REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

INSTITUIÇÕES, APRISIONAMENTO CARBÔNICO E CONFIANÇA: UM MODELO CONCEITUAL PARA A DIFUSÃO DO HIDROGÊNIO VERDE NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

INSTITUTIONS, CARBON LOCK-IN AND TRUST: A CONCEPTUAL MODEL FOR THE DIFFUSION OF GREEN HYDROGEN IN THE ENERGY TRANSITION

Ciências Sociais Aplicadas • 29/10/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/793249591

Romana Martins Alves da Costa Torres[1]

RESUMO

O hidrogênio produzido por eletrólise com energia renovável ocupa lugar central nas estratégias de descarbonização da indústria pesada, mas a sua difusão permanece lenta mesmo nas regiões com políticas mais ambiciosas. Este ensaio teórico discute por que metas, subsídios e tecnologia disponível não bastam para converter o hidrogênio verde em capacidade instalada e propõe um modelo conceitual que articula as dimensões energética, econômica e institucional da transição. O percurso metodológico consistiu em revisão narrativa e integração teórica de quatro correntes de literatura: economia do hidrogênio, transições sociotécnicas e aprisionamento carbônico, economia institucional e sinalização em mercados com atributos ambientais invisíveis. A análise sustenta que a difusão do hidrogênio verde depende da interação entre escala industrial, grau de dependência da matriz em relação aos combustíveis fósseis e qualidade das instituições, entendida como integridade e imparcialidade do Estado. Argumenta-se, ainda, que as instituições atuam em dois planos: do lado da oferta, reduzem o risco de projetos longos e dependentes de regulação; do lado da demanda, conferem credibilidade à certificação que torna visível o atributo limpo do produto. Formulam-se seis proposições e uma agenda de pesquisa voltada a países emergentes com grande potencial renovável. Conclui-se que a transição para o hidrogênio verde é menos um problema de custo tecnológico e mais um problema de organização de mercados, contratos e confiança.

Palavras-chave: hidrogênio verde; transição energética; qualidade institucional; aprisionamento carbônico; confiança.

ABSTRACT

Hydrogen produced by electrolysis with renewable energy plays a central role in strategies to decarbonise heavy industry, yet its

diffusion remains slow even in regions with the most ambitious policies. This theoretical essay discusses why targets, subsidies and available technology are not enough to turn green hydrogen into installed capacity and proposes a conceptual model linking the energy, economic and institutional dimensions of the transition. The methodological path consisted of a narrative review and theoretical integration of four bodies of literature: hydrogen economics, sociotechnical transitions and carbon lock-in, institutional economics, and signalling in markets with invisible environmental attributes. The analysis argues that green hydrogen diffusion depends on the interaction between industrial scale, the degree of fossil fuel dependence of the energy mix and the quality of institutions, understood as the integrity and impartiality of the state. It further argues that institutions act on two levels: on the supply side, they reduce the risk of long, regulation-dependent projects; on the demand side, they lend credibility to the certification that makes the clean attribute of the product visible. Six propositions and a research agenda focused on emerging countries with large renewable potential are formulated. The green hydrogen transition is less a problem of technological cost and more a problem of organising markets, contracts and trust.
Keywords: green hydrogen; energy transition; institutional quality; carbon lock-in; trust.

1. INTRODUÇÃO

A descarbonização dos sistemas energéticos tornou-se uma exigência prática da política climática. Setores como refino, fertilizantes, siderurgia e química básica consomem grandes volumes de energia térmica e de matérias-primas fósseis que a eletrificação direta não substitui com facilidade. Para esses

segmentos, o hidrogênio obtido por eletrólise da água a partir de eletricidade renovável aparece como uma das poucas rotas tecnicamente viáveis de redução profunda de emissões (Staffell *et al.*, 2019; Kovač; Paranos; Marciuš, 2021). A literatura também adverte que o hidrogênio não é solução universal: o seu uso é mais defensável onde as alternativas elétricas são inviáveis, e a expansão em larga escala esbarra em custos, infraestrutura e coordenação de mercado (Ueckerdt *et al.*, 2021; Odenweller *et al.*, 2022).

A União Europeia transformou essa aposta em política pública. A Estratégia do Hidrogênio de 2020 fixou a meta de 40 GW de eletrolisadores até 2030, e o plano REPowerEU elevou a ambição para 10 milhões de toneladas de produção doméstica de hidrogênio renovável e outras 10 milhões importadas no mesmo horizonte (Comissão Europeia, 2020, 2022). Atos delegados, metas vinculantes de consumo e o Banco Europeu do Hidrogênio completaram uma arquitetura sem paralelo em outras regiões (Comissão Europeia, 2023; União Europeia, 2023a, 2023b). Ainda assim, os relatórios oficiais registram que, em 2023, a eletrólise respondia por cerca de 0,4% da capacidade de produção de hidrogênio na Europa e que o consumo de hidrogênio limpo não chegava a 0,4% da demanda (Clean Hydrogen Partnership, 2024). Metas ambiciosas e recursos abundantes conviveram com uma difusão muito lenta.

Esse descompasso é o ponto de partida deste ensaio. A pergunta que o orienta é simples de formular e difícil de responder: por que alguns países convertem metas comuns em capacidade instalada e outros não? A resposta mais imediata aponta para o custo, e o custo de fato pesa. A experiência das energias renováveis sugere, porém, que fatores menos visíveis, como a qualidade das instituições e a inércia dos sistemas fósseis, influenciam a velocidade com que

tecnologias limpas se difundem (Uzar, 2020; Saba; Biyase, 2022). No campo do desenvolvimento sustentável, Torres (2026) observou, em análise de 217 países, que o controle da corrupção e o acesso à energia moderna se associavam ao melhor desempenho no índice dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, ao passo que o consumo energético de base fóssil se associava ao pior desempenho e a estabilidade política não mostrava efeito. A hipótese explorada aqui é que essa mesma lógica institucional se aplica à difusão de uma tecnologia específica de transição.

A literatura sobre hidrogênio tem privilegiado aspectos técnicos, de custo e de cadeia de suprimentos (Glenk; Reichelstein, 2019; Azadnia *et al.*, 2023), e as análises de política costumam assumir a forma de estudos de caso nacionais (Ohlendorf; Löhr; Markard, 2023). Faltam quadros conceituais que articulem, em um mesmo raciocínio, a economia da tecnologia, a dinâmica das transições sociotécnicas, a qualidade das instituições e a confiança dos compradores no atributo limpo do produto. Este ensaio tem como objetivo propor um modelo conceitual para a difusão do hidrogênio verde que integre essas quatro perspectivas e derivar dele proposições testáveis e uma agenda de pesquisa. A contribuição pretendida é teórica, ao aproximar a literatura de transições da literatura sobre instituições e desenvolvimento sustentável, e aplicada, ao oferecer a gestores públicos uma leitura das condições que tornam as metas de hidrogênio exequíveis.

2. PERCURSO METODOLÓGICO

O trabalho assume a forma de ensaio teórico, modalidade que privilegia a reflexão argumentativa e a articulação entre teorias, em lugar da coleta de dados primários. A construção do argumento

seguiu três etapas. Na primeira, realizou-se revisão narrativa de quatro correntes de literatura selecionadas por sua pertinência ao problema: a economia do hidrogênio e da inovação ambiental; os estudos de transições sociotécnicas e de aprisionamento carbônico; a economia institucional e os estudos sobre governança e desenvolvimento sustentável; e a teoria da sinalização aplicada a mercados com atributos ambientais. Foram priorizados artigos publicados em periódicos revisados por pares e documentos oficiais da União Europeia e de agências internacionais de energia.

Na segunda etapa, os argumentos de cada corrente foram organizados segundo três dimensões analíticas já adotadas em estudos sobre determinantes do desenvolvimento sustentável: a energética ou estrutural, a econômica e tecnológica e a institucional (Azam *et al.*, 2021; Ríos *et al.*, 2025; Torres, 2026). Na terceira, as relações identificadas foram sintetizadas em um modelo conceitual e em proposições formuladas de modo a permitir teste empírico futuro. Dados numéricos foram utilizados apenas de forma ilustrativa e extraídos de relatórios públicos.

3. O HIDROGÊNIO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: PROMESSA E LIMITES

O hidrogênio não é fonte primária de energia, e sim vetor: precisa ser produzido a partir de outra fonte e só é tão limpo quanto o processo que o origina. A convenção cromática difundida na literatura distingue o hidrogênio cinza, obtido pela reforma a vapor do metano sem captura de carbono, o azul, que resulta da mesma rota com captura de parte do CO_2, e o verde, produzido pela eletrólise da água com eletricidade renovável (Oliveira; Beswick; Yan, 2021). A classificação por cores, embora didática, vem sendo

substituída por critérios baseados na intensidade de emissões ao longo do ciclo de vida, como os adotados pela União Europeia para o hidrogênio renovável de origem não biológica (União Europeia, 2023a, 2023c).

Quase todo o hidrogênio consumido no mundo é produzido a partir de combustíveis fósseis e destina-se a usos industriais tradicionais, sobretudo refino de petróleo e síntese de amônia e metanol (IEA, 2024). A transição pretendida não consiste, portanto, em criar um mercado novo, mas em substituir a base produtiva de um mercado existente e, depois, ampliá-lo para usos emergentes, como aço por redução direta, combustíveis sintéticos para aviação e navegação e armazenamento sazonal de eletricidade (Staffell *et al.*, 2019). A literatura de cenários reconhece o hidrogênio como componente relevante de sistemas energéticos de baixo carbono, mas diverge quanto à escala: estudos centrados em custos sistêmicos restringem o seu papel a nichos de difícil eletrificação, ao passo que estudos voltados à segurança energética e à integração de renováveis atribuem-lhe funções mais amplas (Hanley; Deane; Ó Gallachóir, 2018).

Ueckerdt *et al.* (2021) argumentam que combustíveis derivados de hidrogênio são caros, escassos no curto prazo e só fazem sentido climático quando produzidos com eletricidade quase inteiramente renovável, razão pela qual recomendam priorizá-los nas aplicações sem alternativa direta. Odenweller *et al.* (2022), por sua vez, estimaram a velocidade plausível de expansão do hidrogênio verde a partir do comportamento histórico de tecnologias análogas e concluíram que, mesmo sob crescimento muito rápido, a oferta global dificilmente alcançará até 2030 as quantidades previstas nas estratégias nacionais. A leitura converge com a de Sovacool (2016),

para quem as transições energéticas costumam ser lentas e cumulativas, salvo em contextos de forte coordenação estatal.

O principal obstáculo econômico é o custo. Em 2023, o custo nivelado médio do hidrogênio produzido por reforma a vapor do metano na Europa foi estimado em cerca de 3,76 euros por quilograma, contra aproximadamente 6,61 euros para a eletrólise conectada diretamente a fontes renováveis (Clean Hydrogen Partnership, 2024). Glenk e Reichelstein (2019) mostraram que a competitividade do hidrogênio renovável depende de arranjos que combinem geração e eletrólise de forma flexível, e que a paridade com o hidrogênio fóssil é sensível ao preço da eletricidade e às políticas de carbono. A viabilidade do hidrogênio verde, nessa leitura, não é uma propriedade da tecnologia, e sim da combinação entre tecnologia, matriz elétrica e regras de mercado.

Há ainda uma dimensão gerencial frequentemente subestimada. Azadnia *et al.* (2023) identificaram, na cadeia de suprimentos do hidrogênio verde voltada a setores europeus de difícil abatimento, riscos associados a infraestrutura, regulação, disponibilidade de eletricidade renovável, aceitação social e financiamento. Esses riscos não se distribuem de maneira homogênea entre os países, porque dependem de recursos naturais, capacidade estatal e estrutura industrial. A difusão do hidrogênio é, portanto, também um problema de gestão de cadeias, de coordenação entre atores e de desenho institucional, temas próprios da Administração.

4. DO NICHO AO REGIME: TRANSIÇÕES SOCIOTÉCNICAS E APRISIONAMENTO CARBÔNICO

A abordagem de transições sociotécnicas ajuda a compreender por que tecnologias limpas, mesmo disponíveis, demoram a se difundir. Geels (2002) propôs a perspectiva multinível, segundo a qual mudanças tecnológicas profundas resultam da interação entre nichos de inovação, regimes sociotécnicos estabelecidos e pressões do ambiente mais amplo. Os regimes reúnem tecnologias, infraestruturas, regras, rotinas organizacionais e interesses que se reforçam mutuamente e tendem à estabilidade. Os nichos são espaços protegidos em que novas tecnologias amadurecem antes de enfrentar a concorrência do regime.

No caso do hidrogênio, o regime corresponde à produção por reforma do metano integrada a refinarias e plantas de amônia, com infraestrutura de gás natural, contratos de longo prazo e competências técnicas consolidadas. A eletrólise ocupa a posição de nicho, protegida por subsídios, projetos de demonstração e metas regulatórias. Markard, Raven e Truffer (2012) destacaram que o estudo das transições para a sustentabilidade precisa considerar a política e o poder, porque a substituição de regimes cria perdedores e ganhadores. Ohlendorf, Löhr e Markard (2023) mostraram, ao analisar o debate sobre hidrogênio na Alemanha, que atores de setores distintos disputam quais usos devem ser priorizados e quais formas de produção devem ser aceitas, e essa disputa influencia o ritmo e a direção da política.

Unruh (2000) cunhou a expressão aprisionamento carbônico para designar a condição em que economias industriais permanecem presas a sistemas baseados em combustíveis fósseis em razão de retornos crescentes de escala, de efeitos de rede e da coevolução entre tecnologias e instituições. Seto *et al.* (2016) distinguiram três tipos de aprisionamento: o de infraestrutura e tecnologia, o

institucional e o comportamental. Os três se aplicam ao hidrogênio. A infraestrutura de reforma fóssil representa capital afundado; as regras de mercado e os contratos de gás refletem o regime anterior; e as rotinas das empresas químicas e de refino estão organizadas em torno dessa base produtiva.

A economia da inovação oferece um mecanismo para esse aprisionamento. Acemoglu *et al.* (2012) mostraram que, em modelos de mudança técnica dirigida, a inovação tende a seguir a base tecnológica dominante, de modo que tecnologias sujas atraem mais pesquisa justamente porque já são maiores; a correção dessa trajetória exige intervenção temporária, como impostos sobre carbono e subsídios à pesquisa limpa. Aghion *et al.* (2016) encontraram evidência dessa dependência de trajetória na indústria automobilística: empresas com histórico de inovação em motores a combustão continuaram inovando nessa direção mesmo com o aumento do preço dos combustíveis. Transposta para o hidrogênio, a lógica sugere que países com grande capacidade instalada de reforma fóssil enfrentam incentivos persistentes para preservá-la.

Disso decorre uma implicação relevante para a análise comparativa. A abertura de um país ao hidrogênio verde depende menos do tamanho do seu mercado de hidrogênio e mais do peso relativo do regime fóssil na sua matriz energética. Países que já avançaram na transição elétrica chegam à era do hidrogênio com o regime fóssil enfraquecido e com eletricidade renovável disponível, condição que, segundo a perspectiva multinível, favorece a passagem do nicho ao regime (Geels, 2002). Países com matrizes muito carbonizadas enfrentam o caminho inverso: grande demanda potencial, mas forte inércia.

5. INSTITUIÇÕES, GOVERNANÇA E CAPACIDADE DE INOVAÇÃO

A tradição institucionalista define instituições como as regras do jogo de uma sociedade, formais e informais, que estruturam incentivos e reduzem a incerteza nas trocas (North, 1990). Instituições de qualidade reduzem custos de transação, protegem direitos de propriedade, tornam previsível a ação estatal e permitem contratos de longo prazo. Esses atributos são particularmente relevantes para investimentos de longa maturação, alto custo inicial e forte dependência regulatória, como os projetos de hidrogênio eletrolítico.

Os Worldwide Governance Indicators operacionalizam a qualidade institucional em seis dimensões: voz e accountability, estabilidade política e ausência de violência, efetividade do governo, qualidade regulatória, estado de direito e controle da corrupção (Kaufmann; Kraay; Mastruzzi, 2011). Os autores advertem que os indicadores são compostos de percepções e que diferenças pequenas entre países devem ser lidas com cautela, mas a ampla cobertura os tornou referência em estudos comparativos. Para o argumento deste ensaio, importa sobretudo a distinção entre as dimensões ligadas à integridade e à imparcialidade do Estado, como o controle da corrupção, o estado de direito e a qualidade regulatória, e a dimensão ligada à mera ausência de turbulência, a estabilidade política.

A relação entre qualidade institucional e desenvolvimento sustentável está bem documentada. Azam *et al.* (2021) verificaram, em países em desenvolvimento, que melhores instituições elevam indicadores de desenvolvimento sustentável. Ríos *et al.* (2025), em análise de 145 países, encontraram associação positiva entre as

dimensões de governança e o desempenho agregado nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Gallego-Álvarez, Nieto-Librero e Martín-Gallego (2025) mostraram que menores níveis de corrupção acompanham melhor desempenho em vários objetivos, e Hoinaru *et al.* (2020) concluíram que a corrupção e a economia informal prejudicam o desenvolvimento econômico e sustentável. Le, Nguyen e Bao (2025) acrescentaram que, em mercados emergentes, o gasto governamental só contribui para o desenvolvimento sustentável quando ancorado em boas instituições.

No campo da energia, as evidências seguem a mesma direção. Uzar (2020) observou que a qualidade institucional aumenta o consumo de energia renovável, e Saba e Biyase (2022), ao estudarem 35 países europeus entre 2000 e 2018, constataram que controle da corrupção, estado de direito, voz e accountability e qualidade institucional exercem efeito positivo de longo prazo sobre o desenvolvimento da eletricidade renovável. A governança atua, portanto, como condição de fundo da transição energética: não substitui recursos naturais ou financeiros, mas determina a eficiência com que esses recursos se convertem em capacidade instalada.

Há boas razões para supor que esse efeito seja ainda mais forte no hidrogênio do que nas renováveis convencionais. A energia eólica e a solar já são competitivas em muitos mercados e podem avançar com apoio regulatório moderado. O hidrogênio eletrolítico, ao contrário, depende de subsídios, de contratos de compra garantidos, de certificação de origem e de coordenação entre produtores de eletricidade, operadores de rede, produtores de hidrogênio e consumidores industriais. Cada elo exige confiança nas regras e na imparcialidade de sua aplicação. A própria Comissão Europeia reconheceu que a maior parte dos investimentos anunciados em

hidrogênio permanecia em fase de planejamento, sem decisão final de investimento, e que a implementação depende de estratégias e capacidades nacionais distintas (Comissão Europeia, 2023). A IEA (2024) registra o mesmo padrão em escala global e aponta a incerteza regulatória e de demanda como principal barreira.

Nem todas as dimensões de governança têm o mesmo peso. A estabilidade política pode ser condição necessária para qualquer investimento, mas, em conjuntos de países com estabilidade relativamente alta, a sua variação diz pouco sobre diferenças de desempenho. O controle da corrupção, o estado de direito e a qualidade regulatória, por sua vez, incidem diretamente sobre licenciamento, contratos e alocação de subsídios. Essa distinção ganha importância porque, na análise de Torres (2026), o controle da corrupção mostrou-se determinante do desempenho sustentável, enquanto a estabilidade política não apresentou significância.

A difusão de tecnologias emergentes depende também da capacidade de gerar, absorver e adaptar conhecimento. Hekkert *et al.* (2007) propuseram analisar sistemas de inovação tecnológica a partir de funções como atividades empresariais, desenvolvimento e difusão de conhecimento, orientação da busca, formação de mercados, mobilização de recursos e criação de legitimidade. Rogers (2003) observou que a adoção de inovações depende da vantagem relativa percebida, da compatibilidade com práticas existentes, da complexidade, da possibilidade de experimentação e da observabilidade dos resultados. O hidrogênio eletrolítico tem vantagem ambiental clara, mas desvantagem de custo, baixa compatibilidade com a infraestrutura vigente e complexidade elevada. Países com mais pesquisa e desenvolvimento tendem a reduzir a complexidade percebida, a multiplicar projetos de

demonstração e a produzir os primeiros casos observáveis. Popp (2019) reforça o argumento ao mostrar que a política ambiental afeta sobretudo a difusão das tecnologias, e que essa difusão depende da capacidade de absorção dos agentes e do ambiente institucional.

6. CERTIFICAÇÃO E CONFIANÇA: A DIMENSÃO DE MERCADO DAS INSTITUIÇÕES

O hidrogênio tem uma particularidade que reforça o peso das instituições: o seu atributo ambiental é invisível. Uma molécula produzida por eletrólise com energia eólica é quimicamente idêntica a outra obtida da reforma do gás natural. O caráter limpo do produto depende inteiramente do rastreamento da eletricidade utilizada, da contabilidade de emissões ao longo do ciclo de vida e de certificados que atestem essas informações. Não por acaso, a União Europeia regulou em detalhe as condições para que o hidrogênio seja considerado renovável, exigindo redução mínima de 70% das emissões em relação ao combustível fóssil de referência e critérios de adicionalidade e de correlação temporal e geográfica entre a geração renovável e a eletrólise (União Europeia, 2023a, 2023c).

A teoria da sinalização ajuda a compreender a função dessas regras. Em mercados com assimetria de informação, sinais custosos e verificáveis permitem distinguir ofertas de qualidade diferente (Spence, 1973). Certificados de origem cumprem esse papel para o hidrogênio, mas só funcionam se o comprador confiar em quem os emite e fiscaliza. Quando a confiança falha, abre-se espaço para o greenwashing, entendido como a combinação de desempenho ambiental fraco com comunicação ambiental positiva, fenômeno

mais frequente onde a regulação é frouxa e a fiscalização incerta (Delmas; Burbano, 2011).

A consequência do greenwashing para o mercado é o ceticismo verde, a disposição de desconfiar das alegações ambientais das empresas, que corrói a confiança e reduz a disposição de pagar pelo atributo sustentável (Leonidou; Skarmeas, 2017). Kulin (2020) mostrou, em comparação entre países, que a qualidade do governo condiciona a conversão da preocupação ambiental em comportamento, o que sugere que a confiança nas alegações ambientais tem raiz institucional, e não apenas comercial. Em países nos quais as alegações ambientais do varejo já enfrentam desconfiança elevada, como o Brasil, onde levantamento recente apontou que a maioria dessas alegações era falsa ou enganosa (Market Analysis; Instituto Akatu, 2024), o risco de transferir esse ceticismo para o mercado nascente de hidrogênio não é desprezível.

Essa discussão desloca o papel das instituições. Na literatura sobre transição energética, a governança costuma ser tratada como variável de oferta, que facilita licenciamento, contratos e investimento. A natureza invisível do atributo limpo indica que ela é também variável de demanda: a qualidade institucional determina se compradores industriais, financiadores e, no limite, consumidores finais aceitarão pagar pelo hidrogênio verde. Instituições íntegras tornam a certificação crível, reduzem o prêmio de risco e permitem a formação de um preço diferenciado para o produto limpo. Instituições frágeis produzem o efeito inverso, ainda que a tecnologia e os recursos naturais estejam disponíveis.

7. MODELO CONCEITUAL E PROPOSIÇÕES

A integração das correntes discutidas permite organizar os fatores da difusão do hidrogênio verde em três dimensões interdependentes. A dimensão energética reúne a disponibilidade de eletricidade renovável e o peso do regime fóssil na matriz, que expressam ao mesmo tempo o insumo da eletrólise e a intensidade do aprisionamento carbônico. A dimensão econômica e tecnológica reúne a escala industrial, que cria demanda e capacidade de investimento, o esforço em pesquisa e desenvolvimento, que reduz a complexidade e multiplica experiências, e o custo relativo entre rotas. A dimensão institucional reúne a integridade e a imparcialidade do Estado, que atuam do lado da oferta, por meio de licenciamento, contratos e subsídios, e do lado da demanda, por meio da credibilidade da certificação.

O modelo proposto sustenta que essas dimensões não atuam de forma aditiva. A qualidade institucional influencia a difusão do hidrogênio verde por dois caminhos. O primeiro é direto: instituições íntegras reduzem custos de transação e o risco dos projetos. O segundo é indireto e mais lento: países com boas instituições tendem a ter feito antes a transição elétrica e chegam à era do hidrogênio com o regime fóssil enfraquecido. Parte do efeito institucional, assim, manifesta-se por meio da matriz energética. A escala industrial, por sua vez, tende a explicar sobretudo o volume absoluto de capacidade instalada, mas pouco diz sobre o grau de transformação da base produtiva. O Quadro 1 apresenta as proposições derivadas do modelo.

Quadro 1. Proposições teóricas do modelo conceitual de difusão do hidrogênio verde

Proposição	Enunciado	Fundamentos
P1	A qualidade institucional, sobretudo o controle da corrupção, o estado de direito e a qualidade regulatória, associa-se positivamente à capacidade eletrolítica e à participação do hidrogênio limpo	North (1990); Kaufmann, Kraay e Mastruzzi (2011); Saba e Biyase (2022)
P2	A estabilidade política, isoladamente, tem baixo poder de discriminar países em estágios distintos de difusão quando o conjunto analisado é relativamente estável	Torres (2026); Ríos et al. (2025)
P3	A dependência da matriz em relação aos combustíveis fósseis associa-se negativamente à participação do hidrogênio eletrolítico, e parte do efeito institucional opera por meio dessa dependência	Unruh (2000); Geels (2002); Seto et al. (2016)
P4	A escala industrial e o esforço em pesquisa e desenvolvimento associam-se positivamente à capacidade eletrolítica absoluta, mas pouco à participação relativa	Hekkert et al. (2007); Acemoglu et al. (2012); Popp (2019)
P5	Diferenças de custo nivelado entre países, dentro de um mesmo espaço regulatório, explicam pouco da variação na difusão, porque instrumentos comuns atenuam essas diferenças	Glenk e Reichelstein (2019); Comissão Europeia (2023)
P6	A credibilidade da certificação, condicionada pela qualidade institucional, modera a disposição dos compradores de pagar pelo atributo limpo e, portanto, a formação da demanda	Spence (1973); Delmas e Burbano (2011); Leonidou e Skarmeas (2017); Kulin (2020)

Fonte: elaborado pela autora (2026).

As proposições P1 e P2 estendem para uma tecnologia específica a hipótese de que a dimensão institucional relevante para a sustentabilidade é a integridade do Estado, e não apenas a ausência de turbulência. A proposição P3 traduz a perspectiva do aprisionamento carbônico em termos testáveis e explicita a mediação entre instituições e matriz. A proposição P4 separa o volume da transformação, distinção que costuma ficar oculta quando se compara apenas a capacidade instalada em megawatts. A proposição P5 questiona a centralidade do custo nas explicações comparativas, sem negar que o custo é a barreira que mantém o hidrogênio verde em posição marginal. A proposição P6 introduz a dimensão de mercado das instituições e conecta a literatura de transição energética à literatura sobre confiança e ceticismo verde.

O modelo tem limites que convém explicitar. Ele foi construído a partir de evidências produzidas sobretudo em países europeus e da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, e a sua aplicação a economias emergentes requer cautela, porque nelas a informalidade, a capacidade estatal desigual entre regiões e a dependência de financiamento externo podem alterar o peso relativo das dimensões. Além disso, as relações propostas são associativas; a identificação de efeitos causais exigirá dados longitudinais, que só estarão disponíveis à medida que os projetos em construção entrarem em operação.

8. IMPLICAÇÕES PARA A GESTÃO E AGENDA DE PESQUISA

Para a gestão pública, o modelo sugere três implicações. A primeira é que metas de capacidade precisam vir acompanhadas de

investimento em capacidade administrativa: licenciamento, certificação e fiscalização são parte da política industrial do hidrogênio, e não etapas burocráticas acessórias. A segunda é que a estratégia de hidrogênio deve ser articulada à transição da matriz elétrica, porque a eletrólise tende a avançar onde a dependência fóssil já recuou. A terceira é que a integridade das instituições é condição para que subsídios e créditos fiscais se convertam em capacidade instalada, e não em renda capturada por poucos agentes.

Essas implicações interessam diretamente a países emergentes com grande potencial renovável. O Brasil aprovou em 2024 o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono e um programa de créditos fiscais para o setor (Brasil, 2024a, 2024b). Segundo Lira, Kamer e Quitzow (2025), os projetos brasileiros avançaram mais pela iniciativa de estados como o Ceará do que por uma estratégia nacional consolidada. Lido à luz do modelo, o caso brasileiro combina vantagem energética rara com desafios na dimensão institucional, o que torna a qualidade da regulamentação e da certificação o fator decisivo para que o potencial se converta em mercado.

Para a pesquisa, abrem-se quatro frentes. A primeira é testar as proposições P1 a P5 com dados comparativos entre países, à medida que séries mais longas se tornarem disponíveis, distinguindo indicadores de volume e de participação relativa. A segunda é investigar a proposição P6 no nível dos compradores, com estudos sobre a percepção de rótulos e certificados de hidrogênio por empresas consumidoras e financiadores. A terceira é examinar a dimensão subnacional, pouco explorada, em países federativos nos quais estados competem por projetos. A quarta é aproximar a

literatura de transições da literatura sobre comportamento do consumidor, investigando se o ceticismo verde observado em mercados de bens de consumo se transfere para mercados de energia e de insumos industriais.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este ensaio partiu de um descompasso: metas ambiciosas, recursos abundantes e tecnologia disponível conviveram, na Europa, com uma difusão muito lenta do hidrogênio verde. Para compreendê-lo, integrou quatro correntes de literatura e propôs um modelo conceitual que articula as dimensões energética, econômica e institucional da transição.

O argumento central é que a difusão do hidrogênio verde depende menos do custo tecnológico isolado e mais da combinação entre escala industrial, peso do regime fóssil e qualidade das instituições. As instituições atuam em dois planos. Do lado da oferta, reduzem o risco de projetos longos e dependentes de regulação. Do lado da demanda, conferem credibilidade à certificação que torna visível o atributo limpo de um produto quimicamente indistinguível do seu equivalente fóssil. Parte do efeito institucional opera por meio da matriz energética, porque países com boas instituições tendem a ter avançado antes na transição elétrica.

A principal contribuição teórica é mostrar que a lógica institucional observada para o desenvolvimento sustentável em escala global pode ser estendida à difusão de uma tecnologia específica de transição, com a inclusão de uma dimensão de mercado, a confiança, que a literatura de transição energética costuma ignorar. Para a Administração, o ensaio desloca a atenção do custo da

tecnologia para a capacidade de organizar mercados, contratos e regras. As seis proposições apresentadas oferecem um roteiro para estudos empíricos futuros, especialmente em países emergentes com grande potencial renovável e instituições ainda em consolidação.

DECLARAÇÕES

Uso de inteligência artificial: a ferramenta de IA Claude (Anthropic) foi utilizada como apoio ao tratamento dos dados, à revisão linguística e à formatação, sob supervisão e responsabilidade intelectual da autora.

Conflito de interesses: a autora declara não haver conflito de interesses.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEMOGLU, D.; AGHION, P.; BURSZTYN, L.; HEMOUS, D. The environment and directed technical change. **American Economic Review,** v. 102, n. 1, p. 131-166, 2012. https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131

AGHION, P.; DECHEZLEPRÊTRE, A.; HÉMOUS, D.; MARTIN, R.; VAN REENEN, J. Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: evidence from the auto industry. **Journal of Political Economy,** v. 124, n. 1, p. 1-51, 2016. https://doi.org/10.1086/684581

AZADNIA, A. H.; MCDAID, C.; ANDWARI, A. M.; HOSSEINI, S. E. Green hydrogen supply chain risk analysis: a European hard-to-abate sectors perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 182, 113371, 2023. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113371

AZAM, M.; HUNJRA, A.; BOURI, E.; TAN, Y.; AL-FARYAN, M. Impact of institutional quality on sustainable development: evidence from developing countries. **Journal of Environmental Management,** v. 298, 113465, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113465

BRASIL. **Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024.** Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono; dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono; institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro). Brasília, DF: Presidência da República, 2024a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14948.htm. Acesso em: 19 out. 2026.

BRASIL. **Lei nº 14.990, de 27 de setembro de 2024.** Institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC). Brasília, DF: Presidência da República, 2024b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14990.htm. Acesso em: 19 out. 2026.

CLEAN HYDROGEN PARTNERSHIP. **The European hydrogen market landscape: November 2024.** Brussels: European Hydrogen Observatory; Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2024. Disponível em: https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/sites/default/files/2024-11/The%20European%20hydrogen%20market%20landscape_November%202024.pdf. Acesso em: 19 out. 2026.

COMISSÃO EUROPEIA. **Comunicação sobre o Banco Europeu do Hidrogénio.** COM(2023) 156 final. Bruxelas: Comissão Europeia, 2023.

Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:52023DC0156. Acesso em: 19 out. 2026.

COMISSÃO EUROPEIA. **Plano REPowerEU.** COM(2022) 230 final. Bruxelas: Comissão Europeia, 2022. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:52022DC0230. Acesso em: 19 out. 2026.

COMISSÃO EUROPEIA. **Uma estratégia do hidrogénio para uma Europa com impacto neutro no clima.** COM(2020) 301 final. Bruxelas: Comissão Europeia, 2020. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301. Acesso em: 19 out. 2026.

DELMAS, M. A.; BURBANO, V. C. The drivers of greenwashing. **California Management Review,** v. 54, n. 1, p. 64-87, 2011. https://doi.org/10.1525/cmr.2011.54.1.64

GALLEGO-ÁLVAREZ, I.; NIETO-LIBRERO, A.; MARTÍN-GALLEGO, E. Sustainable development goals and corruption: an international situation analysis through the application of a three-way multivariate analysis. **Sustainability,** v. 17, n. 5, 1806, 2025. https://doi.org/10.3390/su17051806

GEELS, F. W. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. **Research Policy,** v. 31, n. 8-9, p. 1257-1274, 2002. https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8

GLENK, G.; REICHELSTEIN, S. Economics of converting renewable power to hydrogen. **Nature Energy,** v. 4, p. 216-222, 2019. https://doi.org/10.1038/s41560-019-0326-1

HANLEY, E. S.; DEANE, J. P.; Ó GALLACHÓIR, B. P. The role of hydrogen in low carbon energy futures: a review of existing perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 82, p. 3027-3045, 2018. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.034

HEKKERT, M. P.; SUURS, R. A. A.; NEGRO, S. O.; KUHLMANN, S.; SMITS, R. E. H. M. Functions of innovation systems: a new approach for analysing technological change. **Technological Forecasting and Social Change,** v. 74, n. 4, p. 413-432, 2007. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.03.002

HOINARU, R.; BUDA, D.; BORLEA, S. N.; VĂIDEAN, V. L.; ACHIM, M. V. The impact of corruption and shadow economy on the economic and sustainable development: do they "sand the wheels" or "grease the wheels"? **Sustainability,** v. 12, n. 2, 481, 2020. https://doi.org/10.3390/su12020481

IEA. **Global Hydrogen Review 2024.** Paris: International Energy Agency, 2024. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024. Acesso em: 19 out. 2026.

KAUFMANN, D.; KRAAY, A.; MASTRUZZI, M. The worldwide governance indicators: methodology and analytical issues. **Hague Journal on the Rule of Law,** v. 3, n. 2, p. 220-246, 2011. https://doi.org/10.1017/S1876404511200046

KOVAČ, A.; PARANOS, M.; MARCIUŠ, D. Hydrogen in energy transition: a review. **International Journal of Hydrogen Energy,** v. 46, n. 16, p. 10016-10035, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.256

KULIN, J. Quality of government and the relationship between environmental concern and pro-environmental behavior: a cross-national study. **Environmental Politics,** v. 30, p. 727-752, 2020. https://doi.org/10.1080/09644016.2020.1809160

LE, H.; NGUYEN, T.; BAO, H. Government expenditure and sustainable development in emerging markets: the role of institutional quality. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity,** 100558, 2025. https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100558

LEONIDOU, C. N.; SKARMEAS, D. Gray shades of green: causes and consequences of green skepticism. **Journal of Business Ethics,** v. 144, p. 401-415, 2017. https://doi.org/10.1007/s10551-015-2829-4

LIRA, F.; KAMER, N.; QUITZOW, R. **Hydrogen policy in Brazil: an emerging path to green re-industrialization?** Potsdam: Research Institute for Sustainability, 2025. (RIFS Discussion Paper). https://doi.org/10.48481/rifs.2025.002

MARKARD, J.; RAVEN, R.; TRUFFER, B. Sustainability transitions: an emerging field of research and its prospects. **Research Policy,** v. 41, n. 6, p. 955-967, 2012. https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.013

MARKET ANALYSIS; INSTITUTO AKATU. **Greenwashing no Brasil 2024: um estudo sobre as alegações ambientais nos produtos.** São Paulo: Market Analysis Brasil, 2024. Disponível em: https://marketanalysis.com.br/na-midia/greenwashing-no-brasil-um-estudo-sobre-as-alegacoes-ambientais-nos-produtos-2024. Acesso em: 19 out. 2026.

NORTH, D. C. **Institutions, institutional change and economic performance.** Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

ODENWELLER, A.; UECKERDT, F.; NEMET, G. F.; JENSTERLE, M.; LUDERER, G. Probabilistic feasibility space of scaling up green hydrogen supply. **Nature Energy,** v. 7, p. 854-865, 2022. https://doi.org/10.1038/s41560-022-01097-4

OHLENDORF, N.; LÖHR, M.; MARKARD, J. Actors in multi-sector transitions: discourse analysis on hydrogen in Germany. **Environmental Innovation and Societal Transitions,** v. 47, 100692, 2023. https://doi.org/10.1016/j.eist.2023.100692

OLIVEIRA, A. M.; BESWICK, R. R.; YAN, Y. A green hydrogen economy for a renewable energy society. **Current Opinion in Chemical Engineering,** v. 33, 100701, 2021. https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100701

POPP, D. Environmental policy and innovation: a decade of research. **International Review of Environmental and Resource Economics,** v. 13, n. 3-4, p. 265-337, 2019. https://doi.org/10.1561/101.00000111

RÍOS, A.; RAIMO, N.; BENITO, B.; VITOLLA, F.; GUILLAMÓN, M. Governing for the goals: how governance quality shapes the achievement of the sustainable development goals. **Sustainable Development,** 2025. https://doi.org/10.1002/sd.70361

ROGERS, E. M. **Diffusion of innovations.** 5. ed. New York: Free Press, 2003.

SABA, C. S.; BIYASE, M. Determinants of renewable electricity development in Europe: do governance indicators and institutional quality matter? **Energy Reports,** v. 8, p. 13914-13938, 2022. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.184

SETO, K. C.; DAVIS, S. J.; MITCHELL, R. B.; STOKES, E. C.; UNRUH, G.; ÜRGE-VORSATZ, D. Carbon lock-in: types, causes, and policy implications. **Annual Review of Environment and Resources,** v. 41, p. 425-452, 2016. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085934

SOVACOOL, B. K. How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. **Energy Research and Social Science,** v. 13, p. 202-215, 2016. https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.020

SPENCE, M. Job market signaling. **The Quarterly Journal of Economics,** v. 87, n. 3, p. 355-374, 1973. https://doi.org/10.2307/1882010

STAFFELL, I.; SCAMMAN, D.; VELAZQUEZ ABAD, A.; BALCOMBE, P.; DODDS, P. E.; EKINS, P.; SHAH, N.; WARD, K. R. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. **Energy and Environmental Science,** v. 12, n. 2, p. 463-491, 2019. https://doi.org/10.1039/C8EE01157E

TORRES, R. M. A. C. **A evolução e os determinantes do desenvolvimento sustentável na Administração: uma análise bibliométrica e empírica.** 2026. Dissertação (Mestrado em Administração), Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2026.

UECKERDT, F.; BAUER, C.; DIRNAICHNER, A.; EVERALL, J.; SACCHI, R.; LUDERER, G. Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. **Nature Climate Change,** v. 11, p. 384-393, 2021. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva (UE) 2023/2413 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 18 de outubro de 2023, que altera a Diretiva (UE)

2018/2001 no respeitante à promoção de energia de fontes renováveis. **Jornal Oficial da União Europeia,** L 2023/2413, 31 out. 2023b. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj. Acesso em: 19 out. 2026.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamento Delegado (UE) 2023/1184 da Comissão, de 10 de fevereiro de 2023, que completa a Diretiva (UE) 2018/2001 estabelecendo uma metodologia da União que define regras pormenorizadas para a produção de combustíveis líquidos e gasosos renováveis de origem não biológica para os transportes. **Jornal Oficial da União Europeia,** L 157, p. 11-19, 20 jun. 2023a. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/1184/oj. Acesso em: 19 out. 2026.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamento Delegado (UE) 2023/1185 da Comissão, de 10 de fevereiro de 2023, que completa a Diretiva (UE) 2018/2001 estabelecendo um limiar mínimo para a redução das emissões de gases com efeito de estufa dos combustíveis de carbono reciclado e especificando uma metodologia para avaliar a redução das emissões dos combustíveis renováveis de origem não biológica. **Jornal Oficial da União Europeia,** L 157, p. 20-33, 20 jun. 2023c. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/1185/oj. Acesso em: 19 out. 2026.

UNRUH, G. C. Understanding carbon lock-in. **Energy Policy,** v. 28, n. 12, p. 817-830, 2000. https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00070-7

UZAR, U. Political economy of renewable energy: does institutional quality make a difference in renewable energy consumption? **Renewable Energy,** v. 155, p. 591-603, 2020. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.172

[1] Mestra em Administração pela Universidade Estadual do Ceará (UECE) e graduada em Ciências Contábeis pela Faculdade Estácio do Ceará (Estácio FIC). Programa de Pós-Graduação em Administração (PPGA/UECE), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail. Lattes: http://lattes.cnpq.br/2197552564976547.