

## AVANÇOS TECNOLÓGICOS NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

**DANIELA DOLSAN LOPES ZAMPIERI**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

**CAROLINE RODRIGUES VAZ**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

**MAURICIO URIONA MALDONADO**

### **Introdução**

Nos últimos anos, a redução das emissões de gases de efeito estufa, principal responsável pelo aquecimento global, tem sido o centro das discussões mundiais sobre mudanças climáticas. Em decorrência, a descarbonização se tornou uma urgência global, na qual a transição energética configura como principal instrumento para impulsionar a transformação em direção a uma economia de baixo carbono. Espera-se uma redução da participação de combustíveis fósseis na matriz energética mundial e um aumento nas fontes de baixo carbono, além da eletrificação em processos de conversão de energia.

### **Problema de Pesquisa e Objetivo**

As emissões contínuas de GEE tendem a acelerar o aquecimento global e alterar os sistemas climáticos, aumentando a probabilidade de impactos severos e irreversíveis nos ecossistemas. Nesse contexto, o Hidrogênio Verde é indicado com uma das principais rotas para a descarbonização, trazendo à tona um novo paradigma tecnológico. Este artigo objetiva analisar na literatura a trajetória tecnológica do Hidrogênio Verde.

### **Fundamentação Teórica**

Assim como a eletricidade, o hidrogênio é uma maneira eficiente de armazenar e transportar energia. Dentre as principais formas de obtenção do hidrogênio estão: a reforma a vapor, a oxidação parcial ou reforma auto térmica de gás natural ou óleos, a gaseificação de carvão ou biomassa e a eletrólise da água (MME; EPE, 2020). Diversas rotas levam à produção de hidrogênio descarbonizado. Contudo, a rota do hidrogênio verde é a que vem dominando as iniciativas de desenvolvimento, principalmente em decorrência da queda dos custos de produção da energia elétrica renovável (CNI, 2022).

### **Metodologia**

Para alcançar o objetivo, a pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão sistemática simplificada da literatura, formando uma coletânea de 18 artigos. Para a construção da trajetória do hidrogênio foram utilizados os materiais selecionados na revisão, bem como os materiais citados pelos próprios autores da coletânea de artigos. A trajetória foi dividida em anos, em um recorte temporal de 1671 (primeira aparição datada no hidrogênio) até 2050 (perspectivas futuras de uso e aplicação do hidrogênio). Foram analisados os principais marcos e fatos históricos da trajetória do hidrogênio.

### **Análise dos Resultados**

A trajetória tecnológica demonstra que a utilização do Hidrogênio como vetor energético não é algo inovador, entretanto, a sua produção por meio de rotas tecnológicas renováveis (e.g., Hidrogênio Verde) é recente, originando um novo paradigma tecnológico. A partir da análise da coletânea de artigos, nota-se que a Europa se destaca no número de pesquisas desenvolvidas. Pode-se inferir que isso ocorre, principalmente, por conta dos fatos históricos ocorridos nos últimos anos. Há nível maior de pesquisas que tratam o tema de Hidrogênio globalmente, com uma lacuna nos níveis nacional e regional.

### **Conclusão**

Ao comparar a trajetória tecnológica com a Curva "S" de difusão tecnológica proposta por Perez (2010), fica claro que o hidrogênio verde representa uma inovação radical, embora ainda esteja em um nível inicial de maturidade. A trajetória está em aberto, apresentando diversas possibilidades tanto na produção (rotas tecnológicas) quanto no armazenamento, transporte e uso final. Para impulsionar e fomentar o desenvolvimento, é essencial implementar políticas públicas de incentivo, permitindo que o mercado defina a trajetória e a tecnologia progrida em direção às fases futuras.

### **Referências Bibliográficas**

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI. Hidrogênio Sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira. Brasília: CNI, 2022. 137 p. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio: revisão 1. 2021. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME/EPE, 2020. 227 p. PEREZ, C. Technological revolutions and techno-economic paradigms. Cambridge Journal of Economics, v. 34, p. 185-202, 2010.

### **Palavras Chave**

Hidrogênio Verde, Trajetória Tecnológica, Paradigma Tecnológico

# AVANÇOS TECNOLÓGICOS NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

## 1 INTRODUÇÃO

Durante toda a sua história geológica, o planeta passou por diversas variações climáticas. Porém, estudos científicos demonstram que as mudanças mais recentes são resultado do aumento da temperatura na Terra, o chamado aquecimento global, causado pelas atividades antrópicas que geram gases de efeito estufa (GEE), que estão presentes, principalmente, no consumo de combustíveis fósseis como petróleo, carvão mineral e gás natural (SCHUCHOVSKI; LEITE, 2021).

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2014), as emissões contínuas de GEE tendem a acelerar o aquecimento global e alterar os sistemas climáticos, aumentando a probabilidade de impactos severos e irreversíveis nos ecossistemas.

O Acordo de Paris, ratificado por 195 países, em dezembro de 2015 na COP 21, previu a redução das emissões de gases de efeito estufa, em resposta à ameaça da mudança climática mundial e a consolidação do desenvolvimento sustentável das principais economias mundiais (IRENA, 2019).

Como consequência, a descarbonização se tornou um imperativo global. Atualmente, os países estão passando pela chamada transição energética, que de acordo com o Plano Nacional de Energia 2050 (MME; EPE, 2020), é caracterizada especialmente pela descarbonização das matrizes energéticas, descentralização dos recursos energéticos e digitalização na produção e uso da energia.

A transição energética consiste em processos de transformações em direção à economia de baixo carbono. Espera-se uma redução da participação de combustíveis mais intensos em emissões de GEE na matriz energética mundial e um aumento nas fontes de baixo carbono (renováveis), além da eletrificação em processos de conversão de energia (MME; EPE, 2020).

Dentro desse contexto, o Hidrogênio surge como uma grande aposta para a transição energética mundial, devido a sua capacidade de produzir e armazenar grande quantidade de energia por unidade de massa. Especificamente, a rota tecnológica verde do Hidrogênio é a de maior relevância internacional, devido à baixa pegada de carbono (ZOHURI, 2019; MME; EPE, 2020).

Segundo o Relatório *Global Hydrogen Review* (IEA, 2022), a demanda mundial por Hidrogênio atingiu mais de 94 milhões de toneladas em 2021, com emissão de mais de 900 Mt CO<sub>2</sub>. Do montante produzido, menos de 1 Mt foi referente a hidrogênio de baixo carbono e apenas 35 kt de hidrogênio verde, produzido por meio da eletrólise da água. Apesar da representação do hidrogênio verde ainda ser pequena, já foi registrado um aumento de 20%, quando comparado a 2020. Isso reflete a demanda por esse tipo de tecnologia.

Estudo realizado pela Irena (2019) estima que, para alcançar as metas globais de descarbonização, as emissões de GEE relacionadas à energia precisam reduzir cerca de 52% abaixo do nível de 2019, até 2040, uma vez que o setor energético corresponde a aproximadamente dois terços das emissões globais. Essas metas de redução de emissões, relacionadas principalmente aos impactos ambientais, incentivam o desenvolvimento de pesquisas acerca de tecnologias para produção e aplicação do hidrogênio em diferentes setores. Nesse sentido, o hidrogênio é apontado como uma das principais soluções para descarbonizar setores de difícil redução de emissões (*hard-to-abate*), considerado fundamental para a eletrificação e descarbonização da indústria e meios de transporte (PARRA *et al.*, 2019).

Diante do exposto, nota-se que as mudanças climáticas e a necessidade de redução das emissões de CO<sub>2</sub> criam espaço para um novo paradigma tecnológico: o Hidrogênio Verde. Dessa forma, pretende-se, com essa pesquisa, analisar na literatura a trajetória tecnológica do Hidrogênio Verde.

Este artigo está dividido em cinco partes: a seção 1, introdutória, visa justificar a pesquisa; a seção 2, teórica, utiliza revisão da literatura para conceituar o tema; a seção 3, metodológica, apresenta as estratégias para a condução da pesquisa; a seção 4, apresenta os resultados e discussões; e, ao final, a seção 5, aponta as conclusões da pesquisa.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Nesta seção são apresentados os conceitos teóricos de base para a condução do artigo, abordando os temas de inovação tecnológica e hidrogênio verde.

### **2.1 INOVAÇÃO TECNOLÓGICA**

Segundo o Manual de Oslo, o termo “inovação” é um produto ou processo – novo ou aprimorado (ou uma combinação de ambos) – que difere significativamente dos anteriores e que precisa ser implementada, ou seja, disponibilizada para usuários em potencial (OCDE, 2018). De acordo com Schumpeter (1984), para um produto, processo ou serviço ser considerado como inovação, estes devem gerar resultados econômicos, que podem ser medidos pela aceitação pelo mercado.

As inovações permitem o aumento da riqueza das nações, no sentido de aumento da prosperidade, sendo fundamentais para acelerar ou sustentar a taxa de crescimento econômico. Além disso, são determinantes para a conservação dos recursos naturais a longo prazo e para a melhoria do meio ambiente (FREEMAN; SOETE, 2008).

Freeman e Perez (1988) dividem as inovações em quatro tipos: inovação incremental, inovação radical, novos sistemas tecnológicos e mudanças nos paradigmas tecno econômicos.

As inovações incrementais ocorrem continuamente em qualquer tipo de indústria ou serviço e dependem de pressões da demanda, fatores socioculturais e oportunidades tecnológicas. Também ocorrem por conta de pequenas melhorias advindas dos centros de atividades focadas em pesquisa e desenvolvimento (FREEMAN; PEREZ, 1988).

Já uma inovação radical, segundo Perez (2010), é normalmente introduzida em uma primeira versão da tecnologia e uma vez que o mercado passa a aceitar esta nova invenção, ela está sujeita a inovações radicais, seguindo uma trajetória tecnológica.

Os sistemas tecnológicos, por sua vez, são definidos por Perez (2010) como constelações que englobam inovações radicais e incrementais, que acabam se interrelacionando técnica e economicamente, gerando impactos econômicos, com oportunidade de crescimento para novos setores.

#### **2.1.1 Paradigma Tecnológico e Trajetória Tecnológica**

O termo “paradigma” foi proposto ainda na década de 1940, pelo sociólogo Robert Merton. Quando Kuhn aplicou essa ideia em um estudo para evolução da teoria científica, em 1962, o conceito de paradigma foi amplamente difundido. Foi então que Dosi utilizou o paradigma em seus estudos de inovação tecnológica, propondo uma definição (KUHN, 2012; DOSI, 1982).

Assim, Dosi (1982) definiu "paradigma tecnológico" como um modelo e um padrão de solução de problemas tecnológicos, baseado em princípios derivados das ciências naturais e em tecnologias materiais. Assim, o paradigma define um novo padrão tecnológico, com características distintas do paradigma anterior, que orientam as prováveis “novas trajetórias tecnológicas”, que permitem à sociedade escolhas de rumos e tendências. Trata-se de um processo com parâmetros norteadores, que levam a um número limitado de alternativas factíveis.

Nesse contexto, Perez (2010) traz o conceito de revolução tecnológica, que é definida como um conjunto de tecnologias, produtos e indústrias novas e dinâmicas, que alteram as bases econômicas e impulsionam uma onda de desenvolvimento de longo prazo. Assim surge o conceito de paradigma tecno econômico, que é um modelo de prática ideal constituído por um conjunto de princípios tecnológicos e organizacionais genéricos, que representam a forma de aplicar a revolução tecnológica e modernizar a economia.

Em seu estudo, Dosi (1982) ainda argumenta que a busca de soluções para determinados problemas tecnológicos tende a se concentrar em soluções já conhecidas e no aperfeiçoamento dos conhecimentos relevantes. Assim, ele caracteriza esse conjunto de conhecimentos como um “paradigma tecnológico”. Um paradigma tecnológico tende a ser superado pelo surgimento de novos e superiores paradigmas e a evolução dessas diferentes tecnologias para a solução de problemas constitui a “trajetória tecnológica”.

Contudo, sistemas tecnológicos modernos estão embutidos em estruturas institucionais existentes e a interação entre fatores tecnológicos e institucionais tornam as mudanças mais complicadas (HUGHES, 1983; BENTO, 2010).

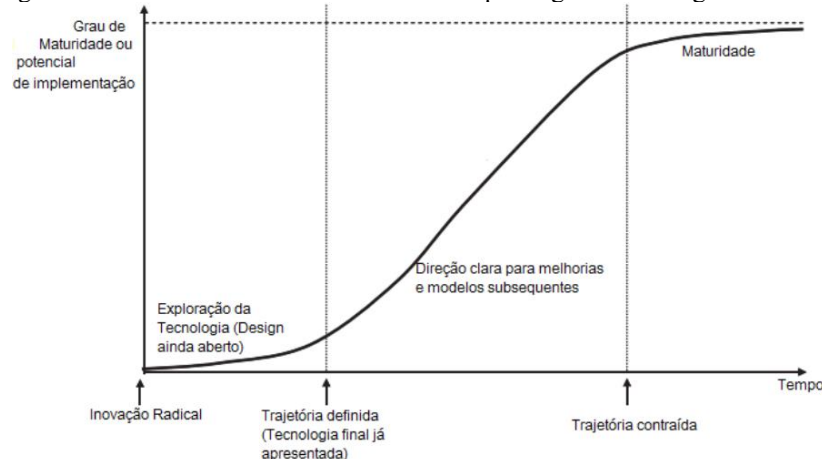
Os avanços tecnológicos ao longo da trajetória são influenciados por impulsos originados no mercado, como mudanças relativas na demanda de bens e na lucratividade de produção. De tal modo, a busca de novas direções tecnológicas surge pelas novas oportunidades proporcionadas pelo desenvolvimento científico ou pela dificuldade tecnológica e/ou econômica em prosseguir em uma determinada direção (DOSI, 1982).

A fase inicial de estabelecimento de um novo paradigma é caracterizada pela variedade de opções para possíveis aplicações, o que leva a um ambiente de concorrência “schumpeteriana”. Na fase seguinte, o mercado seleciona uma “trajetória tecnológica” específica, que tende a levar o setor a uma “maturação oligopolística”, onde o avanço da tecnologia se torna um elemento fundamental na estratégia competitiva das empresas (DOSI, 1982).

Segundo Nelson e Winter (2005), a trajetória tecnológica apresenta um impulso próprio, o que contribui para definir as direções em que determinada atividade, instituída para a resolução de um problema, se move. Porém, a resistência de firmas instaladas, cujos interesses estão ligados ao paradigma dominante, pode atrasar a adoção de novas tecnologias (MURPHY; EDWARDS, 2003). De acordo com Jacobsson e Johnson (2000), políticas que visam promover a variedade tecnológica, como subsídios para P&D, podem reduzir as barreiras impostas ao desenvolvimento de novos sistemas.

Nesse contexto de inovação, é importante relacionar o trabalho de Perez (2010), em que a autora traz a curva “S” de difusão tecnológica e paradigmas tecno econômicos (Figura 1).

Figura 1 – Curva “S” do modelo de difusão e paradigmas tecnológicos



Fonte: Adaptado de Perez (2010, p. 187).

Perez (2010) explica que as mudanças durante a difusão tecnológica costumam ocorrer de forma lenta no começo, enquanto os produtores, distribuidores e consumidores se comprometem em aprender mais sobre o processo. Uma vez atingido um design dominante, que se consolida no mercado, a tecnologia se difunde rápida e intensivamente e, quando atinge a maturidade, a inovação passa a crescer em margens decrescentes.

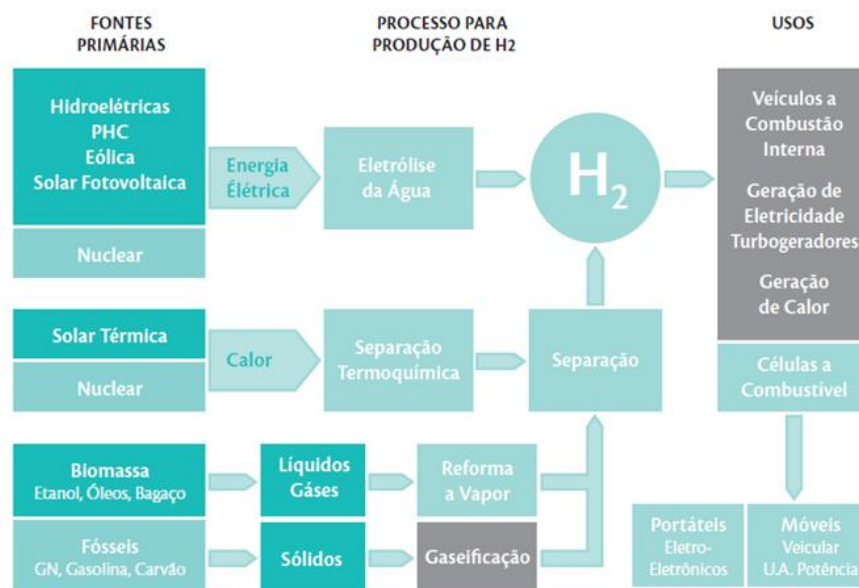
## 2.2 HIDROGÊNIO VERDE

Assim como a eletricidade, o hidrogênio é uma maneira eficiente de armazenar e transportar energia. Dentre as principais formas de obtenção do hidrogênio estão: a reforma a vapor, a oxidação parcial ou reforma auto térmica de gás natural ou óleos, a gaseificação de carvão ou biomassa e a eletrólise da água (MME; EPE, 2020).

Atualmente, a maior parte da produção de hidrogênio provém de fontes de energia fósseis, com alta emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Porém, existe uma grande quantidade de rotas tecnológicas para produção, transporte e estocagem de hidrogênio sem emissões de GEE. Com isso, o hidrogênio e os combustíveis à base de hidrogênio se tornaram uma das grandes alternativas disponíveis para a transição para uma economia de baixo carbono (MME; EPE, 2020; MCKINSEY&COMPANY, 2021; CNI, 2022).

Apesar de abundante, o hidrogênio não é encontrado na natureza na forma livre. Para ser produzido, é necessário passar por algum processo, uma vez que, normalmente, ele se encontra ligado a algum outro elemento ou composto químico. Assim, o hidrogênio pode ser produzido a partir de diversas matérias-primas e por meio de diferentes rotas tecnológicas. Na Figura 2 são apresentadas as principais rotas, desde a produção até o uso do hidrogênio (CGEE, 2010; EPE, 2021).

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



Fonte: CGEE (2010, p. 11).

Conforme exemplificado na Figura 2, o início da cadeia de produção do hidrogênio se dá a partir das fontes primárias de energia utilizadas (elétrica, calor, biomassa ou fósseis), que levam a diferentes processos de produção. Em termos gerais, a energia elétrica é utilizada no processo de produção a partir da eletrólise da água. Na fonte primária de calor, o processo de produção ocorre com a separação termoquímica. Através da biomassa e combustíveis fósseis, o hidrogênio é produzido por meio de reforma a vapor e gaseificação, respectivamente. Com

relação ao seu uso como vetor energético, pode se destacar a utilização em veículos (e.g. células a combustível), e na geração de energia e de calor.

Além das rotas tecnológicas apresentadas na Figura 2, também é possível realizar a classificação do Hidrogênio por cores, que leva em consideração a origem de produção e do eventual acoplamento de tecnologias de captura, utilização e sequestro de carbono (CCUS – *Carbon Capture Utilization and Storage*). Ainda há uma ausência de uniformização, porém a estratégia arco-íris é defendida pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE (CNI, 2022).

De acordo com essa classificação, o hidrogênio preto e marrom são produzidos por gaseificação do carvão mineral (sem CCUS); o hidrogênio cinza e azul são produzidos por reforma a vapor do gás natural (sem CCUS) – eventualmente o hidrogênio azul também pode ser produzido por meio de outros combustíveis fósseis; hidrogênio verde é produzido via eletrólise da água, com energia proveniente de fontes renováveis (eólica, solar e hídrica); hidrogênio branco é produzido por meio da extração de hidrogênio natural ou geológico; hidrogênio turquesa é produzido por pirólise do metano, sem gerar CO<sub>2</sub>; hidrogênio musgo é produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa (com ou sem CCUS); hidrogênio rosa é produzido com fonte de energia nuclear (EPE, 2021).

Diversas rotas levam à produção de hidrogênio descarbonizado: hidrogênio verde, hidrogênio azul, hidrogênio turquesa, hidrogênio musgo e hidrogênio rosa. Contudo, a rota do hidrogênio verde é a que vem dominando as iniciativas de desenvolvimento do mercado de hidrogênio sustentável, principalmente em decorrência da queda dos custos de produção da energia elétrica renovável (CNI, 2022).

De acordo com a International Energy Agency (2023), o uso de terminologias que se baseiam em cores para descrever diferentes tecnologias de produção do hidrogênio, ou termos como "sustentável", "baixa emissão de carbono" ou "limpo" para diferenciá-lo da produção baseada em combustíveis fósseis não capturados, tem se mostrado pouco prática em contratos que fundamentam investimentos.

Definir o hidrogênio com base na intensidade das emissões de gases de efeito estufa de sua produção, pode ajudar a fornecer clareza aos desenvolvedores de projetos e investidores sobre a intensidade de emissões do produto e sua conformidade com os requisitos regulatórios e de mercado. Além disso, isso pode permitir um certo nível de interoperabilidade das regulamentações entre diferentes países e possibilitar o reconhecimento mútuo de esquemas de certificação, o que pode reduzir a fragmentação do mercado. Contudo, ainda não há um acordo internacional sobre o uso desses termos (IEA, 2023).

### **3 METODOLOGIA**

Nesta seção, apresenta-se a classificação da pesquisa e os procedimentos metodológicos adotados, com a descrição dos métodos e ferramentas utilizadas para alcançar os objetivos traçados.

#### **3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA**

A presente pesquisa pode ser classificada sob três prismas: natureza, abordagem do problema e objetivos. Do ponto de vista de sua natureza, é considerada básica, pois envolve novos conhecimentos, porém sem aplicação prática prevista. Em relação a abordagem do problema, a pesquisa é dita como qualitativa, por se preocupar com aspectos da realidade que não podem ser quantificados. E por fim, do ponto de vista dos objetivos, a pesquisa é classificada como exploratória, pois tem como principal objetivo facilitar a proximidade com o problema e torná-lo mais acessível (GIL, 2002; SILVA; MENEZES, 2005).

## 3.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Para estruturar a pesquisa e atingir os objetivos, utilizou-se como método um modelo simplificado de revisão sistemática da literatura, com base no método SYSMAP (VAZ; URIONA-MALDONADO, 2017). Dessa forma, optou-se por utilizar apenas três fases: i) construção da coleção a ser analisada; ii) filtragem para seleção dos artigos relevantes e, iii) sistemática para realizar análise de conteúdo.

Na primeira fase, de construção, definiu-se as palavras-chave e a base de dados para busca. Na segunda fase, de filtragem, identificou-se os artigos enquadrados no tema de pesquisa, realizando a seleção dos mais relevantes. Nesta fase, foram incluídos materiais não constantes na base de dados, que foram considerados importantes para a pesquisa. Assim, formou-se a coletânea de artigos. Na última fase, realizou-se a análise do conteúdo dos artigos selecionados na fase dois.

Neste artigo, utilizou-se a classificação do Hidrogênio por cor, sendo o Hidrogênio Verde aquele produzido a partir da eletrólise da água, com o uso de energias renováveis (eólica, solar e hídrica), conforme explicado por Serra *et al.* (2023).

Para a construção da trajetória do hidrogênio foram utilizados os materiais selecionados na revisão sistemática simplificada, bem como os materiais citados pelos próprios autores da coletânea de artigos. A trajetória foi dividida em anos, em um recorte temporal de 1671 (primeira aparição datada no hidrogênio) até 2050 (perspectivas futuras de uso e aplicação do hidrogênio). Por meio da leitura dos materiais selecionados, foram analisados os principais marcos e fatos históricos que impulsionaram e determinaram a formação dessa trajetória.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados da pesquisa em três tópicos. No primeiro, com base na revisão da literatura, descreve-se a trajetória do hidrogênio ao longo do tempo. Na segunda parte, apresentam-se os resultados da revisão sistemática simplificada da literatura, com um compilado dos conteúdos presentes na coletânea de artigos.

### 4.1 REVISÃO SISTEMÁTICA SIMPLIFICADA DA LITERATURA

Para a construção da coleção de artigos, optou-se por utilizar a base de dados *Scopus*. A pesquisa se deu em duas etapas, para atender aos objetivos de pesquisa definidos. Foram utilizadas a combinação de duas palavras-chave, com seus respectivos sinônimos, sem restrição temporal. Na primeira etapa, utilizou-se as palavras “*hydrogen*” AND “*technological paradigm*” e na segunda, as palavras “*hydrogen*” AND “*Brazil*”.

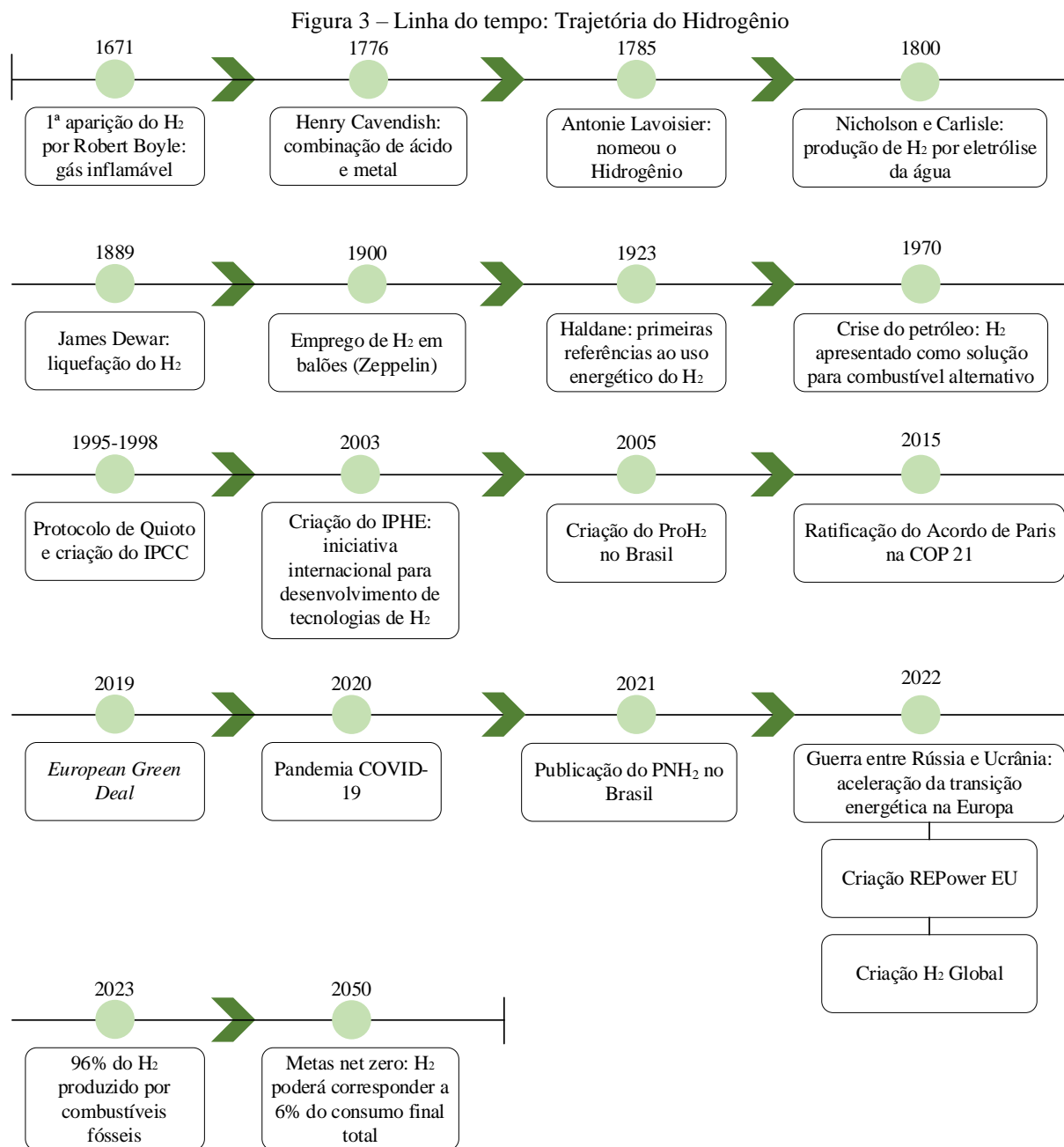
A partir das palavras-chave definidas, obteve-se um total de 108 artigos na primeira pesquisa e 35 artigos na segunda. Realizou-se um primeiro filtro por área de disciplina, selecionando as que teriam maior relação com o tema do presente artigo (*Energy; Engineering; Environmental Science; Business, Management and Accounting; Social Sciences; Economics, Econometrics and Finance*). Com isso, reduziu-se o número de artigos para 93 na primeira pesquisa e 30 na segunda.

Finalizada a fase um, iniciou-se a fase dois do método, com a filtragem dos artigos pelos títulos e resumos, selecionando aqueles com maior aderência à pesquisa. Obteve-se um total de 13 artigos na primeira pesquisa e 3 artigos na segunda. Para complementar a coletânea de artigos, foram incluídos dois materiais de literatura cinzenta – que não passaram por processo de revisão por pares – considerados relevantes para o tema pesquisado.

Por fim, na última fase, foi realizada a leitura da coletânea selecionada – total de 18 artigos – com o objetivo de analisar o conteúdo sob o prisma da pesquisa.

## 4.2 TRAJETÓRIA DO HIDROGÊNIO: UMA LINHA DO TEMPO

Neste tópico são detalhados os principais acontecimentos que marcam a trajetória tecnológica do hidrogênio. A Figura 3, a seguir, sintetiza os principais pontos abordados ao longo do texto.



Fonte: Autoria própria (2023).

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante no universo, constituindo aproximadamente 75% de toda a matéria normal. A maior parte de hidrogênio existente na Terra se encontra em formas moleculares, como na água e em compostos orgânicos (principalmente hidrocarbonetos) (UNEP, 2006).



Atualmente, ele é utilizado como matéria prima na síntese de diversos produtos e processos industriais. Porém, seu uso como vetor energético é conhecido há bastante tempo (MME; EPE, 2020).

A primeira aparição do Hidrogênio foi datada em 1671, quando Robert Boyle obteve o gás durante um experimento com ferro e ácidos. Ele descreveu a reação como “Novas experiências explorando a relação entre a chama e o ar” e chamou esse gás de “gás de solução inflamável de ferro” (KHALILPOUR *et al.*, 2020; CHANTRE *et al.*, 2023).

Quase um século depois, em 1766, Henry Cavendish produziu novamente este gás por meio da combinação entre um ácido e um metal. Ele o reconheceu como um elemento distinto e nomeou-o como “ar inflamável”. Porém, foi somente em 1785, quando Antoine Lavoisier reproduziu o experimento de Cavendish, que o gás recebeu o nome de Hidrogênio, composto pelas palavras gregas “*hydro*” e “*genes*” (nascido da água) (KHALILPOUR *et al.*, 2020).

Nicholson e Carlisle, em 1800, realizaram a primeira produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água. Alguns anos depois, Robert Grove construiu a primeira célula a combustível, precursora das utilizadas neste século, para reconversão de hidrogênio em energia elétrica. A liquefação do hidrogênio foi obtida por James Dewar, em 1889. Em 1900, Ferdinand von Zeppelin inventou o Zeppelin, um tipo de dirigível rígido, que fazia o uso de hidrogênio para flutuar. Foi utilizado amplamente entre os anos de 1920 e 1930 (DAWOOD *et al.*, 2020; CHANTRE *et al.*, 2023).

O uso do hidrogênio como possível vetor energético teve umas das primeiras referências feitas por Haldane, em uma palestra na Universidade de Cambridge, em 1923. Ele defendeu o potencial do hidrogênio como combustível do futuro e antecipou a utilização de fontes renováveis para a sua produção (CHANTRE *et al.*, 2023).

Além dos relatos de descoberta e desenvolvimento na utilização do hidrogênio ao longo dos anos, alguns fatos históricos merecem destaque, uma vez que eles elucidam a trajetória até o chamado “Hidrogênio Verde”.

Seguindo os fatos históricos, de acordo com Lima *et al.* (2014), o hidrogênio foi apresentado como uma possível solução energética ainda nos anos 1970, devido ao aumento nos custos dos combustíveis fósseis, ocasionado pela primeira grande crise no petróleo.

Em 1995, ocorreu a primeira Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), COP 1 em Berlim, na qual se iniciou o processo de negociação para redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) pelos países desenvolvidos. Foi em 1997, na COP 3 em Quioto, que foi criado o chamado Protocolo de Quioto, que definiu as metas de redução de GEE. Um ano depois, em 1998, foi criado o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), que tem como objetivo fornecer, em escala global, conhecimento científico sobre as mudanças climáticas e seus potenciais impactos socioeconômicos e ambientais (UNFCCC, 1997).

No desenvolvimento da Economia do Hidrogênio, a criação do IPHE (*International Partnership for Hydrogen and Fuel Cell in the Economy*), em 2003, foi um importante marco. Trata-se de uma parceria intergovernamental, formada por 21 países-membros e a Comissão Europeia, que compartilham informações e promovem pesquisa e desenvolvimento na introdução de hidrogênio e tecnologias de células a combustível em escala global. Dentre os países membro, pode-se destacar Austrália, Brasil, Chile, Estados Unidos, França, Holanda, Japão, Reino Unido e União Europeia (BRANQUINHO *et al.*, 2023).

No Brasil, em 2005, foi criado o ProH<sub>2</sub> (Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio), com o objetivo de promover ações para impulsionar o desenvolvimento nacional das tecnologias de hidrogênio e célula a combustível (CGEE, 2010).

Outro importante fato histórico impulsionador para o desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono, como o hidrogênio verde, foi a COP 21, em 2015. Nela, foi ratificado o chamado Acordo de Paris. O Acordo previu a redução das emissões de gases de efeito estufa,

em resposta à ameaça da mudança climática mundial. Para isso, os países signatários se comprometeram em agir para manter o aumento da temperatura média global abaixo dos 2°C e limitar o aumento da temperatura em 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais (IRENA, 2019).

Com a ratificação do Acordo de Paris, houve um aumento na preocupação dos países signatários quanto às mudanças climáticas. Em 2019 foi publicado o *European Green Deal*, que estabeleceu metas de emissão zero carbono até 2050. No ano seguinte, em 2020, a Comissão Europeia publicou documentos que definem estratégias, das quais o hidrogênio é o investimento prioritário para atingir as metas do Acordo de Paris e da neutralidade climática do *European Green Deal* (ELIZIÁRIO *et al.*, 2023).

Ainda em 2020, foi declarada uma pandemia mundial, a COVID-19, na qual se vivenciou um período de recessão econômica mundial.

Em 2021 ocorreu a retomada econômica pós-pandemia. Nesse cenário, houve um forte investimento Europeu em Pesquisa e Desenvolvimento para acelerar a transição energética. Diversos países também apostaram nessa estratégia, por considerar a transição energética um mecanismo para o crescimento econômico (PEREIRA, 2022).

No mesmo ano, foi publicada no Brasil a proposta de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>), com atividades previstas para os anos de 2023 e 2025. O programa tem como princípio o desenvolvimento conjunto de três pilares fundamentais para a economia do hidrogênio: políticas públicas, tecnologia e mercado. Dessa forma, o Programa se estrutura em seis eixos: i) Fortalecimento das bases Tecnológicas; ii) Capacitação e recursos humanos; iii) Planejamento Energético; iv) Arcabouço Legal – Regulatório; v) Crescimento do Mercado e Competitividade; vi) Cooperação Internacional (MME, 2021).

A guerra entre Rússia e Ucrânia, no início de 2022, mudou as condições gerais para o comércio internacional de energia da União Europeia, devido à alta dependência do gás natural Russo. Frente a essa situação, a importância relativa aos custos do hidrogênio verde em comparação a outros combustíveis diminuiu consideravelmente diante da urgência de adotar soluções energéticas inovadoras. Essa necessidade iminente levou à aprovação de novas políticas públicas pela União Europeia, nas quais tanto o hidrogênio verde quanto o de baixo carbono têm grande importância (BRAUER, *et al.*, 2022).

Nesse contexto, em maio do mesmo ano, foi criado *REPowerEU*, que visa reduzir a dependência Europeia dos combustíveis fósseis importados da Rússia até 2030 e acelerar a transição energética. Dentre as medidas estabelecidas, inclui-se, no curto prazo, investimento na diversificação das formas de energia, incluindo implantação de projetos de energia solar e eólica, combinados com a implantação de hidrogênio renovável (BRAUER *et al.*, 2022; BRANQUINHO *et al.*, 2023).

Outro importante marco foi a criação do H<sub>2</sub>Global. Trata-se de um instrumento projetado para acelerar o mercado de PtX (*power-to-x*) em grande escala por meio da competição. Atualmente, há uma falha de mercado devido ao investimento insuficiente na capacidade de produção e à falta de fontes de energia neutras em relação ao clima. Para enfrentar isso, uma empresa intermediária estabelece contratos de compra de longo prazo para o fornecimento e contratos de venda de curto prazo para a demanda. Por meio de um mecanismo semelhante a Contratos por Diferença, a diferença de preço entre oferta e demanda é compensada por doações de um órgão de financiamento público ou filantrópico. O objetivo é fornecer a segurança de investimento necessária para estimular investimentos em larga escala e catalisar o crescimento da economia do hidrogênio (H<sub>2</sub>Global Stiftung, 2022).

Em 2023, 96% do hidrogênio utilizado ainda é gerado a partir da reforma a vapor de combustíveis fósseis, principalmente gás natural e carvão, sem captura de CO<sub>2</sub> e a maioria é produzida localmente nas indústrias (CHANTRE *et al.*, 2023).

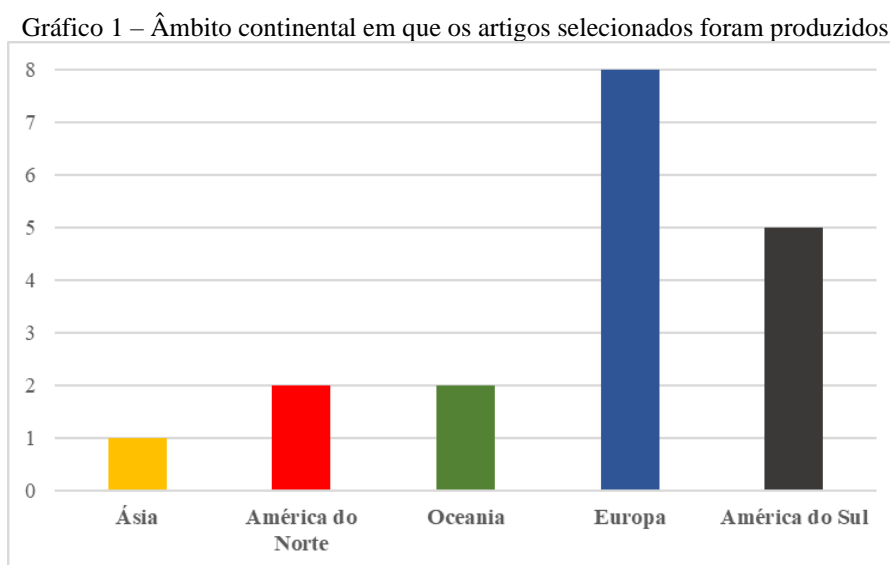
Certamente, o hidrogênio limpo exercerá papel fundamental no sistema energético futuro, principalmente na descarbonização dos setores de difícil redução de emissões e que não podem ser eletrificados, os chamados setores “*hard-to-abate*” (PARRA *et al.*, 2019; SAZALI *et al.*, 2020).

Para 2050, alguns estudos estimam que o Hidrogênio corresponderá a 6% do consumo final total de energia (IRENA, 2019). Já o Hydrogen Council (2017) prevê uma adoção mais acelerada de hidrogênio, cerca de 18% da demanda final de energia. Outros estudos estimam uma redução de até seis bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, até 2050 com a utilização de hidrogênio, além de uma movimentação econômica de US\$2,5 trilhões (HYDROGEN COUNCIL, 2021).

#### 4.3 ANÁLISE DA COLETÂNEA DE ARTIGOS

Neste tópico é realizada uma análise da coletânea composta por 18 artigos. As análises foram realizadas com dois focos: um quanto ao âmbito continental em que as pesquisas foram desenvolvidas; outro quanto ao foco setorial das pesquisas (regional, nacional ou global)

Do número total, oito artigos foram desenvolvidos por países Europeus, cinco por países da América do Sul, dois por países localizados na Oceania e na América do Norte e um artigo conduzido na Ásia. O Gráfico 1 sintetiza as informações coletadas.

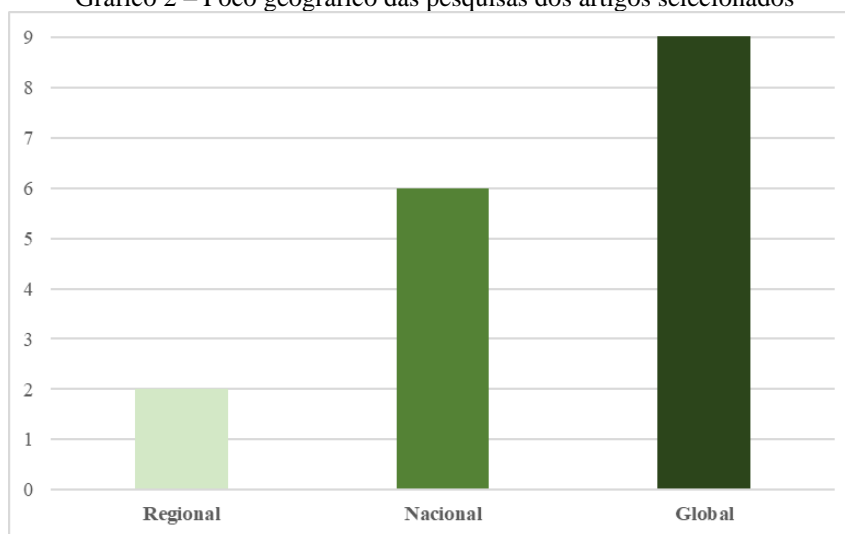


Fonte: Autoria própria (2023).

Ao analisar o Gráfico 1, mesmo com um número reduzido de artigos, nota-se que a Europa se destaca no número de pesquisas desenvolvidas. Pode-se inferir que isso ocorre, principalmente, por conta dos fatos históricos ocorridos nos últimos anos, como as mudanças climáticas, acordos internacionais para neutralidade na emissão de GEE, guerra entre Rússia e Ucrânia (ver item 4.2 para mais detalhes), o que tem direcionado os países Europeus a buscarem uma fonte de energia alternativa para suprir a sua demanda.

Os artigos também foram analisados quanto ao foco setorial das pesquisas, como pode ser visualizado no Gráfico 2. Dos dezoito artigos analisados, dez trataram do tema de Hidrogênio Verde no âmbito global, seis em nível nacional e dois em nível regional.

Gráfico 2 – Foco geográfico das pesquisas dos artigos selecionados



Fonte: Autoria própria (2023).

Há um alto nível de pesquisas que tratam o tema de Hidrogênio a nível global. Pode-se relacionar esse resultado à perspectiva de alta demanda do produto no mercado Europeu, o que leva ao desenvolvimento de pesquisas em níveis globais. Dessa forma, promove-se o mercado internacional e incentiva-se os países com potencial de produção e exportação de Hidrogênio Verde para a Europa a desenvolverem a tecnologia.

Já nos níveis nacionais e regionais, nota-se uma lacuna nas pesquisas. Quando se fala em Hidrogênio Verde, é necessário fomentar o desenvolvimento de pesquisas no nível nacional e regional, devido às singularidades de cada região, como matriz elétrica renovável e capacidade de produção, além das diferentes oportunidades de mercado, como consumo interno do Hidrogênio e capacidade para exportação.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mediante uma análise simplificada e sistemática da literatura, traçou-se a trajetória tecnológica do hidrogênio, desde sua descoberta até os dias atuais. Embora o uso do hidrogênio não seja uma novidade, existe um conhecimento acumulado sobre seu potencial como vetor energético. No entanto, esse progresso tecnológico esteve ligado à produção de hidrogênio a partir de fontes de energia fósseis, resultando na emissão de gases de efeito estufa.

O cenário de mudanças climáticas globais e a urgência em descarbonizar os sistemas energéticos abrem espaço para um novo paradigma tecnológico: o hidrogênio verde. Ao comparar a trajetória tecnológica com a Curva "S" de difusão tecnológica proposta por Perez (2010), fica claro que o hidrogênio verde representa uma inovação radical, embora ainda esteja no primeiro quadrante do gráfico, indicando um nível inicial de maturidade.

A análise dos artigos revela que a tecnologia relacionada ao hidrogênio verde globalmente está em fase de exploração tecnológica, carecendo de um design dominante. A trajetória está em aberto, apresentando diversas possibilidades tanto na produção (rotas tecnológicas) quanto no armazenamento, transporte e uso final.

No Brasil, assim como no cenário global, o desenvolvimento do hidrogênio verde segue um padrão semelhante à Curva "S" de difusão. Para impulsionar e fomentar o desenvolvimento do hidrogênio verde, é essencial implementar políticas públicas de incentivo, permitindo que o mercado defina a trajetória e a tecnologia progreda em direção às fases futuras, até atingir a maturidade desejada.

Desta forma, este trabalho deixa reflexões para pesquisas futuras: i) como as políticas, regulamentações e iniciativas governamentais relevantes podem impulsionar ou dificultar a adoção do hidrogênio verde no país; ii) como identificar tendências, lacunas de conhecimento e áreas de oportunidade que possam informar estratégias futuras para o desenvolvimento sustentável do hidrogênio verde no Brasil; iii) como a colaboração entre setores público e privado, bem como parcerias internacionais podem desempenhar um papel fundamental no avanço dessa tecnologia nos próximos anos.

## REFERÊNCIAS

BENTO, N. Is carbon lock-in blocking investments in the hydrogen economy? A survey of actor's strategies. **Energy Policy**, 2010. p. 7189-7199. 2010.

BRANQUINHO, A. *et al.* Modelos regulatórios e financiamento. In: CASTRO, N. de *et al* (org.). **A Economia do Hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro: E-Papers, 2023. Cap. 3, p. 57-91.

BRAUER, J.; TRÜBY, J.; VILLAVICENCIO, M. **Establishing low-carbon hydrogen trade relations - where to go and who to partner with?** In: 18Th International Conference On The European Energy Market (EEM). Ljubljana, Slovenia, 2022, p. 1-6.

CASTRO, N. de *et al* (org.). **A Economia do Hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro: E-Papers, 2023. 336 p.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Hidrogênio energético no Brasil**. Subsídios para políticas e competitividade: 2010-2025. Série Documentos Técnicos nº 07. 2010. Disponível em: [https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio\\_energetico\\_completo\\_22102010\\_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.3](https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.3). Acesso em: 25 jun. 2023.

CHANTRE, C. *et al.* Experiência Nacional. In: CASTRO, N. de *et al* (org.). **A Economia do Hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro: E-Papers, 2023. Cap. 5, p. 159-223.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI. **Hidrogênio Sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira**. Brasília: CNI, 2022. 137 p.

DAWOOD, F.; ANDA, M.; SHAFIULLAH, G. M. Hydrogen production for energy: An overview. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 7, n. 7, p. 3847-3869, 2020.

DOSI, G. Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. **Research Policy**, n. 11, p. 147-162, 1982.

ELIZIÁRIO, S. *et al.* Experiência Internacional. In: CASTRO, N. de *et al* (org.). **A Economia do Hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro: E-Papers, 2023. Cap. 4, p. 93-158.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio: revisão 1**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT\_Hidrogeno\_rev01%20(1).pdf. Acesso em: 25 mar. 2023.

FREEMAN, C; PEREZ, C. Structural crisis of adjustment: business cycles and investment behavior. In: DOSI, G. et al. (Editors). **Technical change and economic theory**. London: Pinter Publisher, 1988. p. 38-66.

FREEMAN, C.; SOETE, L. **A economia da inovação industrial**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008 [1974].

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. Edição: Atlas. [S.l.]: São Paulo, 2002. v. 4.

H2Global Stiftung. **The H2Global Instrument**. 2022. Disponível em: <https://www.h2-global.de/project/h2g-mechanism>. Acesso em: 29 jun. 2023.

HUGHES, T.J. **Networks of Power: Electrification in Western Society**. The John Hopkins University Press, Baltimore and London, 1983. p.1880–1930.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen scaling up**: A sustainable pathway for the global energy transition. 2017. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2023.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen for Net Zero**. McKinsey & Company, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Global Hydrogen Review 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>. Acesso em: 28 jun. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/towards-hydrogen-definitions-based-on-their-emissions-intensity>. Acesso em: 25 jul. 2023.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Global energy transformation: A roadmap to 2050**. 2019. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA\\_Global\\_Energy\\_Transformation\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2019.pdf). Acesso em: 27 jun. 2023.

JACOBSSON, S.; JOHNSON, A. The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research. **Energy Policy**. n. 28, 2000. p. 625–640.

KHALILPOUR, K. R.; PACE, R.; KARIMI, F. Retrospective and prospective of the hydrogen supply chain: a longitudinal techno-historical analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v 15. p. 34294-34315. 2020.

KUHN. T.S. **The structure of scientific revolutions**. 50th anniversary edition; 2012.

LIMA, M. T. S. *et al.* **Sobre a Situação Energética Brasileira: De 1970 a 2030**. Ciência e Natura, Santa Maria, v. 37, Ed. Especial UFVJM, p. 06-16, 2014.

MCKINSEY&COMPANY. **Hidrogênio verde**: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo. 2021. 14 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Programa Nacional do Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>)**. Brasília: MME, 2021. 24 p. 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/HidrogênioRelatriodiretrizes.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: MME/EPE, 2020. 227 p.

MURPHY, L.M.; EDWARDS, P. L. **Bridging the Valley of Death: Transitioning from Public to Private Sector Financing**. National Renewable Energy Laboratory, 2003. Golden, Colorado.

NELSON, R. R.; WINTER, S. **Uma teoria evolucionária da mudança econômica**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2005 [1982].

OCDE. **The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities**. 4. ed. [S.I.]: FINEP 3ed., 2018. P. 258.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – IPCC. **Climate change 2014**: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.

PARRA, D.; VALVERDE, L.; PINO, F. J.; PATEL, M. K. A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 279-294, 2019.

PEREIRA, R. C. **Geopolítica e Transição Energética na Alemanha**: Potencialidades e Desafios do Hidrogênio Verde. 2022. 105 f. TCC (Graduação) - Curso de Relações Internacionais, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2022.

PEREZ, C. Technological revolutions and techno-economic paradigms. **Cambridge Journal of Economics**, v. 34, p. 185-202, 2010.

SAZALI, N. Emerging technologies by hydrogen: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 38, 18753-18771, 2020.

SCHUCHOVSKI, M.; LEITE, V. W. **Gestão Estratégica de Carbono**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 2021. 108 p.

SCHUMPETER, J. A. **Capitalismo, socialismo e democracia**. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1984 [1942].

SERRA, E. T. *et al.* Rotas tecnológicas: considerações técnicas, econômicas e ambientais. In: CASTRO, N. de *et al.* (org.). **A Economia do Hidrogênio**: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil. Rio de Janeiro: E-Papers, 2023. Cap. 2, p. 21-55.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. Edição: UFSC. [S.l.]: Florianópolis, 2005.

UNFCCC. **Protocolo de Kyoto**. Nations Climate Change, 1997. Disponível em: <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol>. Acesso em: 21 jun. 2023.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **The Hydrogen Economy: A Non-Technical Review**. 2006. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/hydrogen-economy-non-technical-review>. Acesso em: 25 jun. 2023.

VAZ, Caroline Rodrigues; URIONA-MALDONADO, Mauricio. Revisão de literatura estruturada: proposta do modelo SYSMAP (Scientometric and Systematic Yielding Mapping Process). **Aplicações de Bibliometria e Análise de Conteúdo em casos da Engenharia de Produção (UFSC ed., Vol. 1, pp. 21-42 p)**., p. 21–42, 2017.

ZOHURI, B. **Hydrogen energy: challenges and Solutions for a Cleaner Future**. Springer, Cham, 2019. 283 p.