021). Assim, o setor de transportes torna-se cada vez mais intensivo em combustíveis fósseis, de acordo com o balanço energético da EPE (2022), o consumo de combustível do setor de transportes ficou disposto da seguinte forma (Tabela 3):

Tabela 4. Composição da demanda do setor de transportes

Consumo do Setor de Transportes (em %) - 2021	Participação
Óleo Diesel	45,1%
Gasolina Automotiva	26,0%
Álcool Etílico	17,4%
Biodiesel	5,2%

Fonte: Elaboração própria com dados da EPE, 2022.

Conforme destacado anteriormente, o setor de transportes é responsável pela maior parte da demanda por combustíveis fósseis, principalmente os derivados de petróleo. Portanto, a descarbonização deste setor é de suma importância para o compromisso mundial de redução da emissão de gases poluentes. As células a combustível do tipo PEMFC emergem como aliadas fundamentais para alcançar esse objetivo, este tipo de célula é a que melhor se adapta às aplicações de mobilidade urbana (PALADINO, 2013). A venda de caminhões pesados e ônibus movidos a H2 já é uma realidade em alguns países, como China, Coreia do Sul, Japão, entre outros. No Brasil, um protótipo de ônibus movido a hidrogênio foi lançado de modo experimental em 2010 fruto de uma parceria público-privada entre a empresa de carrocerias Busscar, o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

[12] Consumo final refere-se a energia efetivamente consumida pelo elo final da cadeia, ou seja, o consumidor.

(Coppe/UFRJ), a Furnas (subsidiária da Eletrobrás) e empresa de eletrônicos Tracel (CNT, 2023).

O veículo é equipado com um motor híbrido movido a hidrogênio e eletricidade, com capacidade para 69 passageiros e autonomia estimada de 330 quilômetros, com consumo médio de 6,7 kg de H2 para cada 100 km. Em 2017 o ônibus estava avaliado em 2 milhões de reais e a UFRJ pretende lançar a versão comercial do modelo nos próximos anos. Outro caso da aplicação bem-sucedida das células a combustível é exemplificado pelo lançamento do caminhão semirreboque pela Mercedes-Benz em 2023. Este caminhão, nomeado GenH2, é capaz de transportar uma carga útil de 25 toneladas e é equipado com dois tanques de hidrogênio (H2) com capacidade para 80 kg. Impressionantemente, ele ostenta uma autonomia de 1000 km. Submetido a rigorosos testes na Europa, o GenH2 provou-se notável ao emitir apenas vapor d'água como resíduo. A Mercedes-Benz almeja colocar comercialmente esse veículo no mercado até 2027 (CNT, 2023).

No que diz respeito ao setor industrial, a polarização em relação ao seu consumo energético é menor em comparação com o caso anterior. Em 2021 o consumo de combustíveis fósseis da indústria ficou em 27,5%, com destaque para o gás natural com 10,3% e o coque de carvão mineral[13] com 9,3% do total respectivamente. A energia elétrica contribuiu com cerca de 21,6% do total consumido, outra ressalva vai para o emprego de fontes renováveis no setor, que foi majoritária quando olhamos para o agregado, correspondendo a aproximadamente 41% do total, onde o bagaço de cana (biomassa) lidera com 18,2% de todo o consumo industrial daquele ano (EPE, 2022).

Dissecando a indústria com base no levantamento elaborado pela EPE (2022), observamos a composição do consumo dos principais setores que a compõem, no ano de 2021. O setor de fabricação de cimento, insumo fundamental para a construção civil, é intensivo em energia fóssil, onde o coque de petróleo[14] representa 69,7% do consumo total, contra 13,4% de energia elétrica. O mesmo ocorre para o segmento de ferro-gusa e aço, onde a energia de fontes não renováveis correspondem a 58,6% do total, com destaque para a participação do coque de carvão mineral com 43,7%, a eletricidade tem um modesto peso, ficando com 9,7% do total. No caso das ferroligas, peça importante para a fabricação de aço, o quadro se inverte, o setor é intensivo em eletricidade, cerca de 42,9% e mais 40,2% corresponde a parcela do carvão vegetal e lenha.

[13] Material obtido a partir do aquecimento da hulha, sendo esta um tipo de carvão mineral.
[14] Material sólido rico em carbono que é derivado do refino do petróleo.

Para o setor de química, temos um quadro protagonizado pelo gás natural e a energia elétrica, como 30,8% e 30,5% de participação respectivamente. No tocante à metalurgia não ferrosa e outros materiais, temos que os derivados de petróleo equivalem a 34,3% do total, contra 44,8% da eletricidade. O têxtil, forte setor que molda a moda e o vestuário, é intensivo em e eletricidade, com 66,7% do total, contudo, o gás natural também faz uma participação com 21%. O setor de papel e celulose é intensivo em energias renováveis, com 52,3%, tal façanha se deve ao emprego da lixívia[15], a eletricidade corresponde a modestos 15,1%. Por fim, temos o segmento de alimentos e bebidas, que como no caso anterior, se ampara em processos sustentáveis para a geração de energia. Aqui o bagaço de cana corresponde a 70,4% da geração, contra 11,4% da eletricidade (EPE, 2022).

Como mencionado anteriormente, a demanda energética por setores intensivos em eletricidade da indústria pode ser satisfeita pelo emprego das células a combustível, de acordo com Jacinto Junior et al (2022), as principais tecnologias recomendadas para plantas de escala GW são as células de ácido fosfórico (PAFC), as de carbonato fundido (MCFC) e as de óxido sólido (SOFC). Contudo vale uma ressalva, cada tecnologia apresenta características próprias, como temperatura de operação, material empregado, duração da vida útil, entre outros. Assim, não existe tecnologia ideal para a geração estacionária como existe para o segmento de transportes, pois cada indústria tem suas peculiaridades específicas. Algumas podem realizar processos de cogeração e as células que operam a uma maior temperatura podem ser ideais, como a MCFC ou a SOFC, por outro lado, outra indústria pode optar por uma PAFC que opera a uma temperatura inferior a 200ºC. Portanto, a célula tem que ser adequada à demanda da indústria em específico, mas também deve observar as demais características de cada tecnologia.

Em suma, a transição energética do Brasil rumo a uma descarbonização dos setores da economia ainda será longa, porém temos fortes motivos para acreditar que ela não está tão distante quanto estava outrora. Como visto acima, há setores bem heterogêneos dentro da nossa economia, alguns intensivos em eletricidade, os quais que podem ser satisfeitos com as células a combustível em um futuro breve e outros que ainda são muito dependentes de fontes fósseis. Para estes últimos, estudos complementares devem ser feitos para diagnosticar os reais motivos dessa resistência, hipóteses podem ser levantadas, como que esse uso de combustíveis não renováveis possa fazer parte das características próprias de cada setor ou mesmo seja por

[15] Conhecida também como Licor Negro, a lixívia é um líquido extraído como subproduto do processamento da celulose, sendo empregada em processos de cogeração nas próprias usinas.

questões de custo, como também pode ser pela defasagem tecnológica do parque industrial brasileiro. Contudo, no que diz respeito a esse aspecto, nenhuma afirmação pode ser feita com base neste trabalho atual.

6. Conclusão

O fim da era do petróleo, que a décadas atrás era interpretado como um devaneio dos ambientalistas, hoje é uma certeza convicta. É apenas uma questão de tempo para que o modelo econômico de produção baseado em fontes abundantes, mas pouco diversificadas, amparadas no petróleo chegue ao fim. O mundo agoniza em agudas mudanças climáticas decorrentes do uso inconsequente do ouro negro, mas que agora encontra-se no beco sem saídas da entropia. Assim, a transição energética torna-se neste contexto, mais do que um sonho dos ambientalistas, mas sim uma pauta de necessidade urgente.

Neste caótico quadro, emergem as energias renováveis, as quais agora correm contra o tempo para poder suprir as necessidades mundiais, ao passo que o petróleo perde paulatinamente o seu posto soberano. O hidrogênio é mais que um fator energético, é também um fator democrático, pois tratando da geopolítica mundial, guerras foram travadas em nome do petróleo, que agora podem ser evitadas por meio deste vetor energético supranacional.

Trazendo a discussão para o contexto do Brasil, temos que o hidrogênio junto com as células a combustível podem representar um avanço determinante para a descentralização da nossa matriz energética, ao passo que reduzimos a dependência energética de uma única fonte. Contudo, uma devo fazer uma ressalva, o Brasil precisa urgentemente traçar um arcabouço institucional legal, onde possa amparar o processo de mudança do perfil da matriz energética, uma vez que problemas de gestão institucional podem minar o plano do hidrogênio verde de modo análogo ao sistema hidrelétrico do final dos anos 90. É chegada a hora de despertar o gigante dos trópicos do seu sono para a aurora das energias renováveis.

REFERÊNCIAS

AKRAM, Rabia; CHEN, Fuzhong; KHALID, Fahad; YE, Zhiwei; MAJEED, Muhammad Tariq. Heterogeneous effects of energy efficiency and renewable energy on carbon emissions: Evidence from developing countries. **Journal of Cleaner Production,** [S.I.]. v. 247, 2020.

ALMEIDA, Cristiano Farias. YAMASHITA, Yaeko. Uso da teoria dos pólos de crescimento e pólos de desenvolvimento para a elaboração de rede de transporte multimodal de cargas para a região amazônica. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. Goiânia, v. 9, n.1, p. 65-83. 2014. Disponível em: https://revistas.ufg.br/reec/article/view/29299. Acesso em: 15 ago. 2023.

AMINUDIN, M. A.; KAMARUDIN, S. K.; LIM, B. H.; MAJILAN, E. H.; MASDAR, M. S.; SHAARI, N. An overview: Current progress on hydrogen fuel cel vehicles. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 48. Elsevier. 2023.

ANDRADE, Thales Novaes de; LORENZI, Bruno Rossi. Política energética e agentes científicos: o caso das pesquisas em células a combustível no Brasil. v. 30. n. 3. R**evista Sociedade e Estado**. São Carlos: UFSCar, 2014.

ANDRADE, M. C. Espaço, Polarização & Desenvolvimento: Uma Introdução a Economia Regional. Editora Atlas, 5a. ed., São Paulo, Brasil, 1987.

ANEEL. Agência Nacional de energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª edição. Brasília: ANEEL, 2008. Disponível em: https://catalogobiblioteca.cnmc.es/LIBR/BRLIBR000002044/BRLIBR000002044_G2/Texto%20completo.PDF. Acesso em: 24 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE HIDROGÊNIO (ABH2). **Sobre**. Rio de Janeiro: ABH2, 2022. Disponível em: https://abh2.org/sobre. Acesso em: 24 out. 2022.

BEZERRA, Francisco Diniz. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. **Caderno Setorial ETENE**, Fortaleza - CE, v. 6, n. 212, 2021. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf. Acesso em: 5 ago. 2023.

BIANCHI, Ana Maria. Albert Hirschman na América Latina e sua trilogia sobre desenvolvimento econômico. **Revista Economia e Sociedade**, Campinas - SP, v. 16, n. 2, 2007. Disponível em: https://www.scielo.br/pdf/ecos/v16n2/a02v16n2.pdf. Acesso em: 2 set. 2023.

BRASIL, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC). **Acordo de Paris**. Brasília - DF, 2015. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf. Acesso em: 8 de ago. 2022.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional do Hidrogênio (PNH): propostas e diretrizes.** Brasília - DF, 21 de jul. 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. Acessado em: 17 de set. 2022**.**

BRASIL. Ministério das Relações Exteriores. **Nationally Determined Contribution (NDC)**. Brasília – DF, 21 de mar. 2022. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Updated%20-%20First%20NDC%20-%20%20FINAL%20-%20PDF.pdf. Acesso em: 9 de ago. 2022.

BRASIL. Ministério da Ciência e tecnologia. **Sistemas célula a combustível: programa brasileiro PROCaC**. Brasília: MCT, 2002. Disponível em: http://livroaberto.ibict.br/handle/1/977. Acesso em: 23 out. 2022.

CAMPARIN, R. H. et al. Avaliação da eficiência de uma célula a combustível estacionária de ácido fosfórico**. Química Nova**, v. 30, n. 7, p. 1523–1528, 2007.

CASTRO, Nivalde de; LEAL, Luiza Masseno; COSTA, Vinícius José da. **Hubs de hidrogênio verde e perspectivas para as diferentes regiões do Brasil**. Cidade Rio de Janeiro - RJ: Portal hidrogênio verde, 2023a. Disponível em: https://www.h2verdebrasil.com.br/noticia/hubs-de-hidrogenio-verde-e-perspectivas-para-as-diferentes-regioes-do-brasil/. Acesso em: 3 ago. 2023.

CASTRO, Nivalde de; BRAGA, Sergio Leal; PRADELLE, Florian; CHAVES, Ana Carolina; CHANTRE, Caroline. A Economia do Hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2023b. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf. Acesso em: 4 set. 2023.

CAVALCANTE, Francisca Bruna Santiago Viana. Pecém: from local to global. **Geosaberes**, Fortaleza, v. 10, n. 21, p. 1 - 16, maio 2019. Disponível em: http://www.geosaberes.ufc.br/geosaberes/article/view/723. Acessado em: 02 ago. 2023.

CEARÁ. Lei nº 16.372 de 17 de outubro de 2017. Disponível em: https://belt.al.ce.gov.br/index.php/legislacao-do-ceara/organizacao-tematica/industria-e-comercio-turismo-e-servico/item/5949-lei-n-16-372-de-11-10-17-d-o-17-10-17. Acesso em: 2 ago. 2023.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025**. Documentos Técnicos. Brasília: CGEE, 2010. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.3. Acesso em: 23 out. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Hidrogênio renovável: uma das rotas para descarbonizar o transporte rodoviário**. 2023. Relatório. Brasília - DF. Disponível em: https://cnt.org.br/documento/d0b37807-75c4-494d-a296-1e050d5755b3. Acesso em: 12 ago. 2023.

COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DE PECÉM (CIPP). **Hub de hidrogênio verde do complexo do Pecém**. São Gonçalo do Amarante - CE: CIPP, 2022a. Disponível em: https://www.complexodopecem.com.br/hubh2v/. Acesso em: 2 ago. 2023.

COMPLEXO INDUSTRIAL PORTUÁRIO DE PECÉM (CIPP). **EDP produz primeira molécula de hidrogênio verde no Ceará**. São Gonçalo do Amarante - CE: CIPP, 2022b.

Disponível em: https://www.complexodopecem.com.br/edp-produz-primeira-molecula-de-hidrogenio-verde-no-ceara/. Acesso em: 2 ago. 2023

COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DE PECÉM (CIPP). **Informações**. São Gonçalo do Amarante - CE: CIPP, 2023. Disponível em: https://www.complexodopecem.com.br/informacoes/. Acesso em: 10 ago. 2023.

DANISH, Khan; BALOCH, Muhammad Awais; MAHMOOD, Nasir; ZHANG, Jian Wu. Effect of natural resources, renewable energy and economic development on CO_2 emissions in BRICS countries. **Sci Total Environ,** [S.I.]. v. 678, p. 632-638, ago. 2019.

DUNN, Seth. Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. **International journal of hydrogen energy**, v. 27, n. 3, p. 235-264, 2002.

ENERGIAS DE PORTUGAL (SEDE BRASIL). **P&D Pecém H2V: Desenvolvimento de Roadmap e projeto piloto de H2 no Complexo Termelétrico do Pecém**. São Paulo - SP: EDP BRASIL, 2021. Disponível em: https://brasil.edp.com/sites/edpbr/files/2022-03/P%26D%20Pec%C3%A9m%20H2V%20-20Desenvolvimento%20de%20roadmap%20e%20projeto%20piloto.pdf. Acesso em: 3 ago. 2023.

EPBR. **NFE planeja operação de terminais de GNL no Pará, Pernambuco e Santa Catarina para o 1º semestre de 2022**. Brasília: EPBR, 2021. Disponível em: https://epbr.com.br/nfe-planeja-operacao-de-terminais-de-gnl-no-para-pernambuco-e-santa-catarina-para-o-1o-semestre-de-2022/. Acesso em: 13 ago. 2023.

EPBR. **Casa dos Ventos e Comerc assinam pré-contrato para produção de hidrogênio verde no Pecém**. Brasília: EPBR, 2022. Disponível em: https://epbr.com.br/casa-dos-ventos-e-comerc-assinam-pre-contrato-para-producao-de-hidrogenio-verde-no-pecem/. Acesso em: 3 ago. 2023.

EG&G TECHNICAL SERVICES. **Fuel Cell Handbook**. 7. ed. Morgantown, WV: National Energy Technology Laboratory-Morgantown, 2004. Disponível em: https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/FCHandbook7.pdf. Acesso em: 12 jan. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário estatístico de energia elétrica de 2023**, ano base 2022. Brasília - DF: EPE, 2023a. Disponível em: https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/#Apresenta%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 30 jul. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural. Nota Técnica EPE/DPG/SPG/01.** Brasília - DF: EPE, 2022a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrog%C3%AAnio%20Cinza.pdf#search=hidrog%C3%AAnio%20cinza. Acesso em: 23 out. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021**, ano base 2020. Brasília - DF: EPE, 2021b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2021.pdf. Acesso em: 23 out. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogêni**o. Brasília - DF: EPE, 2021a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf. Acesso em: 23 out. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Relatório Síntese 2023, ano base 2022**. Brasília - DF, 2023b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf. Acesso em: 5 ago. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2022, ano base 2021**. Brasília - DF, 2022b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022. Acesso em: 20 jul. 2023

EUROPEAN COMMISSION. The Macroeconomic and Other Benefits of Energy Efficiency. **European Commission**, 2016. Disponível em: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/final_report_v4_final.pdf. Acesso em: 15 ago. 2022.

FELTRE, Ricardo. Química. 6. ed. v. 2. São Paulo: Moderna, 2004.

GANG, Byeong Gyu; KWON, Sejin.Design of an energy management technique for high endurance unmanned aerial vehicles powered by fuel and solar cell systems. n. 20. v. 43. **International Journal of Hydrogen Energy**. Elsevier: 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918311741?via%3Dihub#sec3. Acesso em: 27 de abril. 2023.

GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo - SP: Atlas, 2002.

GIZ. Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro. [**S. l.: s. n**.], 27 Out. 2021. Disponível em: https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf. Acesso em: 23 out. 2022.

GOTARDO, Daiane Marani.; BARCHET, Isabela.; PIFFER, Moacir. Padrões de Crescimento Econômico no Estado do Rio Grande do Sul entre 1996-2010. **Desenvolvimento em Questão**, v. 14, p. 273-300, 2016.

HACKER, Viktor; MITSUSHIMA, Shigenori (Ed.). **Fuel cells and hydrogen: from fundamentals to applied research**. Elsevier, 2018.

HOFFMANN, Peter. **Tomorrow's Energy, revised and expanded edition: Hydrogen, Fuel Cells, and the Prospects for a Cleaner Planet**. Massachusetts: The MIT press, 2012.

HOOGERS, Gregor. **Fuel cell technology handbook**. 1. ed. CRC press, 2002. 360 p.

HYDROGEN COUNCIL. **Path to Hydrogen Competitiveness: A Cost Perspective**. 2020. Disponível em: https://hydrogencouncil.com/en/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective/. Acesso em: 4 set. 2023.

ITAIPU BINACIONAL. **A maior geradora de energia limpa e renovável do mundo**. Revista Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu - PR, 2017. Disponível em: https://www.itaipu.gov.br/sites/default/files/af_df/1702_022_atualizacao_revista_IB_2017_digital_b.pdf. Acesso em: 5 ago. 2023.

JACINTO JUNIOR, S. G.; QUINTELLA, S. A. .; ALVES, D. R. .; CONDE, I. B. .; CASTRO, J. S. de .; LEITINHO, J. L. . Fuel cells: possibilities and limitations. **Research, Society and Development**, *[S. l.]*, v. 11, n. 5, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i5.28522. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/28522. Acesso em: 23 maio. 2023.

JIAO, Kui. LI, Xianguo. Water transport in polymer electrolyte membrane fuel cells. n. 3. v. 37. **Progress in Energy and Combustion Science**: Elsevier, 2011. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128510000511?via%3Dihub. Acesso em: 2 jun. 2023.

JUNIOR, Luiz Moreira Coelho; MELQUÍADES, Thiago Freire; MARTINS, Kalyne de Lourdes da Costa;JÚNIOR, Edvaldo Pereira Santos; FREITAS, Graziela Pinto de. Previsão do consumo de eletricidade no nordeste brasileiro. **ENGEVISTA**, v. 20, n.3, p.408-423, Niterói - RJ: 2018.

KURAMOTO, Renato Yoichi Ribeiro; APPOLONI, Carlos Roberto. Uma breve história da política nuclear brasileira. **Caderno Brasileiro de Ensino da Física**, v. 19, n. 3, p. 379-392, Londrina - PR, 2002. Disponível em: https://iusgentium.ufsc.br/wp-content/uploads/2018/08/1-Obrigat%C3%B3rio.pdf-Breve-Hist%C3%B3ria-da-Pol%C3%ADtica-Nucelar-Brasileira.pdf. Acesso em: 01 ago. 2023.

LINARDI, Marcelo et al. **O IPEN e a economia do hidrogênio**. São Paulo, SP: SENAI-SP Editora, 2022. 288 p.

LOMBARDI, Pedro Mello. A inserção da micro e minigeração distribuída e a liberalização do mercado de energia elétrica: os impactos da Lei nº 14.300/2022 na estratégia de abertura do mercado para a baixa tensão. 2023. 126 f. **Monografia** (Especialização em Controle da Desestatização e da Regulação) – Instituto Serzedello Corrêa, Escola Superior do Tribunal de Contas da União, Brasília, DF.

MACEDO, Humberto Rodrigues et al. **Expansão e perspectiva do sistema de transição brasileiro após a crise energética de 2001**. In: V Jornada de Iniciação Científica e Extensão do Instituto Federal de Tocantins, 2014, Palmas - TO. Anais [...]. Palmas - TO: Instituto Federal de Tocantins. Disponível em: https://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/jice/5jice/paper/viewFile/6449/3222. Acesso em: 01 ago. 2023.

MANZO, Abelardo J. Manual para la preparación de monografias: um guía para presentar informes y tesis. Buenos Aires: Humanitas, 1971.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. Fundamentos de metodologia científica. 5. ed. São Paulo - SP: Editora Atlas, 2004.

MARUYAMA, Flávio Minoru, LACERDA, Arnaldo Gomes de Almeida, GALVAO, Luiz Cláudio Ribeiro *et al*. Células de combustível e a integração de recursos energéticos. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, n. 4. Campinas: 2002. Disponível em:

http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100037&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 04 Jun. 2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Alexandre Silveira participa de lançamento de planta de hidrogênio verde do Complexo Pecém, no Ceará, e reforça compromisso com a transição energética no país**. Brasília - DF, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/alexandre-silveira-participa-de-lancamento-de-planta-de-hidrogenio-verde-do-complexo-pecem-no-ceara-e-reforca-compromisso-com-a-transicao-energetica-no-pais. Acesso em: 3 ago. 2023.

MRS AMBIENTAL. **Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) do Hub de Hidrogênio Verde do Complexo do Pecém**. Brasília, 2023.

NOGAMI, Vitor Koki da Costa. Destruição criativa, inovação disruptiva e economia compartilhada: uma análise evolucionista e comparativa. **Revista Suma de Negocios**, Bogotá - Colômbia, v. 10, n. 21, 2019. Disponível em: https://blogs.konradlorenz.edu.co/files/2.-rsn_1021_costa-nogami-1.pdf. Acesso em: 2 set. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Nações Unidas Brasil. População mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050, diz relatório da ONU**. Brasília - DF, 2019. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/83427-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-deve-chegar-97-bilh%C3%B5es-de-pessoas-em-2050-diz-relat%C3%B3rio-da-onu. Acesso em: 7 ago. 2023.

ÖZCAN, Kivilcim Metin; ÖZKAN, Ayşegül Uçkun. The Relationship between Energy Efficiency and Economic Performance in G20 Countries. **Topics in Middle Eastern and North African Economies,** v. 20, no. 1, Middle East Economic Association and Loyola University Chicago, 2018. Disponível em: https://ecommons.luc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1257&context=meea. Acesso em: 15 ago. 2022.

PALA, Aynur. Energy and economic growth in G20 countries: panel cointegration analysis. **Economics and Business Letters**, [S.I.]. 9(2), 56-72, 2020.

PALADINO, Patrícia Andrea. Uso do hidrogênio no transporte público da cidade de São Paulo. 2013. **Tese (Doutorado)** - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo - SP. Disponível em: https://www.google.com/url?q=https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85133/tde-24102013-112007/publico/2013PaladinoUso.pdf. Acesso em: 12 ago. 2023.

PEGO FILHO, Bolívar; MOTA, José Aroudo; CARVALHO, José Carlos Jacob de; PINHEIRO, Maurício Mota Saboya. **Impactos fiscais da crise de energia elétrica: 2001 e 2002**. *IPEA*, n. 816, Brasília - DF, 2001. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1995/1/TD_816.pdf. Acesso em: 05 ago. 2023.

PENG, Jingxuan et al. Solid oxide fuel cell (SOFC) performance evaluation, fault diagnosis and health control: A review. v. 505. **Journal of Power Sources**. Elsevier. 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775321005838?via%3Dihub. Acesso em: 8 jan. 2023.

PERROUX, F. L'économie du siécleme XX. 2a. ed. Paris, Press Universitaires de France, France, 1964.

PRESTES, Andréia Ferreira; Bezerra, Fernanda Mendes; MELLO, Gilmar Ribeiro de; CASTRO, Talita Egevardt de. Investimento em infraestrutura energética e o crescimento econômico brasileiro período de 2003 a 2018. **Revista Brasileira de Energia**, v. 25, n. 2, p. 92-110, Itajubá-MG: 2019.

QAIR BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**. Fortaleza - CE, 2022. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1lBLlUsgKT55QVl-2Ktx-qPbjH_wcPHSb/view. Acesso em: 09 ago. 2023.

QAIR H2 BRASIL S.A. **Memorial Descritivo de Planta de produção de hidrogênio verde Pernambuco - Projeto H2'SUAPE**. 2022. 61 páginas. Disponível em: https://www.suape.pe.gov.br/pt/licitacoes-2/manifestacao-de-interesse-em-areas-fora-da-poligonal-do-porto-organizado. Acesso em: 30 jul. 2023.

REIS, Fernando Simões dos**. Direito da Energia e os Tribunais de Contas: o controle externo para a sustentabilidade da matriz elétrica**. Curitiba: Juruá, 2021.

REIS, Fernando Simões dos. Mudanças climáticas e transição energética justa: reflexões sobre a atuação do TCU. 2023. **Monografia** (Especialização em Controle da Desestatização e da Regulação) – Instituto Serzedello Corrêa, Escola Superior do Tribunal de Contas da União, Brasília DF.

REIS, Martha. Química. 2. ed. v. 2. São Paulo: Ática, 2016.

RICARDO, David. Princípios de Economia, Política e Tributação. Tradução de Paulo Henrique Sandroni. São Paulo: Editora Nova Cultura, 1996. (Coleção Os Economistas).

RIFKIN, Jeremy. A economia do hidrogênio. São Paulo: M. Books, 2003. 301 p.

SANTOS, Rosana Rodrigues dos; FIGER, Vivian. **Transição enérgica: Brasil dribla a crise hídrica, mas permanece em alerta em relação a conta de luz**. Rio de Janeiro - RJ, 2022. Disponível em: https://portal.fgv.br/artigos/transicao-energica-brasil-dribla-crise-hidrica-mas-permanece-alerta-relacao-conta-luz. Acesso em: 5 ago. 2023.

SCHUMPETER, Joseph Alois. Capitalismo, socialismo e democracia. Tradução de Ruy Jungmann. Rio de Janeiro: Editora Fundo de Cultura, 1961.

SEBRAE. **Entenda o que é um Hub de Inovação e como funciona**. Brasília - DF, 2022. Disponível em: https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/entenda-o-que-e-um-hub-de-inovacao-e-como-funciona,32b22cb3509c4810VgnVCM100000d701210aRCRD. Acesso em: 9 ago. 2023.

SECRETÁRIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E TRABALHO DO GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ (ADECE). **Portos**. Fortaleza: ADECE, 2014. Disponível em: https://www.adece.ce.gov.br/2014/06/11/portos/. Acesso em: 2 ago. 2023.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE COMPONENTES PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES (SINDIPEÇAS). **Relatório da frota circulante**. São Paulo - SP, 2021.

Disponível em: https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2021/RelatorioFrotaCirculante_Marco_2021.pdf. Acesso em: 10 ago. 2023.

SOUZA, Daniel Lúcio Oliveira de; RODRIGUES, Marcelo; REIS, Dálcio Roberto dos. **Crise energética 2001: providencial e reflexiva**. Revista Educação & Tecnologia, Curitiba, v. 2, n. 3, p. 45-56, 2004. Disponível em: http://revistas.utfpr.edu.br/pb/index.php/revedutec-ct/article/view/1131/728. Acesso em: 3 ago. 2023.

SOUZA, Nali de Jesus de. Desenvolvimento polarizado e desequilíbrios regionais no Brasil. Revista Analise Econômica. Porto Alegre - RS, v. 11, n. 19, 1993. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/25279. Acesso em: 6 ago. 2023.

SUAPE. **Edital de anúncio público**. Edital nº 002/2022. Disponível em: https://www.suape.pe.gov.br/pt/licitacoes-2/manifestacao-de-interesse-em-areas-fora-da-poligonal-do-porto-organizado. Acesso em: 1 ago. 2023.

SZWARCFITER, Cláudio. DALCOL, Paulo Roberto T. Economias de escala e de escopo: desmistificando alguns aspectos da transição. Revista Producion, Belo Horizonte, v. 7, n. 2. 1997. Disponível em: https://www.scielo.br/j/prod/a/FD8rNqkDhCThKcmxmFJsRwL/?lang=pt&format=pdf. Acesso em: 12 ago. 2023.

TASCA, Tiago Gabriel. Do interesse nacional à estratégia de segurança energética: um diálogo epistemológico. **Revista Brasileira de Estudos de Defesa**. v. 5, nº 1, Rio de Janeiro - RJ: Edição Online, 2018, p. 63-83.

TOLMASQUIM, Mauricio. **As origens da crise energética Brasileira**. Ambiente & Sociedade, v. 3, n. 6/7, São Paulo - SP, 2000. Disponível em: https://www.scielo.br/j/asoc/a/47YNhcdZ9PXxNfHg7kDgdsy/. Acesso em: 02 ago. 2023.

UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. Energy efficiency in developing countries for the manufacturing sector. **UNIDO**: Vienna, 2011. Disponível em: https://open.unido.org/api/documents/4817789/download/Energy%20efficiency%20in%20dev. Acesso em: 15 ago. 2022.

VERNE, Júlio. A ilha misteriosa. 1. ed. Rio de Janeiro: Zahar, 2015. 698 p.

WEO, IEA. Special report: Energy access outlook. **IEA WEO**: Paris, France, 2017. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9a67c2fc-b605-4994-8eb5-29a0ac219499/WEO2017SpecialReport_EnergyAccessOutlook.pdf. Acesso em: 12 jan. 2023.