



HIDROGÊNIO VERDE E INOVAÇÃO AMBIENTAL: uma abordagem para orientação de políticas públicas de transição energética

Alex Farias¹
Alexandre D'Avignon²

Resumo

O artigo analisa a relação entre inovação ambiental e políticas públicas no contexto da transição energética, com ênfase no papel estratégico do hidrogênio verde. Adotando uma abordagem qualitativa, fundamentada em revisão bibliográfica e documental, o estudo articula referenciais teóricos da economia da inovação e relatórios institucionais nacionais e internacionais. O plano de análise contempla a discussão sobre inovação ambiental, instrumentos de política pública e as barreiras que afetam a competitividade do hidrogênio verde. Conclui que a consolidação desse vetor energético depende de políticas consistentes, inovação ambiental, tecnológica e reconfiguração institucional capazes de alinhar sustentabilidade e desenvolvimento econômico.

Palavras-chave: Inovação ambiental; políticas públicas; transição energética; hidrogênio verde; sustentabilidade.

GREEN HYDROGEN AND ENVIRONMENTAL INNOVATION: an approach to guiding public policies for energy transition

Abstract

The article analyzes the relationship between environmental innovation and public policies in the context of the energy transition, with emphasis on the strategic role of green hydrogen. Adopting a qualitative approach, based on bibliographic and documentary review, the study articulates theoretical references from the economics of innovation and national and international institutional reports. The analysis plan addresses environmental innovation, policy instruments, and the barriers that affect the competitiveness of green hydrogen. It concludes that the consolidation of this energy vector depends on consistent policies, technological and environmental innovation, and institutional reconfiguration capable of aligning sustainability with economic development.

Keywords: Environmental innovation; public policies; energy transition; green hydrogen; sustainability.

Artigo recebido em: 22/08/2025 Aprovado em: 17/05/2026
DOI: <http://dx.doi.org/10.18764/2178-2865v30n1e.27427>

¹ Bacharel em Geografia e Meio Ambiente, MBA em Economia e Sustentabilidade. Mestrando em Políticas Públicas, Estratégia e Desenvolvimento pelo Instituto de Economia da UFRJ. Atuação no setor de energia com projetos estruturantes no Brasil. E-mail: alex.farias@pped.ie.ufrj.br

² É professor colaborador voluntário do Programa de Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento do Instituto de Economia da UFRJ, lecionando as cadeiras de Convenções Ambientais Globais e Gestão Ambiental e Inovação, com viés de análise NeoSchumpeteriana e Institucionalista. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. E-mail: davignon@pped.ie.ufrj.br

1 INTRODUÇÃO

A crise climática e os limites ecológicos do planeta têm colocado em evidência a necessidade de transições energéticas que conciliem desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental. Nesse cenário, a inovação ambiental emerge como elemento central para reconfigurar paradigmas produtivos e tecnológicos historicamente ancorados em combustíveis fósseis, abrindo caminho para soluções mais limpas, eficientes e de baixo carbono. A teoria evolucionária schumpeteriana, ao destacar a inovação como processo dinâmico de destruição criativa, fornece a base teórica para compreender a emergência de novos arranjos tecnológicos e institucionais que podem impulsionar essa transição.

Entre as rotas que despontam como estratégicas para o novo paradigma verde, o hidrogênio verde (H_2V) ocupa posição de destaque. Produzido a partir da eletrólise da água com fontes renováveis, o H_2V apresenta elevado potencial para descarbonizar setores de difícil substituição tecnológica, como a siderurgia, a indústria química, o transporte marítimo e a aviação de longa distância. Contudo, apesar de seu potencial, a difusão desse vetor enfrenta barreiras significativas, como elevados custos de produção, limitações de infraestrutura e baixa maturidade tecnológica em escala comercial.

Nesse contexto, as políticas públicas assumem papel fundamental, ao criar instrumentos capazes de reduzir incertezas, fomentar inovação e atrair investimentos para cadeias produtivas emergentes. A regulação, os incentivos econômicos, as compras governamentais e a indução de novos padrões de consumo são estratégias eficazes para acelerar a transição energética. O Brasil, por sua vez, encontra-se em posição privilegiada pela disponibilidade de fontes renováveis, o que lhe confere condições para se tornar um ator relevante na produção e no uso do hidrogênio verde.

Este artigo tem como objetivo analisar a relação entre inovação ambiental e políticas públicas na transição energética, com ênfase no papel estratégico do hidrogênio verde. Para tanto, adota-se uma abordagem qualitativa, baseada em revisão bibliográfica e documental, articulando referenciais teóricos clássicos e contemporâneos sobre inovação e transição energética. Busca-se, assim, compreender como a inovação ambiental pode contribuir para a superação de barreiras tecnológicas e institucionais, e quais instrumentos de política pública se mostram mais adequados para viabilizar a inserção do H_2V no Brasil e no cenário internacional.

2 METODOLOGIA

Este artigo adota uma abordagem qualitativa, fundamentada na análise teórica e interpretativa de referenciais clássicos e contemporâneos que discutem inovação ambiental, transição energética e o papel das políticas públicas. A escolha por esse método decorre da natureza exploratória do estudo, cujo objetivo é compreender os processos dinâmicos e complexos relacionados à inserção do hidrogênio verde no contexto das transformações tecnológicas e institucionais.

A pesquisa foi conduzida a partir de uma revisão bibliográfica e documental, utilizando como base obras fundamentais da teoria evolucionária schumpeteriana, bem como relatórios institucionais de organismos nacionais e internacionais, tais como a Agência Internacional de Energia (IEA), a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Essa revisão permitiu a construção de um arcabouço conceitual que articula inovação ambiental, políticas públicas e transição energética. O procedimento metodológico consistiu em três etapas principais. Levantamento e seleção bibliográfica; Sistematização dos conceitos-chave; e, Análise interpretativa e crítica, orientada pela perspectiva qualitativa, buscando compreender como a inovação ambiental pode atuar como vetor estratégico da transição energética e quais políticas públicas se mostram mais relevantes nesse processo.

A opção pela abordagem qualitativa permite apreender dimensões políticas, econômicas, sociais e culturais que influenciam a transição energética, oferecendo uma visão abrangente sobre os desafios e oportunidades do hidrogênio verde no Brasil e no mundo. Não se trata, portanto, de quantificar dados, mas de interpretar significados, trajetórias e dinâmicas institucionais que condicionam a emergência de um novo paradigma tecnoeconômico verde.

3 INOVAÇÃO AMBIENTAL PARA ATINGIR A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Na perspectiva da teoria evolucionária schumpeteriana, a *inovação ambiental* pode ser compreendida como um tipo específico de inovação, que rompe com o equilíbrio econômico tradicional ao introduzir novas combinações voltadas à sustentabilidade e à redução de impactos ecológicos. Elas resultam de processos contínuos de busca, seleção e aprendizado organizacional, assim como destacado por Nelson e Winter (1982) e Lundvall (2007). Esses processos ocorrem dentro de trajetórias tecnológicas associadas a determinados paradigmas, os quais orientam o desenvolvimento de produtos, processos e modelos produtivos (Koeller *et al.*, 2020).

Segundo Kemp e Never (2007), a inovação é um processo coletivo que envolve aprendizado e adaptação, uma combinação de conhecimento. Dosi (1984) *apud* Koeller et al., (2020) argumentam que quando as inovações permanecem restritas a certos paradigmas, observa-se o fenômeno da inovação incremental. Por outro lado, quando há a superação ou ruptura dessas trajetórias e paradigmas tecnológicos, caracteriza-se a inovação radical.

Já a dimensão ambiental na inovação pode ser compreendida como um processo de transformação tecnológica e institucional que promove a substituição de práticas produtivas intensivas em recursos e poluentes por alternativas mais limpas, eficientes e sustentáveis. Logo, as inovações ambientais não resultam apenas de avanços tecnológicos isolados, mas de um ambiente institucional propício, que favorece a cooperação entre empresas, universidades, centros de pesquisa e o poder público. Assim, a dimensão ambiental no processo de inovação consolida-se como uma força transformadora, capaz de redefinir os padrões tecnológicos, institucionais e produtivos, contribuindo para um desenvolvimento econômico compatível com os limites ecológicos do planeta.

Nesta perspectiva, entende-se neste artigo a **inovação ambiental** como a (re)combinação de tecnologias, materiais, conhecimentos e arranjos institucionais/organizacionais com o objetivo de minimizar os impactos ambientais e otimizar o uso dos recursos naturais, rompendo com padrões tecnológicos e produtivos poluentes, promovendo um desenvolvimento econômico mais alinhado aos limites ecológicos do planeta.

Na perspectiva de Shumpeter (1984), o desenvolvimento econômico não é um processo contínuo e equilibrado, possui um caráter essencialmente dinâmico, evolutivo e não estacionário. Em linhas gerais, há um processo de inovação que “*revoluciona a estrutura econômica a partir de dentro, incessantemente, destruindo a velha estrutura e criando a nova*”, denominado de **destruição criativa** (Shumpeter, 1984; Corazza e Fracalanza, 2004). A destruição criativa é, de maneira geral, o processo pelo qual novas inovações substituem antigas estruturas econômicas, que estão ancoradas na sociedade, gerando um progresso tecnológico, crescimento e mudança estrutural.

No entanto, diante o enfrentamento da crise ecológica em que se encontra o planeta, esse processo deve levar em consideração variáveis ambientais, climáticas, geográficas e sociais, ou seja, deve ser feito por meio de uma inovação ambiental. Somente com a quebra do paradigma tecnológica, que está com fundações em tecnologias poluentes, será possível o surgimento de uma nova sociedade, que tenha princípios sustentáveis, mais justa e inclusiva, já que o novo paradigma verde tem a capacidade de oferecer alternativas de desenvolvimentos de regiões que estão marginalizadas na dinâmica econômica mundial.

Nelson e Winter (1982, 1992) apud D'Avignon (2010) consideram a geração e a difusão da inovação como decorrência da busca por novas oportunidades e a seleção delas. Os autores fazem analogia com a teoria evolucionária e a seleção natural de Charles Darwin e dos neodarwinistas, destacando que o mercado seria um dos ambientes seletivos, ou seja, uma visão neo-schumpeteriana. Nele (no mercado), a inovação pode ter sucesso ou não, dependendo de sua habilidade em se adaptar ou modificá-lo. Logo, os padrões de desenvolvimento das empresas influenciam outras firmas, influenciando a economia que influencia outras firmas, e assim por diante. Não por um processo apenas da concorrência, que leva as empresas a inovarem, pois elas não conseguem inovar sozinhas, sendo necessária uma combinação de diversos tipos de conhecimento e recursos (Kemp; Never, 2007).

Nesse cenário, destaca-se que a inovação não surge do nada. Para o surgimento da inovação é necessária a capacidade do Estado em induzir e coordenar esse processo por meio de políticas públicas, com foco em atingir padrões e objetivos do desenvolvimento sustentável. É nesse momento, que a temática ambiental deve ser introduzida, por meio de uma inovação ambiental, como um requisito do desenvolvimento sustentável e de inovação.

3.1.1 Políticas públicas, instrumentos e o contexto da transição energética

Freeman e Soete (1997) destacam que há uma grande dificuldade de como introduzir políticas mais sustentáveis em uma economia de mercado, que seleciona rotas tecnológicas e de processos com critérios de lucro extraordinário, e não em condições sustentáveis. Mesmo diante disso, existem instrumentos de políticas que têm o potencial de orientar as empresas privadas a investir em rotas tecnológicas limpas e sustentáveis. Os autores destacam algumas estratégias, sendo elas, **i)** Regulação direta; **ii)** Instrumentos econômicos; **iii)** Compras governamentais; e, **iv)** Políticas para alterar os vínculos sociais das mudanças técnicas.

Antes de apresentar a definição de cada instrumento, é importante ressaltar que cada estratégia política¹ deve ser formulada e implementada, buscando o desenvolvimento sustentável, mas seguindo diretrizes adaptadas a sua realidade e com foco no menor custo efetivo para transição energética, sem importar soluções que não geram benefícios ambientais, sociais e econômicos. Feita essa observação, apresenta-se a seguir a definição de cada estratégia.

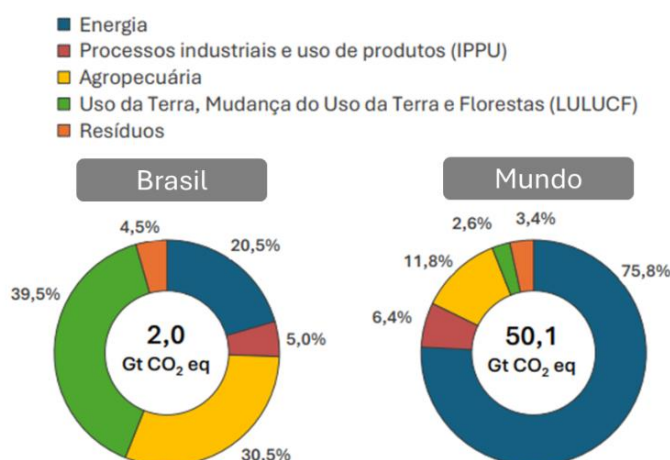
A **regulação direta** pode ser feita por meio de regras, padrões e limitações com foco em reduzir a poluição, como alguns casos da legislação ambiental brasileira que estabelece padrões de lançamento de efluentes², de qualidade do ar³, etc. Os **instrumentos econômicos** estabelecem

critérios econômicos, precificando, por exemplo, a externalidade negativa da poluição, como é o caso do funcionamento teórico do mercado de carbono, podendo negociar permissões de emissões ou da taxaço do carbono, que gera um custo para as emissões de CO_{2e}, obrigando a sua reduço. Já as **compras governamentais** podem ser feitas por meio de subsídio, apoio a projetos de pesquisa e desenvolvimento ou por mecanismos diretos, induzindo a inovaço de tecnologias mais eficientes ou novas. Por fim, o **vínculo social**, que cria fatores que afetam a demanda dos consumidores a partir de uma consciêcia ambiental coletiva, influenciando a maneira da produço.

Os instrumentos de políticas públicas são estratégias que podem ser implementados por governos com foco em impulsionar a transiço energética de baixo carbono, permitindo a criaço e mercado, resiliêcia energética e de se posicionar na dinâmica global energética, buscando alternativas de desenvolvimento sustentável. Além disso, outro aspecto que cabe destacar é que o setor energético apresenta o maior *footprint* de emissões globais, desta forma, a inovaço ambiental para o cumprimento de metas climáticas passa principalmente por este setor, que contribuiu com 75,8% das emissões em 2022 (**Gráfico 1**). Nesse ponto, é importante evidenciar a situaço privilegiada em que o Brasil se encontra quando comparado com o resto do mundo.

O setor de energia brasileiro representou, em 2022, 20,5% das emissões, enquanto o uso e mudanço da terra e agricultura 70% (EPE, 2025), o que evidencia desafios e oportunidades diferentes no âmbito da transiço energética global. Apesar disso, é o setor energético que possui um dos maiores desafios de descarbonizaço em função principalmente das suas rotas tecnológicas e econômicas preferenciais, logo, a inovaço ambiental é parte do quebra-cabeça da transiço energética global e nacional.

Gráfico 1 - Emissões Nacionais e Globais por setor.



Fonte: EPE, 2025 adaptado pelo autor.

Savacool et al., (2025) afirmam que a transição energética é um processo de mudança profunda e sistêmica. Envolve transformações tecnológicas, econômicas, institucionais, políticas, culturais e comportamentais com o objetivo de alcançar sistemas de baixo carbono e mais sustentáveis. Não é uma trajetória linear, mas como um processo com múltiplos caminhos, atores e conflitos.

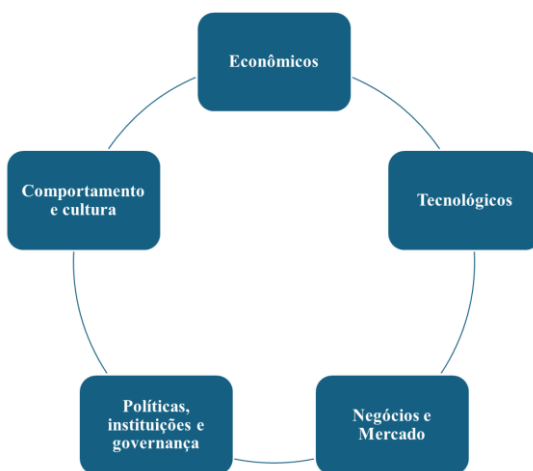
Por não ser uma trajetória linear, pode passar por momentos distintos, incluindo o de aceleração, estagnação e retrocesso (**Figura 1**). Um dos pontos principais para aceleração da transição é o seu custo, deve ser competitivo com os custos tradicionais, existindo também diversos fatores que podem influenciar a velocidade da aceleração, e de certa maneira, estão conectadas, afetando uma à outra (**Figura 2**). Savacool et al. (2025) destacam cinco dimensões cruciais que afetam esse processo (**Tabela 1**).

Figura 1 - Visão tradicional das fases de transição.



Fonte: Savacool et al., (2025) adaptado pelo autor.

Figura 2 - Dimensão que podem afetar a aceleração da transição energética.



Fonte: Savacool et al., (2025) adaptada pelo autor.

Tabela 1 - Dimensões que podem impactar a aceleração da transição energética com base em Savacool *et al.* (2025).

Dimensão	Abordagem e influência de cada dimensão (Savacool et al., 2025)
Econômicos	▪ Queda de custos das tecnologias limpas; ▪ Economias de escala, efeitos de rede, e aprendizado por uso e fabricação (<i>learning-by-doing</i>); ▪ Sistemas de inovação que favorecem P&D, cooperação entre empresas, universidades e governos; ▪ <i>Path dependence</i>, pode ser obstáculo ou facilitador, dependendo da direção da mudança.
Tecnológicos	▪ Tecnologias com <i>design</i> modular e baixa complexidade tendem a se difundir mais rápido; ▪ Tecnologias que se encaixam mais facilmente no sistema vigente têm maiores chances de adoção; ▪ Granularidade e escalabilidade, tecnologias menores e mais replicáveis podem favorecer a aceleração.
Negócios e mercado	▪ Atuação de empresas desafiadoras que lideram inovações disruptivas; ▪ Reorientação estratégica (como empresas de energia e automóveis) em direção a ativos limpos; ▪ Disputas por controle tecnológico e lobbies contrários de setores fósseis; ▪ Mudança nas expectativas de retorno financeiro, quando os lucros futuros se concentram em ativos limpos, a aceleração é favorecida.
Políticas, instituições e governança	▪ Políticas públicas bem desenhadas (subvenções, tributos, metas, normas); ▪ <i>Feedbacks</i> positivos de políticas, geram coalizões que pressionam por sua ampliação; ▪ Combinação de políticas (<i>policy mix</i>): coesão e coerência entre diferentes instrumentos são essenciais; ▪ Desestabilização de regimes fósseis: políticas de faseamento (<i>phase-out</i>) como as de carvão e petróleo; ▪ Geopolítica e segurança energética: crises, guerras ou choques podem impactar negativa ou positivamente nas transições (ex: guerra na Ucrânia).
Comportamento e cultura	▪ Adoção pelos usuários: desde <i>early adopters</i> até o consumidor <i>mainstream</i>; ▪ Mudanças nos valores, normas e aspirações sociais; ▪ Influência de campanhas, exemplos e redes sociais; ▪ Dispositivos culturais e simbólicos: veículos elétricos como status, ou solar como símbolo ecológico; ▪ Intervenções sociais eficazes, incentivos e comunicação segmentada.

Fonte:

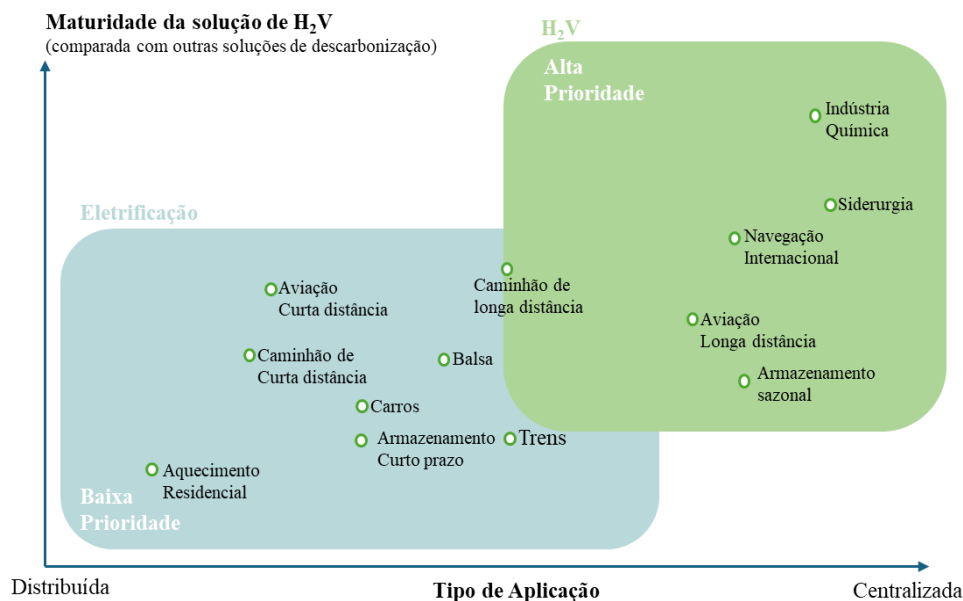
4 ANÁLISE DO PAPEL DO HIDROGÊNIO VERDE NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

O hidrogênio verde (H₂V) é considerado um vetor energético com diversas aplicações, por isso, há uma visão naturalmente superestimada, o que gera desconfiância de alguns especialistas. Possui diversas rotas de produção, sendo diferenciado de acordo com a sua intensidade de emissões de CO_{2e}/kg de H₂ (IRENA, 2024). A rota a partir da eletrólise da água com fontes de energia renovável⁴, denominada de hidrogênio verde é a que mais tem chamado interesse do mundo em função do seu benefício na redução das emissões, já que por ser produzido a partir de fontes renováveis.

Apesar do crescente interesse em relação ao H₂V, sua produção é quase insignificante em função das barreiras tecnológicas e econômicas quando comparadas com a rota tradicional baseada em combustíveis fósseis, em função principalmente dos custos associados. De acordo com o *Global Hydrogen Review* (GHR) 2024, publicado pela *International Energy Agency* (IEA) referente ao ano-base 2023, a produção global de hidrogênio atingiu 97 Mt, concentrada em sua grande maioria a partir de combustíveis tradicionais, carvão e gás natural sem abatimento das emissões de CO_{2e}⁵ (IEA, 2024), sendo a China a maior consumidora e produtora global (29% do mercado), seguida pelos Estados Unidos e União Europeia.

Os diferentes usos do H₂V podem ser priorizados de acordo com sua maturidade tecnológica e sua aplicabilidade centralizada ou distribuída. A **Figura 3** indica que aplicações centralizadas com alta maturidade, como nas indústrias químicas, siderúrgicas e de refino, no transporte marítimo internacional, na aviação de longa distância, no aquecimento de alta temperatura e no armazenamento sazonal, são as de alta prioridade para o uso do H₂V. Estas aplicações são mais difíceis de descarbonizar via eletrificação direta e, portanto, o hidrogênio verde surge como solução estratégica. Usos mais distribuídos, como em aquecimento residencial, veículos urbanos, trens, caminhões regionais, armazenamento de curto prazo e aviação de curta distância, são considerados de baixa prioridade, pois tecnologias baseadas em eletrificação (como baterias) tendem a ser mais eficientes e já estão mais consolidadas nesses segmentos. Os esforços de desenvolvimento e investimento em H₂V devem se concentrar nas áreas onde ele representa a única ou principal alternativa para descarbonização (IRENA, 2022).

Figura 3 - Prioridades para hidrogênio verde.



Fonte: IRENA (2022), adaptado pelo autor.

Diversos países já têm elaborado políticas públicas para promoção do hidrogênio verde e seus derivados. Aproximadamente, pelo menos 41 países lançaram estratégias de hidrogênio e muitos outros estão a caminho de desenvolver, com suas ações influenciando amplamente a construção do cenário internacional de hidrogênio (Liu e Gui, 2024). Alguns países se dedicam a se tornar exportadores de hidrogênio verde, por exemplo, Marrocos, Noruega, Chile, Austrália e Estados Unidos. Outros se dedicam a se tornar importadores, por exemplo, União Europeia, Coreia e Japão. Há também alguns países que se dedicam a atingir a autossuficiência em hidrogênio verde, como a China. O Brasil também possui potencial de atender o seu mercado doméstico e contribuir com o mercado externo.

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), documento referência para o planejamento energético brasileiro, o hidrogênio verde pode ser uma alternativa promissora para o futuro energético e para a transição para uma economia de baixo carbono no Brasil. O Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 (PDE 2034), que possui um horizonte até 2034, também destaca o hidrogênio como tecnologia-chave na transição energética global, dada sua capacidade de ser utilizado como vetor de armazenamento de energia, o que pode viabilizar o avanço da eletrificação (EPE, 2024).

Ambos os documentos destacam a promoção de políticas públicas que incentivem a utilização de tecnologias de hidrogênio como parte da transição energética brasileira. Essas políticas devem priorizar o desenvolvimento de capacidades tecnológicas e o fortalecimento de atividades de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D), com o envolvimento ativo de universidades e instituições de pesquisa. Além disso, é necessário articular as políticas energéticas com os compromissos ambientais,

de forma a viabilizar um desenvolvimento sustentável baseado em uma economia de baixo carbono e com menor pegada ambiental. Desta forma, fica evidente o papel da inovação ambiental para garantir a inserção do hidrogênio verde na matriz energética nacional.

Apesar do grande número de projetos e políticas que vêm sendo anunciadas ao longo dos últimos anos, ainda há desafios referentes a cadeia do hidrogênio verde e seus derivados. Segundo Weichenhain et al., (2024) *apud* Castro, N. J. et al., (2024), a obtenção de *Final Investment Decision* (FID) tem sido um dos maiores desafios para destravar o avanço dos projetos, incluindo a falta de estruturas eficazes para a redução dos riscos ou abordagens muito individualizadas e politizadas com altos custos de transação. Castro, N. J. et al., (2024) afirmam que esses desafios reduzem a confiança dos investidores, estabelecendo barreiras que impedem o desenvolvimento de projetos; além disso, promovem um ceticismo por uma falta de orientação política norteadora.

4.1 Barreiras que afetam a competitividade do H2V

O hidrogênio verde enfrenta desafios substanciais devido ao seu alto consumo energético e econômico. Por isso deve ser usado onde sua menor eficiência é compensada por sua necessidade técnica, ou seja, em setores onde outras soluções simplesmente não são viáveis ou escaláveis. Ao longo de todo o processo, desde a produção por eletrólise até o uso final, ocorrem perdas significativas de energia. A eletrólise da água, etapa inicial, apresenta uma eficiência média de 65% a 70% em tecnologias mais maduras, como eletrolisadores alcalinos e PEM. A eficiência depende significativamente da temperatura de operação, pressão, qualidade dos materiais utilizados nos eletrodos, e da fonte de energia elétrica empregada. Não é algo simples, exige uma operação qualificada para evitar perdas de eficiência. A eletrólise de óxido sólido (SOEC), por operar em alta temperatura e permitir a recuperação de calor, apresenta os maiores níveis de eficiência, mas ainda é menos madura comercialmente (Awad et al., 2024; Castro, N. J. et al., 2024).

Tabela 2 - Resumo dos principais processos de produção de hidrogênio por eletrólise.

Tipo de Eletrolisador	Faixa de Eficiência (%)	Eficiência Média Aproximada (%)	Maturidade (1-10)
Eletrolisador Alcalino	60 – 80 %	~70 %	9-10
Eletrolisador PEM	55 – 75 %	~65 %	7-9
Eletrolisador de Óxido Sólido (SOEC)	80 – 90 % (em alta temperatura)	~85 %	3-5

Fonte: adaptado de Awad et al., 2024 e Castro, N. J. et al., 2024.

Em seguida, processos como compressão, liquefação ou conversão para derivados como amônia podem gerar perdas energéticas até o uso final. Wulf et al. (2018) apud Castro, N. J. et al., (2024) apresentam uma perda de até 4% da massa de hidrogênio comprimido transportado em *pipeline*. O hidrogênio possui baixa densidade energética volumétrica em condições ambientes, o que exige compressão para transporte e uso industrial. A compressão é geralmente feita por compressores mecânicos, cuja eficiência é considerada baixa e com impactos acústicos relevantes (Sasaki et al., 2016 apud Awad et al., 2024)

Na forma líquida, o transporte é indicado quando existe uma demanda elevada e estável em função principalmente do alto custo de capital e energético. A liquefação do hidrogênio requer entre 12,5 e 15,5 kWh por kg de H₂, o que representa aproximadamente 38% a 47% de seu poder calorífico inferior, configurando uma das etapas mais intensivas em energia do ciclo do hidrogênio (Yang; Ogden, 2007; Bartels, 2008; Staffeell et al., 2019 apud Castro, N. J. et al., (2024). Castro, N. J. et al., (2024) afirmam que outros desafios relevantes estão associados a perdas contínuas no armazenamento; estima-se que 0,1% do volume liquefeito seja perdido por dia devido à evaporação, o que limita seu armazenamento de longo prazo.

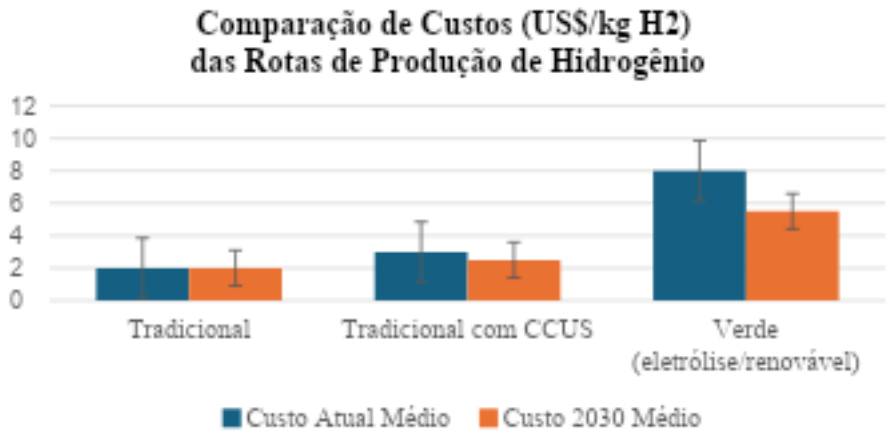
Fique evidente, desta forma, os desafios associados ao H₂V, que em outras palavras, se revertem em custos, gerando barreiras para que o H₂V possa atingir preços competitivos. Por isso, a inovação ambiental é fundamental para gerar instrumentos que possam tornar o H₂V mais competitivo nesse novo paradigma verde. Tem se consolidado também a oportunidade de transportar o H₂V por meio de rotas químicas, tais como amônia (NH₃), metanol (CH₃OH) e combustíveis sintéticos, podendo fazer mais sentido econômico.

O custo de produção do H₂ pode variar de acordo com a sua rota, e de seu país de origem. Estima-se que o H₂V tenha um custo de aprox. 4 a 12 US\$/kg de H₂ (**Tabela 3**), principalmente em função do alto consumo de eletricidade para sua produção, que tem um impacto de 60 a 80% no seu custo final por conta do custo da energia (IEA, 2025). A baixa escala e maturidade dos eletrolisadores são peças que adicionam custos altos, além da falta de infraestrutura necessária para o armazenamento, compressão e transporte do H₂V, conforme observado anteriormente. É natural que uma indústria nascente tenha uma curva de aprendizagem e precise de ganho de escala, políticas, inovação e redução de custos para se tornar competitiva com rotas consolidadas no fluxo econômico.

Dados do IEA (2025) mostram que caso políticas e instrumentos sejam implantados com foco em alavancar o H₂V, o seu custo em 2030 poderá chegar em patamar competitivo, adicionando

um prêmio verde na cadeia produtiva econômica, que poderá passar a valorizar rotas sustentáveis ao invés apenas do lucro extraordinário sem incluir externalidades negativas.

Gráfico 2 - Estimativa de custo do H2 fóssil, com CCUS e verde.



Fonte: Global Hydrogen Review, 2025 adaptado pelo autor.

Tabela 3 - Estimativa de custo do H2 fóssil, com CCUS e verde.

Rota do H2	Custo atual US\$/kg H2	Custo est. (2030)
Tradicional*	~1 - 3	~1 - 3
Tradicional com CCUS	~2 - 4	~1,5 - 3,5
Verde (eletrólise com renováveis)	~4 - 12	~2 - 9

*: rota tradicional é fóssil (gás e carvão) sem abatimento das emissões CO₂

Fonte: Global Hydrogen Review, 2025 adaptado pelo autor.

Os desafios aqui apresentados exigem inovações ambientais e avanços tecnológicos para superá-los. No âmbito da transição energética, há uma corrida de defesa de interesses de cada país, por isso, se posicionar será um divisor de águas no novo paradigma técnico-econômico (Perez, 2022). Neste item da dissertação buscou-se apresentar e discutir os processos de inovação ambiental e de sua relação com a transição energética de baixo carbono, com foco no hidrogênio verde. Essa não é uma tarefa simples e requer o diálogo com diferentes correntes teóricas que, ao longo das últimas décadas, vêm oferecendo abordagens sobre a dinâmica da mudança tecnológica, o papel das instituições e o redesenho de paradigma.

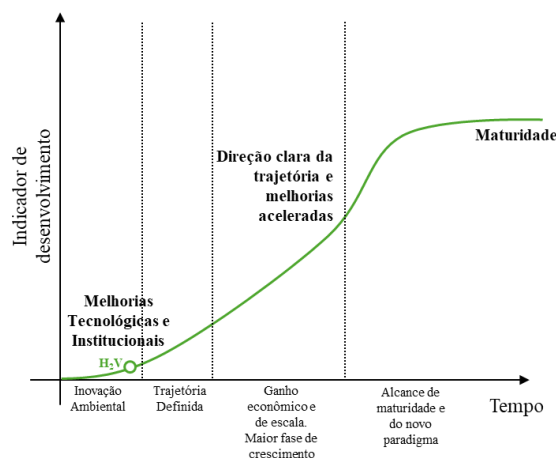
Autores como Joseph Schumpeter (1984) e os evolucionistas neo-schumpeterianos, como Nelson e Winter deram as bases para compreender a inovação como um processo dinâmico, vinculado ao rompimento de estruturas vigentes e ao aprendizado organizacional. Sob essa ótica, a transição energética não ocorre de forma linear, mas por meio de rupturas e reorganizações impulsionadas por

novas tecnologias e arranjos institucionais. Freeman e Soete (1997) e Lundvall (2007) aprofundam essa perspectiva ao ressaltar a importância dos sistemas nacionais de inovação, da cooperação entre atores e da presença ativa do Estado para promover mudanças sustentáveis, evidenciando que as inovações ambientais, como o hidrogênio verde (H₂V), não surgem espontaneamente, mas requerem ambientes institucionais propícios.

Adicionalmente, René Kemp (2017) por sua vez, contribui com abordagens específicas para entender as transições tecnológicas sustentáveis. A obra de Carlota Perez (2022) oferece uma visão macroeconômica e histórica das transições, destacando como novas ondas tecnológicas criam oportunidades de reorganização econômica e social, sendo o atual momento propício para a consolidação de um paradigma verde-tecnológico.

Nesse sentido, o hidrogênio verde representa uma das inovações estratégicas desse novo ciclo, mas ainda em um estágio inicial no processo de mudança de paradigma que irá promover a substituição de práticas produtivas intensivas em recursos e poluentes por alternativas mais limpas, eficientes e sustentáveis. Desta forma, é necessário inovação ambiental para a ruptura de um paradigma insustentável para um novo paradigma verde. Na figura abaixo buscou-se apresentar a curva do hidrogênio verde em direção a um novo paradigma, conforme discutida de forma extensiva neste trabalho. Não está associada à mera evolução tecnológica, e sim ao novo que ainda está por vir. E como isso leva tempo, e de mecanismos de inovação ambiental, de trajetória e de competitividade até o alcance de maturidade, a compreensão à posição do H₂V é ainda inicial, algo natural de uma indústria nascente.

Figura 6 - Trajetória do hidrogênio verde feita com base em Perez (2022) e nos autores apresentados nesta dissertação.



Fonte: autor.

Os autores apresentados neste item oferecem um arcabouço teórico robusto para compreender os desafios e as oportunidades da transição energética em direção a uma economia de baixo carbono, na qual o hidrogênio verde se apresenta como um vetor estratégico, mas que exige políticas públicas, inovação ambiental e reconfiguração institucional para se consolidar e alcançar a maturidade do novo paradigma, que também está em curso. Abaixo apresenta-se uma tabela síntese dos principais autores discutidos neste item sobre inovação ambiental e sua contribuição para transição energética de baixo carbono e o hidrogênio verde.

Tabela 4 - Tabela síntese dos principais autores de inovação e sua contribuição para o H2V e transição energética a partir da interpretação do autor desta dissertação.

Autor(a)	Tese Central	Como contribui para o H2V e a transição energética a partir da interpretação do autor desta dissertação
Schumpeter	Destruição criativa e inovação	H2V como inovação que rompe com o regime fóssil
Nelson e Winter	Inovação como busca, seleção e aprendizado	Êxito do H2V depende de ambiente favorável e aprendizado contínuo
Freeman e Soete	Inovação ambiental exige políticas coordenadas	Transição só ocorrerá com políticas públicas e inovação limpa (ambiental)
Lundvall	Sistemas Nacionais de Inovação e aprendizado	SNI forte integra H2V à matriz energética sustentável
Kemp	Políticas e nichos sustentáveis	H2V precisa de proteção e fomento para se consolidar
Perez	Paradigmas tecnoeconômicos e transição verde	H2V faz parte de novo paradigma verde e precisa de coordenação estatal
Reydon; et al.	Competitividade verde	H2V precisa ser competitivo e sustentável para ganhar escala
D'Avignon	Regulação e substituição de tecnologias sujas	Difusão do H2V depende de políticas e mudanças institucionais

Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

A análise realizada neste artigo evidencia que a transição energética de baixo carbono, centrada na inovação ambiental e no hidrogênio verde, exige um conjunto articulado de políticas

públicas, avanços tecnológicos e reconfigurações institucionais. Sob a ótica evolucionária schumpeteriana, a inovação não é linear, mas resultado de rupturas, destruição criativa e reorganização de paradigmas produtivos. Nesse sentido, o hidrogênio verde representa uma das inovações estratégicas para o novo paradigma verde, ainda em fase inicial de consolidação.

Primeiramente, a inovação ambiental constitui o eixo estruturante da transição energética, ao promover a substituição de práticas intensivas em carbono por alternativas limpas e sustentáveis. Esse processo depende não apenas de tecnologia, mas também de arranjos institucionais, cooperação entre atores e estímulos públicos que viabilizem trajetórias inovadoras. Em segundo lugar, as políticas públicas desempenham papel central na indução e coordenação da transição, seja por regulação direta, instrumentos econômicos, compras governamentais ou pela formação de vínculos sociais que moldem novos padrões de consumo e produção. A ausência de políticas consistentes compromete a capacidade do hidrogênio verde de atingir competitividade e escala.

O terceiro ponto refere-se à dimensão sistêmica e multifatorial da transição energética, que envolve fatores econômicos, tecnológicos, empresariais, políticos e culturais. Esses elementos interagem entre si e determinam a velocidade de aceleração ou estagnação da mudança, demonstrando que a transição é marcada por conflitos, disputas e assimetrias globais.

O quarto ponto é que o hidrogênio verde deve ser priorizado em setores de difícil descarbonização, como a siderurgia, a química e o transporte de longa distância. Nesses segmentos, a eletrificação direta apresenta limites, e o H₂V se consolida como alternativa estratégica, ainda que enfrente barreiras econômicas, logísticas e tecnológicas que demandam políticas de fomento e inovação direcionada.

Por fim, a competitividade do hidrogênio verde dependerá de políticas coordenadas, inovação ambiental e ganhos de escala, capazes de reduzir custos, atrair investimentos e consolidar um novo paradigma tecnoeconômico verde. A experiência internacional mostra que os países que liderarem esse movimento poderão ocupar posições estratégicas na geopolítica da energia, e o Brasil, dadas suas condições privilegiadas em renováveis, tem a oportunidade de alinhar desenvolvimento econômico com sustentabilidade.

Em síntese, o hidrogênio verde representa mais que uma tecnologia emergente: é um vetor estratégico que, ao ser articulado com políticas públicas eficazes e inovação ambiental robusta, pode acelerar a transição energética e inserir o Brasil em uma posição de liderança no cenário global de baixo carbono.

REFERÊNCIAS

- AWAD, Mohamed; et al. A review of water electrolysis for green hydrogen generation considering PV/wind/hybrid/hydropower/geothermal/tidal and wave/biogas energy systems, economic analysis, and its application. **Alexandria Engineering Journal**, [S. l.], v. 87, p. 213–239, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.12.032>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016823011249>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- CASTRO, Nivalde de; BRITO, Kalyne; CHAVES, Ana Carolina. Hidrogênio Verde e os desafios para o Net Zero. **Broadcast Energia**, [S. l.], 2024. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/artigo-gesel-hidrogenio-verde-e-os-desafios-para-o-net-zero/>. Acesso em: 03 out. 2024.
- CORAZZA, Rosana Icassatti; FRACALANZA, Paulo Sérgio. *Caminhos do pensamento neo-schumpeteriano: para além das analogias biológicas*. **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 14, n. 2, p. 127–155, maio/ago. 2004.
- D'AVIGNON, Alexandre. Energia, inovação tecnológica e mudanças climáticas. In: MAY, Peter (org.). **Economia do meio ambiente: teoria e prática**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. cap. 10, p. 191–210.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco Energético Nacional: síntese 2025: ano-base 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf. Acesso em: 30 jun. 2025.
- FREEMAN, Christopher; SOETE, Luc. **The Economics of Industrial Innovation**. 3. ed. London: Pinter, 1997.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Geopolitics of the energy transformation: the hydrogen factor**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-The-Hydrogen-Factor>. Acesso em: 9 jun. 2025.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Hydrogen Review 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>. Acesso em: 16 jun. 2025.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **International co-operation to accelerate green hydrogen deployment**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Hydrogen Review 2024**. Energy International Agency, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>. Acesso em: outubro 2024.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **The State of Energy Innovation**. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-state-of-energy-innovation>. Acesso em: 5 jun. 2025.
- LUNDVALL, Bengt-Ake. Sistemas nacionais de inovação: conceito analítico e ferramenta de desenvolvimento. **Industry and Innovation**, v. 14, n. 1, p. 95–119, 2007.

LIU, Pingkuo; GUI, Junqing. Comparative analysis on the development potential of green hydrogen industry in China, the United States and the European Union. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 84, p. 700–717, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.298>. Acesso em: 9 jun. 2025.

KEMP, René; NEVER, Babette. Green transition, industrial policy, and economic development. **Oxford Review of Economic Policy**, Oxford, v. 33, n. 1, p. 66-84, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/oxrep/grw037>. Acesso em: 2 jul. 2025.

KOELLER, Priscila; MIRANDA, Pedro; LUSTOSA, Maria Cecília; PODCAMENI, Maria Gabriela. **Ecoinovação: revisitando o conceito**. Brasília: IPEA, 2020. (Texto para Discussão, n. 2556).

NELSON, R. R.; WINTER, S. In search of useful theory of innovation. **Research Policy**, v. 6, n. 1, p. 36-76, 1977.

PEREZ, Carlota. **Technological revolutions and techno-economic paradigms**. Working Paper No. 20. Tallinn: The Other Canon Foundation; Tallinn University of Technology, 2009.

REYDON, Bastiaan P.; CAVINI, Regina A.; ESCOBAR, Héctor E.; FARIA, Helena M. A **competitividade verde enquanto estratégia empresarial resolve o problema ambiental?** Campinas: IE/UNICAMP, 2007. (Texto para Discussão, n. 125).

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

SOVACOOOL, Benjamin K. et al. The acceleration of low-carbon transitions: insights, concepts, challenges, and new directions for research. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 176, 2025. DOI: 10.1016/j.rser.2022.113250.

Agradecimento

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela Bolsa de Pós-Graduação que possibilitou o desenvolvimento e execução da pesquisa.

Notas

¹ Cada estratégia política é referente aos instrumentos políticos de Freeman e Soete (1997).

² Resolução CONAMA nº 430/2011 - Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.

³ Resolução CONAMA nº 491/2018 - Dispõe sobre padrões de qualidade do ar.

⁴ Hidrogênio produzido por eletrólise da água, utilizando fontes de energia renováveis, tais como as solar, eólica, hidráulica, biomassa, etanol, biogás, biometano, gases de aterro e geotérmica.

⁵ Em 2023, as emissões de CO₂e oriundas da produção de hidrogênio atingiu 920 Mt, o equivalente às emissões anuais da Indonésia e França juntas (IEA, 2024).