

REVISTA DE ECONOMIA DA UEG

ISSN 1809-970X

DOSSIÊ ESPECIAL
MEIO AMBIENTE, EDUCAÇÃO E
POLÍTICAS PÚBLICAS

Org.: Joana D´arc Bardella Castro



Cartão Postal (1928) - Tarsila do Amaral

Pintora brasileira (1886-1973)

A PARTICIPAÇÃO DO BRASIL NO PROCESSO DE DIFUSÃO DA ENERGIA DO HIDROGÊNIO VERDE¹

BRAZIL'S PARTICIPATION IN THE GREEN HYDROGEN ENERGY DIFFUSION PROCESS

IRACI MATOS VASCONCELLOS

 <http://lattes.cnpq.br/0044315413695984>

Possui graduação em Ciências Econômicas (UFRJ, 2008), graduação em Licenciatura Matemática (UNESA, 2022) e mestrado em Ciências Econômicas (UERJ, 2012). Atualmente é doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento (PPED/IE/UFRJ) e professora do Departamento de Economia da UFRRJ.

ALEXANDRE D'AVIGNON

 <http://lattes.cnpq.br/9136354252402479>

Pós-Doutor pelo PPE/COPPE UFRJ. Atualmente é professor colaborador voluntário do Programa de Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento do Instituto de Economia da UFRJ e Pesquisador e membro do Conselho Gestor do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento / INCT-PPED.

RAYANE CATRINCK DOS REIS

 <http://lattes.cnpq.br/5586961826978990>

Possui graduação em Ciências Econômicas (UFRRJ, 2022) Possui experiência em pesquisa de iniciação científica sobre Inovação tecnológica e desenvolvimento econômico pela FGV- Fundação Getúlio Vargas.

RESUMO

A energia tem um papel fundamental na transição à uma produção sustentável, o que é uma tendência global. Como possibilidade energética, o hidrogênio é uma invenção feita há mais de um século, mas o seu processo de difusão parece finalmente estar sendo impulsionado nos últimos anos. O objetivo geral deste trabalho é identificar os esforços do Estado para que o Brasil possa ser incluído neste promissor mercado da energia do hidrogênio. Para tal, foi utilizado a metodologia qualitativa a partir de análise de documentos. Como conclusão do trabalho afirma-se que a inovação da energia do hidrogênio não é um assunto novo, mas a difusão tem tomado maior proporção nos últimos anos impulsionada pela opção de produção de energia limpa. No Brasil, as iniciativas ainda são tímidas e isoladas, mas o

¹ Uma primeira versão foi apresentada no IX Encontro Científico do Programa de Pós-graduação em Economia da UNESP de 2022 e publicado no Anais do Encontro.

governo brasileiro tem feito esforços para se inserir neste promissor mercado da energia do hidrogênio. Faltam, no entanto, alguns ajustes, como por exemplos, clareza nas fontes de financiamento e um desenho adequado do marco regulatório.

Palavras-chave: Energia do Hidrogênio, Difusão, Estado

ABSTRACT

Energy plays a key role in the transition to sustainable production, which is a global trend. As an energy possibility, hydrogen is an invention made more than a century ago, but its diffusion process finally seems to be boosting in recent years. The general objective of this work is to identify the efforts of the State so that Brazil can be included in this promising hydrogen energy market. For this, a qualitative methodology was used based on document analysis. As a conclusion of the work, it is stated that the innovation of hydrogen energy is not a new subject, but the diffusion has taken greater proportions in the last years driven by the option of producing clean energy. In Brazil, initiatives are still timid and isolated, but the Brazilian government has made efforts to enter this promising hydrogen energy market. However, some adjustments are still missing, such as, for examples, clarity on funding sources and an adequate design of the regulatory framework.

Keywords: Hydrogen Energy, Diffusion, State

INTRODUÇÃO

Existe uma revolução verde em curso para frear o aquecimento global causado sobretudo pela emissão de gás carbono na atmosfera. Baseados em acordos entre nações, como por exemplo o Acordo de Paris de 2015, as nações estão assumindo compromissos com a redução de emissões que poluem o meio ambiente. Neste processo de transição à sustentabilidade a energia é um elemento-chave não somente pelo fato do fornecimento de energia esta associado a um possível esgotamento dos recursos naturais, mas também pelo fato das produções tradicionais serem bastantes maléficas para a natureza. Isso explica o porquê de o setor energético ter sido um dos que mais recebeu inovações nas últimas décadas no sentido de promover uma energia mais limpa (MARKARD, RAVEN, TRUFFER, 2012).

Neste contexto ressurge o hidrogênio como fonte alternativa e mais sustentável de energia. Embora a produção ainda tenha alguns obstáculos, incluído o transporte e o armazenamento, Castro e Braga (2021) acreditam que no futuro da economia energética é possível que o hidrogênio tenha um papel preponderante como fonte de energia limpa, sendo reconhecido como um importante vetor energético capaz de promover uma profunda descarbonização da economia mundial.

A invenção da energia gerada através do hidrogênio não é algo contemporâneo, mas o seu processo não foi completo pois pereceu a difusão. Schiling (2006) acredita que o fracassado processo de difusão do hidrogênio sofreu ciclos de boas expectativas e de desilusões nas últimas décadas pela forte concorrência e lobbies dos derivados de petróleo, gás natural e carvão. Na literatura clássica, a difusão promove uma mudança social que altera significativamente o contexto social e econômico (ROGERS, 1983; HALL, 2005). Tal mudança possui uma série de atores envolvidos, sendo o Estado uma figura crucial. Mazzucato (2014) afirma que o apoio do Estado é fundamental nas inovações, promovendo novas tecnologias “verdes” no qual e atuando na criação do ambiente institucional para a implementação do projeto.

Alguns países já superaram as dificuldades enfrentadas na produção e difusão do hidrogênio. Percebe-se que a maior parte deles possuem objetivos similares como a promoção do desenvolvimento econômico, redução das emissões e integração de fontes renováveis (HYDROGENCOUNCI, 2022). Sem dúvida, o desafio para o mundo é imensamente maior que para o Brasil: segundo o Balanço Energético Nacional de 2018 (EPE, 2021), a matriz elétrica mundial é constituída de 25% de energia renováveis contra 75% de não renováveis enquanto a matriz elétrica nacional é constituída de 83% de fontes renováveis contra 17% de não renováveis.

Adicionalmente, o Brasil possui uma matriz bastante diversificada. De acordo com a previsão de Sousa e Silva (2020), a energia eólica, cujo percentual da matriz elétrica brasileira em 2018 foi de 7,6%, saltará para 11,1% em 2024. A energia solar representou 0,5% e saltará para 2,4% nos mesmos anos, respectivamente, e por isso o Brasil pode ganhar bastante evidência neste mercado, dado que um dos principais e mais caros insumos na produção da energia do hidrogênio é outra forma energética, preferencialmente vinda de uma fonte limpa, o que resulta no “hidrogênio verde”.

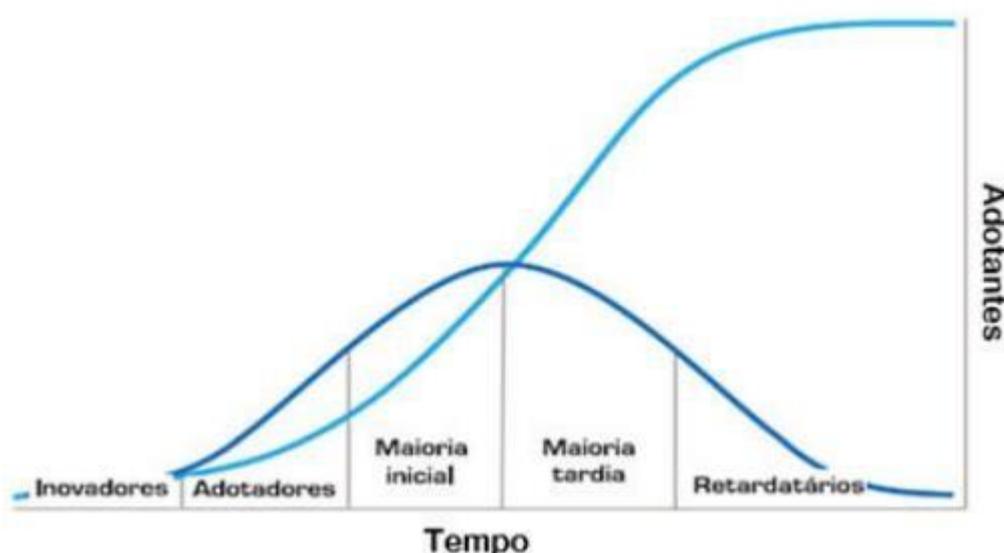
Outro destaque nos objetivos dos países que já estão investindo em hidrogênio é a exportação, especialmente naqueles com elevada disponibilidade de fontes renováveis, que é o caso brasileiro. Aqui já existem iniciativas privadas na produção do hidrogênio, sobretudo das empresas estrangeiras pertencentes ao setor elétrico. Para adequar os objetivos, o Governo precisa executar algumas tarefas que já foram iniciadas em 1998, mas que ganhou evidência no Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂) lançado em 2021 para apresentar as estratégias para o desenvolvimento da economia de hidrogênio no Brasil. Este trabalho tem como objetivo principal averiguar as iniciativas do Estado brasileiro no processo de difusão do hidrogênio verde, especialmente no que tange às formas de financiamento e na construção de um arcabouço regulatório adequado para o setor inserido no PNH₂.

REFERÊNCIAL TEÓRICO

A energia do hidrogênio é uma invenção feita há mais de um século, mas o seu processo de difusão parece finalmente ter sido impulsionado apenas nos últimos anos. O autor seminal em difusão

é Everett Rogers. Em seu trabalho de 1962, apresentou a curva da difusão, relacionando o número de empresas adotantes da inovação em relação ao tempo. A curva assume uma forma de S, já que o comportamento da adoção aumenta lentamente no início, quando apenas os inovadores a adotam, e acelera ao atingir os adotantes iniciais e a maioria inicial, o que representa aproximadamente a metade dos indivíduos previstos no sistema. Após, aumenta a uma taxa mais lenta, alcançando a maioria tardia e retardatária, (ROGERS, 1983)

Gráfico 1: Curva de Difusão de Inovações



Fonte: Ferreira, Ruffoni et al, 2018

Para Hall (2005) a difusão é mais conhecida como o processo para descrever como pessoas e empresas adotam uma nova tecnologia, isto é, o meio pelo qual a inovação se torna útil ao ser espalhada. Mas não é apenas isso: para a autora, a difusão é também uma parte intrínseca do processo de inovação, pois os efeitos de aprendizagem, imitação e *feedback* que surgem durante a disseminação de uma nova tecnologia aprimoram a inovação original. Sem a difusão, a inovação teria pouco impacto social e econômico.

A difusão de uma tecnologia pode trazer muitos benefícios para os mercados, mas é bastante complexa por envolver uma mudança social, ideia que foi apresentada pelo próprio Rogers em 1983, que definiu a difusão como uma espécie de mudança social, um processo cuja alteração ocorre na estrutura e função de um sistema social. Para o autor, quando novas ideias são inventadas, difundidas e adotadas ou rejeitadas, levando a certas consequências, ocorre a mudança social que pode ser comparada com outros tipos de mudanças que podem acontecer tais como, uma revolução política ou um evento natural como uma seca ou terremoto (ROGERS, 1983).

De fato, muitas inovações mudam significativamente todo o contexto social e econômico. Para Hasenclever e Tigre (2001) o processo de difusão da energia elétrica no final do século XIX

A PARTICIPAÇÃO DO BRASIL NO PROCESSO DE DIFUSÃO DA ENERGIA DO HIDROGÊNIO VERDE

exigiu a montagem de redes de distribuição, novas formas de compra e venda, e uma institucionalidade distinta da adotada quando as principais fontes energéticas eram o carvão e o querosene. Este arranjo é caracterizado como uma inovação sistêmica, que envolve muitos aspectos, como regulatórios, infra-estruturas, sociais, sistemas de financiamento e mesmo aspectos macroeconômicos.

Segundo Hall (2005), além de fatores culturais e sociais, a difusão depende dos benefícios e dos custos econômicos envolvidos. Os benefícios estão presentes ao longo da vida da inovação e associados à quantidade de melhorias que a nova tecnologia oferece em relação a qualquer tecnologia anterior. Já os custos acontecem normalmente no momento da adoção e podem ser do tipo “irrecuperáveis”, embora possa haver uma taxa contínua para o uso de algumas das novas tecnologias, este custo é geralmente muito menor do que o custo inicial.

Uma inovação pode ser protegida ou difundida como estratégia da empresa. Para Schilling (2019) a difusão de uma inovação tecnológica pode encorajar várias empresas a produzir, distribuir e promover a tecnologia, possivelmente acelerando seu desenvolvimento e aperfeiçoamento. A difusão pode ser particularmente útil nos casos de empresas que não dispõem do poder de monopólio de um determinado produto, sendo que, a concorrência entre os produtores pode derrubar o preço da tecnologia, tornando-a mais atraente para o mercado de consumo. Essa percepção pode contribuir para uma adoção mais rápida da tecnologia por clientes e fornecedores de bens complementares, o que estimula o investimento de empresas para apoiar no desenvolvimento da tecnologia.

A introdução comercial e exploração de uma invenção, e sua aceitação pelo mercado é uma condição que deve ser cumprida em todas as situações. Mas, a demanda de mercado não é necessariamente a única, ou mesmo a principal, determinante da escala e direção do trabalho inventivo e inovador (COOKE, 1979). A inovação diz respeito a um conjunto de processos, nos quais algumas mentes imaginativas interligam ciência, tecnologia e mercado, no intuito de desenvolver novas tecnologias e produtos (FREEMAN, 1979). Assim, são muitos os atores envolvidos, inclusive o Estado.

Para Mazzucato (2014), o Estado deve não somente corrigir falhas de mercado (por exemplo, por meio do financiamento para pesquisa básica e projetos de infraestrutura), mas também abrir espaço para o investimento privado dinamizando-o, cabendo ao Estado sinalizar para a sociedade sua visão, definir sua missão e formular e executar um planejamento coerente. Além disso, a autora afirma que o Estado pode assumir riscos que o setor privado não deseja assumir e por isso, o apoio dele é fundamental nas inovações, inclusive promovendo novas tecnologias “verdes” no qual pode-se atuar criando o ambiente institucional necessário para a implementação do projeto.

A energia do hidrogênio

O hidrogênio é o elemento mais abundante do universo, mas apesar disso, a sua forma pura existe apenas em pequena quantidade na atmosfera terrestre. Para ser uma fonte de energia o hidrogênio precisa ser gerado, isto é, extraído de outras matérias-primas e dentre todas as opções, a água (H₂O)

é a mais utilizada. Assim, na forma de produção da energia do hidrogênio, também chamada de rotas tecnológicas, são utilizadas outras formas de energia através de dois processos e tecnologias diferentes: i) Eletrólise; e ii) Reforma, ou reformação por vapor. A eletrólise é o processo de divisão das moléculas de água em átomos individuais de hidrogênio e oxigênio através da reação química induzida pela eletricidade, que pode ser de origem renovável, não renovável ou até uma combinação entre elas. A produção da energia do hidrogênio feita pela eletrólise resultante é chamada de hidrogênio verde e neste caso, o hidrogênio é considerado uma fonte de energia neutra em carbono pois o processo de sua queima produz água e não CO₂.

O segundo processo, a reforma, tem um maior impacto ambiental, pois envolve o uso de combustíveis fósseis, como carvão mineral, petróleo e gás natural. Para a produção da energia do hidrogênio, tais combustíveis são decompostos com vapor de água a alta temperatura. Este processo envolve a emissão de CO₂, que pode ser solto no ar ou capturado. No primeiro caso, a energia resultante é chamada de hidrogênio cinza. No segundo caso, a energia resultante é chamada de hidrogênio azul. O Quadro 1 resume as cores da energia do hidrogênio².

Quadro 1: Algumas Cores da Energia do Hidrogênio

Cinza	Azul	Verde
Por Reforma. Obtido principalmente do gás natural ou outros combustíveis fósseis, que ao serem aquecidos para separar o H ₂ acabam também por libertar CO ₂ para a atmosfera. É um processo altamente poluente, o que justifica a cor cinza.	Por Reforma, mas é menos poluente do que o hidrogênio cinzento, porque durante este processo o CO ₂ libertado é capturado, armazenado e enterrado no solo, em vez de ser emitido para a atmosfera.	Por Eletrólise. A separação das moléculas de hidrogênio das moléculas de oxigênio não gera quaisquer emissões poluentes diretas ao longo do processo, desde que a energia elétrica usada venha de fontes renováveis.

Fonte: Elaboração própria a partir do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (2022).

A energia do hidrogênio também existe através da célula de combustível. As células convertem a energia química em eletricidade a partir de um combustível com o qual são abastecidas. São basicamente formadas por dois eletrodos, um suprimido com oxigênio e outro com hidrogênio e tem as seguintes vantagens: modularidade, pouco ruído e quase nenhuma emissão (ROHRICH, PEREIRA, 2011).

Dada a tecnologia, a energia do hidrogênio ainda tem algumas barreiras e desafios a serem vencidos. A própria difusão com a ampliação do mercado doméstico através da redução de custos de

² O hidrogênio pode ser produzido por diferentes rotas e tais rotas que mostram tanto a origem da energia utilizada como o processo pelo qual o hidrogênio é feito, definem a cor. Além das mencionadas no Quadro 1, também podem ser preta / marrom (quando a origem é do carvão); turquesa (metano) ou ainda rosa (nuclear) IRENA (2020).

A PARTICIPAÇÃO DO BRASIL NO PROCESSO DE DIFUSÃO DA ENERGIA DO HIDROGÊNIO VERDE

equipamentos e bens de capital é a primeira delas. O transporte também é um gargalo. Para que o transporte de hidrogênio se torne economicamente viável, o setor precisa ampliar sua infraestrutura, com o objetivo de chegar a níveis semelhantes ao GLP -gás natural líquido. (HYDROGEN COUNCIL, 2020).

Descrito como um dos gargalos para o uso do hidrogênio, o relatório do CGEE (2010), que se refere ao Hidrogênio energético, destaca que a forma mais econômica de transporte do hidrogênio para os centros distribuidores e consumidores é por tubovias transporte do hidrogênio. Porém, existem ainda severas restrições para a implantação e consolidação das tubovias no mercado de hidrogênio. Um dos principais motivos é que os custos de implantação são elevados e a demanda de hidrogênio a ser transportado ainda é baixa.

A Europa lidera os projetos integrados de economia de hidrogênio. A Tabela 1 a seguir compila os principais exemplos específicos de 15 países, além da União Europeia e do estado da Califórnia. Foram listados os seguintes objetivos: Redução das emissões de gases do efeito estufa, Diversificação da matriz energética, Promoção do crescimento econômico, Desenvolvimento de tecnologia nacional, Integração de fontes renováveis e Desenvolvimento de mercado exportador de hidrogênio. Os campos sinalizados (✓) confirmam a presença do objetivo na respectiva estratégia nacional. Os campos não sinalizados correspondem à ausência do objetivo.

Tabela 1: Objetivos Específicos das Estratégias Nacionais

Objetivos	União Europeia	Alemanha	Países Baixos	França	Espanha	Itália	Reino Unido	Noruega	Suíça	Ucrânia	Rússia	Japão	Coreia do Sul	China	Austrália	Califórnia	Marrocos	Chile
Redução das emissões	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓			✓		✓		✓	✓	✓
Diversificação da matriz energética	✓	✓		✓					✓		✓		✓					
Promoção do crescimento econômico	✓	✓	✓	✓			✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Desenvolvimento de tecnologia nacional	✓	✓	✓	✓		✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Integração de fontes renováveis	✓	✓	✓	✓	✓		✓			✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓
Desenvolvimento de mercado exportador				✓						✓	✓			✓		✓	✓	✓

Fonte: Adaptado de World Energy Council (2020)

Percebe-se que a maior parte dos países possuem objetivos similares como a promoção do desenvolvimento, redução das emissões e integração de fontes renováveis. No entanto, destacam-se os objetivos claros de exportação de hidrogênio nos países com elevada disponibilidade de fontes renováveis: Espanha, Ucrânia, Rússia, Austrália, Marrocos e Chile. Para esses, a exportação do hidrogênio apresenta-se como um fator adicional de promoção de crescimento econômico. Cabe ressaltar que as estratégias nacionais também apresentam enfoques setoriais específicos tais como

indústria, transportes e residências. De maneira geral, pode-se afirmar que a maior parcela das estratégias nacionais possui enfoque nos segmentos industriais de difícil descarbonização e/ou eletrificação, como é o caso das indústrias siderúrgicas, vidros planos, mineração e de cimento. Além disso, as estratégias de países asiáticos tais como o Japão, Coreia do Sul e China possuem grande enfoque no setor de transportes.

METODOLOGIA

A metodologia escolhida para este trabalho foi do tipo qualitativa e explanatória. Para atingir os objetivos propostos, foram feitas uma revisão da literatura sobre a teoria da difusão e uma análise das ações feitas pelo Governo brasileiro no que tange à difusão da energia do hidrogênio, especialmente a da última ação, por ser a mais completa e a mais importante até aqui: o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) de 2021. A partir deste tema, foram feitas as argumentações.

A difusão da energia do hidrogênio no Brasil: a jornada do Estado brasileiro

O Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) foi um marco, mas não exatamente um Programa. Tornou-se um grande centro de informações, discussões e articulações de pesquisa e desenvolvimento no setor de hidrogênio. Vários consórcios e pesquisas foram realizados, mas o centro propriamente não realiza pesquisas, apenas articula alianças com empresas e outras instituições. O principal aliado do Ceneh na realização de pesquisas é o Laboratório do Hidrogênio (LH2), instituição de pesquisa independente da Universidade Estadual de Campinas.

O Quadro 2 abaixo mostra as iniciativas do governo brasileiro para promover a energia do hidrogênio. Elas tiveram início na década de 1990 com a criação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) por meio do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI).

Quadro 2: Iniciativas no do Governos Brasileiro para a Difusão do H₂



Fonte: Elaboração própria.

Apenas em 2002 foi lançado o Programa Brasileiro de Sistemas de Células a Combustível (PROCaC), voltado para a pesquisa em células a combustível, com o objetivo de organizar uma rede de pesquisas e promover ações integradas e cooperadas, que viabilizassem o desenvolvimento nacional da tecnologia de sistemas célula a combustível. Na avaliação de Andrade e Lorenzi (2014), nada foi feito até 2005, quando o PROCaC passou a ser denominado Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH2), tendo como objetivo central o incentivo a ações capazes de impulsionar o desenvolvimento nacional da tecnologia de hidrogênio e de sistemas de célula a combustível. No mesmo ano de 2005, foi lançado um roteiro para estruturação da economia do hidrogênio no Brasil, conforme mostra a Figura 1. Refletiu o momento, no qual as fontes de energia solar e eólica não estavam tão consolidadas e por isso, não citadas.

Figura 1: Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil



Fonte: Portal Hidrogênio Verde (2022)

A última ação relacionada ao hidrogênio do Governo brasileiro partiu do Ministério de Minas e Energia (MME), que apresentou em agosto de 2021 a proposição de diretrizes para o Plano Nacional do Hidrogênio (PNH₂) aos membros do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). O estudo foi realizado em cooperação com os Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e do Desenvolvimento Regional (MDR) com apoio técnico da Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Figura 2: Eixos Temáticos que compõe o PNH₂



Fonte: PNH₂ (2021)

O PNH₂ destaca que, assim como Brasil, diversos outros países vêm apresentando estratégias para o desenvolvimento da economia de hidrogênio e o Programa almeja contribuir de forma significativa para que o País caminhe na rota do desenvolvimento sustentável com o aumento da competitividade e da participação do hidrogênio na matriz energética brasileira, tendo em vista sua importância econômica, social e ambiental para o desenvolvimento.

O Programa ressalta que no Brasil há i) potencial de recursos energéticos diversificados disponíveis (inclusive gás natural, principal insumo na produção de hidrogênio no mundo); ii) alta participação de fontes renováveis na matriz energética nacional; iii) infraestrutura de transporte de energia; iv) disponibilidade hídrica; v) base instalada de potencial consumo na indústria, para transportes, comércio, serviços e residências, bem como seu potencial de expansão, dentre outros itens. Outra ambição do PNH₂ é almejar o desenvolvimento de um mercado competitivo, considerando o potencial de demanda interna e para exportação de hidrogênio.

Quadro 3: Os Seis Eixos do PNH₂

Eixo	Objetivo
Eixo 1: Fortalecimento das Bases Científico-Tecnológicas	Mapear e aumentar as competências existentes no País para o desenvolvimento da economia do hidrogênio, bem como as lacunas a serem preenchidas.
Eixo 2: Capacitação de Recursos Humanos	Desenvolver recursos humanos nacionais com competências para planejamento, licenciamento, implantação e operação de projetos relacionados à produção, transporte, armazenamento e uso do hidrogênio
Eixo 3: Planejamento Energético	Realizar estudos de demanda e oferta existente e potencial e aprimorar sua representação e modelagem no processo de planejamento energético nacional
Eixo 4: Arcabouço Legal e Regulatório-Normativo	Mapear legislações e regulações nacionais existentes para subsidiar a inclusão do Hidrogênio, como vetor energético e combustível na matriz energética brasileira. Promover a regulação, por meio de agências governamentais, sobre produção, transporte, qualidade, armazenamento e uso do hidrogênio e suas tecnologias
Eixo 5: Abertura e Crescimento do Mercado e Competitividade	Mapear atores nacionais que já operam com aplicações de hidrogênio em serviços de energia elétrica e transportes, por exemplo, a fim de mobilizar outros <i>players</i> para adoção do uso de tecnologias do hidrogênio em outras cadeias produtivas, tais como siderurgia, fertilizantes e processos químicos
Eixo 6: Cooperação Internacional	Considerar a dimensão da cooperação internacional como elemento integral do domínio do ciclo tecnológico completo, do desenvolvimento industrial e da consolidação da economia do hidrogênio no Brasil

Fonte: Elaboração própria a partir do PNH₂ (2021)

O Programa está dividido em seis eixos principais, conforme o quadro 3 acima. Cada um deles apresenta objetivos e os meios pelos quais os objetivos devem ser alcançados. O Eixo 1, por exemplo, pretende mapear os investimentos e as iniciativas já realizadas ou em andamento no País e suas fontes de recursos, identificar instituições acadêmicas, centros de pesquisa e instituições de fomento à pesquisa e inovação atuantes e com potencial de atuação no setor, identificar empresas de tecnologia atuantes e com potencial de atuação no setor, dentre outras ações.

O PNH₂ também reconhece que a concretização do uso energético do hidrogênio como este vetor apresenta ainda significativos desafios tecnológicos e de mercado, ao longo de toda a sua cadeia energética (produção, transporte, armazenamento e consumo), impondo a necessidade de um olhar estruturado em torno do desenvolvimento deste mercado e, nesse contexto, se inserem diversas ações ao redor do mundo, em termos de planos e políticas energéticas como foco no uso de hidrogênio como um dos elementos para acelerar a transição energética em diversos Países. Os temas

financiamento e regulação são tratados, respectivamente, nos Eixos 5 e 4, e serão analisados de forma diferenciada neste trabalho.

Em 2022, o programa ganhou mais um capítulo: Resolução nº 6, de 23 de junho de 2022, do CNPE. Nele, fica evidente o interesse em desenvolver e consolidar o mercado de hidrogênio no Brasil e a inserção internacional do país, com foco nas exportações, dado o empenho de muitas nações na transição energética.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na difusão da energia do hidrogênio, o Brasil já ocupa algum cenário, embora tímido e com apenas alguns projetos-piloto e iniciativas privadas bastante debutantes, impulsionados pelo interesse de instituições estrangeiras. Hoje as principais iniciativas se concentram no Porto do Pecém, no Ceará; no Porto do Açu, no Rio de Janeiro; e no Porto de Suape, em Pernambuco. Segundo a União Nacional da Bioenergia (EMBAIXADOR, 2021), especificamente no Ceará há ao menos nove empresas já têm projetos avançados, dentre elas as australianas Energix Energy e Fortscue, a francesa Qair, a White Martins e a Neoenergia. Em setembro de 2021, a multinacional de energia portuguesa EDP, anunciou investimentos de R\$ 49,1 milhões em usina de (CHIAPPINI, 2021).

Outras empresas de energia também divulgaram em seus relatórios de sustentabilidade anuais os projetos para a energia do hidrogênio. A empresa de energia AES Brasil, em seu Relatório Integrado de Sustentabilidade (2021), iniciou em 2021 investimos em um estudo de mercado para a avaliação da aplicação do hidrogênio verde como um substituto de alto rendimento para os combustíveis fósseis. Com apoio de uma consultoria externa, a empresa entrevistou stakeholders de empresas líderes desse mercado e buscou subsídios para apoiar o desenvolvimento de uma política pública para a aceleração dessa solução. Em dezembro no mesmo ano, a empresa assinou um memorando de entendimento com o governo do Ceará para estudar a viabilidade de produção de hidrogênio verde na região. No ano anterior, também finalizaram os testes operacionais de um eletrolisador de baixo custo capaz de gerar hidrogênio a partir da água. Com isso, a empresa passou a ter subsídios para avaliar o custo de produção da molécula de hidrogênio a partir da solução desenvolvida com outras parcerias. Nos últimos dez anos, a empresa fez estudos de possibilidades e caminhos para a utilização do hidrogênio verde como uma fonte energética mais limpa e renovável. Os projetos realizados posicionam a companhia como referência para o desenvolvimento de projetos comerciais nos próximos anos.

A Neoenergia, outra empresa de energia elétrica, tem apostado que as energias limpas são o caminho para a descarbonização da economia, por isso segue na expansão de um parque renovável. Segundo o Relatório de Sustentabilidade (2021), a companhia assinou o Memorandos de Entendimento (MOU) com os governos de Pernambuco e do Ceará para o desenvolvimento de hidrogênio verde, para buscar solução de produção local de hidrogênio verde, a partir de energia solar fotovoltaica com intuito de atendimento de demanda interna de resfriamento da Neoenergia Termopernambuco, aplicação em empilhadeira industrial e em mobilidade elétrica (abastecimento veicular).

Sobre o Financiamento

Em 2005 foi liberado o primeiro montante de recursos significativos de dois milhões de reais através da FINEP, Financiadora de Estudos e Projetos (ANDREDE, LORENZI, 2015). Os

A PARTICIPAÇÃO DO BRASIL NO PROCESSO DE DIFUSÃO DA ENERGIA DO HIDROGÊNIO VERDE

valores para financiar as pesquisas são essenciais, mas partindo do princípio que o Governo tem um custo de oportunidade quanto ao orçamento e há inúmeras prioridades no País, a solução deve passar também pelo setor privado ou pela combinação público-privado, como será mostrado abaixo.

O PNH₂ afirma que a economia e o mercado brasileiro, possuem condições diversas de financiamento para energias renováveis e projetos de hidrogênio. Mas a palavra financiamento é citada apenas nos itens “h” do Eixo 5 - Abertura e Crescimento do Mercado e Competitividade: “h”. *Avaliar as necessidades e condições de financiamento de projetos* (PNH₂, 2021, p. 18).” e no “e” do Eixo 6 - Cooperação Internacional: “e”. *Identificar fontes e instrumentos de financiamento internacional, tais como fundos “verdes”, agências de cooperação* (PNH₂, 2021, p. 19).”

A ausência de financiamento na elaboração de um Programa de grande impacto econômico e social não é algo novo. A economia brasileira tem experiências de lançamento e execução de projetos que também não apresentaram proposta de financiamento, como mostraram Giambiagi e Vilela (2011) ao escreverem sobre o Programa de Metas da década de 1950, no Governo Juscelino Kubitschek: “*É importante salientar que, ao lançar o Programa, o governo se esquivou de apresentar, em paralelo, uma proposta detalhada de financiamento, preferindo procurar sua solução ao longo da execução do programa*” (GIAMBIAGI, VILLELA *et al*, 2011, p. 37).

Uma das possíveis formas de financiamento foi apresentada meses antes da apresentação do PNH₂, a Resolução nº 2, de 10 de fevereiro de 2021, que estabelece orientações sobre pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia no País e que já deu destaque ao hidrogênio no primeiro artigo, destacando a necessidade de pesquisa e inovação por parte da Agência Nacional de Energia Elétrica e a Empresa de Pesquisa Energética (ANEEL) e EPE.

Art. 1º Orientar a Agência Nacional de Energia Elétrica e a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis que, no âmbito de suas competências, priorizem a destinação dos recursos de pesquisa e desenvolvimento e inovação regulados por essas Agências, observadas a Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, e a Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, aos seguintes temas afetos ao setor de energia: I - hidrogênio; (CNPE, 2021, p.1).

Para financiar inovações na área de energia, o Governo tem usado a Lei nº 9.991/2000 (Brasil, 2000), que sujeita o setor elétrico a realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética e as obriga a aplicar, anualmente, o montante de no mínimo 1% de sua receita operacional líquida (ROL) em pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico, sendo 0,4% destinados à execução de projetos de P&D regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Essa legislação parece pesada para as empresas, dado que é aplicada sobre a receita, e não sobre o lucro, mas apresenta a vantagem que isso garante a continuidade das pesquisas. Além disso, a obrigatoriedade de investimento em inovação não é um fator que as empresas enxergam como

negativo. Pelo contrário, de acordo com Porter e Van Der Linde (1995), quando a regulamentação ambiental é bem trabalhada, ela beneficia tanto o meio ambiente, quanto a empresa.

Uma segunda forma é dada pelas debêntures incentivadas, através da Lei nº 12.431/2011 (BRASIL, 2011), conhecida como a Lei das Debêntures de Infraestrutura (DIs) que tem como objetivo o crescimento dos mercados primário e secundário, elevando a base de investidores que atuam na oferta primária e no giro do mercado secundário. A lei fornece incentivos fiscais a investidores, brasileiros e estrangeiros, que estejam dispostos a investir em títulos de crédito de projetos de infraestrutura incentivadas no mercado de títulos de longo prazo no Brasil. Wajnberg (2014) fez uma avaliação inicial da Lei 12.431/11 ao analisar as debêntures incentivadas emitidas até 2013 e seus projetos relacionados. Concluiu que a política teve boa aceitação entre os investidores e as empresas devedoras, atraindo uma gama diversificada e reduzindo o custo de captação das empresas. Mostrou que muitas empresas se mostraram interessadas nesse novo tipo de instrumento. Desde sua criação, em 2012, o volume total de emissões ultrapassou o montante de desembolsos do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), somando R\$ 24,4 bilhões, tornando as debêntures o principal instrumento de financiamento da infraestrutura, segundo dados da Associação Brasileira das Entidades dos Mercados Financeiro e de Capitais (Anbima) e do BNDES.

Uma terceira opção é via Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), que é o principal instrumento de Governo para promover investimentos de longo prazo na economia brasileira. Embora o banco já possua linha exclusiva para uma ampla gama de soluções de financiamento para projetos com fundo sustentável, o banco anunciou em julho de 2022 para fomento ao Hidrogênio Verde com o objetivo de construir fontes de financiamento que ajudem a tornar o Brasil grande exportador de energia. A iniciativa piloto incentivará a implantação de plantas no país, além de iniciativas de desenvolvimento tecnológico e as taxas de juros serão competitivas para atrair investimentos para o setor. A nova linha do BNDES começará com foco em projetos de pequeno porte, com investimento total em torno de R \$400 milhões. Já há pedidos de financiamento em análise pela área técnica do banco e deverão ser aprovados até o meio de 2023.

Sobre a Regulação

O Eixo 4 do PNH2 é sobre o arcabouço Legal-Regulatório, que tem como objetivo “mapear legislações e regulações nacionais existentes para subsidiar a inclusão do Hidrogênio, como vetor energético e combustível na matriz energética brasileira. Promover a regulação, por meio de agências governamentais” (PNH2, 2021, p. 17). Na avaliação de Machado (2021), a estrutura regulatória atualmente para o hidrogênio é inexistente. Não se tem uma segurança normativa que diga quem são os agentes que podem produzir, se precisa ou não de autorização, em quais categorias os agentes precisam se enquadrar para poder comercializar, isso pode ser interpretado como um sinal vermelho para os investidores. Certamente é necessário aprimoramentos regulatórios, como, por exemplo, a regulação da mistura do hidrogênio com gás natural na malha de gás natural, o que minimizaria a necessidade de construção de infraestrutura e custos associados.

Regular é uma forma de defender a concorrência em um mercado. A regulação dos mercados imperfeitamente competitivos constitui uma intervenção indireta feita pelo Estado, preferencialmente por meio das autoridades administrativas independentes (agências reguladoras) para assegurar o bem-estar econômico do consumidor, corrigindo as falhas do mercado³ (PINTO JUNIOR, FIANI, 2002).

O setor elétrico sofreu uma significativa mudança na década de 1990 com o objetivo de atrair capital privado e gerar competição no setor. O meio principal para atingir tal objetivo foi através do Programa Nacional de Desestatização (PND) tendo as privatizações como principal meio. No ano de 2000, o setor privado já possuía 66,75% do mercado de distribuição (FRANÇA, 2014). Mas ainda ao longo da década de 1995 vários acontecimentos moldaram o novo desenho do setor, como por exemplo, a criação em 1997 de uma agência reguladora, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), instituída pela Lei Federal nº 9.427/1996 com as competências para regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal. No entanto, ainda não se sabe se é mesmo a ANEEL que vai regular (sozinha) a energia do hidrogênio.

Para Machado (2021), quando o combustível é produzido a partir de gás natural, a competência atraída é a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Mas o hidrogênio verde é feito a partir de uma energia limpa e tem como subproduto a água. Assim, não se tem um panorama de qual agência vai regular o hidrogênio verde. Neste caso, é possível que também envolva a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

A regulamentação inexistente ou inadequada oferece riscos, inclusive associados a um entrave ao desenvolvimento do mercado, dissuadir o investimento do setor privado que fica limitada aos projetos pilotos e deixando de explorar toda a potencialidade existente.

CONCLUSÕES

A transição energética contemporânea tem como eixo principal a transformação de um sistema energético global fortemente dependente dos combustíveis fósseis para um outro de zero emissão de CO₂. A produção global está sujeita a uma transição à sustentabilidade, e a energia limpa tem um papel evidente. Já existem produções alternativas às tradicionais bastante consolidadas e a energia do hidrogênio pode figurar entre elas. Embora não seja uma inovação recente, a energia do hidrogênio tem sido impulsionada em muitos países pelo mundo, no qual é possível observar iniciativas de produção, uso e comercialização.

A difusão é um processo que vai além da disponibilidade tecnológica ou inovação disponível consolidada no mercado. Carece de muitos elementos heterogêneos de uma rede de atores (como

³ Externalidades, as assimetrias de informação e os monopólios naturais, típicos do setor de energia.

técnicos, sociais, humanos e não humanos etc.) para que a difusão funcione adequadamente. O Estado é crucial neste processo.

No Brasil as iniciativas ainda são tímidas e isoladas, partindo sobretudo das empresas multinacionais e que já produzem algum tipo de energia. O potencial brasileiro para produzir a energia do hidrogênio verde é enorme principalmente pelas condições naturais: o principal insumo da energia do hidrogênio verde é outra energia limpa, condição que é evidentemente possível no Brasil, dada a matriz elétrica. As iniciativas governamentais não datam de hoje, muito embora o principal passo tenha sido dado em 2021 com a apresentação do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂), um Programa bastante otimista quanto às estratégias para o desenvolvimento da economia de hidrogênio, mas contém falhas especialmente no que tange às fontes de financiamento e um desenho adequado do marco regulatório.

Quanto às fontes de financiamento, este trabalho mostrou que há três fontes de financiamentos: através da Lei nº 9.991/2000, que é exclusiva para empresas do setor elétrico; pela Lei nº 12.431/2011, de debêntures incentivadas e via BNDES. As formas legais são estímulos para que o setor privado possa ser inserido neste processo. Sobre regulamentação, ela é debutante, o que oferece riscos e entranha ao desenvolvimento do mercado, limitando-os a projetos-piloto. Avançar neste sentido é crucial e o país tem experiência e expertise, dada a reputação de diferentes agências de regulação do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, T., LORENZI, B. **Política energética e agentes científicos: o caso das pesquisas em células a combustível no Brasil**. Revista Sociedade e Estado - Volume 30 N. 3 Setembro/Dezembro 2015

BRASIL. Receita Federal. **Lei 12.431, de 24 de junho de 2011**. Diário Oficial da União, de 27 jun. 2011. Disponível em: Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2011/Lei/L12431.htm Acesso em: 22 de maio de 2022.

CASTRO, N.; BRAGA, S. **Perspectivas da Economia do Hidrogênio no Setor Energético Brasileiro**. TDSE Texto de Discussão do Setor Elétrico Nº 100. Disponível em https://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/39_castro_2021_07_14.pdf Acesso em 23 abril 2022.

CHIAPPINI, g. EDP anuncia investimento de R\$ 41,9 milhões em usina de hidrogênio verde no Ceará. EPBR Hidrogênio, Transição energética. Disponível em <https://epbr.com.br/edp-anuncia-investimento-de-r-419-milhoes-em-usina-de-hidrogenio-verde-no-ceara/> Acesso em 20 de outubro de 2021.

EMBAIXADOR do Brasil defende que hidrogênio verde é o melhor substituto do petróleo e carvão. **União Nacional da Bioenergia**. Disponível em <https://udop.com.br/noticia/2022/04/20/embaixador-do-brasil-defende-que-hidrogenio-verde-e-o-melhor-substituto-do-petroleo-e-carvao.html> Acesso em 23 de março de 2022

FERREIRA, J. RUFFONI. A. CARVALHO. **Dinâmica da difusão de inovações no contexto brasileiro** Rev. Bras. Inov., Campinas (SP), 17 (1), p. 175-200, janeiro/junho 2018.

FREEMAN, C. **The Determinants of Innovation: Market Demand, Technology and the Response to Social Problems**, Futures, Vol.11, No. 3 (1979), 206-215.

GIAMBIAGI, F.; VILLELA, A.; CASTRO, L.; HERMANN, J. (orgs). **Economia brasileira contemporânea: 1945-2010**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus Elsevier, 2011.

HALL, B. **Innovation and diffusion**. In: FARGERBERG, J., MOWERY, D., NELSON, R. (Ed.). The Oxford handbook of innovation. New York: Oxford University Press. 2005 (Capítulo 17).

HASENCVLEVER, L.; P. TRIGRE. **Estratégias de Inovação**. In KUPFER, D.; HASENCVLEVER, L. (Orgs). Economia Industrial Fundamentos Teóricos e Práticos no Brasil. Rio de Janeiro. Elsevier, 2002 (capítulo 18).

HYDROGEN COUNCIL. **Via de Descarbonização do Hidrogênio**. 2022. Disponível em <<https://hydrogencouncil.com/en/>> Acesso em 01 de maio 2022.

IRENA – International Renewable Energy Agency (2020). Hydrogen: A renewable energy perspective. 2020. Disponível em <http://www.irena.org/> Acesso em 25 de março 2022.

MARKARD, J; RAVEN, R; TRUFFER, F. **A Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects**. J. Markard et al. / Research Policy 41 (2012) 955–967

MAZZUCATO, M. **O Estado Empreendedor - Desmascarando o mito do setor público vs. setor privado**. São Paulo: Companhia das Letras, 2014

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro**. Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde, [s. l.], 27 out. 2021. Disponível em: https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf Acesso em: 21 fev. 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)**. Proposta de Diretrizes, [s. l.], 1 jul. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogioRelatriodiretrizes.pdf> Acesso em: 18 fev. 2022.

PINTO JUNIOR, Helder Queiroz; FIANI, Ronaldo. **Regulação Econômica**. In: KUPFER, David; HASENCEVER Lia. Economia Industrial. Rio de Janeiro: Campus, 2002. (Capítulo 22)

PORTER, M. E.; van der LINDE, C. **Toward a New Conception of the Environmentcompetitiveness Relationship**. Journal of Economic Perspectives, v. 9, n. 4, p. 97-118, 1995.

ROGERS, E. **Diffusion of Innovations**, 3rd ed. New York: Free Press, 1983.

SCHILLING, M. **Strategic management of technological innovation**. 6th edition. New York: McGraw-Hill Education, 2019 (Capítulo 9).

SCHUMPETER, J. A. **A Teoria do Desenvolvimento Econômico**. 1. ed. São Paulo: Abril Cultural, 1912.

ROHRICH, S.; PEREIRA, N. **Descarbonização do regime energético dominante: perspectivas para a economia do hidrogênio no Brasil**. BRAZILIAN OPEN JOURNAL OF ENERGY. Espaço Energia. N. 14, Abril 2011

WAJNBERG, D. **Debêntures de infraestrutura: emissões realizadas e perspectiva.** Revista do BNDES, v. 41, p. 331-378, jun. 2014.

Artigo recebido em 09/08/2022

Aprovado em 14/02/2023

VASCONCELLOS, Iraci Matos; D'AVIGNON, Alexandre; REIS, Rayane Catrinck. A Participação Do Brasil No Processo De Difusão Da Energia Do Hidrogênio Verde. Revista de economia da UEG vol. 18 n. 2 Jul/Dez (2022).