

FORTUNATO LOBO LAMEIRAS

O HIDROGÊNIO COMO VETOR DE ENERGIA

Trabalho de Conclusão de Curso - Monografia apresentada ao Departamento de Estudos da Escola Superior de Guerra como requisito à obtenção do diploma do Curso de Altos Estudos de Política e Estratégia.

Orientadora: Professora Doutora Fernanda das Graças Corrêa

Rio de Janeiro

2019

Este trabalho, nos termos de legislação que resguarda os direitos autorais, é considerado propriedade da ESCOLA SUPERIOR DE GUERRA (ESG). É permitida a transcrição parcial de textos do trabalho, ou mencioná-los, para comentários e citações, desde que sem propósitos comerciais e que seja feita a referência bibliográfica completa. Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e não expressam qualquer orientação institucional da ESG.

Fortunato Lobo Lameiras

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L228h Lameiras, Fortunato Lobo

O hidrogênio como vetor de energia / CMG (RM1-T) Fortunato Lobo Lameiras. - Rio de Janeiro: ESG, 2019.
90 f.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Fernanda das Graças Corrêa
Trabalho de Conclusão de Curso - Monografia apresentada ao Departamento de Estudos da Escola Superior de Guerra como requisito à obtenção do diploma do Curso de Altos Estudos de Política e Estratégia (CAEPE), 2019.

1. Hidrogênio – fonte de energia. 2. Meio Ambiente. 3. Energia – Fontes alternativas. 4. Políticas públicas I. Título.

CDD – 333.79

À minha querida família, meu porto seguro,
e aos meus novos e velhos amigos!

AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus por todas as bênçãos que recebi. E que não foram poucas!

À minha esposa, Fátima, que apesar das grandes provações que a vida está lhe atribuindo, segue firme ao meu lado.

Aos meus filhos, Lucas e Júlia, e à minha nova filha, Lisa Lameiras, pelo amor que me ofereceram, forte o suficiente para que eu vencesse todas as adversidades do meu caminho.

Aos meus pais Justiniano e Maria, pelos sacrifícios que fizeram ao longo da vida para que eu adquirisse a base de conhecimentos necessários ao meu desenvolvimento.

À toda minha família pela contribuição na formação do meu caráter e dos meus valores.

À Marinha do Brasil, minha segunda paixão, que possibilitou todo o meu crescimento profissional e cultural.

À Escola Superior de Guerra, casa onde se estuda o destino do Brasil, por me ensinar que, nós os brasileiros, podemos trabalhar juntos para fazer um Brasil maior, melhor e mais justo e, principalmente, que o nosso destino depende só de nós.

Ao Brig Ronaldo Yuan pela minha indicação para o Curso de Altos Estudos de Política e Estratégia (CAEPE), e muito especialmente ao Vice-Almirante Carlos Frederico Carneiro Primo que, na função de Subcomandante da Escola à época, viabilizou minha participação no Curso.

Aos Assistentes de Marinha que serviram na ESG, que desde 2009 vêm me orientando. Agradeço em especial ao CA Rocha que teve participação decisiva para minha admissão no CAEPE.

Ao CA Guilherme, nosso líder no Departamento de Estudos, agradeço a atenção especial, os constantes ensinamentos, a consideração incomum e a fidalguia com a qual sempre me brinda.

Aos amigos do Corpo Permanente por me transmitirem seus conhecimentos: preciso me esforçar muito para chegar perto de vocês. Ao CMG Tepedino, obrigado pelo permanente apoio!

Aos Colegas da Divisão de Assuntos Científicos e Tecnológicos que se incumbiram das minhas tarefas para que eu pudesse me dedicar ao CAEPE. Registro meu agradecimento ao nosso então Chefe, Gen Vendramin, que me forneceu a necessária autorização para o Curso.

À minha Orientadora, a Senhora Prof^ª. Dr^ª. Fernanda das Graças Corrêa a quem agradeço as orientações, paciência, colaboração e principalmente por entender quando e o que eu precisava.

Aos meus antecessores no CAEPE, Estagiários das turmas Destinos do Brasil, Espírito Olímpico, Ordem e Progresso e Ética e Democracia por me tratarem como um dos seus.

E por último, e não menos importante, aos meus amigos da Turma ESG 70 anos – Pátria Amada Brasil, melhor turma que já passou na ESG, todos vocês são especiais: obrigado por cada minuto!

Deus quer, o homem sonha, a obra nasce,
Fernando Pessoa.

I believe that water will one day be employed as fuel, that hydrogen and oxygen which constitute it, used singly or together, will furnish an inexhaustible source of heat and light, of an intensity of which coal is not capable.

Júlio Verne (1874)

RESUMO

Esta monografia trata do uso energético do hidrogênio. Para verificar se o hidrogênio reúne condições para integrar a matriz energética brasileira, este trabalho discorre sobre energia, traça um pequeno panorama das fontes de energia e das matrizes energéticas e elétricas em nível global e nacional, para então descrever as propriedades do hidrogênio, classificação, sua produção, armazenamento, transporte e as possibilidades para seu uso energético. Apresenta as políticas públicas atinentes à área, casos de sucesso, sua correlação com o meio ambiente e sua capacidade de uso para a defesa. Construída a base para a análise, verificou-se que o hidrogênio apresenta características ímpares que o qualificam para atender os desafios energético-ambientais auxiliando o país a cumprir os compromissos de descarbonização demandados pela sociedade e pelo acordo de Paris. Entretanto, mesmo com contínuo avanço das tecnologias para que o hidrogênio se consolide como vetor de energia ainda será preciso percorrer uma longa jornada. Seu uso energético ainda depende de políticas de fomento, em especial no Brasil que já possui uma matriz energética consideravelmente limpa, o desafio de consolidar essa fonte energética é ainda maior. Após os fatores adversos serem identificados, são apontados os atores com potencial de participação no desenvolvimento desse vetor de energia e são discutidas soluções, de modo que ao final são apresentadas dez propostas para viabilizar a inclusão do hidrogênio na matriz energética nacional.

Palavras-chave: 1. Hidrogênio – fonte de energia. 2. Meio ambiente 3. Energia – Fontes alternativas. 4. Políticas Públicas

ABSTRACT

This dissertation discusses the usage of hydrogen as energy. In order to verify the suitability of hydrogen to integrate the Brazilian energy mix, this research analyses sources of energy and energy mixes at both national and international levels, describes the properties of hydrogen, its classification, production, storage, transport and its overall usage as a source of energy. Furthermore, this paper presents successful case studies and policies related to the usage of hydrogen, its correlation to environmental change and possible applications to defense-related issues. This study has concluded that hydrogen presents unique characteristics that make it suitable to undertake the Brazilian energy and environmental challenge, and thus assist the country in achieving the decarbonization goals set by the Paris Agreement. However, despite technological advancements, there is still a long way for hydrogen to become a major energy source. For this to be accomplished, favorable development policies are still required, especially in a country with a considerably clean energy mix such as Brazil. After potential challenges are identified, organizations and factors that could assist in the development of hydrogen as a source of energy are introduced. Finally, possible solutions are discussed and ten proposals to facilitate the inclusion of hydrogen into the national energy mix are presented.

Keywords: 1. Hydrogen as energy. 2. Environment 3. Energy – Alternative sources. 4. Public Policies

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1	Matriz energética nacional - repartição de lixo e outras renováveis.....	25
FIGURA 2	Oferta interna de energia 2008 - 2018.....	25
FIGURA 3	Mercado de hidrogênio nos Estados Unidos.....	50
FIGURA 4	Primeira célula para uso portuário instalada mundialmente.....	51
FIGURA 5	Células a combustível portátil da NESKON.....	61
FIGURA 6	Gerador de hidrogênio portátil da NESKON.....	61
FIGURA 7	Equipamentos militares supridos por células a combustível.....	62
FIGURA 8	Equipamentos a hidrogênio instalados em veículos médios.....	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Capacidade instalada de geração elétrica por região do mundo em GW.....	26
TABELA 2	Capacidade instalada de geração elétrica no mundo 10 - maiores países em GW.....	26
TABELA 3	Capacidade de geração de energia elétrica por fonte.....	27
TABELA 4	Investimento anual em pesquisa e desenvolvimento em tecnologias do hidrogênio por país.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AED	Ação Estratégica de Defesa
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARP	Aeronave remotamente pilotada
ASEAN	Associação de Nações do Sudeste Asiático
BIG	Banco de Informações de Geração
BP	<i>British Petroleum</i>
CAFPC	<i>California Fuel Cell Partnership</i>
CARICOM	Comunidade do Caribe
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CENBIO	Centro de Referência em Biomassa
CENEH	Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CERPCH	Centro Nacional de Referência de Pequenas Centrais Hidroenergéticas
CO ²	Gás Carbônico
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
EFEI	Escola Federal de Engenharia de Itajubá
EMTU/SP	Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo
END	Estratégia Nacional de Defesa
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EQHHPP	<i>Euro Quebec Hydro Hydrogen Pilot</i>
EUA	Estados Unidos da América
FAPERJ	Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FNCD	Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
GNV	Gás Natural Veicular
GEF	<i>Global Environment Facility</i>

GREEN SOLAR	Centro Brasileiro para o Desenvolvimento de Energia Solar Térmica
GW	Giga Watts
H ²	Gás hidrogênio
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPHE	<i>International Partnership for Hydrogen Economy</i>
ITRI	Instituto de Pesquisa de Tecnologia Industrial de Taiwan
JHyM	<i>Japan H² Mobility</i>
LabCelComb	Laboratório de Células a Combustível do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
LBDN	Livro Branco de Defesa Nacional
LH2	Laboratório de Hidrogênio
LM	<i>Lockheed-Martin</i>
NEPAD	Nova Parceria para o Desenvolvimento da África
OECIF	<i>Operational Energy Capability Improvement Fund</i>
OND	Objetivos Nacionais de Defesa
ONU	Organização das Nações Unidas
OTEC	Energia Térmica Oceânica
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MME	Ministério das Minas e Energia
Mtep	Mega Toneladas Equivalente de Petróleo
P2G	Tecnologia power-to-gas
PND	Política Nacional de Defesa
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
ProCaC	Programa Brasileiro de Sistemas de Células a Combustível
PTI	Parque Tecnológico Itaipu
PUC-MG	Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMET	Esquadrão de Transporte Multipropósito
SOFC	Célula a combustível de Óxido Sólido

TRL	<i>Technology Challenges for Research</i> – Nível de Maturação Tecnológica
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
U. S. DoD	<i>U.S. Department of Defense</i> (Departamento de Defesa Norte-Americano)
U.S. DoE	<i>U.S. Department of Energy</i> (Departamento de Energia Norte-Americano)
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	ENERGIA	17
2.1	MATRIZ ENERGÉTICA.....	18
2.1.1	Panorama da matriz energética mundial de fontes alternativas e gás natural	18
2.1.1.1	Gás Natural.....	18
2.1.1.2	Energia solar.....	20
2.1.1.3	Eólica.....	20
2.1.1.4	Hidráulica.....	22
2.1.1.5	Biomassa.....	23
2.1.1.6	Energia Oceânica.....	24
2.1.2	Panorama da Matriz energética nacional	24
2.1.3	Matriz de energia elétrica	26
2.1.3.1	Matriz de energia elétrica mundial.....	27
2.1.3.2	Matriz de energia elétrica nacional.....	28
3	HIDROGÊNIO	30
3.1	PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO.....	31
3.2	TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO.....	32
4	HIDROGÊNIO COMO FONTE DE ENERGIA	34
4.1	HIDROGÊNIO COMO VETOR DE ENERGIA	35
5	POLÍTICAS PÚBLICAS DE HIDROGÊNIO	38
5.1	ENERGIA E MEIO AMBIENTE.....	38
5.2	POLÍTICAS PÚBLICAS DO HIDROGÊNIO EM NÍVEL GLOBAL.....	41
5.3	POLÍTICAS PÚBLICAS DO HIDROGÊNIO NO BRASIL.....	43
5.4	HIDROGÊNIO NOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA E NO JAPÃO....	50
6	ENERGIA, HIDROGÊNIO E PODER	55
6.1	ENERGIA E O PODER NACIONAL.....	56
6.2	HIDROGÊNIO E A DEFESA.....	58
7	ANÁLISE SOBRE A POSSIBILIDADE DE APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO ENERGÉTICO NO BRASIL	64
8	ATORES, SOLUÇÕES E OPORTUNIDADES PARA O USO DO HIDROGÊNIO COMO VETOR DE ENERGIA NO BRASIL	70

9	PROPOSTAS.....	79
10	CONCLUSÃO.....	81
	REFERÊNCIAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

O hidrogênio, elemento mais abundante do universo, há anos vem sendo apontado como a fonte energética do futuro. Este trabalho pretende identificar as possibilidades concretas de aplicação do hidrogênio como vetor de energia. Para isso, serão levados em conta seus benefícios para a redução de emissões de gás carbônico (CO²), sua flexibilidade de uso para a geração de energia, segurança energética e sua contribuição para a diversificação da matriz energética nacional.

O uso do hidrogênio como vetor de energia se apresenta como possibilidade tanto para aplicações civis como militares. Em virtude de sua flexibilidade, é possível seu uso em unidades fixas, como na geração centralizada de energia, e em equipamentos móveis, como por exemplo em substituição aos combustíveis fósseis nos mais diversos tipos de veículos. Seu uso como vetor de energia tem ainda potencial para ser disruptivo em um futuro próximo, apresentando impactos para a Defesa e o Desenvolvimento Nacionais.

Nesse sentido este trabalho pretende responder a seguinte questão: em que medida o uso do hidrogênio como vetor de energia pode contribuir para a matriz energética nacional?

Para sanar esta inquietude, por meio de uma pesquisa bibliográfica, será traçado um perfil das energias alternativas e do gás natural e apresentado um panorama energético por meio do desenho das matrizes energética e elétricas do mundo. Para isso serão utilizados principalmente as informações coletadas e divulgadas pela Agência Internacional de Energia para as discussões globais e da Empresa de Pesquisa Energética para as locais. Identificadas as possibilidades de contribuição das energias alternativas para a segurança energética dos países, serão levantadas as características, os principais atores e as tecnologias do hidrogênio, para então estudar as ações e os resultados de políticas públicas de países onde o uso energético do hidrogênio mais avançou, no sentido de promover o hidrogênio como energia.

Como existem diversas aplicações para o hidrogênio, em especial em processos industriais, este trabalho ficará restrito ao seu uso para a produção de energia. Serão abordados os aspectos atinentes à energia, às fontes energéticas, obtenção do hidrogênio, armazenamento e seus múltiplos usos apenas em

profundidade suficiente para que seja realizada uma análise política estratégica do uso do hidrogênio como vetor de energia. Em virtude da limitação do número de páginas estabelecido pela Escola Superior de Guerra para a produção deste relatório de pesquisa, deixarão de serem abordados os aspectos ampliados de segurança, processos de fabricação, transporte e distribuição do hidrogênio.

Serão realizadas pesquisas sobre políticas de uso e incentivo do uso de hidrogênio, entretanto elas ficarão restritas ao Brasil, Estados Unidos e Japão, entretanto serão incluídos aspectos europeus quando necessário para a compreensão do assunto de modo global. A escolha destes países se deu por estes serem conhecidos investidores na pesquisa ou na promoção do uso de hidrogênio como vetor de energia, em especial no segmento de transporte de cargas e de pessoas.

O gás natural foi incluído neste trabalho junto com as energias alternativas não só por ser uma importante fonte de energia e poluir menos que os demais combustíveis fósseis, mas por atualmente responder pela quase totalidade da matéria prima para obtenção do hidrogênio.

De posse de todos os dados coletados, a pesquisa buscará identificar o estágio de desenvolvimento e de implementação desta tecnologia no Brasil, os óbices a serem vencidos, o nível de maturação tecnológica, sua viabilidade de uso para diversos fins com especial atenção à Defesa e novas oportunidades que contribuam para o desenvolvimento científico, tecnológico e econômico nacionais.

Uma vez reunidos os dados referentes às fontes e às tecnologias, conhecidas as vantagens, desvantagens, oportunidades, e também as políticas públicas nacionais e internacionais, o próximo passo será analisar o uso do hidrogênio como vetor de energia no país de modo a possibilitar construir propostas para uma política pública de incentivo ao uso do hidrogênio, de fomento à pesquisa das tecnologias necessárias e para sua inclusão na matriz energética nacional.

Segundo Aldabó (2004), o poder disruptivo do uso do hidrogênio como energia é tão significativo como a descoberta do petróleo foi para o sistema energético há mais de 100 anos atrás. Gomes Neto (2005), em sua obra "*Hidrogênio evoluir sem poluir*", diz que o fim da era do petróleo se dará com o início da era do hidrogênio e das fontes renováveis de energia, e desse horizonte estaria surgindo uma nova economia, a - "economia do Hidrogênio". Na mesma linha, Rifkin, em sua obra sobre o hidrogênio, a "*A economia do hidrogênio: criação de uma nova fonte de*

energia e a redistribuição do poder na terra” (RIFKIN, 2003) compartilha do mesmo pensamento. No Brasil, pesquisadores como o Dr. Ennio Peres da Silva já labutavam nos anos 1980 no Laboratório de Hidrogênio da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) no desenvolvimento do ciclo do hidrogênio, visando a poder participar junto com países mais desenvolvidos nessa nova economia (SILVA, 1991). Segundo Souza (2009), essa transição para a economia do hidrogênio é uma mudança de paradigma exigida pela necessidade de redução das emissões dos gases causadores do efeito estufa, e que segundo Miranda (2018), já está em curso uma verdadeira “[...] transição energética em nível global, que levará à descarbonização do sistema energético mundial [...]”.

Realizada esta introdução onde foram apresentados o problema de pesquisa e a metodologia para a produção do conhecimento, o próximo capítulo inicia o raciocínio trazendo à luz um pequeno histórico da energia, seguido de uma definição e nível de utilização das energias eólica, solar, hidráulica, biomassa, energia oceânica dentro de um panorama da matriz energética mundial de fontes alternativas acrescida do gás natural, para finalmente traçar um panorama da matriz energética e da matriz de energia elétrica nacionais.

2 ENERGIA

A interação do homem com a energia propriamente dita começou a milhares de anos atrás com a descoberta do fogo, fato que propiciou uma grande melhoria na qualidade de vida. A queima de matéria orgânica possibilitava o aquecimento necessário, o cozimento de alimentos e a iluminação. Um importante evento da história da energia aconteceu 200 anos antes de Cristo, “[...] ao escavarem poços em busca de sal, os chineses descobriram o petróleo e o gás natural [...]” (GOMES NETO, 2005, p. 24). Também foi importante para o desenvolvimento humano o uso da energia dos ventos, seja nos processos produtivos por meio de cata-ventos, seja nos transportes por meio dos barcos a vela, permitindo a expansão do mundo conhecido até então. Para completar o rol das principais fontes de energia até o século XVII ainda havia o carvão e a roda hidráulica.

O século XVIII marca um período transformador da humanidade: a primeira revolução industrial. A invenção da máquina a vapor foi a mola impulsora dessa transformação, sendo o carvão e a lenha seu suporte energético (AMARANTE, 2009). No século seguinte, os avanços científicos e tecnológicos se intensificaram, dando início a segunda revolução industrial.

O motor a combustão e a eletricidade contribuíram significativamente para as mudanças do século XIX. O uso do petróleo como energia se expandiu rapidamente desde o primeiro poço perfurado na Pensilvânia em 1859, que produzia há época 19 barris dia (GOMES NETO, 2005), até que segundo Daniel YERGIN:

No século XX, o petróleo e o gás natural, derrubaram o carvão de seu trono como fonte de energia para o mundo industrial. O petróleo também se tornou a base do grande movimento de urbanização do pós-guerra que transformou tanto a paisagem contemporânea quanto nosso estilo de vida moderno. [...] (YERGIN, 1991, p. 14, tradução nossa)¹.

Já para a eletricidade, o ponto de inflexão pode ser considerado a invenção da lâmpada incandescente por Thomas Edison. Seguiram transformando a vida

¹ “*In the twentieth century, oil, supplemented by natural gas, toppled King Coal from his throne as the power source for the industrial world. Oil also became the basis of the great postwar suburbanization movement that transformed both the contemporary landscape and our modern way of life. [...]*” (YERGIN, 1991, p. 14).

humana, grandes invenções suportadas pela energia que se desenvolveram até então. Depois dos barcos a vela, do barco a vapor e o trem, vieram o automóvel e o avião que levariam o homem a ir mais longe e mais rápido, possibilitando um concreto e irreversível processo de globalização. Teve início a era do petróleo.

2.1 MATRIZ ENERGÉTICA

Após o petróleo passar o carvão como principal fonte energética e se tornar um fator relevante geopoliticamente, a persistente busca por energia e o desenvolvimento da ciência e tecnologia possibilitaram o estabelecimento de novas fontes de energia. O desenvolvimento da energia nuclear é um bom exemplo desses avanços. O conjunto de fontes de energia disponíveis para uso em uma determinada região compõe o que hoje se chama matriz energética.

2.1.1 Panorama da matriz energética mundial de fontes alternativas e gás natural

Além do petróleo e seus derivados, como Diesel, gasolina, óleo combustível e querosene, do carvão e da energia nuclear, várias fontes de energia se desenvolveram significativamente nos últimos 70 anos, passando a compor a matriz energética mundial, em especial o gás natural, as energias solar, eólica e hidráulica e biomassa.

2.1.1.1 Gás natural

Importante fonte de energia, o gás natural apresenta grande versatilidade. Geralmente é comercializado para o usuário final por meio de gasodutos, sendo muito frequentemente utilizado para queima direta gerando calor. Para suprir

demandas específicas, ou em regiões onde não há gasodutos conectando a produção ao consumo, seu transporte pode ser feito por meio de gás liquefeito em caminhões, ou em longas distâncias, por trem ou navios construídos especificamente para esse fim.

O gás natural tomou ganhou importância no mercado energético, que atualmente, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), já representa mais de um quinto de toda a energia consumida no mundo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019g). Sua importância é tão grande que muitas empresas, e mesmo cidades ou países, dependem de seu fornecimento para manter estáveis suas atividades econômicas, provocando consequências geopolíticas.

Apesar de não ser uma fonte renovável de energia, o gás natural apresenta um impacto ambiental inferior aos demais hidrocarbonetos. Seu uso em substituição aos demais combustíveis fósseis pode ser considerado o primeiro passo para a transição energética para uma matriz mais limpa. Já consolidado para o uso em aquecimento residencial e cozimento, seu menor impacto ambiental associado a menores custos de obtenção faz com que seu uso seja cada vez mais frequente no campo industrial. Nos Estados Unidos, a produção do *shale gas* tem sido crescente, o que vem provocando uma verdadeira transformação no mercado interno de energia daquele país e diminuindo significativamente sua dependência de importação de petróleo, em especial do Oriente Médio.

Ainda segundo a Agência Internacional de Energia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019b), a demanda por gás natural no mundo cresceu 4,6% em 2018, sendo que de 2019 a 2024 a demanda terá um acréscimo de mais 10%, atingindo o patamar de 4,3 trilhões de metros cúbicos em 2024, o que representa uma pressão no custo de obtenção desta *comodity*.

O gás natural fornece 22% da energia utilizada no mundo, e compõe quase um quarto da geração de eletricidade, assim como desempenha um papel crucial como matéria-prima para a indústria. O gás natural é um combustível versátil e seu crescimento está ligado em parte aos seus benefícios ambientais em relação a outros combustíveis fósseis, especialmente para a qualidade do ar, bem como as emissões de gases com efeito de estufa (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019g, tradução nossa).²

² “Natural gas supplies 22% of the energy used worldwide, and makes up nearly a quarter of electricity generation, as well as playing a crucial role as a feedstock for industry. Natural gas is a versatile fuel and its growth is linked in part to its environmental benefits relative to other fossil fuels, particularly for air quality as well as greenhouse gas emissions.” (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019g).

2.1.1.2 Energia solar

A energia solar é uma fonte primária inesgotável. Seu aproveitamento pode ser feito basicamente de duas maneiras, por meio de células fotovoltaicas, que transformam a luz incidente em energia ou pela convergência dos raios solares³ em determinada área provocando aumento de temperatura, calor que posteriormente é aproveitado diretamente para o aquecimento ou para a geração de energia elétrica.

Com um crescimento de 30% na geração de energia, representado pelo acréscimo de geração na ordem de 570 TWh⁴ em 2018, a energia solar passou a representar uma fatia de 2% na geração global de eletricidade, uma verdadeira conquista para a proteção do meio ambiente. A grande pressão dos consumidores por energia limpa impulsionou a demanda por células fotovoltaicas, consequentemente estimulou a pesquisa e desenvolvimento desta tecnologia. Ao passo que novas tecnologias são incorporadas aos processos produtivos das células, obtém-se aumentos de produção, o que leva a uma tendência contínua de redução dos preços dos módulos, como aqueles observados ao longo dos últimos anos. Somente em 2018 o decréscimo de preço foi de aproximadamente 10% (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019j).

Fruto desse ciclo virtuoso, espera-se para os próximos cinco anos um crescimento mundial de 16% na geração de energia de fotovoltaica, com a especial contribuição da China, dos Estados Unidos, do Japão e da Índia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019j).

2.1.1.3 Eólica

A captação da energia dos deslocamentos de massas de ar para provocar movimentos de rotação é a base da energia eólica. Em sua origem esse aproveitamento era totalmente mecânico, ou seja, por meio de engrenagens eram

³ Por meio de concentradores parabólicos ou torres solares. (Nota nossa).

⁴ Tera Watts Hora – unidade de medida de energia equivalente a um milhão de milhões de Watts hora: 10¹² Wh (Nota nossa).

movimentados aparelhos mecânicos, como por exemplo moinhos ou bombas. Modernamente ainda vemos o mesmo princípio de funcionamento, só que agora o deslocamento de massas de ar impulsiona turbinas geradoras de eletricidade. O aproveitamento desse tipo de energia acontece em parques eólicos, que hoje já deixam o solo firme e se expandem em empreendimentos em mar aberto⁵.

A geração de energia eólica, excluindo a consolidada energia hidráulica, é responsável pelo maior segmento energético do mercado das renováveis. Em 2018 foram acrescentados 44 GW⁶ em empreendimentos no solo, respondendo a Inglaterra e Alemanha por um quinto deste aumento. Apesar de tímido para seus mercados, na China houve um crescimento de 9 GW e nos Estados Unidos, 7GW (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019i).

Com o avanço das tecnologias para turbinas e a fabricação de geradores mais altos e de maior diâmetro, são esperados a diminuição dos custos e o aumento da produção energética, em busca da desejada meta de crescimento estabelecida pela IEA de 12% anuais na disponibilidade dessa fonte de energia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019i).

Já para a energia gerada *offshore*, houve um acréscimo de 4,5 GW em 2018. A China com 1,6 GW adicionais, seguida pelo Reino Unido com 1,3 GW e da Alemanha com 0,9 GW foram as maiores contribuições individuais. Baseada nos preços ofertados nos leilões ingleses de energia, foi sinalizada uma redução de metade dos custos de instalação de novos empreendimentos nessa categoria, devido à economia de escala e à padronização já alcançadas. Com isso devem ser conquistados novos mercados (em especial nos Estados Unidos, na China e no Japão) e uma melhor regulamentação do setor, como já aconteceu no Japão quando aprovou uma nova lei para definir as zonas de desenvolvimento de projetos, reduzindo as dificuldades de licenciamento e conexão à rede. Um desafio para o desenvolvimento dessas tecnologias é o aumento da resiliência das torres aos fortes ventos e às condições meteorológicas diferenciadas no mar (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019h).

⁵ Geração *offshore* de energia eólica.

⁶ Giga Watt = mil milhões de watts: 10⁹ Watts.

2.1.1.4 Hidráulica

Utilizada há séculos, a energia hidráulica é, muito resumidamente, o aproveitamento da energia de massas de água em movimento, como por exemplo na vazão de um rio, ou em quedas d'água. Para este aproveitamento, existem duas principais possibilidades de uso energético, uma usina clássica, valendo-se de uma diferença da energia potencial entre dois pontos de alturas diferentes, ou uma usina a fio d'água, que se aproveita da vazão, ou melhor explicando, da velocidade com que a água flui de um ponto para outro. Sendo a primeira mais estável, pois faz uso de reservatórios de armazenamento de água, e a segunda mais depende das variações climáticas e das estações do ano. Apesar de menos produtivas, as usinas a fio d'água proporcionam a grande vantagem de provocar um impacto ambiental bem menor, em virtude da não necessidade de formação de reservatórios.

Importante fonte de energia⁷ em diferentes partes do mundo como nos Estados Unidos, Suécia, Japão, Costa do Marfim e Brasil, sua geração não emite gases em seu processo produtivo, contribuindo significativamente para o cumprimento de metas ambientais. Apesar disto, críticos tem reservas para sua expansão, em virtude de possíveis impactos socioambientais de novos empreendimentos, por modificar o meio ambiente onde são inseridas, em especial em florestas, biodiversidade local e na criação de novos centros urbanos.

Em 2018, com o comissionamento de grandes unidades geradoras no Brasil e na China, foi mantido o crescimento anual próximo aos 25 GW. No Cenário de Desenvolvimento Sustentável da Agência de Energia Internacional, a geração de energia hidrelétrica se expande em 2,5% ao ano até 2030, o que significa que as adições de capacidade precisam ser de aproximadamente de 40 GW anuais. Mesmo com potencial de crescimento na África e em países Asiáticos, os altos custos de construção e impactos sociais e ambientais podem dificultar a ampliação desse tipo de energia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019f).

⁷ A energia hidráulica não é uma energia primária, pois depende do deslocamento inicial da água para um ponto para outro mais alto, que na natureza acontece com o processo de evaporação, que por sua vez depende da energia proveniente do sol para acontecer. (Nota nossa).

2.1.1.5 Biomassa

Trata-se do aproveitamento energético proveniente de matéria orgânica de origem vegetal ou animal. Segundo (BERMANN, 2008), “[...] a biomassa é uma forma indireta de energia solar, pois resulta da conversão de energia solar em energia química por meio da fotossíntese, base dos processos biológicos dos seres vivos [...]”.

A obtenção de energia é feita por meio da queima do material em fornos ou em caldeiras, geralmente para o aproveitamento direto do calor ou para a geração de eletricidade. Na verdade, em locais mais afastados das cidades é comum o aproveitamento combinado para o suprimento de energia e calor. São importantes fontes o bagaço de cana-de-açúcar, a lenha, o carvão vegetal, diversos resíduos das cadeias produtivas do agronegócio⁸, resíduos de pecuária⁹ e a lixívia¹⁰. Essas fontes têm se mostrado tão eficientes que deram origem a um segmento energético com tantas possibilidades que para ele foi cunhado o termo “culturas energéticas”.

O Biogás é uma fonte decorrente da biomassa. Produzido, por exemplo, em aterros sanitários ou em estações de tratamento de esgoto. Além da sua capacidade energética atrelada ao alto teor de metano produzido pela decomposição dos materiais, o aproveitamento desse tipo de resíduos urbanos traz grandes benefícios ambientais, em especial nas regiões próximos a grandes centros.

De 2011 a 2018, a geração de bioenergia vem crescendo 8% anualmente. A China, a exemplo dos grandes investimentos que tem feito para aproveitamento de energia em seus aterros sanitários, tem sido uma grande contribuinte para este crescimento, que além da produção de energia, estes tipos de empreendimentos na China também visam à melhoria da qualidade do ar de seus grandes centros urbanos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019a).

Apesar do grande incremento na geração de bioenergia, espera-se uma contribuição ainda maior da China nos próximos anos no uso da biomassa como matéria prima, devido principalmente ao uso desta fonte energética em substituição à utilização do carvão em caldeiras. Em nível global o Brasil, com o plano federal

⁸ A gaseificação de biomassa no setor sucroalcooleiro e da produção de arroz são bons exemplos de aproveitamento energético (Nota nossa).

⁹ A “cama de frangos” e o esterco em geral são exemplos (Nota nossa).

¹⁰ Resíduo resultante do processo de cozimento da madeira para produção de celulose. A presença de resíduos de madeira é mais acentuada nas indústrias de celulose (Nota nossa).

RenovaBio, o México e a Turquia também declararam que pretendem expandir a participação da biomassa e do biogás em suas matrizes energéticas (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019a).

2.1.1.6 Energia oceânica

Novas tecnologias e novas possibilidades de geração de energia são sempre bem-vindas. Por serem estratégicas, as novas tecnologias no campo da energia recebem investimentos contínuos de governos e agências internacionais. Uma nova fonte de energia que se enquadra nesse tipo de desenvolvimento é a energia oceânica. Segundo a Agência Internacional de Energia são três as tecnologias que estão em desenvolvimento em níveis de TRL¹¹ 3 e 4: a conversão de energia térmica oceânica (OTEC) (TRL 4), tecnologia que busca extrair energia aproveitando a diferença de temperatura existente entre a superfície e o fundo do mar, que pode chegar a 20°C em alguns casos; a potência gradiente de salinidade (TRL 3) onde a energia é produzida a partir da diferença de salinidade entre a água doce e a água salgada, por exemplo na foz de um rio; e a mais conhecida, a tecnologia de corrente oceânica (TRL 3) que busca a energia no movimento das correntezas de água. Lideram as pesquisas a holandesa TU Delft, um consórcio da japonesa Xenesys com a Inc. Pacific trabalhando na Polinésia Francesa; a França com a iniciativa IPANEMA; a Lockheed-Martin (LM) junto com o Instituto de Pesquisa de Tecnologia Industrial de Taiwan (ITRI) no Havaí e a holandesa REDstack (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019d).

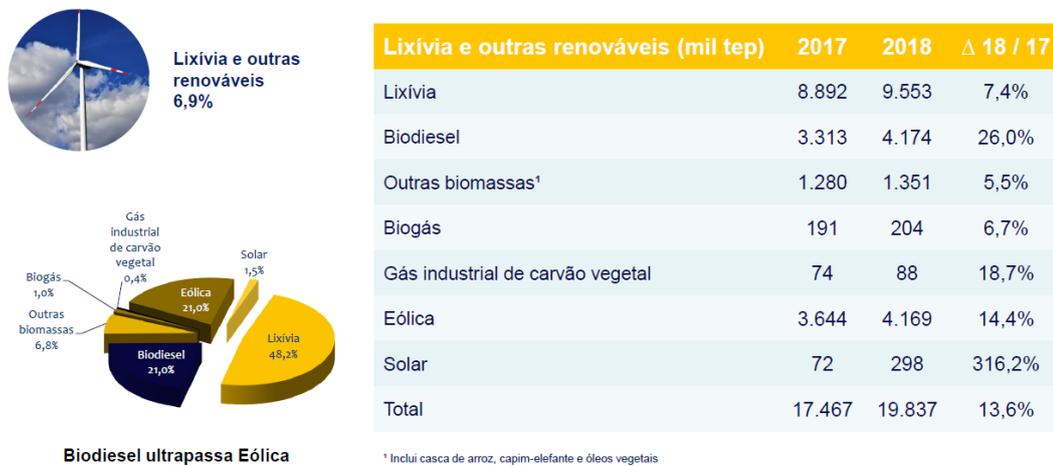
2.1.2 Panorama da Matriz energética nacional

¹¹ *Long-term technology challenges for research* (TRL), representa o grau de maturidade da tecnologia. Os níveis 3 e 4 representam respectivamente, que o conceito precisa de validação (a solução proposta precisa ser “prototipada” e aplicada) e protótipo inicial (protótipo comprovado em condições de teste). (Nota nossa).

Anualmente o Ministério de Minas e Energia (MME), por meio da Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), apresenta o Balanço Energético Nacional. Segundo seu relatório versão 2019 – ano base 2018 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019), a matriz energética nacional de renováveis conta as seguintes fontes de energia alternativa: lixívia, biodiesel, o biogás, o gás industrial de carvão vegetal, a eólica, a solar e outras biomassas como pode ser observado na Figura 1.

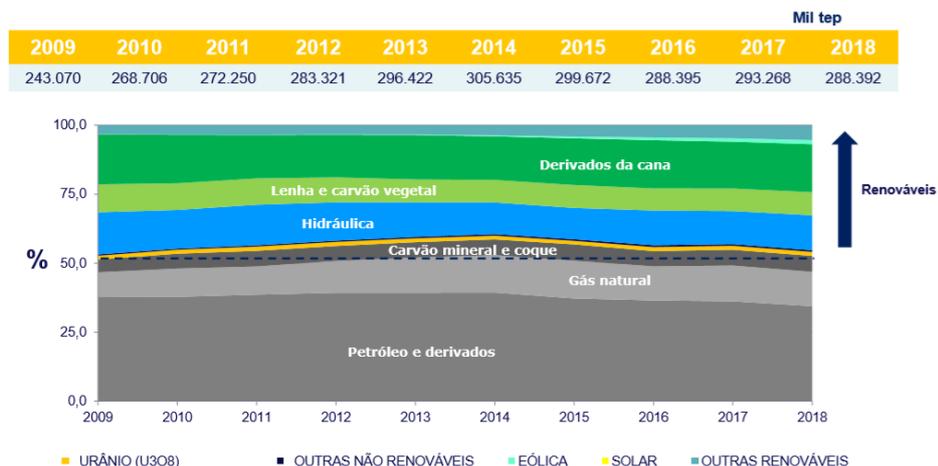
As fontes não renováveis que compõem a matriz são petróleo, gás natural, carvão mineral, urânio e outras. A figura 2 apresenta a evolução da totalidade da matriz energética brasileira (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019).

Figura 1: Matriz energética nacional - repartição de lixívia e outras renováveis



Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2019, p. 19)

Figura 2 - Oferta interna de energia 2009 – 2018



Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2019, p. 21)

2.1.3 Matriz de energia elétrica

A capacidade instalada de geração elétrica no mundo em 2015, segundo o último anuário estatístico de energia publicado pela EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2018), era de 6.256,7 GW. As tabelas 1 e 2 apresentam um retrato dessa capacidade dividido por região do mundo e expresso em Giga Watts (GW).

Tabela 1 – Capacidade instalada de geração elétrica por região do mundo em GW

	2011	2012	2013	2014	2015	Δ% (2015/2014)	"Part. % (2015)"	
Mundo	5.311,4	5.518,6	5.741,6	6.017,6	6.256,7	4,0	100,0	World
Ásia & Oceania	2.034,2	2.160,4	2.325,0	2.501,7	2.680,9	7,2	42,8	Asia & Oceania
América do Norte	1.246,6	1.258,1	1.257,8	1.271,8	1.279,5	0,6	20,5	North America
Europa	1.030,3	1.069,0	1.087,0	1.109,0	1.120,9	1,1	17,9	Europe
Eurásia	360,5	365,4	371,8	395,1	399,7	1,2	6,4	Eurasia
América do Sul e Central	273,3	284,3	297,2	312,9	323,9	3,5	5,2	South and Central America
Oriente Médio	221,8	230,9	243,6	258,9	276,4	6,7	4,4	Middle East
África	144,7	150,4	159,2	168,1	175,3	4,3	2,8	Africa

Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2018)

Tabela 2 – Capacidade instalada de geração elétrica no mundo 10 - maiores países em GW

	2011	2012	2013	2014	2015	Δ% (2015/2014)	"Part. % (2015)"	
Mundo	5.311,4	5.518,6	5.741,6	6.017,6	6.256,7	4,0	100,0	World
China	1.069,5	1.154,6	1.267,7	1.379,8	1.518,6	10,1	24,3	China
Estados Unidos	1.051,3	1.063,0	1.060,1	1.068,4	1.064,1	-0,4	17,0	United States
Índia	246,0	260,3	283,0	310,9	324,9	4,5	5,2	India
Japão	288,8	294,8	302,4	315,2	322,2	2,2	5,1	Japan
Rússia	232,8	234,8	237,9	259,5	263,5	1,6	4,2	Russia
Alemanha	167,5	177,3	186,1	198,4	204,1	2,8	3,3	Germany
Canadá	132,9	130,7	133,3	136,8	147,6	7,9	2,4	Canada
Brasil	117,1	121,0	126,7	133,9	140,9	5,2	2,3	Brazil
França	127,3	129,3	128,4	128,9	129,3	0,3	2,1	France
Itália	118,8	124,6	124,5	121,7	117,0	-3,9	1,9	Italy
Outros	1.759,4	1.828,3	1.891,4	1.963,9	2.024,7	3,1	32,4	Other

Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2018)

Das informações disponibilizadas pelas tabelas 1 e 2, o que chama mais atenção é que houve um progressivo e significativo aumento da participação da Ásia na geração de eletricidade do mundo. Adicionalmente, observa-se que há um grande desequilíbrio energético em nível mundial, pois apenas dois países, China e Estados Unidos consumiram mais de 41% de toda energia que foi gerada.

2.1.3.1 Matriz de energia elétrica mundial

Desde a introdução do carvão na matriz energética mundial, as fontes fósseis sempre tiveram papel preponderante. Como pode ser observado na tabela 3, na matriz de energia elétrica não é diferente. Em 2015, de cada 4 GW gerados, mais do que 3 GW vieram de fontes não renováveis. Observa-se também que naquele ano praticamente 2/3 de toda a eletricidade que se produzia no mundo vinha de fontes fósseis. Retirando a energia hidráulica que já está consolidada, o número que chama a atenção é a pequena quantidade de energia gerada a partir de fontes alternativas de baixo impacto ambiental. Apenas um total de 5% da energia gerada mundialmente vieram das fontes eólica, solar, biomassa, resíduos, sólidos ou geotérmica.

Compiladas as informações disponibilizadas pela EPE, a tabela 3 apresenta um resumo da geração elétrica mundial por tipo de fonte. Pode-se observar que, apesar de ainda representarem um pequeno quantitativo se comparada com as fontes fósseis, as energias alternativas praticamente dobraram sua participação na matriz elétrica mundial em quatro anos.

Tabela 3 - Capacidade de geração de energia elétrica por fonte em GW - 2015

Fonte	Total 2011	Total 2015	Varição 2011/2015	China	Estados Unidos	Europa
Térmica	3.492,6	3.906,3	11,85%	990,2	758,5	476,5
Hidráulica	930,0	1.071,0	15,16%	296,0	79,7	180,4
Nuclear	368,8	382,4	3,69%	21,7	98,7	123,6
Alternativas	381,3	758,3	98,87%	182,5	112,7	291,7

Fonte: o autor, com dados disponibilizados pela EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2018)

Trabalhando os dados da tabela 3, chega-se às seguintes conclusões: que houve 39,5% de crescimento do total de energia provenientes de fontes renováveis no período de 2011 a 2015 e que, mesmo com a pressão da sociedade por uma transição energética para fontes renováveis visando à proteção dos recursos naturais ainda disponíveis, a energia oriunda de fontes não renováveis não teve seu uso diminuído, na verdade subiu para um nível de geração 11% superior.

2.1.3.2 Matriz de energia elétrica nacional

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil em 18 de agosto de 2019 possuía um total de 7.468 empreendimentos de geração de eletricidade em operação, totalizando um total de 170.181.572 kW de potência instalada, sendo que está prevista para os próximos anos uma adição de capacidade de 22.745.461 kW, aproximadamente 13,4% de aumento na disponibilidade energética, provenientes de 203 empreendimentos atualmente em construção e mais 410 em empreendimentos com construção ainda não iniciada (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019). No retrato de agosto de 2019¹², conforme pôde ser observado no banco de informações de geração (BIG), a parcela de 60,21% da capacidade total geradora brasileira advinha de 217 usinas hidroelétricas; 9,09% de 615 empreendimentos eólicos; e 1,31% tinha origem em um total de 2.479 empreendimentos fotovoltaicos (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019).

O movimento de transformação de nossa matriz de energia para novas fontes energéticas fica evidente quando se analisa os empreendimentos em construção ou já outorgados que em breve iniciarão sua construção. Daqueles já em construção, aproximadamente 14,19% são de energia eólica provenientes de 56 novos empreendimentos e outros 9,26% de energia fotovoltaica de 28 novas centrais geradoras solares fotovoltaicas. Dos já outorgados que não iniciaram a construção, mais da metade da capacidade geradora virá de fontes alternativas. Serão

¹²A ANEEL atualiza permanente o banco de informações de geração (BIG), de modo dificilmente as informações permanecem inalteradas dentro do mesmo mês, ou até da mesma semana. Os cálculos realizados por este autor valem-se de informações coletadas em 18 de agosto de 2019.

construídos 249 empreendimentos eólicos ou fotovoltaicos (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019).

Olhando com atenção os dados apresentados pela ANEEL, chegamos à conclusão de que passaremos dos atuais 15.106.789 kW, para 21.330.759 kW eólicos, ou seja, aproximadamente 30 % de aumento, e dos atuais 2.172.362 kW para 6.290.538 kW fotovoltaicos, o que aponta para significativos 189,6 % de aumento nos próximos anos. Processando os números de todas as fontes energéticas que compõe a matriz elétrica nacional, chega-se ao resultado de que as energias limpas provenientes dos ventos e do sol passarão de um total de 10,4% para 14,3% de participação na matriz, o que representa uma importante contribuição para preservação do meio ambiente e para o cumprimento das metas assumidas pelo Brasil no acordo de Paris.

Neste capítulo foram apresentados os aspectos históricos da energia, as definições para as principais fontes de energia alternativa e como elas, junto com o gás natural, participam das matrizes energéticas e elétricas mundiais e brasileiras. Pode-se observar que o Brasil, em termos de energia alternativas e renováveis, apresenta uma matriz muito mais avançada que a média mundial. Verificou-se que os números mostram que o mundo passa por uma transição energética, onde, exceto pelo gás natural, há uma clara redução da participação dos combustíveis fósseis. No próximo capítulo será realizada uma breve apresentação sobre o hidrogênio, sua produção, transporte e armazenamento.

3 HIDROGÊNIO

Elemento mais comum na natureza, o hidrogênio pode ser considerado uma fonte inesgotável de energia não poluente. Ao contrário do que inicialmente pode-se imaginar, o hidrogênio não é uma fonte primária de energia¹³, entretanto, ele pode tornar-se um importante vetor a partir do uso da energia proveniente do sol, dos combustíveis fósseis ou da energia nuclear para sua obtenção.

Apesar de abundante, 93% dos átomos do universo, o hidrogênio é muito raramente encontrado na natureza em sua forma pura. Devido às suas características físico-químicas, ele é normalmente encontrado combinado com outros elementos, como por exemplo na água, nas plantas ou ainda em hidrocarbonetos. Para o seu uso energético, há a necessidade de que seja separado dos demais elementos químicos, de modo que se obtenha a molécula surgida da combinação de dois átomos de hidrogênio, a sua forma pura, o H₂ (ENVIRONMENTAL LITERACY COUNCIL, 2015).

O hidrogênio foi descoberto em 1766 por Henry Cavendish, quando este, em um experimento, colocou ácido em ferro. Cavendish observou a formação de bolhas, que queimavam e provocavam explosões¹⁴ com o ar. Mais tarde, Lavoisier decidiu nomear esse elemento com o nome de hidrogênio, que em grego significa formação de água, pelo fato de que nessas explosões haver a formação de água. (SIBLERUD, 2001).

Segundo Silva (1991), mesmo já tendo sido usado como combustível para motores no século XIX, o hidrogênio ainda é muito pouco explorado como fonte de energia. Apenas no início do século XX há os primeiros registros de uso prático do hidrogênio no setor de transportes. Como exemplos citam-se o seu uso em motores ou como preenchimento para balões e dirigíveis, caso do LZ 1 de Ferdinand Von Zeppelin. Contudo, apenas com o avanço tecnológico e a redução de custos obtidos no pós-Segunda Guerra Mundial é que o hidrogênio passa a ser utilizado em larga escala pela indústria. Posteriormente, com o advento da corrida espacial, consequência de intensivo investimento em tecnologia e em pesquisas científicas, foram desenvolvidas as modernas tecnologias de geração energética.

¹³ As fontes primárias de energia são a solar, a fóssil e a nuclear (Nota nossa).

¹⁴ Uma concentração de 4 a 75% de hidrogênio é inflamável (Nota nossa).

Robert Sibley (2001) discorre sobre a história do hidrogênio no mundo em seu livro — *Our future is hydrogen! energy, environment and economy*. Neste livro o autor cita como exemplos históricos do uso energético do hidrogênio pelo mundo, a Austrália que pesquisa o uso do hidrogênio em transportes desde 1970; a Bélgica, origem do projeto Euro Quebec Hydro Hydrogen Pilot (EQHHPP) criado para mostrar na Europa a versatilidade do hidrogênio; o Brasil com as pesquisas da Unicamp usando um Toyota e uma Kombi movidos a hidrogênio; o Canadá, sede da importante *Ballard Power System*; a Alemanha que desde 1973, por meio da Mercedes Benz, testa a possibilidade do uso de hidrogênio em automóveis; o Japão, um dos países mais prósperos na tecnologia do hidrogênio, com 50 anos de experiência em pesquisas; e dois institutos de pesquisa da antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), hoje um na Rússia e outro na Ucrânia, que avançavam na busca por menores emissões de gases.

Como a queima de hidrogênio produz 150% mais energia do que a gasolina¹⁵, seu uso para fins militares sempre foi objeto de interesse. Em 1956, os Estados Unidos obtiveram sucesso em um teste de bombardeiro bimotor USAF B-57 modificado para usar o hidrogênio como combustível. Segundo Sibley (2001), essa experiência capacitou a Pratt and Whitney Aircraft Company para o desenvolvimento, em 1963, do motor de foguete de hidrogênio/oxigênio líquido RL-10 para o programa espacial estadunidense.

Trazendo para os dias de hoje, o emprego do hidrogênio é muito significativo em processos petroquímicos, na fabricação de amônia e na produção de metanol, aplicações que juntas consomem quase a totalidade da oferta de hidrogênio.

3.1 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Apesar de presente em abundância na natureza, como já anteriormente dito, na quase a totalidade dos casos, o hidrogênio encontrado não serve para uso

¹⁵ “Especificamente, a quantidade de energia liberada durante a reação de hidrogênio, numa base de massa, é cerca de 2,5 vezes o calor de combustão de combustíveis de hidrocarbonetos comuns (gasolina, diesel, metano, propano, etc.) Portanto, para um determinado trabalho, a massa de hidrogênio necessária para produção de energia é apenas de um terço da massa necessária de hidrocarbonetos” (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2001, p. 15, tradução nossa).

energético, pois para isso é preciso isolar suas moléculas e assim obter o hidrogênio puro, o H². Essa separação pode ser obtida em processos específicos ou como subproduto, onde o H² coletado em diferentes processos industriais. Entre os processos para obtenção do gás hidrogênio adequados às fontes eólicas e solar, podemos destacar a eletrólise, caso em que com o uso da eletricidade, o hidrogênio contido na água é separado do oxigênio¹⁶.

Já para o hidrogênio obtido a partir de fontes fósseis, a indústria petroquímica é a responsável por sua maior produção¹⁷. Neste caso o H² é obtido por meio da reforma de vapor de hidrocarbonetos, muito frequentemente a reforma do metano¹⁸, mas também pode advir da nafta, da oxidação parcial de óleos pesados, ou ainda, pela oxidação parcial de carvão. Esses processos são atualmente os principais geradores de hidrogênio. É possível ainda a obtenção do hidrogênio puro por meio de processo térmicos e térmicos-químicos, sendo que nestes dois casos a energia nuclear se mostra uma fonte primária de energia bem adequada.

3.2 TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO

O armazenamento é um desafio para a consolidação do hidrogênio como fonte de energia. Conforme seu uso for se espalhando pelos diversos setores da economia, representará uma importante adversidade. Hoje, ainda com a baixa utilização no segmento dos transportes, essa equação tem sua solução simplificada, pois no segmento industrial, seus maiores produtores também são os seus maiores consumidores, razão pela qual a quase totalidade do gás produzido é rapidamente consumida em instalações próximas, exigindo-se, para isso, apenas uma pequena infraestrutura de distribuição e de armazenamento.

O armazenamento de hidrogênio pode ser feito na forma gasosa, a mais comum; a líquida, valendo-se inclusive de compostos intermediários como a amônia;

¹⁶ São três as principais tecnologias de eletrólise, a eletrólise alcalina, a de eletrólito sólido polimérico e a de óxido sólido.

¹⁷ E também seu o maior consumidor.

¹⁸ A reação típica para obtenção de H² é processo de reforma onde o metano reage com a vapor a temperatura de 700 a 1000° Celsius em catalizador de níquel: CH₄ + H₂O => CO + 3H₂. Para não impactar o meio ambiente, geralmente o monóxido de carbono gerado é coletado e em novo processo, reagindo agora em um catalizador de aço a 350° Celsius, resultando na produção de mais hidrogênio e agora gás carbônico (Nota nossa).

ou sólida, como em hidretos metálicos, por exemplo. Em seu estado gasoso, o armazenamento pode ser feito em gasômetros (baixa pressão), em cilindros ou em vasos de alta pressão, nos próprios gasodutos ou ainda em instalações subterrâneas como cavernas, cavernas de sal, lençóis aquíferos ou até em poços de petróleo e gás já esgotados.

O transporte de hidrogênio também é um desafio, especialmente por suas particularidades, entre elas, o H^2 ser explosivo em uma concentração de apenas 4%. Mesmo assim, em seu estado gasoso, tem as mesmas dificuldades de transporte de qualquer outro gás inflamável.

O transporte deste vetor de energia pode ser realizado por meio de gasodutos ou, em diferentes modais, por meio de vasos pressurizados de diferentes capacidades volumétricas e de pressão. O hidrogênio é mais frequentemente transportado em suas formas gasosa e líquida, sendo que na forma líquida apresenta a vantagem de possuir uma densidade muito superior, entretanto tendo como desvantagens o custo adicional do processo de liquefação do gás em si e a necessidade do uso de equipamentos mais sofisticados para o transporte, em virtude das baixas temperaturas envolvidas.

Neste capítulo foram apresentadas bem resumidamente as características, as peculiaridades de obtenção e as necessidades especiais para transportes e armazenamento do hidrogênio, de modo a permitir o próximo passo do relatório: discutir o seu uso como vetor de energia.

4 HIDROGÊNIO COMO FONTE DE ENERGIA

Diferentemente dos combustíveis fósseis, o aproveitamento energético do hidrogênio como vetor de energia raramente se dá por sua combustão (queima), mas sim por meio de uma transformação eletroquímica, realizada em células geradoras conhecidas como células a combustível.

Nestes equipamentos, o oxigênio existente na atmosfera se combina com o hidrogênio, produzindo energia elétrica e água. Ou seja, o processo de geração de energia por meio de células a combustível em si não impacta o meio ambiente, razão pela qual podemos classificá-lo como sendo um processo limpo.

Entretanto, antes de se avançar na discussão da geração de energia, é preciso ampliar a abordagem do processo de obtenção do hidrogênio puro (utilizado nas células a combustível). Deve-se analisar se a energia para sua obtenção provém de energias renováveis e, principalmente, se as matérias primas utilizadas para a obtenção do hidrogênio puro têm origem em fontes fósseis ou renováveis.

No momento em que as tecnologias de processos e de produtos avançam, essa discussão se torna ainda mais relevante, no sentido de que se garanta a sustentabilidade e os menores impactos sócio ambientais diretos e indiretos que a produção do gás hidrogênio traz consigo. O objetivo final que se deve ter em mente é obter um processo de geração sistematicamente sustentável.

No sentido da sustentabilidade e da preservação do meio ambiente, o hidrogênio obtido a partir de fontes de energia renováveis, em um processo no qual não haja a emissão de carbono é chamado de hidrogênio verde. Já aquele que advém de processos em que haja a produção residual de carbono, sendo essa produção capturada para reaproveitamento ou armazenamento, é conhecido como hidrogênio azul. Por último, a situação na qual haja produção de carbono como consequência do processo de sua purificação, o hidrogênio obtido é chamado de hidrogênio cinza.

Como a quase totalidade de hidrogênio hoje produzido tem origem no gás natural (CH_4), onde a cada duas moléculas de hidrogênio obtidas, um átomo de carbono é emitido, portanto a maioria absoluta da produção do hidrogênio é classificada como cinza, podendo a vir a ganhar a classificação azul caso sejam feitos esforços adicionais de reaproveitamento desse carbono emitido. No lado

oposto, um processo de eletrólise da água, cuja fonte de energia seja por exemplo eólica, o hidrogênio obtido é classificado como verde. Esse é o hidrogênio que o mundo precisa e o mercado deseja.

4.1 HIDROGÊNIO COMO VETOR DE ENERGIA

Das energias disponíveis hoje no mercado para atender às demandas dos consumidores, as que têm origem fósseis, nas suas diversas vertentes, se apresentam quase sempre muito versáteis. Dentre elas, os hidrocarbonetos assumem uma indiscutível vantagem. Pegar um veículo a Diesel ou a gasolina em Nova Iorque e chegar a Los Angeles, em Lisboa e chegar a Moscou, de Dakar a Paris, ou partir de Porto Alegre e chegar a Boa Vista pode ser um desafio logístico para manter os viajantes seguros, confortáveis, aquecidos ou alimentados, mas está longe de ser um desafio energético, em virtude de haver uma infraestrutura global que se capilariza em múltiplas empresas locais, formando uma rede de produção, armazenamento e distribuição desses combustíveis.

Isso acontece simplesmente porque a energia na forma de Diesel ou gasolina pode ser facilmente transportada e armazenada pelo seu próprio usuário, de modo a estar disponível para uso nas mais longínquas estâncias quando necessário. É exatamente esse o desafio do hidrogênio: ser uma energia que está disponível para uso a qualquer momento e em qualquer lugar, fácil de ser transportada pelo usuário e de ser armazenada e vendida pelo distribuidor.

Mesmo o hidrogênio estando presente em quase tudo que podemos observar na face da terra, ele, em sua forma pura, raramente pode ser obtido diretamente na natureza. É necessário algum tipo de processamento, o que o caracteriza como uma fonte secundária de energia.

Apesar da água ser um bem de fácil acesso, a principal fonte de hidrogênio são as fósseis, que em geral são processadas por meio de reforma de gases (ALBADÓ,2004), em especial o gás natural ou o sintetizado de carvão. O procedimento de separação do hidrogênio é basicamente o mesmo para a gasolina, a nafta, o metanol ou até as fontes renováveis como o etanol. Independente da fonte

fóssil, esses processos nunca serão são inertes ao meio ambiente. Há impacto, pois na melhor das situações existirá a emissão de CO₂.

Os processos tecnológicos ligados ao setor de materiais e de energia estão em contínuo avanço. Mesmo sem aparecer tecnologias que possam ser disruptivas, a opção eletrólise está ficando mais barata a cada dia. Entretanto, comparada a outros processos, a utilização da eletrólise para separação do hidrogênio ainda é muito pequena, representando apenas 0,1% da produção global dedicada de H₂ (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019e).

O custo da energia elétrica gasta no processo eletrólise da água é decisivo para esta modalidade de obtenção de hidrogênio, pois a energia dispendida para produção do gás puro sempre é maior do que aquela que o hidrogênio pode oferecer para uso. A eficiência é prejudicada pelas perdas inerentes aos processos, tanto da quebra da molécula da água, quanto da sua recomposição com o oxigênio dentro da célula combustível, em especial devido às perdas por calor. Desse modo, obter hidrogênio por eletrólise só se justifica em três situações: a primeira é quando a energia gasta para sua obtenção é farta e de baixo custo; a segunda, quando no mesmo processo produtivo também haja o interesse pela produção de oxigênio; ou, por último, quando a necessidade mobilidade ou a construção de uma reserva energética futura propiciada pelo hidrogênio produzido se tornam imperativas.

A melhor oportunidade para a geração de hidrogênio por meio de eletrólise acontece nos casos em que a energia que esteja sendo gerada no momento não possa ser entregue à rede de distribuição, ou por falta de demanda momentânea, ou por excesso de geração. Estas situações não são incomuns, acontecem com frequência na geração de energias consideradas intermitentes, como a eólica e a solar, onde a geração depende de condições do meio ambiente de captação. Estes dois casos assemelham a produção de hidrogênio a uma espécie de acumulação de energia, onde, valendo-se de um vetor, guarda-se a energia que está sobrando em determinado momento, para sua utilização posterior quando a demanda crescer, ou quando o fornecimento é prejudicado, conforme o caso, pela ausência de ventos ou da luz do sol, ou ainda por quaisquer outras razões, como o caso da ausência de geração devido à parada dos equipamentos geradores para manutenções preventivas ou corretivas.

Outro modo de obtenção de hidrogênio é a utilização da biomassa/biogás com fonte de hidrogênio. São passíveis de utilização, por exemplo o gás produzido

por qualquer tipo de dejetos de alimentos, sobras de produção agrícola ou florestal e da maior parte do lixo urbano e industrial. Trata-se de boa oportunidade para vários setores produtivos nacionais, em especial para o setor sucroalcooleiro. Uma vantagem adicional da biomassa/biogás a ser explorada neste caso, é que a utilização dessas fontes para obtenção de hidrogênio contribui significativamente para a proteção ao meio ambiente.

Se por um lado o baixo impacto ambiental da energia gerada pelo hidrogênio é seu maior aliado, seu custo de obtenção e a infraestrutura para seu transporte e armazenamento são seus maiores inimigos. Segundo Albadó (2004), para que o hidrogênio seja uma realidade, o custo de um quilograma de hidrogênio precisa custar a metade do custo de um galão de gasolina, uma realidade ainda não alcançada. Uma vez solucionado a componente de custo do gás, os holofotes se moverão para às células combustíveis.

Conhecidas desde o século XIX¹⁹, é no interior das células de combustíveis que a geração de energia se processa²⁰. Em resumo, é nesse tipo de células que o oxigênio e hidrogênio se juntam para formar moléculas d'água. Como resultado da combinação de uma molécula hidrogênio puro (H^2), quebrada em dois átomos de hidrogênio H , com um átomo de oxigênio, além da formulação de uma molécula de água, são gerados corrente elétrica e calor.

Neste capítulo foi discutido o uso do hidrogênio como fonte de energia. Foram apresentados os conceitos de hidrogênio verde, azul e cinza e discutidas as questões de viabilidade da geração do gás e seu impacto no meio ambiente. No próximo serão estudadas as políticas públicas que estão ou que podem ser adotadas para o fomento e o uso do hidrogênio como energia.

¹⁹ As primeiras células a combustíveis de hidrogênio foram inventadas por Willian Robert Grove em 1839 (Nota nossa).

²⁰ O termo célula a combustível foi cunhado em 1889 por Ludwig Mond e Charles Langet. (ALBADÓ, 2014)

5 POLÍTICAS PÚBLICAS DE HIDROGÊNIO

A conscientização ambiental das sociedades foi paulatinamente sendo construída, inicialmente pela divulgação de alertas vindo de cientistas e depois pela própria observação das consequências da falta de cuidado com a natureza. Ao mesmo tempo que crescia a ciência desses impactos, a pressão pela preservação dos recursos naturais e pela redução dos efeitos sobre o meio ambiente e sobre o clima se intensificavam, e deste modo, pouco a pouco, esse assunto foi entrando na agenda da mídia e dos entes políticos.

O mundo vem assistindo nos últimos tempos a uma crescente preocupação de governos, organismos internacionais e da sociedade, relativamente às questões ambientais e, especialmente, ao aquecimento global do planeta, problemas que começam a ganhar contornos estratégicos. (BRASIL, 2019b).

Como resultado do aumento da consciência ambiental, hoje países e organizações mundiais se alinham no sentido de construir políticas que visam a proteger o meio ambiente e a preservar a vida na terra de um modo sustentável.

5.1 ENERGIA E MEIO AMBIENTE

Segundo a Agência Internacional de Energia, em 2017 apenas três fontes de energia atendem mais de 80% da demanda primária de energia no mundo, sendo que o carvão responde por 26,8%; o petróleo 31,7% e o gás natural 22,2%. Por outro lado, as energias eólica, hidráulica, solar, biomassa (exceto madeira e carvão vegetal), biogás e biocombustíveis e outras alternativas juntas representaram menos de 10% de toda a energia gerada no mundo. Entretanto, também segundo os dados da IEA, pode-se observar um franco crescimento das energias renováveis que saltaram de 662 toe²¹ em 2000 para 1334 toe em 2017, podendo triplicar novamente, alcançando a significativa marca de 4.159 toe projetadas para 2040, dentro

²¹ Uma unidade de toe representa que a energia gerada é equivalente a mesma energia gerada por uma tonelada de petróleo. Essa unidade é útil para criar um parâmetro comum de comparação entre os diferentes tipos de energia. (Nota nossa)

de um cenário de desenvolvimento sustentável estabelecido pela Agência (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018).

Esse cenário de transição energética apontado pela Agência é uma megatendência, que tem como seu fator de motivação uma maior conscientização ambiental. A pressão das sociedades por questões ambientais fez a Organização das Nações Unidas e diversos países incorporarem a preservação ambiental e o uso racional dos recursos naturais em seu ordenamento jurídico e nos respectivos sistemas educacionais, provocando a implementação de toda ordem de políticas públicas visando à proteção da natureza.

A Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano em 1972 pode ser considerada como um marco de partida dessas preocupações ambientais em nível global.

A Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano (também conhecida como Conferência de Estocolmo) foi uma conferência internacional organizada sob os auspícios das Nações Unidas em Estocolmo, Suécia, de 5 a 16 de junho de 1972. Foi a primeira grande conferência da ONU sobre questões ambientais internacionais e marcou um ponto de virada no desenvolvimento da política ambiental internacional. (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2019, tradução nossa).²²

O relatório da Conferência elenca 26 premissas que foram estabelecidos por consenso pelos Estados representados e que visavam a inspirar e a orientar os povos do mundo na preservação e valorização do ambiente humano. A segunda destas premissas elencadas retrata uma perspectiva da época que ainda se mantém muito atual:

Premissa 2

Os recursos naturais da Terra, incluindo o ar, a água, a terra, a flora e a fauna e, especialmente, amostras representativas dos ecossistemas naturais, devem ser salvaguardados para o benefício das gerações presentes e futuras por meio de um apropriado planejamento ou gerenciamento cuidadoso. (UNITED NATIONS, 1973, p. 4, tradução nossa).²³

²² “*The United Nations Conference on the Human Environment (also known as the Stockholm Conference) was an international conference convened under United Nations auspices held in Stockholm, Sweden from June 5-16, 1972. It was the UN’s first major conference on international environmental issues, and marked a turning point in the development of international environmental politics.*” (Organização das Nações Unidas, 2019).

²³ “*Principle 2*

Desse ponto de partida, foram se sucedendo tratados, painéis e documentos dentro da Organização das Nações Unidas (ONU) provenientes de seguidas conferências, provocando, à época, acalorados debates em vários parlamentos espalhados pelo mundo. Das iniciativas da ONU veio a relevante Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a Rio 92.

Durante a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992, a Rio 92, representantes de 179 países consolidaram uma agenda global para minimizar os problemas ambientais mundiais. Crescia a ideia do desenvolvimento sustentável, buscando um modelo de crescimento econômico e social aliado à preservação ambiental e ao equilíbrio climático em todo o planeta. Nesse cenário, foi elaborada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Foram definidos compromissos e obrigações para todos os países (denominados Partes da Convenção), para garantir o cumprimento desses compromissos é necessário [sic] os recursos financeiros para custear as despesas. (BRASIL, 2019d).

Como decorrência dos debates da RIO 92, sucederam-se o protocolo de Kyoto em 1997²⁴, com compromissos ambientais e ações governamentais a serem cumpridos tendo o ano base de 1990; até as mais recentes, a Conferência de 2007, conhecida como plano de ação de Bali; a COP 15 na conferência do clima de 2009 em Copenhague, considerada um fracasso por não ter conseguido traçar compromissos de redução de emissões; seguiram também menos relevantes a COP 16 no México, a COP 17 em Durban; a COP 18 Doha, a COP 19 Warsaw, a COP 20 Lima em 2014. Até que em 2015 veio a COP 21 com significativos resultados, ocasião na qual 195 países participantes, por meio da reunião de 2.800 delegados e 150 chefes de Estados, celebraram o Acordo de Paris que visa a manter o aumento de temperatura global neste século abaixo de 2°C e empregar esforços para limitar o aumento de temperatura em 1,5°C com relação aos níveis pré-industriais, tendo entrado em vigor em 04 de novembro de 2016 (UNITED NATIONS, 2019).

O Brasil assumiu alguns compromissos dentro da COP 21, como por exemplo ter 45% energias renováveis em sua matriz energética até 2030; aumentar para 18%

The natural resources of the earth, including the air, water, land, flora and fauna and especially representative samples of natural ecosystems, must be safeguarded for the benefit of present and future generations through careful planning or management, as appropriate" (UNITED NATIONS, 1973, p. 4).

²⁴ Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, terceira seção da conferência das partes da UNFCCC, Kyoto, de 1 a 10 de dezembro, que exigia para sua entrada em vigor a adesão por parte de 55 Estados membros, o que só foi atingido em 2004 (BRASIL, 2019b).

a participação de bioenergia sustentável até 2030, além de expandir uso de fontes renováveis não hídricas na matriz energética e na matriz de energia elétrica e prosseguir como a melhoria da eficiência do setor elétrico (BRASIL, 2019c).

Desde a Conferência de Estocolmo, nesses quase 50 anos surgiram um sem número de atores que militam pela preservação ambiental, com importantes atuações e diferentes resultados. Dentre as ações marcantes, citam-se os boicotes às fontes fósseis, o que representou uma importante janela de oportunidade para o desenvolvimento das tecnologias atinentes ao hidrogênio, em um movimento maior do que a simples transição energética para as fontes renováveis, um movimento na direção da Economia do Hidrogênio.

5.2 POLÍTICAS PÚBLICAS DO HIDROGÊNIO EM NÍVEL GLOBAL

As políticas de meio ambiente em nível global citadas na seção anterior, associadas à atuação dos grupos de pressão da sociedade organizada, à conscientização da população das necessidades de preservação ambiental, à observação de frequentes eventos climáticos extremos, ao avanço das tecnologias e ao barateamento dos equipamentos pavimentam o caminho para descarbonização da economia. Já é possível identificar grandes investimentos financeiros em infraestrutura, em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias que aproveitam exatamente este caminho pavimentado para se chegar em uma nova porta, a de entrada para o hidrogênio como solução energética para a vida das pessoas pelo mundo afora.

Em junho de 2019, a IEA a pedido do governo Japão preparou um relatório sobre o uso do hidrogênio para o G20²⁵. Segundo este relatório (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019e) foram esses os principais investimentos dos países para alavancar o uso do hidrogênio como energia em 2108 e 2019: a Austrália anunciou

²⁵ O Grupo é integrado pela África do Sul, Alemanha, Arábia Saudita, Argentina, Austrália, Brasil, Canadá, China, Coreia do Sul, Estados Unidos, França, Índia, Indonésia, Itália, Japão, México, Reino Unido, Rússia, Turquia e União Europeia. Além dos membros permanentes, participam como convidados da atual presidência da Argentina a Espanha, Chile e Países Baixos, além da Jamaica, representando a Comunidade do Caribe (CARICOM); Ruanda, representando a União Africana (UA); Senegal, representando a Nova Parceria para o Desenvolvimento da África (NEPAD) e Singapura, representando a Associação de Nações do Sudeste Asiático (ASEAN). Outros chefes de Estado e de Governo foram convidados para participar exclusivamente da Cúpula (BRASIL, 2019a).

mais de AUD 100 milhões para apoiar pesquisas de hidrogênio e projetos pilotos; na Bélgica, um plano de investimento regional associado de 50 milhões de euros para o fornecimento de geração de gás visando a atender as suas metas para o hidrogênio de 2030-2050; a Alemanha aprovar o Programa Nacional de Inovação para Tecnologias de Hidrogênio e de Célula a combustível para mais dez anos, com um financiamento de 1,4 bilhões de euros, incluindo subsídios para estações de reabastecimento de hidrogênio, veículos movidos a célula a combustível de hidrogênio, e aquisição de micro cogeração, a serem complementados por 2 bilhões de euros de investimento privado; a França apresentar um plano de implantação de hidrogênio e um financiamento de 100 milhões de Euros; na Índia, editais para recebimento de propostas no valor de 60 milhões de INR para propostas de ligadas ao hidrogênio e a células a combustível; por fim, a Inglaterra anunciar um investimento de 170 milhões de libras esterlinas de investimentos públicos para descarbonização de sua indústria incluindo o uso do hidrogênio.

Ainda segundo o mesmo documento da IEA, em 2108 e 2019 foram traçados ou atualizados roteiros estratégicos para o desenvolvimento da tecnologia do hidrogênio na Austrália; na Bélgica; na Coreia do Sul que apresentou um roteiro da economia do hidrogênio com metas para 2022 e 2040; na Holanda, que publicou um roteiro de hidrogênio que inclui um capítulo sobre o acordo do clima holandês; no Japão, que foi além de traçar um roteiro, incluiu novas metas para os custos do combustível, para implantação do hidrogênio, células a combustível e do uso de hidrogênio em usinas de energia; na Áustria que traçou a estratégia para implementação de geração de energia alternativa para atingir as metas do acordo climático de 2030; na Itália, que ajustou a regulação para derrubar as barreiras à implantação de estações de reabastecimento de hidrogênio, facilitando a distribuição e aumentando sua segurança, equacionando aspectos econômicos e sociais; na Noruega, que criou um fundo de financiamento para desenvolvimento de uma rota de *ferryboats* e embarcações propulsadas a hidrogênio; e na África do Sul que colocou em seu roteiro a aquisição de ônibus que utilizem célula a combustível como parte da Estratégia de Transporte Verde nas áreas metropolitanas e urbanas do país (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019e).

Do relatório também se extrai que a China lançou programas para automóveis elétricos em 10 cidades, que pode ser replicado para o transporte público baseado em hidrogênio em Pequim, Xangai e Chengdu, além da intenção de

construir a primeira cidade do hidrogênio chinesa, com previstos 300 postos de reabastecimento até 2025; que a Comissão Europeia publicou uma estratégia de descarbonização de longo prazo que incluiu o hidrogênio entre as fontes renováveis a serem utilizadas para atingir a neutralidade de carbono, reformular a diretiva relativa à promoção do uso de energia proveniente de fontes renováveis, permitindo que o hidrogênio produzido a partir de fontes com garantias de origem possam contribuir para o atingimento das metas para uso de energia renovável até 2030; e que na Índia a Suprema Corte pediu a Nova Délhi para explorar o uso de ônibus com célula a combustível na cidade para combater a poluição do ar. Ainda pôde-se verificar que a Alemanha apoiou a operação comercial do primeiro trem movido a hidrogênio e um programa anual de instalação de estações de reabastecimento de hidrogênio no país; que a Arábia Saudita construiu sua primeira estação de reabastecimento de hidrogênio; nos Estados Unidos, a Califórnia definiu metas e parcerias para implementação de 1.000 estações de reabastecimento de hidrogênio e instalações 1.000.000 de células de hidrogênio até 2030; e , finalmente, o Brasil, que além de sediar a 22ª Conferência Mundial da Energia do Hidrogênio em 2108, incluiu o uso do hidrogênio no Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Renováveis e Biocombustíveis (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019e).

A tabela 4 apresenta o total de gastos anuais de países com pesquisa e desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio. A tabela foi construída pelo autor com as estatísticas disponibilizadas pela IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY 2019c).

5.3 POLÍTICAS PÚBLICAS DO HIDROGÊNIO NO BRASIL

Como resposta aos dois choques do petróleo, foram criados no Brasil programas governamentais para substituição desse combustível. Como decorrência desses programas, incentivado pelos governos militares, surgiram pelo país laboratórios para a pesquisa e desenvolvimento de combustíveis alternativos ao petróleo. Entre eles, criado em 1975, está o Laboratório do Hidrogênio (LH2). Instituição de pesquisa independente, ligada ao Instituto de Física da Universidade

Tabela 4: Investimento anual em pesquisa e desenvolvimento em tecnologias do hidrogênio por país.

Pesquisa em C&T: Valores expresso em milhares de dólares americanos.																	
País	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	somatório
Austrália	0.321	0	0.195	0.612	0.295	1.073	1.993	2.037	0.182	1.477	3.271	3.341	3.018	4.174	21.989
Áustria	0	2.767	9.355	1.653	3.305	3.622	4.79	2.89	4.921	5.014	10.338	2.087	3.843	5.551	60.136
Bélgica	0.825	..	..	0	1.851	0.275	0	3.96	1.506	1.525	2.294	12.236
Canada	38.016	40.582	52.21	35.857	63.177	48.771	46.197	41.124	21.582	14.121	10.795	10.198	17.048	16.984	456.662
República Tcheca	0	0.256	0.255	0.246	0.319	0.28	0.186	1.389	1.725	1.849	0.89	0.928	0.604	..	8.927
Dinamarca	12.695	23.796	27.438	37.66	23.91	20.487	40.509	36.662	30.915	16.356	32.95	17.55	10.27	11.586	342.784
Estônia	1.446	0	0.872	1.08	1.118	0.774	0.72	6.01
Finlândia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
França	30.393	36.749	31.924	61.469	68.257	75.172	73.922	67.214	58.195	62.558	43.652	44.728	45.845	37.475	34.144	33.413	805.11
Alemanha	37.398	31.321	36.102	43.07	33.226	32.336	34.379	36.679	24.667	34.463	28.464	24.421	18.806	26.342	441.674
Grécia	0	0	0	0	0	0.697	0.587	..	..	..	..	..	..	1.284
Hungria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.069	0	0.008	0	0.692	0.769
Irlanda	0	0	0	0	0	0	0.776	0.261	0.136	0.19	0.116	0.052	..	..	1.531
Itália	0	0	27.595	37.028	32.836	21.903	31.98	29.945	19.336	15.675	11.92	22.15	11.436	11.577	273.381
Japão	206.941	218.361	219.174	191.956	198.472	143.345	113.79	96.031	130.188	107.517	114.378	125.928	126.347	132.821	2.125.249
Coréia	32.939	28.89	45.618	47.462	81.928	60.716	55.337	50.531	38.562	37.457	31.335	29.671	38.776	38.533	617.755
Luxemburgo	0	3.914	..	..	..	..	..	3.914
México	0	0	0.433	0	0.11	0.663	0.757	1.963
Países Baixos	9.809	9.156	9.372	10.959	14.54	5.669	0	0	1.851	0.033	0.933	0.352	4.006	66.68
Nova Zelândia	2.208	2.07	1.655	1.582	1.14	1.134	1.093	1.488	1.495	0	0	0.099	0	0	13.964
Noruega	4.53	11.043	11.543	11.452	7.485	14.507	15.069	14.177	7.623	6.175	6.218	7.114	8.705	6.555	132.196
Polónia	0.729	3.274	2.24	7.131	6.719	6.867	2.218	0.79	0.89	0.754	31.612
Portugal	0	0.086	0	0.07	0.035	0.053	0.226	0	0.038	0.765	0.73	0.626	..	..	2.629
República Eslovaca	1.528	1.634	1.708	0	0	0.097	0	0.02	0.066	0.011	5.064
Espanha	0	0	2.877	4.798	7.851	5.339	13.292	9.482	8.109	1.293	5.12	7.235	2.81	1.784	69.99
Suécia	3.525	3.219	2.77	2.458	3.748	3.395	2.678	2.478	3.696	3.572	3.794	1.58	1.127	0	38.04
Suíça	10.347	10.189	15.698	14.455	17.115	17.137	16.465	25.692	25.247	28.025	31.003	28.48	30.031	30.109	299.993
Turquia	0.043	0.565	1.379	2.116	0.86	1.048	..	..	..	..	2.824	1.714	3.179	3.019	16.747
Reino Unido	4.709	4.125	11.908	14.76	17.368	18.919	30.257	24.979	20.043	32.127	17.589	18.433	18.707	14.52	248.444
Estados Unidos	194.947	397.742	398.226	383.149	375.996	414.012	382.617	292.285	130.69	156.305	152.86	130.983	105.255	103.338	3.618.405
TOTAL	30.393	36.749	580.543	846.29	941.411	915.753	956.204	894.739	860.143	741.703	523.715	517.298	517.731	474.55	438.376	449.54	9.725.138

Fonte: o autor - baseado nas estatísticas globais da Agência Internacional de Energia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019c)

Estadual de Campinas. Coordenado pelo Professor Doutor Ennio Peres da Silva, um dos maiores nomes do hidrogênio no Brasil, o LH2 participava do esforço com a pesquisa sobre a produção de hidrogênio para uso de maneira eficiente em motores a combustão. Andrade e Lorenzi consideram que:

[...] a crise acabou e o preço do petróleo caiu, quase todos os projetos foram descontinuados, seus recursos cortados e a maior parte dos laboratórios simplesmente fechou. Todavia, o LH2 continuou. Sem recursos, demitiu praticamente todos os seus funcionários e técnicos, porém, através da infraestrutura instalada no período anterior, continuou subsistindo por meio da venda de hidrogênio para a indústria química. (ANDRADE; LORENZI, 2015, P. 736)

Os movimentos ambientalistas que tomavam grande importância nos anos 1980 e 1990 e da possibilidade de ampliar o leque de oportunidades para novas fontes de energia, fizeram o mundo e o Brasil abrirem os olhos para a tecnologia do hidrogênio, de modo que:

No fim da década de 1990 a Finep propôs o financiamento de pesquisas e desenvolvimento de diversos combustíveis alternativos os combustíveis fósseis, incluindo o hidrogênio. Criou-se um grupo do hidrogênio e o LH2 voltou a receber recursos e novos técnicos puderam ser contratados. As pesquisas, que estavam paradas, puderam ser retomadas, agora sob a perspectiva da questão ambiental. (ANDRADE; LORENZI, 2015, p. 736).

Como resultado da primeira Conferência Brasileira sobre o Hidrogênio, em Pernambuco, surge o Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) fruto do IV Encontro do Fórum Permanente de Energias Renováveis, onde se reuniram os cinco centros nacionais de referência em energias renováveis da época²⁶. O objetivo do CENEH era “[...] reunir e divulgar informações a respeito de pesquisas e desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao uso energético do hidrogênio [...]” (ANDRADE; LORENZI, 2015, p. 735).

No início dos anos 2000, a conscientização ambiental já estava bem consolidada em nível mundial. Pressionados pela necessidade de ação dos países frente aos compromissos assumidos pelo protocolo de Kyoto em 1997, o mundo se movia preocupado em achar soluções para a produção de energia limpa.

²⁶ Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE), localizado na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE); Centro Brasileiro para o Desenvolvimento de Energia Solar Térmica (Green Solar), instalado na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG); Centro Nacional de Referência de Pequenas Centrais Hidroenergéticas (CERPCH), localizado na Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), em Minas Gerais; Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel); e Centro de Referência em Biomassa (CENBIO), instalado na Universidade de São Paulo (USP).

Um bom exemplo dessas preocupações na Europa foi a conferência — *The hydrogen economy: a bridge to sustainable energy* — que aconteceu em Bruxelas em junho de 2003. O caput do relatório da conferência, apresentava o hidrogênio como uma tecnologia promissora: “O hidrogênio e as células combustíveis são vistos por muitos como soluções-chave para o sistema de energia do século XXI, possibilitando uma produção limpa e eficiente de energia e aquecimento a partir de uma ampla gama de fontes de energia primárias”²⁷ (EUROPEAN COMMISSION, 2003, tradução nossa) e destacou dentre os principais programas do mundo na época:

Os programas americanos Freedom Fuel e Freedom Car propõem um total de 1.7 bilhões de dólares americanos (340 milhões de dólares) nos próximos cinco anos para desenvolver células a combustível de hidrogênio, infraestrutura de hidrogênio e tecnologias automotivas avançadas. De acordo com o departamento de energia dos EUA, essas atividades resultarão em 750.000 novos postos de trabalho até 2030.

[...]

O Japão também está buscando agressivamente pesquisas sobre hidrogênio e demonstração de células combustíveis, com um orçamento de 2002 estimado em cerca de 240 milhões de dólares. A conferência sobre comercialização de células a combustível do Japão irá implementar seis estações de abastecimento de hidrogênio em Tóquio e Yokohama em 2002-03. As autoridades japonesas anunciaram metas de comercialização iniciais de 50.000 veículos de célula combustível até 2010, e 5 milhões até 2020, e uma capacidade estacionária de células a combustível de 2.100 MW até 2010, com 10.000 MW até 2020. (EUROPEAN COMMISSION, 2003, tradução nossa).²⁸

Como resultado dos debates, a Europa decidiu aumentar o orçamento da sexta fase (2002-2006) dos projetos de pesquisa e fomento às tecnologias do hidrogênio para €250-300 milhões contra os €130 milhões da fase anterior (1992-2002) visando a, já naquela época, “[...] estabelecer um suprimento energético sustentável, capaz de fornecer energia limpa a preços acessíveis, sem aumentar as

²⁷ Hydrogen and fuel cells are seen by many as key energy system solutions for the 21st century, enabling clean and efficient production of power and heat from a broad range of primary energy sources (EUROPEAN COMMISSION, 2003)

²⁸ “USA Freedom Fuel and Freedom Car Programmes proposes a total of \$1.7 billion (340 m\$/year) over the next five years to develop hydrogen fuel cells, hydrogen infrastructure and advanced automotive technologies. According to the US Department of Energy those activities will result in 750,000 new jobs by 2030. [...] Japan is also aggressively pursuing research and demonstration of hydrogen and fuel cells, with a 2002 budget estimated at around \$240 million. The Japan Fuel Cell Commercialisation Conference will commission six hydrogen fuelling stations in Tokyo and Yokohama in 2002-03. The Japanese authorities have announced initial commercialisation targets of 50,000 fuel cell vehicles by 2010, and 5 million by 2020, and installed stationary fuel cell capacity of 2,100 MW by 2010, with 10,000 MW by 2020.” (EUROPEAN COMMISSION, 2003).

emissões de gases com efeito de estufa [...]” (EUROPEAN COMMISSION, 2003, tradução nossa).

As discussões mundiais sobre esse assunto no início do século apresentavam um cenário muito claro para o potencial de uso do hidrogênio, o que motivou o Brasil a incrementar a pesquisa do hidrogênio como solução energética. Pelo fato de o país possuir diferentes possibilidades de fontes de obtenção de hidrogênio em abundância; de seu uso contribuir para uma maior segurança energética nacional; de contribuir para a redução da importação de petróleo, ainda um grande problema nacional à época; para proteção do meio ambiente; e visando ao uso eficiente da energia, o Brasil, sob influência dos movimentos mundiais, deu partida em novos programas de hidrogênio.

Surge o programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio do Ministério da Ciência e Tecnologia, que tinha como objetivo:

- [...] • Criação e operação de redes cooperativas de PD&I abrangendo universidades, institutos de pesquisa, centros de pesquisa, incubadoras e empresas;
- Apoio para a revitalização e melhoria da infraestrutura de pesquisa das instituições envolvidas no ProH2;
- Fomento à formação e treinamento de recursos humanos, com ênfase à pós-graduação no Brasil e aperfeiçoamento em centros de excelência no Brasil e no exterior;
- Implantação de projetos de demonstração de diferentes sistemas de células a combustível e de tecnologias de produção de hidrogênio, com prioridade para as tecnologias desenvolvidas no ProH2;
- Implementação de projetos de demonstração integrados que privilegiem o uso de combustíveis renováveis nacionais, com ênfase especial à reforma do etanol;
- Fomentar o estabelecimento de normas e padrões para certificação dos produtos, processos e serviços relativos às tecnologias de hidrogênio e células a combustível;
- Manutenção e disponibilização de informações sobre os grupos de pesquisa, infraestrutura, projetos e empresas envolvidas com as tecnologias do hidrogênio no Brasil. Brasil. (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010, p. 16).

É lançado o Programa Brasileiro de Sistemas de Células a Combustível (ProCaC), que tinha como objetivo principal “de organizar uma rede de pesquisas e promover ações integradas e cooperadas, que viabilizassem desenvolvimento nacional da tecnologia de sistemas célula a combustível [...]” (ANDRADE; LORENZI, 2015, p. 733), visando à produção de energia elétrica de maneira mais limpa e

eficiente. Na mesma época o Brasil adere ao *International Partnership for Hydrogen Economy* (IPHE)²⁹.

No horizonte apresentava-se a possibilidade do Brasil se inserir nesse mercado nascente como um importante *player*, pelo menos como produtor de hidrogênio em face da grande quantidade de fontes renováveis de energia disponíveis em território nacional. Segundo Andrade e Lorenzi (2015, p. 735) “[...] até 2007, cerca de 290 projetos foram executados na área de pesquisa em células a combustível e hidrogênio com financiamento público, num total de cerca de R\$133 milhões”.

Mesmo com um roteiro para Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil traçado em 2005, há uma desaceleração nas pesquisas ligadas ao hidrogênio, principalmente pelo desânimo mundial com as dificuldades e pelo lento avanço da tecnologia. Mesmo nos Estados Unidos o pensamento era que mesmo no melhor cenário “[...] a introdução de veículos com célula a combustível no mercado requer várias décadas antes que a penetração no mercado se torne suficiente para ter um impacto mensurável no consumo de petróleo e nas emissões de CO² [...]” (NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES, 2008, p. 51, tradução nossa)³⁰. Esse cenário não teve grandes mudanças na última década.

Os programas e políticas foram em sua quase totalidade conduzidos pelo Ministério de Ciência e Tecnologia, dentro da lógica de criação de tecnologia e inovação, com uma participação menor de órgãos do Ministério de Minas Energia. Os resultados foram sendo colhidos, como em 2010 - o primeiro ônibus a hidrogênio com tecnologia nacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) (FINANCIADORA DE INOVAÇÃO E PESQUISA, 2015), um projeto capitaneado pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe)/UFRJ com financiamento da Financiadora de Estudos Projetos (FINEP), Petrobras, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj).

O Brasil foi o primeiro País da América Latina a possuir uma frota de ônibus movido a células de hidrogênio. O Projeto Ônibus Brasileiro a

²⁹ Em 2009 o *International Partnership for Hydrogen Economy* (IPHE) teve a nomenclatura alterada para *The International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy*. (Nota nossa).

³⁰ “[...] for introduction fuel cell vehicles into the market requires several decades before market penetration becomes sufficient to have a measurable impact on petroleum consumption and CO² emissions [...]” (UNITED STATES, 2008)

Hidrogênio, que representa o ponto de partida para o desenvolvimento de uma solução mais limpa para o transporte público urbano, foi coordenado pela Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU/SP) e dirigido pelo Ministério das Minas e Energia (MME). A iniciativa contou com duas fontes principais de recursos: R\$ 8,4 milhões da Finep e US\$ 12,3 milhões do Global Environment Facility (GEF), aplicados por meio do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). (FINEP, 2015).

Dentro do Ministério de Minas e Energia, as linhas de pesquisa do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) sobre Sistemas de Geração de Energia à Base de Células a Combustível; Desenvolvimento e Caracterização de Materiais e Componentes de Células a Combustível; Produção e Condicionamento de Hidrogênio produziram resultados teóricos e experimentais como a “[...] a implementação e operação do primeiro sistema à base de células a combustível, capaz de operar com hidrogênio produzido pela reforma de gás natural. Esse sistema foi desenvolvido, no Brasil, pela empresa Electrocell [...]” e “[...] desenvolvimentos de novas formulações para eletrólitos de células a combustível de óxido sólido e de placas bipolares para células a combustível de membrana trocadora de prótons.” (ELETROBRAS, 2018).

Mais recentemente, das soluções de fontes alternativas para uso em veículo, uma em especial é promissora, a utilização de bioetanol pesquisada pela Unicamp. Nessa solução, as células a combustível dos veículos não são alimentadas diretamente com hidrogênio puro proveniente de um tanque ou cilindro, mas sim pelo gás obtido da reforma de bioetanol. Assim o veículo abastece normalmente em postos de combustíveis como um veículo convencional. O Laboratório de Genômica e BioEnergia da Unicamp e a Nissan assinaram em abril de 2019 um contrato para avançar no desenvolvimento deste tipo de célula, conhecida como célula a combustível de óxido sólido (SOFC) (SUGIMOTO, 2019).

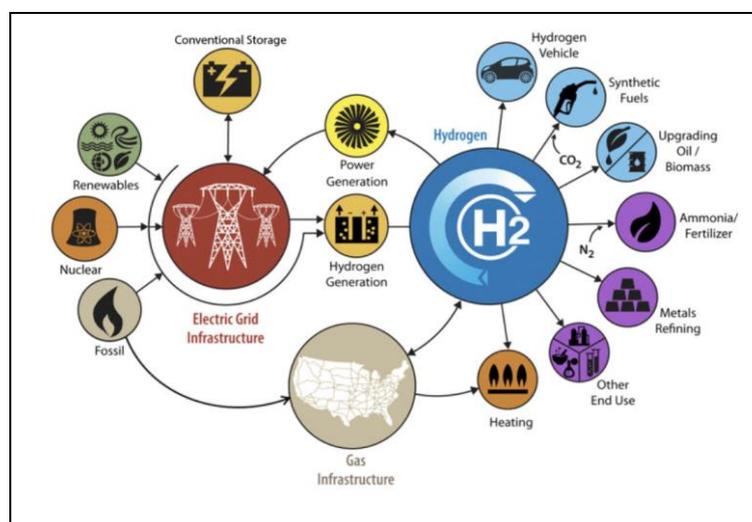
Marco Silva³¹, por sua vez, adiantou que a ideia é colocar a tecnologia do etanol dentro dos veículos da Nissan não apenas no Brasil, mas em nível mundial. “Queremos levar essa tecnologia desenvolvida para o Japão e também para outros países. Temos vários interesses em relação a eletrificação e formas de propulsão, e o motor 100% elétrico é um deles, mas vemos uma grande oportunidade para os nossos produtos através da tecnologia baseada na célula a combustível de óxido sólido. E o estudo da Unicamp vai nos ajudar nesta tecnologia completamente inovadora de hidrogênio gerado pelo etanol. (SUGIMOTO, 2019)

³¹ Presidente da Nissan do Brasil em abril de 2019 (Nota nossa).

5.4 HIDROGÊNIO NOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA E NO JAPÃO

Segundo o Departamento de Energia Norte-Americano (U.S. DoE) a produção de hidrogênio nos Estados Unidos em 2019 está no patamar de dez milhões de toneladas métricas, das quais 95 % provem da reforma de gás natural em unidades centralizadas. A produção destina-se principalmente para o refino de petróleo e para a fabricação de amônia. Apenas uma pequena parcela é usada para a geração de energia, veículos com célula a combustível, refino de metais e produção de gás natural sintético³² (UNITED STATES. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019a). A figura 3 apresenta os componentes do mercado de hidrogênio nos EUA.

Figura 3: - Mercado de hidrogênio nos Estados Unidos



Fonte: UNITED STATES. DEPARTMENT OF ENERGY (2019a)

Segundo a Dra. Sunita Satyapal, Diretora do Escritório de Tecnologia de Células a combustível do U.S. DoE, o setor de células a combustível automotiva em junho de 2017 já empregava cerca de 16.000 pessoas, com um potencial de geração de 250.000 empregos diretos e indiretos nos Estados Unidos, dos quais 100.000 na produção e 150.000 em vendas e distribuição de células (SATYAPAL, 2017). Como resultado do impacto tecnológico deste setor nos Estados Unidos, já foram produzidas até 2019, 960 patentes, das quais 37% provenientes de

³² Resumidamente o gás natural sintético (CH_4) pode ser obtido da mistura de monóxido de carbono com o gás de hidrogênio ($\text{CO} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_3\text{OH}$), que após processado além do gás natural, resulta na formação de gás carbônico e água ($4\text{CH}_3\text{OH} = 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$) (Nota nossa).

laboratórios do governo, com impacto em mais de 30 tecnologias no setor privado e uma receita de 2.3 bilhões de dólares. (UNITED STATES. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019c).

Na última década as novas tecnologias desenvolvidas já provocaram uma redução de 60% no custo das células e resultaram em um aumento de 400% em sua durabilidade, por outro lado, o custo de eletrólise caiu 80% (UNITED STATES. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019c).

Nos Estados Unidos já há uma rede de abastecimento de hidrogênio estabelecida que atende à uma frota crescente de automóveis. Fora as mais de 25.000 de empilhadeiras já em operação nos EUA, pode-se citar como exemplos de uso de veículos de hidrogênio comerciais em pleno funcionamento, caminhões de entregas da UPS ou um reboque de aeronaves no aeroporto de Memphis. Outros exemplos de aplicação comerciais são a primeira célula para uso portuário do mundo, instalada no Havaí (figura 4); o uso de células de hidrogênio na iluminação do *Super Bowl* na Califórnia; e mais de 80.000 unidades de *backup* de energia no território norte-americano (UNITED STATES. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019c).

Figura 4: primeira célula para uso portuário instalada mundialmente no Havaí



Fonte: Sandia National Laboratories (IAE, 2010c)

O Estado americano da Califórnia é o local dentro do território dos Estados Unidos onde o uso do hidrogênio mais se afirmou. Um dos pontos de partida dessa conquista aconteceu em 1999 quando surgiu o *California Fuel Cell Partnership*, parceira em que governos central e local, junto com empresas se uniram para:

[...] expandir o mercado para veículos elétricos de movidos a célula a combustível alimentadas por hidrogênio, visando a ajudar a criar um futuro mais limpo, com diversificadas fontes de energia destinados a veículos que

não emitem gases de efeito estufa [...] (CALIFORNIA FUEL CELL PARTNERSHIP, 2019a , tradução nossa).³³

Como resultado do trabalho conjunto, órgãos federais como o Departamento de Energia, Departamento de Transportes, a Agência de Proteção Ambiental e o Centro Nacional Automotivo do Exército dos Estados Unidos que se uniram com órgãos estaduais de energia e de meio ambiente do governo da Califórnia, e juntamente com as grandes montadoras e petrolíferas norte-americanas conseguiram fazer com que “saísse do chão” uma rede de reabastecimento de hidrogênio na Califórnia, que em 01 de setembro de 2019 contava com mais de 40 estações de revenda (CALIFORNIA FUEL CELL PARTNERSHIP, 2019a).

Com a infraestrutura estabelecida, os consumidores começam a se motivar para a compra dos veículos. A iniciativa privada rapidamente reagiu e já estão disponíveis para compra na Califórnia o *Toyota Mirai*³⁴ e o *Honda Clarity*, e mais recentemente o *Hyundai Nexa* que antes só era vendido na Coreia do Sul e no Reino Unido. Também dados do início de setembro de 2019, rodavam na Califórnia 40 ônibus e a maior parte dos 7.450 carros a hidrogênio vendidos nos Estados Unidos da América (CALIFORNIA FUEL CELL PARTNERSHIP, 2019b). Estes carros custam em torno de US\$ 60.000,00 nos Estados Unidos da América (EUA), um preço caro mesmo para o padrão norte-americano de consumo. Entretanto, dentro da política de uso do hidrogênio há incentivos fiscais para aquisição deste tipo de veículo, como a restituição de até 7.500,00 dólares americanos de impostos aos compradores por parte do governo federal, que contribui, deste modo, para a disseminação desse tipo de veículo naquele país.

Adicionalmente, como política de benefícios do governo da Califórnia, esses carros são elegíveis para recebem identificadores que permitem, por exemplo, rodar em faixas exclusivas, mesmo que só com o motorista dentro do carro (CALIFORNIA, 2019). Caso o comprador seja morador do estado, dependendo do tipo de carro adquirido, também recebe até 7.000 dólares americanos de restituição, provenientes de um fundo que conta com 238 milhões de dólares americanos de incentivo à aquisição de carros com zero emissão de gases, sendo que os carros movidos a hidrogênio são normalmente elegíveis para receberem um subsídio de 5.000 dólares

³³ “[...] *expanding the market for fuel cell electric vehicles powered by hydrogen to help create a cleaner, more energy-diverse future with no-compromises zero emission vehicles.* [...]” (CALIFORNIA FUEL CELL PARTNERSHIP, 2019a).

³⁴ “*Mirai*” significa “Futuro”, em japonês (Nota nossa).

americanos. Desde 2010, este fundo já contribuiu para que 300.000 carros de baixo impacto ambiental rodassem nas ruas e estradas da Califórnia (CALIFORNIA, 2019). Como política privada da montadora Honda para incentivar essa nova tecnologia, quem adquirisse um automóvel modelo Clarity movido a hidrogênio na Califórnia por meio de um contrato de *lease* de três anos, em setembro de 2019 recebia da montadora um crédito de até 15.000 dólares americanos para compra de hidrogênio na rede de postos da Califórnia durante os três anos de contrato (HONDA, 2019).

O Japão também possui uma iniciativa similar à da californiana: o *Japan H2 Mobility* (JHyM), onde companhias japonesas, entre elas Toyota, Nissan e Honda, lançaram um empreendimento em 2018 que tem como objetivo construir 80 novas estações de abastecimento de veículos a hidrogênio até 2022 (HORNYAK, 2019).

Essa iniciativa está alinhada com a estratégia japonesa traçada pelo *Ministerial Council on Renewable Energy, Hydrogen and Related Issues*³⁵:

A estratégia estabelece o objetivo de que o Japão deve reduzir os custos de hidrogênio para o mesmo nível de energia convencional (por exemplo, gasolina e GNV [gás natural veicular]) e para atingir este objetivo, deve providenciar políticas integradas com todos os ministérios que tenham o mesmo objetivo desde a produção à sua utilização do hidrogênio. (JAPAN, 2017, tradução nossa)³⁶.

Os objetivos das políticas japonesas são ambiciosos. Pode-se citar as metas oficiais estabelecidas no mapa estratégico para o uso de hidrogênio de ter no país 200.000 carros movidos a hidrogênio até 2025, sendo que para 2030 prevê que 800.000 carros e 12.000 ônibus também funcionem com hidrogênio no Japão, reabastecidos em previstas 320 estações de reabastecimento em 2025 e em 900 até 2030 (JAPAN, 2017). Em 2018 foi publicado pelo Ministério de Economia japonês (JAPAN, 2018) um mapa estratégico completo retratando o longo caminho a ser percorrido para que se obtenham esses resultados.

As metas que o Conselho Ministerial sobre energias renováveis, hidrogênio e assuntos relacionados japonês estabeleceu para seu país atingir faz com que seja necessária uma cadeia internacional de suprimento de hidrogênio e que sejam

³⁵ Conselho Ministerial sobre energias renováveis, hidrogênio e assuntos relacionados.

³⁶ "The strategy sets a goal that Japan should reduce hydrogen costs to the same level of conventional energy (e.g., gasoline and LNG) and to achieve the goal, provides integrated policies across ministries ranging from hydrogen production to utilization under the common goals" (JAPAN, 2017).

tomadas iniciativas que garantam acesso a recursos energéticos baratos e estáveis no exterior, incluindo a produção de hidrogênio em si. Nesse sentido, são importantes a escala de produção do gás, o desenvolvimento de tecnologias de armazenagem e, principalmente, transporte para estabelecimento de uma cadeia de suprimentos internacional consistente. Visando a atingir esse propósito, o governo decidiu que:

Por meio da concretização da estratégia de uma sociedade livre de carbono, o Japão vai apresentar o hidrogênio para o resto do mundo como uma nova opção de energia e levará esforços globais para estabelecer uma sociedade livre de carbono aproveitando os pontos fortes do Japão. (JAPAN, 2017, tradução nossa).³⁷

O primeiro ministro japonês, visando a cumprir essa decisão, e valendo-se da condição de estar presidente do G20 durante o encontro das nações em junho de 2019, encomendou à Agência Internacional de Energia um relatório sobre o uso do hidrogênio como energia para ser divulgado aos representantes dos países no encontro. Para o Japão, país com poucos recursos naturais, incentivar o uso do hidrogênio, além de enfrentar efetivamente e eficazmente o problema ambiental do uso da energia, cria uma nova opção energética, atacando, conseqüentemente, sua dependência externa de combustíveis fósseis.

Neste capítulo foram estudadas as políticas públicas atinentes ao uso do hidrogênio. Foi visto que o movimento pelo uso do hidrogênio decorre de uma crescente conscientização da sociedade sobre a necessidade de preservação ambiental e do entendimento da vinculação das questões energéticas com o meio ambiente impulsionados pela atuação da ONU a partir dos anos 1970. Foram discutidas como políticas públicas podem contribuir para ampliação do uso energético do hidrogênio. Para ilustrar essa contribuição foi apresentado como os Estados Unidos e o Japão vêm trabalhando para fomentar essa fonte de energia. Foi mostrado que a pesquisa do uso energético do hidrogênio no Brasil tomou forma com os governos militares que buscavam alternativas para o petróleo e que depois de longo período sem grandes investimentos, praticamente só foram retomadas, já nos anos 2000, junto com o restante do mundo. No próximo capítulo serão discutidas questões que ligam o uso desse vetor energético ao poder das nações.

³⁷ "Through achieving a carbon-free society under the strategy, Japan will present hydrogen to the rest of the world as a new energy choice and will lead global efforts for establishing a carbon-free society taking advantage of Japan's strong points". (JAPAN, 2017).

6 ENERGIA, HIDROGÊNIO E PODER

Em uma breve análise sob a ótica das expressões do poder nacional, o uso do hidrogênio se correlaciona principalmente com os seguintes pontos relevantes na:

- a) expressão política: contribuiria para que o Brasil cumpra os compromissos assumidos com órgãos internacionais como os da 21^a Conferência das Partes da Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas - COP 21/UNFCCC - adotar políticas e medidas nacionais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e minimizar mudanças do clima.
- b) econômica: como o hidrogênio pode ser produzido a partir de uma vasta gama de abundantes fontes no Brasil; seu uso permitiria aumentar nossa independência de fontes de energias e inclusive nos levar a uma condição de importante produtor de hidrogênio verde com origem em uma ampla gama de matérias primas renováveis.
- c) militar: valendo-se da alta densidade energética das células de hidrogênio, do baixo nível de ruído produzido, da baixa emissão de raios infravermelhos, da alta estabilidade e da fácil manutenção de suas partes, apresenta condições de ser a fonte de energia preferencial de uso militar para, por exemplo, alimentação elétrica, comunicações, aeronaves não tripuladas e veículos de assalto.
- d) psicossocial: é fonte de energia não poluente, podendo ser utilizada facilmente nos grandes centros urbanos com zero impacto ambiental, contribuindo, para o atendimento da demanda da sociedade pelo uso de energia limpa e redução dos problemas de saúde ligados à poluição.
- e) científica e tecnológica: como a tecnologia ainda está em desenvolvimento, possibilitaria a oportunidade do surgimento de núcleos de excelência nacionais em equipamentos de produção, assim como na fabricação de insumos, componentes e sobressalentes, o que abriria um novo mercado para produtos de alto valor agregado para nossas exportações e provocaria um transbordamento tecnológico para vários segmentos da indústria nacional.

6.1 ENERGIA E O PODER NACIONAL

Não há dúvidas que energia é um item estratégico e fundamental para a defesa e o desenvolvimento nacionais. Isso fica claro quando se observa que o verbete – energia – aparece por quinze vezes, tanto na Constituição Federal, como no Livro Branco de Defesa. Do mesmo modo, a Política e a Estratégia Nacionais de Defesa também tratam desse assunto (BRASIL, 1988, 2016a, 2016b, 2016c).

A Política Nacional de Defesa (PND), em seu item 2.3.3, ao afirmar que:

[...] o expressivo aumento das atividades humanas decorrente dos crescimentos econômico e populacional mundiais tem resultado na urbanização desordenada e na ampliação da demanda por recursos naturais. Dessa forma, não se pode negligenciar a intensificação de disputas por áreas marítimas, pelo domínio espacial e por fontes de água doce, de alimentos e de energia. Tais questões poderão levar a ingerências em assuntos internos ou a controvérsias por interesses sobre espaços sujeitos à soberania dos Estados, configurando possíveis quadros de conflito (BRASIL, 2016c, p. 9),

faz a ligação entre energia e soberania. Deste modo, planejar o uso eficiente das fontes de energia é uma imposição que os governos precisam estar atentos. Quando um país consegue disponibilizar em sua matriz de energia diversas opções de fontes energéticas, ele adquire uma maior flexibilidade para vencer crises de origens climáticas e de fatores conjunturais internos ou externos, garantindo assim à população um melhor provimento de segurança energética.

Visando a dar cumprimento ao apontado na PND, a Estratégia Nacional de Defesa (END) acata seus oito Objetivos Nacionais de Defesa (OND). No cumprimento desses OND, destaca-se, para este trabalho, a Ação Estratégica de Defesa (AED) ligada ao setor de energia, a AED-2 do OND-1: garantir a soberania, o patrimônio nacional e a integridade territorial, que diz:

Contribuir para o incremento do nível de segurança das Estruturas Estratégicas (sistema de captação, tratamento e distribuição de água, geração e distribuição de energia elétrica, sistemas de transporte, produção e distribuição de combustíveis, finanças, comunicações e cibernética [...]) (BRASIL, 2016a, p. 33).

No Livro Branco de Defesa Nacional (LBDN), a importância dada às fontes de energias alternativas fica clara no documento, ao tratar de energia já em seu

primeiro parágrafo, quando no LBDN é apresentado o Estado Brasileiro: “É grande produtor de energia renovável e não renovável, de proteína animal e vegetal.” (BRASIL, 2016b, p. 13); e em ainda mais 14 oportunidades.

Com o objetivo de:

[...] solucionar os principais desafios tecnológicos identificados, tendo como premissa elevar os índices de participação de fontes renováveis na matriz energética, manter o País como referência mundial em energias renováveis, bem como expandir a liderança alcançada na produção e uso de biocombustíveis [...] (BRASIL, 2016b),

o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, por meio Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, apresentou o – Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis: 2018-2022 –, para promover

[...] o conhecimento científico e desenvolvimento tecnológico em fontes renováveis de geração de energia elétrica, na produção e uso de biocombustíveis e no uso eficiente da energia, garantindo a segurança e o abastecimento energético, tendo em vista a importância econômica, social e ambiental para o País (BRASIL 2018b, p. 6).

Neste plano, em consonância com a Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação de 2016-2022, são apresentas estratégias associadas à energia. Entre elas destacam-se:

Apoio às ações de PD&I em fontes renováveis para geração de energia elétrica e na produção e uso de biocombustíveis, visando:

[...]

(ii) apoiar o desenvolvimento de fontes renováveis para geração de energia elétrica de forma a manter altos percentuais na matriz;

[...]

(iv) desenvolver tecnologias associadas às redes elétricas inteligentes, novas tecnologias de transmissão, distribuição e armazenamento de energia, visando ao aumento da segurança do Sistema Interligado Nacional (SIN) (BRASIL, 2018a, p. 7).

Essas ações estratégicas têm como premissa “[...] elevar os índices de participação de fontes renováveis na matriz energética, manter o País como referência mundial em energias renováveis, bem como expandir a liderança alcançada na produção e uso de biocombustíveis [...]” (BRASIL, 2018a, p. 7).

6.2 O HIDROGÊNIO E A DEFESA

Dentro de uma economia de mercado, a lógica de um produto, serviço ou tecnologia é que eles se tornam viáveis quando o preço for aceitável, ou melhor, que possam trazer lucro a seus fabricantes e fornecedores. Sendo que ser aceitável para o consumidor depende de condições nem sempre lineares ou igualmente distribuídas pela sociedade. Valores pessoais como por exemplo ponderações ambientais, *design*, origem geográfica ou social do produtor podem interferir nas escolhas. Já para aplicações militares os parâmetros de escolha são outros. Custo de produção altíssimos podem ser desconsiderados dependendo poder estratégico do bem, ou dos potenciais resultados que o produto, recurso ou tecnologia pode contribuir para que se adquira uma determinada vantagem estratégica.

Nesse sentido, aplicações militares para o hidrogênio, como já dito nos antecedentes históricos, estão ligadas ao seu uso como combustível. O exemplo apresentado foi o da importância que o hidrogênio teve para que o homem alcançasse o espaço, o que impactou até na guerra fria, pois seu uso também estava, e ainda está, ligado à fabricação dos motores de mísseis.

Com o maior desenvolvimento da tecnologia de produção de hidrogênio puro e das células a combustível, seu uso não mais se restringe à propulsão ou aos motores. Seu uso está muito mais perto, está na geração de energia consumida no dia a dia. Para um amplo uso militar do hidrogênio ainda há alguns desafios a se vencer, como tornar os tanques de armazenamento mais leves e principalmente a questão da dissipação ou redução do calor gerado quando se utiliza as células a combustível.

Por outro lado, as vantagens de seu uso militar já são muitas, sendo a principal delas a densidade energética do hidrogênio, em outras palavras, a grande quantidade de energia que pode ser obtida com um determinado volume de combustível. Como as fontes para a obtenção deste combustíveis são múltiplas, essa característica é outra grande vantagem, em especial a possibilidade de se obter o hidrogênio por meio de uma simples eletrólise de água, o que poderia ser

feito no teatro de operações³⁸, diretamente pela unidade operacional sem a necessidade de nenhum tipo de apoio logístico. Adicionalmente a produção de energia é totalmente silenciosa e não emite nenhum rejeito, sendo uma opção discreta que favorece a surpresa estratégica, muito necessária por exemplo para aeronaves não tripuladas, unidades de ataque ou para forças especiais.

A dualidade de uso é outra vantagem, pois os investimentos em pesquisa em desenvolvimento de produtos militares que usam hidrogênio podem reverter para toda sociedade. Pode também gerar *royalties* para os centros de pesquisa militares, decorrentes da tecnologia obtida, ao passo que podem gerar produtos e patentes que, em tese, poderão ser explorados ou vendidos comercialmente.

Nos Estados Unidos da América, além do fomento genérico do uso energético do hidrogênio pelo Departamento de Energia norte-americano, que junto com a iniciativa privada já aplicou no período de 2000 a 2018 perto de 1 bilhão de dólares americanos em projetos em 66 indústrias, 40 instituições acadêmicas e 10 laboratórios nacionais (UNITED STATES. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019c)³⁹, o Departamento de Defesa Norte-Americano (U.S. DoD) possui um fundo que também apoia as inovações no campo de energia, o *Operational Energy Capability Improvement Fund* (OECIF) estabelecido desde 2012 como o objetivo de apoiar as iniciativas para o domínio dessa tecnologia.

São exemplos de programas apoiados pelo fundo, o Sistema americano de células a combustível que usam o combustível JP-8⁴⁰, que recebeu 8,5 milhões de dólares americanos para o desenvolvimento de uma unidade que gerasse energia que atendesse os requisitos de emissão de ruídos, alcance e potência para veículos não tripulados do Esquadrão de Transporte Multipropósito (SMET), ou ainda o projeto *Hybrid Tiger* que recebeu 6,3 milhões de dólares americanos para uma demonstração de uso híbrido de energia, associando o uso de hidrogênio com outras fontes renováveis em aeronaves (U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE, 2019).

No primeiro exemplo, o desafio é conseguir que o conjunto reformador/célula consiga gerar energia suficiente para as grandes aeronaves não tripuladas do

³⁸ Basicamente, é a área onde o combate entre forças militares efetivamente acontece (Nota nossa).

³⁹ Apresentação do Dr. Shailesh D. Vora, gerente de tecnologia do *Fuel Cells National Energy Technology Laboratory* dos Estados Unidos realizada no Departamento de Energia Americano em Washington, dia 13 de junho de 2018, durante o encontro anual de avaliação do Programa Americano de Hidrogênio e Células de Combustível (Nota nossa).

⁴⁰ Tipo de querosene de aviação de uso militar norte-americano similar ao utilizado na aviação comercial onde são adicionados inibidores de corrosão e líquido anticongelante (Nota nossa).

esquadrão de transporte de equipamentos, de modo que elas atravessem terrenos inimigos em longas distâncias sem reabastecimento, eliminando a necessidade de outros geradores, carregadores ou baterias adicionais. Pelo planejamento este equipamento está em fase de instalação em aeronave e deve estar prontificado até 2020 (U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE, 2019).

No segundo exemplo o *Hybrid Tiger* é uma aeronave não tripulada de 23 quilos e 7,5 metros e envergadura capaz de voar por tempo superior a dois dias, usando célula a combustível combinadas com células fotovoltaicas. Este sistema híbrido solar + hidrogênio permite que a aeronave voe por muitas horas fazendo com que consiga operar discretamente sobre alvos localizados a mais de 1.600 quilômetros do local de lançamento (U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE, 2019).

Ao longo de sua existência o OECIF, em parceria com a indústria, já destinou mais de 255 milhões de dólares americanos para Ciência e Tecnologia, atingindo mais de 60 projetos visando a aumentar a capacidade de combate das forças armadas norte-americanas com o objetivo de:

[...] melhorar o uso da energia em campo, uso de consórcios inovadores para melhorar as capacidades operacionais, fortalecer o papel da energia operacional em modelagem e simulação, aumentar a amplitude e a capacidade da frota de veículos terrestres, melhorar o desempenho energético operacional de sistemas não tripulados, tecnologias de avanço térmico e de gerenciamento de energia para sistemas de pulso de alta potência, e avaliar a transmissão fio de energia em longas distâncias. Nosso orçamento de 2018 busca cobrir as necessidades de ciência e tecnologia na área de energia operacional para atender os requisitos operacionais a curto, médio e longo prazos (U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE, 2019, tradução nossa).⁴¹

Falando agora de outro grande player militar, em 2018, durante o Seminário de tecnologias estratégicas em baterias e economia do hidrogênio promovido pelo Parque Tecnológico Itaipu (PTI)⁴², a empresa chinesa NESKON (ZHEJIANG NEKSON POWER TECHNOLOGY CO., LTD), subsidiária do Grupo ZHONGSHAN QUÍMICA, maior fabricante de herbicidas de triazinas⁴³ da China, fez uma apresentação sobre suas atividades e produtos. A NEKSON, que tem foco no uso de

⁴¹ “[...] to improve the use of energy in base camps, use innovative consortia to enhance warfighting capabilities, strengthen the role of operational energy in Department modeling and simulation, increase the range and capability of the legacy tactical ground vehicle fleet, transform the operational energy performance of unmanned systems” (U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE, 2019).

⁴² Seminário realizado em Foz de Iguaçu nos dias 17 e 18 de maio de 2018

⁴³ A triazina é comumente usada como biocida. Refere-se a um grupo de compostos orgânicos tendo a fórmula molecular C₃H₃N₃ (Nota nossa).

hidrogênio como energia, fez investimentos superiores a 50 milhões de dólares americanos nesta área, resultando em patentes e em produtos de uso civil e militar. Seus produtos vão de equipamentos portáteis a veículos de médio porte, passando por subsistemas para aeronaves não tripuladas. Para uso individual, ou de um militar isoladamente, ela apresentou células a combustíveis portáteis com capacidade de fornecimento de energia de uso para computadores como pode ser observado na figura 5.

Figura 5 - Células a combustíveis portáteis da NESKON



Fonte: NESKON

Como solução para o suprimento de hidrogênio de pequeno porte, a NESKON possui um gerador de hidrogênio portátil para uso operacional, uma espécie de cantil (figura 6) onde o militar insere qualquer tipo líquido que contenha água, inclusive sua própria urina, que em contato com um reagente libera hidrogênio que pode ser utilizado diretamente nas células a combustível de uso militar por ela desenvolvida.

FIGURA 6 - Gerador de hidrogênio portátil da NESKON



Fonte: NESKON

Também foram desenvolvidas pela empresa células para equipamentos mais sofisticados como aeronaves remotamente tripuladas (ARP) e robôs de uso militar (figura 7) e para veículos médios (figura 8).

FIGURA 7 – Equipamentos militares supridos por células a combustível



Fonte: NESKON

FIGURA 8 – Equipamentos a hidrogênio instalados em veículos médios



Fonte: NESKON

A novidade do uso militar do hidrogênio não é seu uso energético, mas sim a miniaturização das unidades, pois em virtude de sua flexibilidade, afastando-se os custos de produção, dependendo da tecnologia utilizada, já havia histórico de seu uso na propulsão de diferentes tipos de veículo de uso militar, aí incluídos carros, mísseis, foguetes, aeronaves, embarcações e em submarinos, como por exemplo, os *Type 212* Alemães e os classe *Todaro* Italianos.

A principal vantagem de submarinos com células a combustível sobre os demais submarinos convencionais é a maior capacidade de se manter submerso, apresentando autonomia mais próxima dos submarinos nucleares. Outra vantagem adicional é a nula emissão de ruídos proveniente da célula a combustível quando em funcionamento, importante vantagem estratégica para os submarinos, pois torna muito mais difícil sua detecção.

Neste capítulo foram tratadas questões de defesa e poder. Foram apresentadas as vantagens do uso militar do hidrogênio como o baixo nível de emissão de ruído e de raios infravermelhos, a flexibilidade para uso em diversos tipos de equipamentos e a redução de necessidades logísticas de unidades em campo. Adicionalmente foram exemplificados produtos já em uso e políticas de desenvolvimento de novos produtos. A seguir será discutida a viabilidade do uso energético do hidrogênio no Brasil.

7 ANÁLISE SOBRE A POSSIBILIDADE DE APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO ENERGÉTICO NO BRASIL

Geração de energia e meio ambiente estão ligados umbilicalmente. Nos dias atuais, deixar de mensurar essa relação é ser negligente com as demandas da sociedade. Razão pela qual a geração de energia limpa, ou a mais limpa possível, entrou nas agendas de todos os governos, revelando-se um campo promissor e aberto para as fontes alternativas.

O consumo de energia per capita no mundo varia muito de região para região, com evidente inferioridade para os países africanos e asiáticos. Considerando que o mundo caminhará para um desenvolvimento global das sociedades, ao melhorarem as condições socioeconômicas dessas duas regiões, haverá uma grande demanda energética, pressionado ainda mais o meio ambiente.

Os acordos que as nações têm costurado dentro das conferências do clima indicam metas cada vez mais rigorosas de redução de emissões de gases nocivos ao meio ambiente, tornando a necessidade de conjugação de crescimento da oferta de energia e da segurança energética com metas de descarbonização um grande desafio. Encontrar soluções que se apliquem ao mesmo tempo aos setores industrial, transporte e elétrico também é desafiante.

Dentre as fontes alternativas, o hidrogênio apresenta características ímpares que o qualificam para atender os desafios energético-ambientais previstos nas políticas públicas espalhadas pelo mundo, em virtude de poder ser obtido de fontes renováveis e inesgotáveis, do resíduo de sua utilização em geral ser apenas a água e sua versatilidade permitir seu uso tanto na geração de energia centralizada, como na distribuída.⁴⁴

Para atender aos compromissos de descarbonização demandados pela sociedade, a melhor situação é buscar a produção do hidrogênio verde, o que representa valer-se ao mesmo tempo de uma fonte renovável para suprimento do hidrogênio e usar energias alternativas como a eólica ou a solar para a obtenção do hidrogênio puro.

⁴⁴ Geração Centralizada é aquela feita em grandes unidades geralmente longe do consumidor e que demandam uma rede de distribuição ou transmissão. O oposto da distribuída.

O contínuo avanço da tecnologia esperado para os próximos anos, tanto nos processos produtivos do hidrogênio puro, como nas células a combustível, e a redução dos preços em virtude do aumento de escala de produção proporcionada pelas políticas públicas já em vigor, em especial na Europa e Japão, permitem dizer que o caminho para a Economia do Hidrogênio foi preparado.

Para a consolidação do uso do hidrogênio como vetor de energia, é imprescindível a inclusão de seu uso no setor de transportes. Isso só é possível com o apoio de políticas públicas de incentivo. Dos segmentos ligados ao transporte, a infraestrutura é o que mais depende da atuação estatal, como o incentivo à construção de uma rede de reabastecimentos e a regulamentação das relações entre os atores, do transporte, do armazenamento, das concessões e das autorizações em todos os níveis governamentais. O uso de redes de gasodutos e os transportes públicos são outros exemplos onde as políticas governamentais têm grande impacto.

Para o desenvolvimento dessas atividades é fundamental o financiamento público em pesquisa e desenvolvimento. Também são importantes os subsídios para a venda de combustível, a oferta de juros diferenciados para aquisição de veículos, o fornecimento de garantias e financiamentos para o setor privado.

Já para a produção do hidrogênio, pensar em atender a nova demanda com a introdução de veículos a hidrogênio no mercado com o fornecimento de hidrogênio verde é utopia, é negar a realidade, pois uma transição é mais do que importante, é imprescindível, já que a escala de produção, com a consequente redução de custos, é que vai viabilizar o uso de hidrogênio limpo.

É exatamente aí o grande papel do gás natural. Nos dias atuais, a quase totalidade do hidrogênio obtido vem desse gás⁴⁵. Para a transição para outra fonte, é importante ter em mente que o uso do hidrogênio obtido nos atuais processos de fabricação teria uma fração do impacto que a simples queima energética de combustíveis fósseis produzem. Com o avançar da tecnologia, o uso dos biocombustíveis se apresentarão para outro passo na transição, um passo azul. O uso de biocombustíveis como o etanol ou biodiesel em carros pode ser

⁴⁵ Segundo a Agência Internacional de Energia, a produção de hidrogênio mundial anual de 70 milhões de toneladas, consome 275 Mtep [mega toneladas equivalente de petróleo] o que equivale a 2% de toda a energia demandada no mundo, sendo que para esta produção é consumido 6% da totalidade do gás natural extraído, gerando 830 milhões toneladas de dióxido de carbono anuais (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019e).

potencializado em 100, 200% ou até mais, caso seu uso energético mude de destinação, de um motor à combustão convencional, para uma unidade de reforma que resulte no hidrogênio a ser utilizado em uma célula a combustível, que por sua vez alimente um motor elétrico. Quando toda a tecnologia envolvida estiver madura e quando o mercado estiver se consolidando, aí sim chegará a vez da eletrólise e do hidrogênio verde.

Para viabilizar o hidrogênio, Europa, Japão e Estados Unidos estão fazendo sua parte. Trabalham na infraestrutura da economia do hidrogênio, montando o tabuleiro onde esse jogo será realizado. Agora, chamadas pela sociedade, grandes empresas também entraram na jornada em prol da preservação ambiental. Novas tecnologias de purificação de hidrogênio, novos tipos de células, componentes, membranas e catalisadores contribuem para que o custo do hidrogênio caia. As empresas do setor automotivo já perceberam esses movimentos e recentemente promoveram lançamentos de veículos movidos a hidrogênio na Ásia, na Europa e na América do Norte. Os governos centrais estão receptivos às novas fontes de energia. O consumidor está consciente da necessidade de uma transição energética. Tudo isso junto leva a crer que o momento atual é favorável para o hidrogênio estabelecer-se como fonte de energia.

Mesmo nesses países citados, são barreiras ao desenvolvimento do hidrogênio: o custo de produção do combustível, inviável para quase todas as operações puramente comerciais; a existência de poucas cidades atendidas por rede de abastecimento de hidrogênio; a falta de, ou a existência de regulamentações distintas de país para país; a dificuldade para avanços tecnológicos nos segmentos de transporte e armazenamento do gás em virtude do custo e da durabilidade das células a combustível; e o desconhecimento e a desinformação da sociedade sobre esse assunto.

No Brasil, o cenário energético é ímpar. Nossa matriz energética já é dotada de fontes renováveis em quantidade. O país é privilegiado geográfico e “hidrológicamente”; possui exposição solar em quantidade e por longos períodos; e possui ventos permanentes e intensos em diferentes regiões, abrindo um leque de possibilidades energéticas. Adicionalmente, os governos militares, como reação às crises do petróleo, apoiaram e fomentaram pesquisa e desenvolvimento de combustíveis alternativos, resultando em um programa de uso de biomassa sem paralelo no mundo, o programa nacional de carro a álcool. Mais tarde o país inovou

novamente ao adotar a tecnologia *flex*, o que permitiu a adaptação da frota nacional ao uso de biocombustível em qualquer quantidade.

Essa gama de possibilidades energéticas é positiva para o país, mas por outro lado, para o hidrogênio se apresenta como um fator adverso. Se o Japão não tem combustíveis; se na China a poluição ambiental tem patamares alarmantes; se na Europa em muitas cidades a população não aceita mais o uso de fontes fósseis; se os Estados Unidos sofrem pressão do resto do mundo para mudar sua abordagem energética; nada disso no Brasil é significativo a ponto de provocar uma ruptura. Se para eles a necessidade de investir em hidrogênio é clara, por que seria importante investir no hidrogênio como energia no Brasil?

A resposta para essa questão não é simples. Em um país onde a questão energético-ambiental já tem vários caminhos viáveis, que possui problemas orçamentários, restrições financeiras adicionais advindas de um período recessivo e moderada pressão ambiental, a lógica é não priorizar novos caminhos energéticos e atender às demandas imediatas da sociedade em outras áreas.

Sem contar os desconhecidos números chineses, o mundo já investiu somente em pesquisa e desenvolvimento na área de hidrogênio perto de 10 bilhões de dólares americanos em tecnologia, pesquisa e desenvolvimento nos últimos 15 anos. Atualmente Europa, Japão e Estados Unidos têm investido separadamente uma faixa de 400 a 600 milhões de reais todos os anos em pesquisas do hidrogênio (IAE, 2019c), ou seja, é impossível, na condição atual do país, acompanhar este volume de investimento.

Se por um lado é clara a dificuldade de obter recursos para trilhar na direção da economia do hidrogênio, abandonar esse caminho é um erro. Dos segmentos apresentados, o Brasil tem recursos humanos e laboratórios capazes de dominar nichos estratégicos e, desse modo, poder participar da produção de componentes e insumos para os equipamentos de geração de hidrogênio puro ou de geração de energia, sejam eles células a combustível, processos químicos ou biológicos. Já para a produção do hidrogênio puro nenhum país tem mais potencial que o Brasil. Para cada cenário, cinza, azul ou verde, o Brasil apresenta pontos fortes e oportunidades.

Para o hidrogênio cinza, como vimos em capítulos anteriores, a chave é o gás natural. O Brasil tem grandes reservas provadas de gás que são pouco exploradas, pois nunca foram uma prioridade para a Petrobras, mas que agora recebem uma

atenção especial da companhia e do governo. Desse modo, com investimentos que podem ser majoritariamente privados, no médio e no longo prazo produzir hidrogênio cinza em grandes quantidades não é um desafio.

Já para a produção do hidrogênio azul, duas linhas se apresentam. A primeira é no processo de captura de carbono. Essa linha é incerta, pois exige grande investimento e capacidade de armazenamento ou uso do gás carbônico emitido, contudo, caso seja viável produzir perto do local onde se extraia petróleo ou em áreas com aquíferos esses problemas podem ser solucionados. A segunda linha para a produção do hidrogênio azul é a utilização de matérias primas renováveis, biomassa ou biogás por exemplo, valendo-se de fontes energéticas que não emitem gases de efeito estufa. Para esta linha, o Brasil tem grande potencial, pois possui amplos recursos de biomassa, assim como opções de geração de energia limpa.

Para o hidrogênio verde, o Brasil também possui grandes vantagens e pontos fortes, só que para aproveitá-los é necessário dispor de energia barata e em abundância, o que para o curto e médio prazo é uma missão que se mostra inalcançável, pois seriam necessários investimentos em geração de energia solar e eólica em patamares muito altos que, mesmo que sejam conseguidos, gerariam um produto com custo comercialmente impeditivo. Essa questão energética só se conseguiria reverter no longo prazo, mas por outro lado, como essa energia sobressalente também é importante para os processos industriais tradicionais e para agregar valor ao que se exporta como *commodities*, essa energia dificilmente poderia ser canalizada para eletrólise em um volume que justifique o retorno financeiro.

Como último elemento desta análise, falta falar da logística. O mercado nacional de hidrogênio energético fora do escopo industrial não é grande, e nem no longo prazo são esperadas alterações. No setor de transporte, o Brasil não chegará ao hidrogênio sem passar pelo natural e demorado caminho do veículo híbrido e depois do veículo elétrico. Em outras palavras, para se tornar importante *player* do hidrogênio, o Brasil precisará participar do atendimento de uma demanda internacional, entretanto será preciso vencer um ponto fraco do Brasil: estar muito longe dos grandes potenciais consumidores: o Japão, a China, a Europa e a costa leste dos Estados Unidos. Como a demanda não contemplará o hidrogênio cinza, exatamente pela sua menor vantagem ambiental, para que o Brasil consiga ser importante ator, dependerá de que os preços do hidrogênio fiquem altos, o que é a

contramão de todas as previsões, e que os custos de transporte sejam muito baixos, o que também não está em um cenário positivo.

Nesta seção foi feita uma análise da possibilidade do uso energético do hidrogênio e em especial a possibilidade de sua inclusão na matriz energética nacional. Foi mostrado que o hidrogênio tem condições de atender à crescente demanda mundial de energia de um modo sustentável, mas que para isso é importante valer-se de políticas de incentivo do uso do hidrogênio no setor de transportes envolvendo governo, sociedade e empresas públicas e privadas de modo que se consiga uma escala de produção que o viabilize. Trazendo a análise para o Brasil, foi apresentada a vocação natural brasileira para a produção do hidrogênio e que apesar dos custos envolvendo pesquisa, desenvolvimento e da construção de uma infraestrutura dedicada a esta fonte de energia serem altos para serem suportados pelo governo, buscar o desenvolvimento da tecnologia para participar do mercado externo de componentes e suprimentos é o caminho que pode levar a um arrasto tecnológico para outros setores da economia brasileira e, principalmente, uma redução de custos que facilitaria a implementação do uso do hidrogênio energético no Brasil. A próxima seção apresenta caminhos para vencer os óbices apresentados nesta seção de modo que sejam aproveitadas as oportunidades que esse setor oferece, criando-se, deste modo, as condições necessárias para a inclusão do hidrogênio na matriz energética nacional.

8 ATORES, SOLUÇÕES E OPORTUNIDADES PARA O USO DO HIDROGÊNIO COMO VETOR DE ENERGIA NO BRASIL

O relatório da IEA, *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*, no trecho que apresenta os resultados e as políticas públicas de incentivo ao uso do hidrogênio pelo mundo, ao falar do Brasil, cita como exemplo do avanço do uso do hidrogênio no país, a inclusão do hidrogênio no Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis, uma ação do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019, p.21-22). Observando as experiências brasileiras do passado citadas no capítulo 5 deste trabalho, pode-se verificar que as ações apresentadas também são eminentemente iniciativas do MCTIC.

Analisando e pesquisando as políticas de sucesso no mundo, verificou-se que a liderança das ações de inclusão do hidrogênio como energia estão no âmbito de atuação de ministérios, secretarias ou departamentos que no Brasil corresponderiam a órgãos das estruturas dos Ministérios da Economia ou de Minas e Energia.

Para que o hidrogênio seja significativo como fonte de energia para a matriz energética nacional ainda será preciso percorrer uma longa jornada. Olhando os caminhos trilhados por outros países chega-se à conclusão de que essa marcha não pode ser conduzida pelo MCTIC. Os ministérios da Economia, Infraestrutura, Transportes, Defesa, Meio Ambiente e Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações tem óbvias ligações com o assunto e precisam trabalhar em conjunto, contudo a pasta de Minas e Energia deve ser a natural líder das iniciativas e da gerência estratégica das ações.

Nesse sentido cabe considerar a necessidade de compor um grupo técnico, sob coordenação do MME e composto pelos ministérios da Economia, Infraestrutura, Transportes, Defesa, Meio Ambiente e Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, representantes do meio acadêmico e instituições afins, para proporem iniciativas que viabilizem a efetiva expansão do uso energético do hidrogênio, cujas as conclusões seriam submetidas à deliberação do Conselho Nacional de Política Energética.

Conforme apresentado na seção 5.3 - Políticas públicas do hidrogênio no Brasil, já houve um ciclo de investimentos para a introdução do hidrogênio com fins energéticos no país nos anos 2000. Observando os resultados alcançados no Brasil

desde aquela época e as políticas públicas atualmente sendo implementadas em outros países, pode-se afirmar que esta centralização proposta é importante para que, além da indicação do norte a ser seguido, haja a coordenação da contribuição de cada instituição nos esforços, tanto na distribuição dos orçamentos, como no controle das ações planejadas.

Neste sentido, o Brasil absolutamente não pode prescindir de uma política pública para a inclusão de novas tecnologias no campo da energia, e em especial, devido ao seu poder disruptivo, um plano específico para o hidrogênio.

Conforme demonstrado no capítulo 5 deste trabalho, há ações para o fomento do uso energético do hidrogênio e a sua inclusão nas matrizes energéticas em diferentes países em plena implementação. O Brasil tem uma oportunidade de dar um passo nessa mesma direção por meio da inserção do tema na revisão do Plano Nacional de Energia. Mesmo para as próximas revisões do Plano Decenal de Energia, em um contexto de visão de futuro para os recursos energéticos, a inclusão do hidrogênio já é possível, em especial no que tange à geração distribuída e ao setor de transportes.

O Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNCD e, em consonância com a Lei no 9.991/2000, os recursos destinados à execução de projetos de P&D regulados pela ANEEL têm sido as principais fontes de financiamento de projetos de hidrogênio no Brasil. A Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética (SPE), responsável por regulamentar os investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento, deu uma importante contribuição ao lançar em julho de 2016 o “projeto estratégico: Arranjos técnicos e comerciais para a inserção de sistemas de armazenamento de energia no setor elétrico brasileiro, conhecido como “*chamada Nº 21*””, que contempla a possibilidade de desenvolvimento de importantes tecnologias para o hidrogênio (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016).

Dentre as instituições ligadas diretamente ou indiretamente ao governo que já trabalham em prol do desenvolvimento do hidrogênio pode-se citar:

a) o Laboratório de Células a Combustível do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (LabCelComb), é um bom exemplo de órgão que pode contribuir para o desenvolvimento de importantes tecnologias do hidrogênio.

[...] localizado na Unidade Fundão⁴⁶, está capacitado para desenvolver, caracterizar, analisar e avaliar sistemas de células a combustível e seus principais componentes, contribuindo para o setor elétrico em atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e assessoria tecnológica. (ELETROBRAS, 2019)

Ao pesquisar sistemas híbridos de armazenamento energético e geração distribuída, seus projetos têm potencial para contribuir significativamente na produção de soluções nacionais para acumulação energética das fontes intermitentes de energia e para a mobilidade, importantes sobretudo para a capacitação de pessoal técnico necessário para os próximos passos na introdução da tecnologia no setor elétrico nacional.

b) Em Foz do Iguaçu, a Itaipu Binacional implementou o Parque Tecnológico de Itaipu (PTI) com a finalidade de "Promover o desenvolvimento territorial sustentável por meio da educação, ciência, tecnologia, inovação, cultura e empreendedorismo" (PARQUE TECNOLÓGICO DE ITAIPU, 2019b). Um dos campos de conhecimento em que o PTI atua é o hidrogênio. Em suas instalações foi construído com o apoio da Eletrobrás o Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio (NUPHI). Gerido pelo Professor Doutor Ricardo José Ferracin, o Núcleo tem como primeiro propósito: "Proporcionar, no campo tecnológico, a pesquisa, desenvolvimento e inovação em equipamentos, métodos e processos, contribuindo com as parcerias nacionais e internacionais para o desenvolvimento da economia do Hidrogênio" (PARQUE TECNOLÓGICO DE ITAIPU, 2019a). Neste sentido,

[...] foi implementada uma Planta Experimental de Produção de Hidrogênio, que possibilita a análise de todo o ciclo de obtenção e aplicação desse gás, envolvendo a produção, purificação, compressão, armazenamento e posterior utilização em células a combustível ou combustão em mistura com outros combustíveis, como, por exemplo, o biometano. (PARQUE TECNOLÓGICO DE ITAIPU, 2019a)

Um segundo propósito para o domínio da tecnologia do hidrogênio é o domínio da construção de eletrolisadores alcalinos, muito importante para produção do hidrogênio que o mercado demanda para minimizar o impacto da geração de energia no meio ambiente.

c) A Universidade Federal do Rio de Janeiro possui um dos mais importantes polos de tecnologias do Brasil, o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e

⁴⁶ Ilha do Fundão, Rio de Janeiro. O Laboratório encontra-se na área da Cidade Universitária – UFRJ.

Pesquisa de Engenharia (COPPE), com mais de uma centena de laboratórios altamente especializados. A COPPE pode contribuir significante para o desenvolvimento das tecnologias necessárias a alcançar o hidrogênio a novos patamares de utilização para fins energéticos.

Dentro da estrutura da UFRJ, fundado e coordenado há mais de 35 anos pelo Doutor Paulo Emílio de Miranda⁴⁷, professor do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE, está o Laboratório de Hidrogênio (LABH2),

Desenvolve pesquisas fundamentais e aplicadas com o objetivo de criar novos materiais, processos e dispositivos necessários para o uso energético do hidrogênio. O laboratório trabalha com temas específicos, com base na capacitação da equipe e no interesse estratégico para o país. Esses temas abordam, para o hidrogênio: a produção ambientalmente amigável; o armazenamento seguro e eficiente; a detecção como elemento químico no interior de materiais e como gás no meio ambiente; a influência nas propriedades físico-químicas e mecânicas, quando contido na composição química de materiais; o uso, assim como de outros combustíveis que o contêm em grandes quantidades, para a geração de energia elétrica, calor e produtos químicos em pilhas a combustível; e a utilização em veículo urbano de grande porte, como o ônibus híbrido a hidrogênio atualmente em desenvolvimento no LABH2. (COPPE, 2019)

Com mais de uma dezena de patentes ligadas ao hidrogênio, o LABH2 dedica-se principalmente ao uso energético do hidrogênio. “Os desenvolvimentos atuais compreendem pilhas a combustível de óxido sólido e veículos pesados com tração elétrica e geração embarcada de eletricidade utilizando pilha a combustível” (COPPE, 2019). Além da tração do ônibus híbrido elétrico-hidrogênio, objeto de demonstração tecnológica, dos ônibus híbrido elétrico-etanol e do ônibus com tração 100% elétrica,

[...] o sucesso das tecnologias desenvolvidas pelo LabH2 – COPPE/UFRJ no campo de mobilidade elétrica deu origem a uma nova abordagem: o desenvolvimento de embarcações híbridas. Atualmente, estão em produção uma balsa híbrida elétrica-etanol com capacidade para 15 veículos e 100 passageiros, e um catamarã híbrido elétrico-hidrogênio-etanol com capacidade para transporte de até 100 passageiros. (COPPE, 2019)

d) A Universidade Estadual de Campinas possui diversos laboratórios que trabalham com pesquisas ligadas à tecnologia do hidrogênio. Um deles é o Laboratório de Hidrogênio – LH2, coordenado pelo Professor Doutor Ennio Peres da Silva, um dos principais nomes do hidrogênio há 40 anos. Outro importante

⁴⁷ O Professor Doutor Paulo Emílio, um dos maiores entusiastas nacionais da tecnologia do hidrogênio em setembro de 2019, data deste trabalho monográfico, era o presidente da Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2).

laboratório é o de Genômica e BioEnergia, com importantes conquistas nas pesquisas de células a combustível de óxido sólido. Podem aderir nos avanços da tecnologia outros setores da universidade como os Institutos de Física "Gleb Wataghin" e de Química.

e) Podem contribuir ainda outras instituições como o Centro de Células a Combustíveis e Hidrogênio do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), com seus laboratórios de células a combustível de óxidos sólidos, de célula a combustível, de membrana polimérica, e de catálise e hidrogênio; o Instituto de Química de São Carlos com as pesquisas do grupo de eletroquímica, ou ainda o Laboratório de Engenharia Térmica - LET do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP com o trabalho do Professor Doutor Gerhard Ett com fontes de hidrogênio, processos de produção e logística do hidrogênio, todos os três ligados à Universidade de São Paulo. Na lista encontram-se também o Instituto Nacional de Tecnologia (INT) com pesquisas de análise, catálise e processos químicos; a Faculdade de Engenharia Industrial, com pesquisas realizadas nos laboratórios dos cursos de engenharia e de química; ou ainda a nas Universidades Federais do Rio Grande do Sul e do Amazonas.

Se o uso energético do hidrogênio nos campos da geração elétrica e dos transportes é uma atividade em desenvolvimento, seu uso nos ramos de petroquímica e fertilizantes é mundialmente consolidado há décadas. Em um mercado de 70 milhões de toneladas de hidrogênio produzidas anualmente (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019e), o Brasil não estaria sem capacitação técnica nesse assunto. Várias empresas nacionais estão envolvidas no desenvolvimento de produtos e na entrega de serviços e que detêm significativo conhecimento técnico nessa área.

O esforço em obtenção de tecnologias do hidrogênio para fins energéticos deve incluir empresas privadas. A Eletrocell, como apresentado no capítulo 5, foi uma pioneira no sistema à base de células a combustível, capaz de operar com hidrogênio produzido pela reforma de gás natural, atuando entre outras áreas do setor elétrico, como fornecedora de células a combustível e na geração de energia limpa, é apenas um exemplo. Empresas de energia nacionais ou multinacionais como a PETROBRAS, a BP e a EXXON são exemplos que poderiam, em solo nacional, participar do mercado de hidrogênio mundial, valendo-se de nossas potencialidades.

A existência de empresas nacionais, de universidades capacitadas e da atuação estatal direcionada por uma política pública de incentivo de uso do hidrogênio energético fariam com que o modelo de tripla hélice pudesse ser usado como estratégia nacional para o desenvolvimento do hidrogênio energético no Brasil. Neste contexto, também podem contribuir os institutos militares, em consonância com o estabelecido na Estratégia Nacional de Defesa.

Na seção 6.1 deste trabalho, foram estudadas as possibilidades do uso energético do H^2 para a Defesa e pôde-se confirmar que a tecnologia do hidrogênio em si é de uso dual. A tecnologia, ou o princípio de funcionamento da célula a combustível de um Honda Clarity ou de um Submarino *Type 212* alemão é praticamente a mesma. Ao incentivar projetos das Forças Armadas na área de hidrogênio, ao mesmo tempo em que os institutos de pesquisa militares buscassem soluções para suas forças, levariam capacitação científica e tecnológica à sociedade, como aconteceu no caso do projeto do avião AMX da Força Aérea Brasileira, que proporcionou a capacitação tecnológica e de recursos humanos para que a Embraer viesse a dominar mundialmente o mercado da aviação regional. Os polos tecnológicos da Marinha no Rio de Janeiro e em São Paulo; o Instituto Militar de Engenharia e o Centro Tecnológico do Exército no Rio de Janeiro; e o Instituto Tecnológico da Aeronáutica e o Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial em São José dos Campos, recebendo recursos financeiros específicos do MME, MCTI, FINEP e da ANEEL, poderiam ter participação significativa na busca da tecnologia do hidrogênio.

Trazendo para o presente, possuir, por exemplo, uma aeronave remotamente pilotada (ARP) que possa voar silenciosamente e furtivamente sobre um determinado terreno produz uma vantagem muito útil para as Forças Armadas. A tecnologia para a construção de aeronaves é uma expertise que o Brasil já possui. Visando a incluir órgãos militares no desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio, inicialmente a Força Aérea poderia trabalhar no projeto de uma célula a combustível de pequeno porte para fornecimento de energia para uma ARP, o que poderia ser útil para as três forças. Este equipamento, em versões civis, poderia atender a órgãos de segurança e de fiscalização nos três níveis da administração pública.

Para a produção de células a combustível são fundamentais o conhecimento das tecnologias ligadas à produção de membranas poliméricas, catalizadores, anodos, catodos, eletrólitos e placa bipolares entre outros. Para o desenvolvimento

dessas tecnologias é importante dominar o desenvolvimento de materiais especiais, uma expertise em uma área na qual o Exército já trabalha. Um projeto do Exército brasileiro em conjunto com o CEPEL e a COPPE, por exemplo, poderia trazer benefícios para o país com potencial de transbordamento em diferentes áreas de aplicação que poderiam favorecer nossa balança comercial com produtos de alto valor agregado.

Para a produção de hidrogênio puro, o CTMSP poderia trabalhar em conjunto com a Unicamp, o IPT, a FEI em São Paulo e com o PTI no Paraná para a capacitação na produção de hidrogênio em grandes volumes, conforme as previsões da Agência Internacional de Energia, uma condição importante para o futuro dos transportes, inclusive para a propulsão de navios já para a segunda metade deste século.

A união dos esforços das três forças, das universidades e de empresas pode representar um caminho para que Brasil se qualifique para ser importante *player* na Economia do Hidrogênio.

Um terceiro ponto necessário a trazer para essa discussão é a questão do hidrogênio natural. Como sabido, apesar do hidrogênio ser abundante, seu uso energético depende de que este elemento seja encontrado em sua forma pura, o que raramente acontece na natureza. Uma das ocorrências conhecidas de uma fonte de hidrogênio natural encontra-se em Bourabougou, no Mali (PRINZHOFER, TAHARA CISSÉ e DIALLO, 2018). Foram exitosos os testes para geração de energia com o gás retirado dessa fonte natural:

Em julho de 2015, três anos após seu primeiro teste bem-sucedido, a Petroma Company demonstrou como o gás hidrogênio pode ser usado para gerar energia, iluminando parte da aldeia de Bourakebougou, cidade próxima da capital Bamako, no Mali, o oitavo maior país África. Isso criou quase 100% de eletricidade limpa em uma área rural pobre que não tinha acesso à eletricidade, algo que dificilmente parecia plausível há apenas uma década (AFOLAYAN, 2016, tradução nossa)⁴⁸.

Este tipo de empreendimento chama atenção para a possibilidade de uso do hidrogênio natural também no Brasil. Em consulta ao geólogo Cassio Roberto da

⁴⁸ In July 2015, three years after their first successful test, the Petroma Company demonstrated how hydrogen gas can be used to generate power, by lighting up part of the village of Bourakebougou not far from the capital Bamako in Mali, the eighth largest country in Africa. This has created almost 100% clean electricity in a poor rural area that did not have any access to electricity, something that would have hardly seemed plausible only a decade ago.

Silva⁴⁹, conselheiro do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), foi obtida a informação de que oficialmente não há registro de fontes de hidrogênio identificadas no Brasil. Entretanto em virtude de similaridades geológicas entre África e Brasil é possível a existência de evento semelhante no Brasil.

Por último, como mencionado no capítulo 4, os parques de energia solar e em especial os de energia eólica podem ser importantes *players* na produção de H₂. Quando estiverem gerando energia que não possa ser fornecida aos sistemas de distribuição, os empreendimentos geradores poderiam canalizar o excedente energético para obtenção de hidrogênio para uso posterior (processo conhecido *power-to-gas*⁵⁰). A utilização dessas possibilidades caracterizariam os parques de geração como parques híbridos solar-hidrogênio ou eólico-hidrogênio.

Especificamente sobre energia eólica, segundo a Agência Internacional de Energia a tecnologia *offshore* para geração de energia está consolidada, com crescimento de 52% registrado no período de dois anos - 2017 e 2018 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019g). Uma das dificuldades de se levar energia dos geradores eólicos *offshore* aos consumidores é a transmissão da energia gerada até o sistema de distribuição em terra. Neste caso, a tecnologia *power-to-gas* (P2G) é uma oportunidade: “transformar” a energia dos ventos em hidrogênio. Nessa opção, o gás é o vetor energético, só que não mais valendo-se de uma sobra energética para sua obtenção, mas sim como objetivo da existência do empreendimento. Seria, por exemplo, o caso em que uma determinada localidade com grande potencial eólico *offshore* encontre-se a uma longa distância da costa, onde a transmissão da energia gerada para o sistema de distribuição seja inviável, assim sua utilização para a produção do hidrogênio pode ser a solução. Para essa “transformação”, a de energia produzida pelas turbinas geradoras alimentaria eletrolizadores para a produção de H₂. Após o transporte até os usuários, o gás obtido poderia alimentar células a combustível conectadas a sistemas de geração distribuída de energia elétrica, ou ainda essa opção seria também muito útil, entre outras oportunidades, para o uso direto em unidades petroquímicas, os atuais maiores consumidores de hidrogênio puro.

⁴⁹ Consulta verbal realizada em 18 de setembro de 2019 durante atividade do Curso de Altos Estudos de Política e Estratégia de 2019 da Escola Superior de Guerra.

⁵⁰ *Power-to-gas* é conhecida como tecnologia P2G. Quanto o H₂ é obtido por eletrólise valendo-se de eletricidade de fontes alternativas de energia. O gás com essa procedência é chamado de *windgas*.

Neste capítulo foi apresentada a infraestrutura já obtida como legado dos esforços nacionais do passado para a pesquisa do uso energético do hidrogênio. Foram identificados atores, soluções e oportunidades para seu uso como vetor de energia no Brasil. Para a viabilização desse objetivo, foi apontado que a solução passa pelo modelo de tríplice hélice, sendo necessário incentivar a participação de empresas e que, no mesmo sentido, o Ministério da Defesa, por meio de seus institutos militares e centros de pesquisa, pode contribuir em um esforço conjunto com universidades e empresas. O próximo capítulo apresenta dez propostas fruto da convergência de todas as informações tratadas nesta monografia.

9 PROPOSTAS

Considerando a análise realizada no capítulo 7, e as soluções, oportunidades e atores apresentados no capítulo anterior para viabilizar a inclusão do hidrogênio na matriz energética nacional sugere-se que sejam adotadas as seguintes linhas de ação:

- a) Criar um grupo técnico coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e composto por representantes dos ministérios da Economia, Infraestrutura, Transportes, Defesa, Meio Ambiente e Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, Educação, representantes do meio acadêmico e instituições afins, para a proposição de um Plano Nacional de Hidrogênio que inclua um mapa estratégico para o desenvolvimento e implementação do uso energético do hidrogênio no Brasil.

Agentes responsáveis: MME / CNPE

- b) Incluir o tema hidrogênio na revisão do Plano Nacional de Energia e no Plano Decenal de Energia.

Agentes responsáveis: MME / EPE

- c) Lançar edital para um projeto de arranjos técnicos e comerciais visando à inserção do hidrogênio na matriz energética nacional.

Agente responsável: ANEEL

- d) Fomentar as atividades de pesquisa científica, tecnológica e de inovação dos laboratórios de hidrogênio e linhas de pesquisa ligadas à produção de tecnologias e equipamentos destinados à produção de hidrogênio puro e de células a combustível em instituições de ensino superior.

Agentes responsáveis: MEC/CAPES e MCTIC/FINEP

- e) Aumentar o número de bolsas de Mestrado e Doutorado em linhas de pesquisa ligadas às tecnologias necessárias ao desenvolvimento do uso energético do hidrogênio.

Agentes responsáveis: MCTIC/ CNPq

- f) Avaliar a participação dos órgãos de Ciência e Tecnologia das Forças Armadas no desenvolvimento de tecnologias atinentes ao uso do hidrogênio como fonte de energia.

Agente responsável: Ministério da Defesa

- g) Realizar pesquisas para identificação de fonte hidrogênio natural no Brasil.

Agente responsável: MME / CPRM

- h) Incluir nos leilões de energia a oferta de um empreendimento piloto de geração híbrida que contemple o uso do hidrogênio para a acumulação de energia.

Agente responsável: ANEEL

- i) Estudar a inclusão nos leilões de energia eólica a geração *offshore* com a possibilidade de transmissão convencional de energia ou por meio do hidrogênio como vetor energético.

Agente responsável: EPE

- j) Estudar a possibilidade de redução de impostos na produção de equipamentos e componentes de eletrolisadores; células a combustível; e de veículos movidos a hidrogênio, como empilhadeiras, ônibus e automóveis.

Agente responsável: Ministério da Economia

10 CONCLUSÃO

O hidrogênio há anos se apresenta como uma solução energética do futuro, entretanto, como vimos no capítulo 4, recentemente observa-se um encontro do que seria uma utopia com a realidade. A pressão por utilização de fontes de energia limpa tem origem em todos os campos da sociedade. A consciência de que é necessário preservar o ambiente passou de um conceito abstrato para uma realidade. As demandas por descarbonização dos produtos e a relação entre energia e meio ambiente já interferem nas escolhas de consumo dos indivíduos.

Para atender esses interesses, os países e as empresas estão a cada dia desenvolvendo políticas e processos de geração energética progressivamente mais avançados tecnologicamente, resultando em uma economia de escala que gera um círculo virtuoso, ao passo que favorece a redução de custos. O que fica patente, por exemplo, no caso das células fotovoltaicas, em que o resultado da pressão por energia limpa, associado à redução de custos obtidos com os avanços tecnológicos, fez com que a oferta de energia solar aumentasse expressivamente, e conseqüentemente, que os preços despencassem, ocasionando um rápido crescimento, fazendo com que esta fonte energética atingisse o patamar de 2% de toda a energia produzida no mundo.

A energia eólica segue o mesmo caminho. Os custos baixaram e novas tecnologias avançaram de modo que passaram a ser viáveis, por exemplo, parques eólicos sobre o mar. A já consolidada energia hidráulica, mesmo enfrentando dilemas de altos custos de construção e impactos sociais e ambientais continua em expansão. Do mesmo modo, a utilização de biomassa tem cooperado significativamente para a preservação do meio ambiente, ao converter resíduos de todo o tipo em energia, importante para transformar a vida nos grandes centros urbanos e, em especial, nos locais próximos à produção agroindustrial.

O Brasil tem uma matriz energética invejável, em especial sua matriz elétrica, por possuir várias fontes renováveis de energia com baixo impacto ambiental. Mesmo o aumento da participação do gás natural na matriz energética projetado para os próximos anos é positivo, ao permitir a diminuição do consumo de combustíveis fósseis tradicionalmente utilizados no país para produção industrial e na geração térmica de energia.

Deste cenário de transição energética para uma matriz energética mais limpa, o hidrogênio ascende como portador de futuro. Apesar de ser um velho conhecido, mas agora sob a roupagem ecológica de hidrogênio verde, o hidrogênio se apresenta como uma solução extremamente útil na busca da energia limpa e sustentável. O Brasil desponta como potencial fornecedor de hidrogênio puro em virtude de uma invejável diversidade de fontes presentes em abundância em seu território.

As últimas barreiras tecnológicas para o uso do hidrogênio estão sendo vencidas nos setores de produção, transporte e armazenamento, tornando essa fonte energética cada vez mais acessível. Deste modo, em breve veremos o hidrogênio substituindo tradicionais combustíveis fósseis em um caminho de descarbonização da sociedade. Os Estados Unidos, e especialmente o Japão e a Europa já estão trilhando esse caminho de transição energética, liderando as políticas públicas de preservação ambiental lastreadas na redução dos impactos dos produtos e serviços produzidos, na eficiência energética, no consumo consciente de energia e nos investimentos em fontes renováveis. Adicionalmente, a inclusão do hidrogênio como vetor de energia contribui para que as economias nacionais diminuam suas exposições às variações de oferta de petróleo e de seus derivados.

Das experiências aqui apontadas, já que o Brasil foi agraciado com abundantes fontes de hidrogênio e com condições geográficas que possibilitam a geração de energia com grande aproveitamento eólico e solar, conclui-se que, mesmo o Brasil já possuindo uma matriz ecologicamente bem estruturada, é importante o país ir além da introdução do hidrogênio em sua matriz energética, e sim construir as condições de ser um *major player* nesse novo mercado, particularmente ser um grande fornecedor de hidrogênio verde.

Para a consecução deste objetivo é necessária uma abordagem pragmática do desenvolvimento dessa fonte energética. O agente mais indicado para ser líder dessa atividade é o Ministério de Minas e Energia, entidade que deve dar o norte para a atuação e coordenação de uma política pública para a inclusão de novas tecnologias no campo da energia, e necessariamente construir um plano específico para o hidrogênio em um modelo de tríplice hélice, incluindo órgãos científicos e tecnológicos civis e militares, universidades e empresas privadas. Para isso é importante fortalecer instituições como o Laboratório de Células a Combustível do CEPEL, o Laboratório de Hidrogênio de Itaipu e o Centro de Células a Combustíveis

e Hidrogênio do IPEN, investir nas linhas de pesquisa da COPPE, da Unicamp e da USP ligadas a esse vetor de energia. A EPE e a ANAEEEL devem estudar e promover o uso de geração híbrida visando ao melhor aproveitamento das fontes intermitentes de energia. Deve-se dar atenção em especial à eólica *offshore*, setor com forte crescimento no mundo, mas que no Brasil é incipiente. O setor privado também precisa ser incluído no desafio do hidrogênio. O fomento de projetos deve levar em consideração a indústria nacional, aproveitando a expertise e o conhecimento das empresas já existentes.

No campo da Defesa, o hidrogênio energético já é uma realidade no mundo. As vantagens do uso militar do hidrogênio como vetor de energia são tantas que o país não pode renunciar à pesquisa do hidrogênio, tanto no que tange à geração do gás, como no desenvolvimento de células a combustível. A inclusão de pesquisas sobre seu uso energético nos Institutos Militares de Ciência e Tecnologia das Forças Armadas pode transbordar conquistas para a sociedade, beneficiando o país como todo.

Mesmo com todas as vantagens que o uso energético do hidrogênio pode trazer, como o Brasil é dotado de um diversificado leque de opções energéticas, e em face do grande volume de investimentos envolvidos para se estar na fronteira do conhecimento nesta área, incluir o hidrogênio na matriz energética brasileira é um desafio. Criar, por exemplo, um mercado nacional para veículos movidos a hidrogênio não deve ser um objetivo direto, mas sim, preparar o país para integrar o mercado mundial que surgirá com a consolidação da tecnologia deve ser o objetivo. Ao participar deste mercado com suprimento de peças, sobressalentes, células, eletrolisadores ou até com o fornecimento do gás, cria-se a escala para uma gradual introdução da tecnologia no mercado nacional, inclusive para a geração híbrida.

REFERÊNCIAS

AFOLAYAN, Enu. **Hydrogen Power in Mali**. [Nigéria]: Africa Middle East, 2016. Disponível em <http://africa-me.com/hydrogen-power-in-mali/>

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**. Brasília, DF: ANAEEL, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **BIG - Banco de Informações de Geração**: capacidade de geração do Brasil. Brasília, DF: ANAEEL, 2019. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 18 ago. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **CHAMADA NO 021/2016 PROJETO ESTRATÉGICO**: “arranjos técnicos e comerciais para a inserção de sistemas de armazenamento de energia no setor elétrico brasileiro”. Brasília, DF: ANAEEL, 2016. Disponível em: www.aneel.gov.br/documents/656831/14930433/Chamada+PD_Estrategico_21_Armazenamento_Julho2016/0210802b-b6a6-4ed5-aa9e-2ec3911f7b44. Acesso em: 20 set. 2019.

ALDABÓ, Ricardo. **Célula combustível a hidrogênio**: fonte de energia da nova era. São Paulo: Artliber Ed., 2004.

AMARANTE, José Carlos. **O voo da humanidade e 101 tecnologias que mudaram a face da Terra**. Rio de Janeiro: BIBLIEx, 2009.

ANDRADE, Thales Novaes de; LORENZI, Bruno Rossi. Política energética e agentes científicos: o caso das pesquisas em células a combustível no Brasil. **Revista Sociedade e Estado**, Brasília, DF, v. 30, n. 3, p. 727-747, dez. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/se/v30n3/0102-6992-se-30-03-00727.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2019.

BERMANN, Célio. Crise ambiental e as energias renováveis. **Ciência e Cultura** [online], São Paulo, v. 60, n. 3, set. 2008. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252008000300010&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 19 set. 2019.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Presidência da República, 1988. Atualizada até a Emenda Constitucional nº 97, de 2017. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 7 maio 2019.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2016-2022**: sumário executivo. Brasília, DF: MCTIC; CGEE, 2018a. Disponível em: http://www.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/Arquivos/Plano_sDeAcao/PACTI_Sumario_executivo_Web.pdf. Acesso em: 7 maio 2019.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Secretaria

de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. **Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis**: 2018-2022. Brasília, DF: MCTIC, Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, 2018b. Disponível em: <https://www.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/tecnologia/tecnologiasSetoriais/Plano-de-Ciencia-Tecnologia-e-Inovacao-Para-Energias-Renovaveis-e-Biocombustiveis.pdf>. Acesso em: 7 maio 2019.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Estratégia Nacional de Defesa**. Brasília, DF: MD, 2016a. Aprovada em 14 dez. 2018 pelo Decreto Legislativo do Congresso Nacional nº 179, de 2018. Disponível em: http://www.defesa.gov.br/arquivos/2017/mes03/pnd_end.pdf. Acesso em: 7 maio 2019.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Livro Branco de Defesa Nacional**. Brasília, DF: MD, 2016b. Aprovada em 14 dez. 2018 pelo Decreto Legislativo do Congresso Nacional nº 179, de 2018. Disponível em: <http://www.defesa.gov.br/arquivos/2017/mes03/livro-branco-de-defesa-nacional-consulta-publica-12122017.pdf>. Acesso em: 7 maio 2019.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Política Nacional de Defesa**. Brasília, DF: MD, 2016c. Aprovada em 14 dez. 2018 pelo Decreto Legislativo do Congresso Nacional nº 179, de 2018. Disponível em: http://www.defesa.gov.br/arquivos/2017/mes03/pnd_end.pdf. Acesso em: 7 maio 2019.

BRASIL. Ministério das Relações Exteriores, **O Brasil no G-20**. Brasília, DF: MRE, 2019a. Disponível em: <http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/diplomacia-economica-comercial-e-financeira/15586-brasil-g20>. Acesso em: 13 set. 2019.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Ônibus a hidrogênio**: projeto ônibus brasileiro a hidrogênio: tecnologias renováveis para o transporte urbano no Brasil. Brasília, DF: MME, 2019b. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas/onibus-a-hidrogenio>. Acesso em: 21 ago. 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Acordo de Paris**. Brasília, DF: MMA, 2019c. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>. Acesso em: 17 ago.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. Brasília, DF: MMA, 2019d. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas>. Acesso em: 17 ago. 2019.

CALIFORNIA, Clean Vehicle Rebate Project. California Air Resources Board. **Drive clean and safe**: California residents get up to \$7,000 for the purchase or lease of a new, eligible zero-emission or plug-in hybrid light-duty vehicle. [S. l.]: Clean Vehicle Rebate, 2019a. Disponível em: <https://cleanvehiclerebate.org/eng>. Acesso em: 19 set. 2019.

CALIFORNIA FUEL CELL PARTNERSHIP. **About us**. West Sacramento: CFCP, 2019a. Disponível em: https://cafcp.org/about_us. Acesso em: 17 set. 2019.

CALIFORNIA FUEL CELL PARTNERSHIP. **By the numbers**: FCEV Sales, FCEB, & hydrogen station data. West Sacramento: CFCP, 2019b. Disponível em: https://cafcp.org/by_the_numbers. Acesso em: 18 set. 2019.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Hidrogênio energético no Brasil**: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025: tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários. Brasília, DF: CGEE, 2010.

COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia . **Laboratório de Hidrogênio (LABH2)** Rio de Janeiro, RJ. UFRJ. Disponível em: <http://www.coppe.ufrj.br/pt-br/pesquisa/laboratorios/laboratorio-de-hidrogenio-labh2>. Acesso em: 18 set. 2019.

ELETROBRAS. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Células a combustível**: apresentação. Rio de Janeiro: CEPEL, 2018. Disponível em: http://www.cepel.br/pt_br/linhas-de-pesquisa/menu/celulas-a-combustivel.htm. Acesso em: 18 ago. 2019.

ELETROBRAS. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Cepel detém ampla experiência na área de células a combustível: uma tecnologia de geração limpa e promissora** Rio de Janeiro: CEPEL, 2019. Disponível em: http://www.cepel.br/pt_br/linhas-de-pesquisa/menu/celulas-a-combustivel.htm. Acesso em: 18 ago. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2018**: ano base 2017. Brasília, DF: EPE, 2018. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf. Acesso em: 18 set. 2019

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2019**: relatório síntese: ano base 2018. Brasília, DF: EPE, 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relatório%20Síntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>. Acesso em: 18 set. 2019.

ENVIRONMENTAL LITERACY COUNCIL. **Hydrogen**. Washington, DC: The Environmental Literacy Council, 2015. Disponível em: <https://enviroliteracy.org/energy/hydrogen/>. Acesso em: 18 ago. 2019.

EUROPEAN COMMISSION. **Memo/03/132**: The hydrogen economy a bridge to sustainable energy: Brussels: EC, 16 jun 2003. Disponível em: https://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-03-132_en.htm. Acesso em: 18 ago. 2019.

FINANCIADORA DE INOVAÇÃO E PESQUISA. **Ônibus a hidrogênio**. Rio de Janeiro: FINEP, 2015. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/a-finep-externo/aqui->

tem-finep/onibus-a-hidrogenio. Acesso em: 14 set. 2019.

GOMES NETO, Emílio Hoffmann. **Hidrogênio evoluir sem poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível**. Curitiba: Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005.

HONDA. **2019 Clarity fuel cell**. [S. l.]: Honda, 2019. Disponível em: <https://automobiles.honda.com/clarity-fuel-cell#>. Acesso em: 14 set. 2019.

HORNYAK, Tim. Powering the future: how Toyota is helping Japan with its multibillion-dollar push to create a hydrogen-fueled society. **CNBC**, 26 fev. 2019. Disponível em: <https://www.cnbc.com/2019/02/26/how-toyota-is-helping-japan-create-a-hydrogen-fueled-society.html>. Acesso em: 15 set. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Bioenergy power generation**: tracking clean energy progress. Paris: IEA, May 24, 2019a. Disponível em: <https://www.iea.org/tcep/power/renewables/bioenergy/>. Acesso em: 20 ago. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Demand from Asia is set to power the growth of the global gas industry over the next five years**. Paris: IEA, 7 June 2019b. Disponível em: <https://www.iea.org/newsroom/news/2019/june/demand-from-asia-is-set-to-power-the-growth-of-the-global-gas-industry-over-the-n.html>. Acesso em: 20 ago. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Technology RD&D**. Paris: IEA, 2019c. Disponível em: <https://webstore.iea.org/energy-technology-rdd-budgets-2019-overview>. Acesso em: 20 ago. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Exploiting ocean energy through advanced design concepts**. Paris: IEA, 2019d. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/innovation/renewables/gaps/exploiting-ocean-energy-through-advanced-design-concepts.html>. Acesso em: 20 ago. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The future is hydrogen**: seizing today's opportunities. Paris: IEA, 14 June 2019e. Data & Publications. Disponível em: <https://webstore.iea.org/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 20 ago. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Hidropower**: tracking clean energy progress. Paris: IEA, May 24 2019f. Disponível em: <https://www.iea.org/tcep/power/renewables/hydropower/>. Acesso em: 20 ago. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Natural gas**. Paris: IEA, 2019g. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/naturalgas/>. Acesso em: 20 ago. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Offshore wind**: tracking clean energy progress. Paris: IEA, May 28 2019h. Disponível em: <https://www.iea.org/tcep/power/renewables/offshorewind/>. Acesso em: 20 ago. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Onshore wind**: tracking clean energy

progress. May 24 Paris: IEA, 2019i. Disponível em: <https://www.iea.org/tcep/power/renewables/onshorewind/>. Acesso em: 20 ago. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Solar PV: tracking clean energy progress.** Paris: May 24 IEA, 2019j. Disponível em: www.iea.org/tcep/power/renewables/solarpv/. Acesso em: 20 ago. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2018.** Paris: Nov 11 IEA, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/weo2018/>. Acesso em: 20 ago. 2019.

JAPAN. Ministry of Economy, Trade and Industry - METI. Agency for Natural Resources and Energy. **Basic hydrogen strategy determined.** Tokyo: METI, 2017. Disponível em: https://www.meti.go.jp/english/press/2017/1226_003.html. Acesso em: 17 set. 2019.

JAPAN. Ministry of Economy, Trade and Industry - METI. **The strategic road map for hydrogen and fuel cells: industry-academia-government action plan to realize "hydrogen society": overall.** Tokyo: METI, 2018. Disponível em: <https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001-3.pdf>. Acesso em: 17 set. 2019.

MIRANDA, Paulo Emílio V. de. WHEC2018. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, 2017. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762017000300201&lng=pt&nrm=iso. acesso em: 07 maio 2019.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES (United States). **Review of the research program of the freedomcar and fuel partnership: second report.** Washington, DC: National Academies Press, 2008.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **A ONU e o meio ambiente.** Nova Iorque: ONU, 2019. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente/>. Acesso em: 17 ago. 2019.

PARQUE TECNOLÓGICO DE ITAIPU, **Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio.**(2019a) Disponível em: <https://www.pti.org.br/pt-br/sobre-o-pti>. Acesso em: 20 set. 2019

PARQUE TECNOLÓGICO DE ITAIPU, **Parque Tecnológico Itaipu.**(2019b) Disponível em: <https://www.pti.org.br/pt-br/sobre-o-pti>. Acesso em: 20 set. 2019

PRINZHOFER, A., TAHARA CISSÉ, C. S., & DIALLO, A. B. (2018). Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). **International Journal of Hydrogen Energy**, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319918327861>

RIFKIN, Jeremy. **A economia do Hidrogênio: a criação de uma nova fonte de energia do poder na terra.** San Francisco: M. Books, 2003.

SATYAPAL, Sunita. **Hydrogen and fuel cells enabled through the U.S.**

Department of Energy. In: ECS MEETING, 235. Dallas. Abstract. [S. l.]: ECS, 2019c. Disponível em: <https://ecs.confex.com/ecs/235/meetingapp.cgi/Paper/120776>. Acesso em: 18 ago. 2019.

SATYAPAL, Sunita. **U.S. Department of Energy hydrogen and fuel cells program.** Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2017. 18 slides, color. Disponível em: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/06/f34/fcto_june_2017_h2_scale_review_satyapal.pdf. Acesso em: 17 ago. 2019.

SIBLERUD, Robert. **Our future is hydrogen! energy, environmental and economy.** Wellington, CO: New Science Publications, 2001.

SILVA, Ennio Peres da. **Introdução à tecnologia e economia do hidrogênio.** Campinas: Ed. UNICAMP, 1991.

SOUZA, Mariana de Mattos Vieira Mello. **Tecnologia do hidrogênio.** Rio de Janeiro: Synergia: FAPERJ, 2009.

SUGIMOTO, Luiz. **Unicamp, Nissan e o carro movido com eletricidade gerada por etanol.** Campinas: Unicamp, 26 abr. 2019. Disponível em: <https://www.unicamp.br/unicamp/noticias/2019/04/26/unicamp-nissan-e-o-carro-movido-com-eletricidade-gerada-por-etanol>. Acesso em: 14 set. 2019.

UNITED NATIONS. **Report of the United Nations Conference on the Human Environment, Stockholm, 5-16 June 1973.** New York: UN, 1973. Disponível em: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/CONF.48/14/REV.1. Acesso em: 17 ago. 2019.

UNITED NATIONS. **United Nations Conference on The Human Environment (Stockholm Conference).** UN, 2019. Disponível em: https://sustainabledevelopment.un.org/milestones/humanenvironment_. Acesso em: 17 ago. 2019.

U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. Office of the Assistant Secretary of Defense for Sustainment. **Operational energy.** Washington, DC: OSD, Disponível em: https://www.acq.osd.mil/eie/OE/OE_index.html. Acesso em: 15 set. 2019.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF ENERGY. Energy Technology Training Center. **Hydrogen fuel cell engines and related technologies:** module 1: hydrogen properties. Palm Desert: College of the Desert, Dec. 2001. Plano de aula. 47 p., color. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/fcm01r0.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2019.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF ENERGY. **H2@Scale.** Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2019a. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/h2scale>. Acesso em: 18 ago. 2019.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF ENERGY. Office of Fossil Energy. **Solid oxide**

fuel cell program. Washington, DC: U.S. Department of Energy, [2019b]. Disponível em: <https://www.energy.gov/fe/science-innovation/clean-coal-research/solid-oxide-fuel-cells>. Acesso em: 15 set. 2019.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF ENERGY. Office of Energy Efficiency. **Hydrogen and Fuel Cells Enabled through the U.S. Department of Energy**, [2019c]. Disponível em: www.energy.gov/sites/prod/files/2019/06/f63/fcto-satyapal-overview-for-ecs-meeting-2019-05-27.pdf. Acesso em: 15 set. 2019.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF ENERGY. **Progress report for Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies Program.** Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2003. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-technologies-office#progress>; . Acesso em: 19 ago. 2019.

YERGIN, Daniel. Prólogo. *In*: YERGIN, Daniel. **The prize**: the epic quest for oil, money, and power. New York: Simon & Schuster, 1991. p. 11-16. Fotocópia. Disponível em: <https://nature.berkeley.edu/er100/readings/Yergin-1991.pdf>. Acesso em: 14 set. 2019.