

Estudos regulatórios para a certificação do hidrogênio verde no Brasil

Regulatory studies for green hydrogen certification in Brazil

José sérgio gabrielli*
André pereira R. tokarski**

► DOI: <https://doi.org/10.14295/principios.2675-6609.2024.170.005>

Acervo Depositphotos



Montagem retrata as potencialidades do hidrogênio verde como fonte de energia

RESUMO

O hidrogênio ocupa hoje uma posição estratégica para a transição energética. Após décadas sendo considerado uma fonte de energia disruptiva e de grande potencial, o hidrogênio verde (H_2V) tem sido aposta de algumas das maiores economias do mundo, que o produzem pela rota eletrolítica ou com baixa emissão de carbono como uma opção para o cumprimento das metas climáticas. Este artigo busca avaliar as oportunidades para a regulação do processo de certificação do hidrogênio verde no Brasil. A pesquisa foi realizada a partir de uma metodologia qualitativa e de revisão bibliográfica. As conclusões indicam a necessidade de estabelecer sistemas confiáveis de certificação para a produção de H_2V e seus produtos derivados. Sem padrões internacionais definidos para a certificação, é improvável que o comércio de hidrogênio renovável se desenvolva plenamente. Como próximos passos de pesquisa, sugerimos investigar a extensão do sistema de certificação e a uniformização de seus critérios e alcances.

Palavras-chave: Certificação. Regulação econômica. Hidrogênio verde. Desenvolvimento sustentável. Transição energética.

ABSTRACT

Hydrogen now occupies a strategic position in the energy transition. After decades of being considered a disruptive energy source with great potential, some of the world's largest economies are betting on the use of green hydrogen, produced by the electrolytic or low-carbon route, as an option for meeting climate goals. This article aims to analyze the opportunities for regulating the green hydrogen certification process in Brazil. The research was carried out using a qualitative methodology and a literature review. The conclusions indicate the need to establish reliable certification systems to produce H_2V and its derived products. Without defined international standards for certification, the renewable hydrogen trade is unlikely to develop fully. As next research steps, we suggest investigating the extension of the certification system and the standardization of its criteria and scope.

Keywords: Certification. Economic regulation. Green hydrogen. Sustainable development. Energy transition.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste artigo é avaliar a viabilidade da implementação de um sistema de certificação no Brasil da produção de hidrogênio verde e de alguns de seus subprodutos, como a amônia e o metanol, e as possíveis aplicações destes enquanto combustíveis sintéticos e fertilizantes de baixo carbono.

O uso do hidrogênio como fonte de energia não é novidade, é amplamente utilizado em plantas industriais e a maior parte de sua produção atual provém do gás natural, sendo principalmente um subproduto do refino do petróleo. Depois de décadas sendo considerado uma fonte energética de grande potencial e disruptiva para o futuro, o hidrogênio verde vem sendo uma aposta das maiores economias do mundo, que o produzem, por fontes renováveis ou com baixa emissão de carbono, não apenas como uma alternativa para o cumprimento das metas climáticas, mas também para resguardar seus interesses energéticos diante das turbulências do contexto geopolítico atual.

A guerra entre Rússia e Ucrânia acelerou as pretensões da União Europeia de reduzir sua dependência do gás russo e buscar diversificar suas fontes de energia, incluindo um forte investimento em fontes renováveis. Tal objetivo está claramente delineado no REPowerEU (Mathiesen *et al.*, 2022), programa da Comissão Europeia que já anunciou, dentre outras medidas, destinar 225 bilhões de euros para o investimento em energias limpas nos próximos cinco anos.

O hidrogênio de baixo carbono está no centro da estratégia do bloco europeu para atingir as metas do Acordo de Paris (2015). Os documentos *European Green Deal* (European Commission, 2019), *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe* (European Commission, 2020a) e *EU strategy for energy system integration* (European Commission, 2020b), apresentados pela Comissão Europeia, situam o uso do H₂ como absolutamente decisivo para a transição do sistema elétrico europeu para um sistema neutro em emissão de gases de efeito estufa (GEEs) até 2050.

Para a Alemanha o foco está no hidrogênio a partir de fontes renováveis, com os EUA, China, Índia, Reino Unido e outros países adotando uma posição mais flexível, aceitando o aumento da produção do H₂ de fontes fósseis, desde que acompanhado de projetos de sequestro e armazenamento de carbono.

Apesar de o hidrogênio renovável ser bastante promissor, ainda persistem inúmeras incertezas no campo tecnológico e regulatório para alavancar seu comércio internacional. Não existe hoje um mercado de hidrogênio no sentido estrito do termo, uma vez que ele é produzido e consumido nas próprias unidades de produção, sem trocas comerciais entre produtores e consumidores.

A criação de um mercado internacional de hidrogênio vai depender não só da expansão do uso desse combustível para outros setores como da elaboração de mecanismos que estimulem seu comércio. Devido à variedade de rotas de produção e às diferentes intensidades de carbono associadas a cada uma delas, é imprescindível estabelecer padrões e certificações para garantir a rastreabilidade e a qualidade do hidrogênio ao longo de toda a cadeia de abastecimento. Os padrões de certificação devem ser acordados internacionalmente por meio de uma estrutura regulatória e de certificação com atributos e normas que permitam aos compradores se assegurar da origem do H₂.

A certificação deve atender aos requisitos nacionais e internacionais e buscar apoiar o mercado de hidrogênio em âmbito global, dando segurança aos consumidores para comprovarem a origem e rastrearem os atributos ambientais do produto, e aos produtores, fortalecendo a segurança e credibilidade do seu produto (CCEE, 2023).

Este artigo é constituído de mais seis seções. Na seção 2 será debatida a experiência de certificação enquanto política de diferenciação do produto e a sua relação com a complexidade econômica e a sofisticação produtiva. A seção seguinte apresentará exemplos de diferentes requisitos para a certificação. A seção 4 tem como objetivo avaliar a disposição dos agentes para pagar pela certificação verde, enquanto a seção 5 irá comparar as experiências piloto de certificação de hidrogênio verde, inclusive no Brasil, e a seção 6 discutirá as metodologias de estudo de pegadas de carbono, com destaque especial para a RenovaCalc, instrumento utilizado para calcular a pegada de carbono e atribuir uma nota de eficiência energética aos produtores de biocombustíveis. Ao final serão apresentadas as conclusões.

2. A CERTIFICAÇÃO COMO POLÍTICA INDUSTRIAL DE DIFERENCIAÇÃO DE PRODUTOS

A estratégia de certificação como política industrial de diferenciação de produtos é utilizada em diversas atividades econômicas e, nas circunstâncias em que há disposição de pagar a diferença de preço, tem revelado a sua eficácia na valorização do produto certificado. A certificação pode envolver um ou mais aspectos relacionados ao processo produtivo, isoladamente ou em combinação. São largamente utilizadas as certificações de origem geográfica, de insumos, de processos e de equipamentos.

A certificação, ao garantir a conformidade de um produto com determinados padrões e normas, confere-lhe atributos de qualidade, segurança e sustentabilidade, que podem ser utilizados como fatores de diferenciação no mercado.

Assim, a diferenciação dos produtos pela via da certificação tem o potencial de promover efeitos positivos ao longo de toda a cadeia produtiva. A certificação do produto com um ou mais atributos, como a origem geográfica e a conformidade de insumos, dos processos e dos equipamentos empregados, além de responder a uma eventual demanda específica por parte do mercado consumidor, requer maior sofisticação do sistema produtivo.

Estudos do *Atlas da complexidade econômica* (Hausmann *et al.*, 2011) relacionam o padrão de renda de cada sociedade ao grau de sofisticação e complexidade produtiva por ela alcançado. O desenvolvimento econômico, nessa perspectiva, estaria diretamente ligado ao domínio de capacidades produtivas mais sofisticadas.

Os principais indicadores para aferir a complexidade econômica são a não ubiquidade dos bens produzidos e a diversidade da pauta exportadora de cada país:

Se determinada economia é capaz de produzir bens não ubíquos, raros e complexos, estamos diante de uma indicação de que o país tem um sofisticado tecido produtivo. [...]

Os bens não ubíquos devem ser divididos entre aqueles que têm alto conteúdo tecnológico e, portanto, são de difícil produção, como aviões, e aqueles que são muito escassos na natureza, como diamantes, e, portanto, apresentam uma não ubiquidade natural (Gala, 2017, p. 22).

Para mitigar eventuais distorções decorrentes da ocorrência de recursos naturais

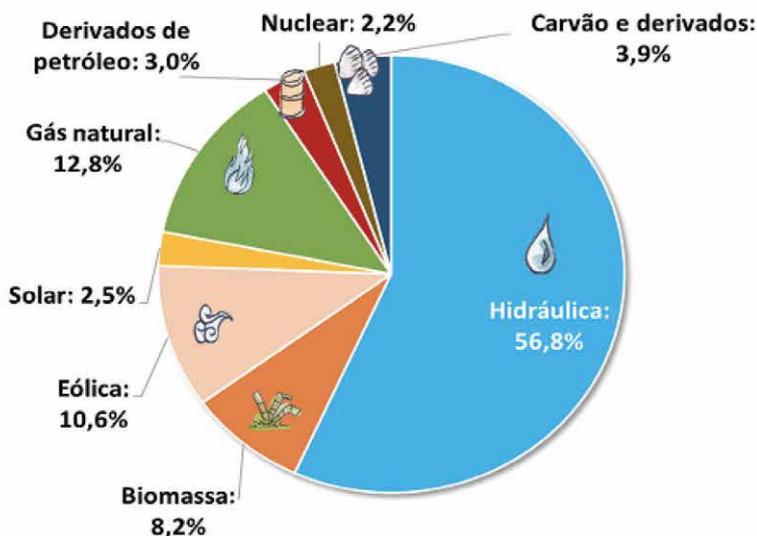
Reprodução: <https://pt.made-in-china.com/>

Modelo de eletrolisador produzido na China, país que lidera a produção de H₂V

escassos na medição da complexidade, os autores do *Atlas* incluem nos parâmetros de análise a diversidade da pauta exportadora do país. A título exemplificativo: “Botsuana e Serra Leoa produzem algo raro não ubíquo: diamantes brutos, mas têm uma pauta exportadora extremamente limitada, não diversificada. Estamos diante de um caso de não ubiquidade sem complexidade.” (Gala, 2017, p. 22)

O conceito de complexidade econômica pode ser útil no estudo das possibilidades e desafios da agenda de certificação e diferenciação do hidrogênio verde. O Brasil tem um enorme potencial para a produção de H₂V. De acordo com a EPE (2021), no ano de 2020, 82,9% da energia elétrica gerada no país foi proveniente de fontes renováveis, enquanto o balanço da geração mundial naquele mesmo ano foi de 71,4% de fontes não renováveis e apenas 28,6% de fontes renováveis.

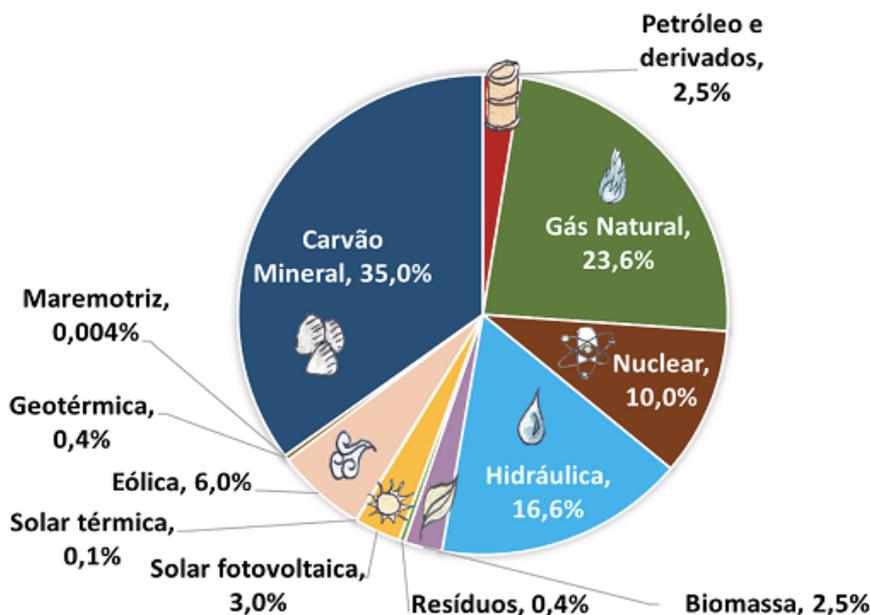
Gráfico 1 — Participação das fontes energéticas na matriz elétrica brasileira — 2020



Fonte: EPE (2021).

► DOI: <https://doi.org/10.14295/principios.2675-6609.2024.170.005>

Gráfico 2 — Participação das fontes energéticas na matriz elétrica mundial — 2020



Fonte: EPE (2021).

Esse quadro situa o Brasil em uma condição bastante vantajosa para a produção de H_2V , pois, além de seu protagonismo internacional na geração de energia renovável, o país ainda dispõe de um expressivo potencial de crescimento da participação da energia solar e eólica. Em que pese as limitações técnicas entre as fontes intermitentes e a utilização das redes de distribuição, o potencial excedente eólico e solar pode ser utilizado em sistemas isolados.

Atualmente o hidrogênio é classificado em uma escala discreta com cores que refletem seus graus de emissão. Tanto a Agência Internacional de Energia (International Energy Agency — IEA) como várias outras entidades promotoras do hidrogênio têm pressionado para a adoção de uma escala contínua, que possa diferenciar os diversos graus de ganho de redução de emissões das suas distintas rotas tecnológicas.

Como o hidrogênio pode ser produzido por diversas rotas tecnológicas que, por sua vez, apresentam diferentes intensidades de emissão de CO_2 , a definição em âmbito internacional de requisitos e indicadores de sustentabilidade por meio da certificação é decisiva para delimitar os parâmetros para o mercado de H_2V (Castro; Leal; Elizeu, *s.d.*).

O H2Global, programa de hidrogênio verde da Alemanha, só considera renovável o hidrogênio produzido através da eletrólise da água com o uso de energia elétrica proveniente de fontes limpas. A rastreabilidade da energia elétrica utilizada para a produção do hidrogênio é uma exigência dos padrões de certificação. Um dos principais desafios para a certificação verde é a definição de requisitos transparentes para o cálculo das emissões de carbono associadas à produção de hidrogênio, bem como a definição do modelo de ciclo de vida a ser adotado.

O hidrogênio verde, para além de se vincular à descarbonização, tem o potencial de impulsionar cadeias de valor que, no médio prazo, deverão substituir os recursos energéticos não renováveis pelo H₂V. Isso abre oportunidades reais para inovações tecnológicas necessárias para a conversão energética de setores como a indústria química e petroquímica, transportes rodoviários pesados, aviação, transportes marítimos, ferro e aço e o próprio setor elétrico

No que se refere à diferenciação do produto, o hidrogênio verde, para além de se vincular à descarbonização, tem o potencial de impulsionar cadeias de valor que, no médio prazo, deverão substituir os recursos energéticos não renováveis pelo H₂V. Isso abre oportunidades reais para inovações tecnológicas necessárias para a conversão energética de setores como a indústria química e petroquímica, transportes rodoviários pesados, aviação, transportes marítimos, ferro e aço e o próprio setor elétrico (Castro; Santos; Aquino, *s.d.*). Em alguns desses setores, chamados *hard-to-abate*, não há ainda possibilidade efetiva de substituição das fontes fósseis de importantes componentes de seu sistema produtivo.

Atualmente, não há um mercado estabelecido para o hidrogênio em âmbito internacional. Isso se deve ao fato de que a produção e o consumo de hidrogênio são, em grande parte, realizados nos próprios locais de produção e utilização. Em muitos casos, o hidrogênio é produzido localmente, seja por meio da reforma de gás natural ou da eletrólise da água, e utilizado dentro das instalações industriais ou refinarias onde é gerado. Além disso, o transporte e o armazenamento do hidrogênio apresentam desafios significativos devido à baixa densidade energética do produto e à necessidade de infraestrutura específica. Há esforços em andamento para desenvolver uma cadeia de valor do hidrogênio, promovendo a produção em larga escala, o transporte eficiente e a criação de um mercado global para o hidrogênio como fonte de energia limpa.

A produção de H₂V pode representar uma oportunidade para a transformação da estrutura produtiva do país, em direção ao fortalecimento de atividades produtivas mais complexas e de maior valor agregado. Entretanto, essa oportunidade só será concretizada com o desenvolvimento de um ambiente regulatório e de certificação favorável ao uso dos derivados e insumos do H₂V.



O aumento da complexidade está associado, especialmente, ao acúmulo de capacidades para a produção de bens mais sofisticados. A acumulação de capacidades, nesses termos, refere-se ao domínio de conhecimentos e habilidades tanto para superar gargalos tecnológicos e regulatórios quanto para tecer relações cada vez mais complexas entre as instituições e os mercados (Britto; Freitas; Romero, 2015).

Produzir H_2 demanda, de um lado, a mobilização de recursos naturais não disponíveis para as principais fontes consumidoras — em especial, ventos e irradiação solar —, e, de outro, a superação de desafios econômicos, tecnológicos e regulatórios, que pode reforçar a liderança do Brasil na produção de energias limpas e criar as condições para uma nova etapa de industrialização, que utilize fontes de energia renováveis, diferenciando seus produtos e agregando-lhes valor.

A certificação do H_2 é uma prioridade para países que pretendem comercializar H_2 e para o estabelecimento de um padrão da pegada de carbono, uma vez que oferece aos compradores transparência e melhor acesso a informações, facilitando o comércio de H_2 limpo e permitindo uma comparação precisa entre os produtos comercializados pelos diferentes fornecedores. A certificação do H_2 , ademais, é essencial para garantir a sua qualidade, segurança e sustentabilidade, desde a produção até o armazenamento e distribuição.

Além da certificação direta do produto hidrogênio, os sistemas de certificação possibilitam também a rastreabilidade de setores que passem a utilizar a molécula, permitindo a classificação dos produtos mais próximos dos consumidores em termos de nível de emissões e grau de contribuição contra o aquecimento global.

3. EXPERIÊNCIAS DE CERTIFICAÇÃO

A certificação é um instrumento eficiente para identificar produtos e serviços por sua origem e diferenciar tais produtos por suas características especiais, de forma a qualificar

o controle social — mecanismos de rastreabilidade e transparência — sobre a cadeia produtiva desses produtos e evidenciar para os consumidores potenciais o caráter sustentável desses insumos e o avanço na descarbonização de sua cadeia produtiva. Um dos limitadores fundamentais dos sistemas de certificação é a eventual indisposição dos consumidores para assumir as diferenças de custo embutidas nos novos produtos ou processos.

Embora cada uma das certificações elencadas no quadro 1 tenha abrangência e critérios específicos, todas compartilham o objetivo de promover práticas sustentáveis, responsáveis e de qualidade em diversos setores, atendendo a diferentes preocupações socioambientais e atuando em diferentes níveis da cadeia produtiva. Essas certificações atuam na orientação e reconhecimento de boas práticas, auxiliando consumidores e empresas na tomada de decisões mais conscientes e sustentáveis.

Quadro 1 — Exemplos de certificados de origem, processos e insumos

Certificado	Requisito	Atributo
Rainforest Alliance	Gestão de processos (sociais, ambientais e econômicos) e conformidade dos insumos utilizados na produção.	Certifica produtos de origem agrícola com base em processos de gestão apoiados em três pilares da sustentabilidade: social, econômico e ambiental.
Forest Stewardship Council	Conformidade de origem geográfica, de gestão de processos produtivos e de insumos.	Certifica produtos e materiais de origem de madeira reflorestada.
Global G.A.P.	Conformidade de origem geográfica, gestão de processos produtivos e dos insumos adicionados.	Certifica produtos agrícolas com manejo sustentável.
Fair Trade	Conformidade associada a modelos de gestão sustentável.	Certifica produtos decorrentes de práticas comerciais justas e sustentáveis entre produtores rurais e comerciantes.
Ecocert	Conformidade de gestão de processos produtivos.	Certifica produtos orgânicos e sustentáveis.
Cerflor (Inmetro)	Garantia de origem e conformidade de gestão de processos.	Certifica produtos e práticas sustentáveis que utilizam madeira reflorestada.
ISO 5001 — Sistema de Gestão de Energia	Conformidade de gestão de processos para o aumento da eficiência energética e redução das emissões de gases de efeito estufa (GEEs).	Certifica o modelo de gestão organizacional e a contabilidade dos resultados de redução de consumo total de energia e emissão de GEEs e a economia financeira.

NBR ISO 14001	Conformidade do ciclo de vida do produto e do processo de gestão ambiental.	Certifica os resultados de melhoria de desempenho ambiental envolvendo atividades, produtos e serviços e os impactos ambientais a eles associados.
Good Manufacturing Practice (GMP)	Controle sobre o ciclo de vida do produto.	Certifica a origem e a conformidade dos insumos. Amplamente utilizado na indústria farmacêutica e de alimentos.
International Featured Standard (IFS)	Conformidade de gestão e verificação de origem de insumos.	Certifica o controle de qualidade da produção de alimentos.
Safe Quality Food (SQF)	Conformidade de gestão e verificação de origem de insumos.	Certifica a garantia de qualidade de produtos e processos ao longo da cadeia de fornecimento de alimentos.
Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP)	Conformidade de gestão e verificação de origem de insumos.	Certifica a identificação e controle de riscos críticos associados à cadeia de fornecimento de alimentos.
Responsible Care	Conformidade de gestão (ambiental, de saúde e de segurança) e verificação de origem de insumos.	Certifica a gestão de processos e de insumos. De uso recorrente na indústria química.

Fonte: elaborado pelos autores.

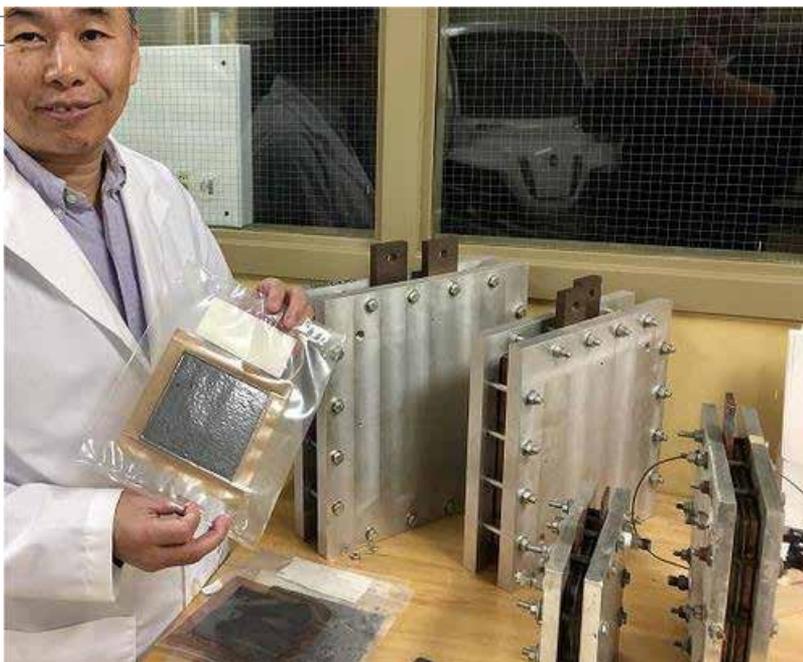
Em resumo, essas diferentes certificações abordam aspectos específicos da sustentabilidade e garantem a conformidade de produtos, processos, insumos ou equipamentos com critérios estabelecidos. Elas desempenham um papel importante na promoção da sustentabilidade em diversos setores e oferecem aos consumidores e organizações a garantia de estar adotando práticas responsáveis e sustentáveis.

4. DISPOSIÇÃO PARA PAGAR PELA CERTIFICAÇÃO VERDE

A disposição para pagar pela certificação verde refere-se à disposição de indivíduos, empresas ou governos para pagar um preço adicional por produtos ou serviços que tenham uma certificação que comprove seu impacto ambiental positivo. A certificação verde é uma forma de confirmar que determinado produto ou processo segue práticas sustentáveis e de baixa emissão de carbono.

Isso levanta a questão da avaliação da possibilidade de que os consumidores não estejam dispostos a pagar mais caro pelos produtos certificados, o que reduziria a possibilidade da aplicabilidade econômica da certificação.

As certificações são instrumento de políticas orientadas pelos mercados, que visam incentivar práticas sustentáveis ou certos tipos de produtos, mais do que equalizar as ações entre todos os atores setoriais para impedir certos comportamentos e procedimentos (Edu, 2015).



Japão e Coreia do Sul são líderes na produção de células de combustível, que têm a premissa de produzir eletricidade limpa, por exemplo, a partir do hidrogênio

No caso do hidrogênio verde, a certificação pode desempenhar um papel importante no mercado. Com a crescente conscientização sobre a necessidade de reduzir as emissões de carbono e combater as mudanças climáticas, muitos consumidores e empresas estão dispostos a pagar mais por produtos e serviços que sejam ambientalmente sustentáveis. De fato, ao atestar que o hidrogênio foi produzido de forma sustentável e que atende aos requisitos de qualidade e segurança estipulados, a certificação contribui para promover a adoção segura desse recurso energético, ajudando a impulsionar a transição para uma economia de baixo carbono.

Uma das áreas em que as certificações têm sido bastante utilizadas é a indústria de alimentos. Os consumidores europeus são mais exigentes do que os estadunidenses em relação à qualidade dos alimentos, seus componentes e origem, levando a que a certificação europeia desses bens de consumo se concentre principalmente nesses indicadores (Loureiro; Umberger, 2003).

As certificações europeias podem ser de origem, indicação geográfica e país de origem, conforme seja mais limitada ou mais ampla a abrangência das características comuns da origem de determinados produtos. Um dos elementos fundamentais desses sistemas é a capacidade de rastreabilidade dos produtos, o que eleva os custos da certificação.

A rastreabilidade no caso do mercado de consumo de carnes é definida pela capacidade de identificar a origem dos animais ou da carne desde seu nascedouro, garantindo a propriedade, herança genética, condições sanitárias e de segurança do crescimento e movimentação dos animais (Loureiro; Umberger, 2003). Portanto, implica uma avaliação do conjunto da cadeia de fornecimento.

Em um dos poucos estudos sobre a disposição do consumidor para pagar pela diferença de custos das certificações de carne nos EUA, Loureiro e Umberger (2003) concluíram que os atributos associados à segurança alimentar eram os mais valorados em comparação com os outros atributos, como a certificação de origem, rastreabilidade e informações sobre

as qualidades da carne. A certificação de segurança é responsabilidade das autoridades sanitárias, ainda que esses sistemas de inspeção não sejam em si testados, levantando algumas dúvidas sobre sua validade. Isso destaca a importância dos pontos de checagem ao longo da cadeia de suprimento dos sistemas de certificação.

4.1. DISPOSIÇÃO PARA PAGAR POR PRODUTOS VERDES

A eficiência do sistema de certificação deve ser tal que o custo adicional de conseguir a informação que garanta a certificação seja menor do que os benefícios da própria certificação, considerando a disposição do consumidor de pagar a diferença.

A expansão do uso dos biocombustíveis na tentativa de reduzir as pegadas de carbono requer cada vez mais uma avaliação do impacto do aumento de sua produção sobre o conjunto da sua cadeia de suprimentos. Essa cadeia vai da infraestrutura necessária para a coleta dos produtos de origem vegetal ou animal para a produção do biocombustível e os processos de produção dele à logística para levar o produto da área de produção ao consumidor, o ajuste de máquinas e equipamentos para utilizar o produto nas proporções adequadas, as condições de produção desses equipamentos e a cadeia de postos de varejo que entregam os biocombustíveis aos consumidores (Hausmann; Wagner, 2009).

Há a necessidade de calibrar certificações que destaquem o caráter “verde” dos produtos mas também considerem a economicidade do conjunto de atores ao longo de toda a cadeia produtiva.

Uma das questões fundamentais para isso é a profundidade do sistema de certificação nos vários elos do fornecimento. Até que ponto o caráter verde deve ser buscado em termos das interpelações entre os setores econômicos?

Ao pagar por uma certificação verde, os consumidores e empresas estão demonstrando seu compromisso com a sustentabilidade e apoiando a transição para uma economia de baixo carbono. Além disso, a certificação verde pode fornecer uma vantagem competitiva para os produtores de hidrogênio verde, uma vez que eles podem diferenciar seus produtos dos concorrentes e atrair consumidores e investidores preocupados com a sustentabilidade.

4.2. POLÍTICAS DE INCENTIVO E CERTIFICAÇÃO VERDE

A Alemanha apresentou uma iniciativa ambiciosa e positiva, em consonância com os compromissos de descarbonização assumidos pelo país. Essa iniciativa visa criar um mecanismo competitivo para facilitar as trocas internacionais de hidrogênio, levando em consideração o estágio atual de desenvolvimento desse vetor energético no país.

Para estabelecer as bases do mercado de hidrogênio verde na Alemanha, foi criado em abril de 2021 o fundo de investimento H2Global, com uma alocação de 2 bilhões de euros. Esse fundo tem como objetivo apoiar e financiar dois leilões complementares, utilizando o modelo de leilão duplo (*double auction model*).

O primeiro leilão foi direcionado à compra e importação de hidrogênio verde ou de baixo carbono, estabelecendo um mecanismo competitivo para definir preços de importação favoráveis e firmar contratos de longo prazo de fornecimento (incluindo transporte) de hidrogênio exclusivamente para o mercado interno alemão. O segundo leilão realizará vendas anuais de hidrogênio verde para suprir a demanda interna, celebrando contratos de curto

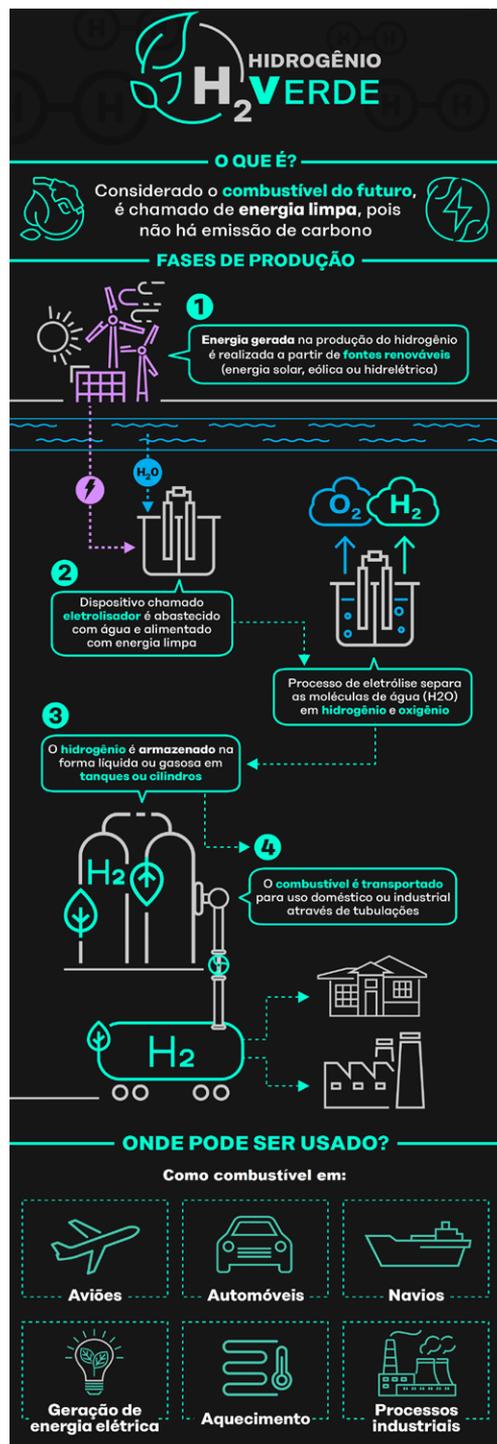
prazo de fornecimento de hidrogênio para diferentes tipos de consumidor na Alemanha.

Com o objetivo de concretizar esses leilões, foi criada uma entidade privada chamada HINT.CO, que atuará como intermediária entre os contratos de compra internacional e de venda nacional de hidrogênio. Essa intermediação se faz necessária não apenas para ajustes de prazos e quantidades, mas também devido à diferença de custos entre o hidrogênio verde, que é mais caro por constituir uma indústria emergente, e o hidrogênio de base fóssil, mais barato por ser uma indústria estabelecida.

Dessa forma, para que o hidrogênio verde possa ser consumido de maneira competitiva e contribuir para o processo de descarbonização, a diferença de preços entre os contratos de importação e os contratos de venda aos consumidores alemães será coberta por uma compensação financeira proveniente dos 2 bilhões de euros do fundo H2Global. Isso representa um exemplo consistente de política pública proativa do governo alemão, com o objetivo gradual, porém inexorável, de substituir o consumo de hidrogênio de base fóssil pelo hidrogênio verde, reduzindo ao longo do tempo a diferença de preços entre os contratos de curto e longo prazo devido aos ganhos de escala na produção (Castro; Santos; Aquino, *s.d.*).

A certificação para o hidrogênio verde pode abranger vários aspectos, como a rota de produção, a eficiência energética do processo de produção e a redução das emissões de carbono ao longo do ciclo de vida do produto.

Os Estados Unidos, através do Inflation Reduction Act (IRA), pretendem investir cerca de US\$ 370 bilhões nos próximos anos para incentivar o uso de fontes de energia limpa, incluindo subsídios para projetos de hidrogênio de baixo carbono. O incentivo pode



Reprodução: InvestNews

Infográfico ilustra o ciclo de produção e os possíveis usos do hidrogênio verde

chegar a até US\$ 3 dólares por quilo de H₂ renovável. Quanto menor a intensidade de emissão de carbono, maior poderá ser o subsídio.

De acordo com o relatório *Hydrogen insights 2022* (Hydrogen Council; McKinsey & Company, 2022), naquele ano havia no mundo 680 iniciativas de grande escala relacionadas à produção de hidrogênio verde, que somavam investimentos no valor de US\$ 240 bilhões. Isso demonstra o crescente interesse e comprometimento com o desenvolvimento desse setor.

No que diz respeito à utilização de eletrolisadores, a China está liderando a disputa, enquanto o Japão e a Coreia do Sul são líderes na produção de células de combustível. Esses países detêm cerca de 60% da capacidade de produção global, que atualmente é de 11 GW (gigawatts).

Essas informações destacam a dinâmica em evolução do mercado de hidrogênio verde, com investimentos crescentes e liderança regional em diferentes aspectos da cadeia de valor. O cenário promissor indica um impulso contínuo para o desenvolvimento e difusão dessa fonte de energia limpa.

No contexto mencionado, em que há um aumento significativo nos investimentos em hidrogênio verde e uma série de iniciativas em andamento, a certificação verde pode ser um fator crucial para impulsionar ainda mais o crescimento desse setor. À medida que mais investimentos são direcionados para a produção de hidrogênio verde, a certificação pode ajudar a garantir a transparência e a confiabilidade dos produtos, além de impulsionar a demanda e a adoção em larga escala.

5. EXPERIÊNCIA DE CERTIFICAÇÕES DE PROCESSOS RELACIONADOS À PEGADA DE CARBONO

Há um conjunto de certificações relacionadas com a sustentabilidade, que vão além da avaliação sobre a origem dos produtos, principalmente quando se referem a produtos de fontes renováveis de origem agrícola. Cresceu recentemente a tentativa de estender as certificações para produtos não renováveis, principalmente na análise das suas cadeias de suprimentos, destacando-se os impactos ambientais e sociais. Uma das questões chave é a mensuração das pegadas de carbono no conjunto da cadeia de fornecimento do produto.

Existem diversas experiências de certificação para estimular o uso de tecnologias verdes ao longo de cadeias de suprimento. Por exemplo, a indústria da pesca cada vez abrange mares mais distantes e utiliza refrigeração mais poderosa, deixando uma grande pegada de carbono ao longo de sua cadeia de suprimento, do fundo das águas ao prato do consumidor. Identificar a fonte dessa eletricidade pode abrandar os impactos que a indústria tem sobre as mudanças climáticas. Estudo relativamente recente identificou uma grande variação de pegadas de carbono na indústria pesqueira norueguesa (Madin; Macreadie, 2015), possibilitando a criação de um programa de certificação para estimular o consumo de pescado com menores pegadas de carbono.

A avaliação da sustentabilidade dos vários tipos de pescado considera os três seguintes elementos (Madin; Macreadie, 2015, p. 179):

1. nível de impacto da intensidade da pesca nos cardumes existentes;
2. combate às práticas nocivas ao meio ambiente e mais intensivas em energia;
3. efetividade da gestão dos cardumes no tempo.

Esses critérios podem ser considerados no cálculo de pegadas de carbono de toda a

cadeia de produção, desde a criação de cardumes, a sua captura, o seu transporte, as cadeias de distribuição, a armazenagem em frigoríficos e o uso de energia no consumo final. Isso possibilita avaliar os impactos ambientais para além dos locais de pesca.

A avaliação dos processos de implementação de um sistema de certificação deve considerar alguns efeitos, tais como:

1. deslocamento da preferência do consumidor para os produtos menos impactantes sobre o clima;
2. ajuste das cadeias de distribuição que poderiam dar preferência a produtos mais verdes, criando cadeias e marcas de suprimento diferenciadas;
3. alteração do comportamento dos ofertantes, que buscariam adotar mais tecnologias com menor pegada de carbono.

Não obstante, as experiências de implementação de sistemas de certificação, que podem inclusive gerar créditos de carbono, enfrentam alguns desafios, a saber:

1. definir uma metodologia eficiente para medir as pegadas de carbono da cadeia;
2. estabelecer um sistema de verificação confiável;
3. estabelecer critérios transparentes para os distintos selos de certificação.

5.1. ATRIBUTOS E CRITÉRIOS PARA UM SISTEMA DE CERTIFICAÇÃO NO BRASIL

No caso brasileiro existem duas iniciativas de certificação de hidrogênio verde que merecem ser observadas: a certificação da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e a certificação do Bureau Veritas.

As principais características e atributos dessas experiências iniciais estão apresentadas nos quadros 2 e 3.

Quadro 2 — Versão inicial de certificação e próximos passos estipulados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica — 2023

	VERSÃO INICIAL	PRÓXIMOS PASSOS
Atributos	Certifica a produção de H2	Certificar produtos derivados
Rota de produção	Eletrólise	Reforma do biogás; conversão bioquímica da biomassa, hidrogênio azul, turquesa e outros;
Emissões	Indiretas associadas ao consumo de energia elétrica (escopo 2 de GHG Protocol)	Escopo 1 (emissões diretas, dentro do processo) do GHG Protocol e ciclo de vida;
Modalidade	Produtores conectados ao SIN (sistema interligado nacional) com contrato (PPA), autopromoção renovável ou conexão direta (offgrid)	Adequações conforme necessidade do mercado e regulação nacional/internacional
Entrega de certificado	Relatório em PDF	Token ou block chain
Padrão de Referência	Europeu RED II (versão setembro/2022)	PNH2, evolução do padrão europeu;

Fonte: elaborado pelos autores, com base em CCEE (2023).

Quadro 3 — Versão inicial de certificação do Bureau Veritas — 2023

	VERSÃO INICIAL
Atributos	Avaliação do ativo de produção de hidrogênio renovável em relação aos critérios ESG, processos de segurança e emissões de gases de efeito estufa. Ele também avaliará a energia renovável usada para alimentar o eletrolisador. Um certificado será emitido se todos os requisitos forem cumpridos.
Rota de produção	Eletrólise da água.
Emissões	O cálculo da pegada de carbono é baseado em uma metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida que inclui emissões a montante derivadas das origens do processo de dessalinização de eletricidade e água em uso.
Modalidade	Abrange processos e segurança ocupacional e define requisitos abrangentes de sustentabilidade, como impactos ambientais e abastecimento de água.
Entrega de certificado	A etapa final será a emissão do selo após a verificação da quantidade de hidrogênio produzida pelo ativo certificado. A etiqueta estipula que o ativo deve ter uma pegada de carbono inferior a 2 kg de CO ₂ equivalente por quilo de hidrogênio.
Padrão de Referência	A etapa final será a emissão do selo após a verificação da quantidade de hidrogênio produzida pelo ativo certificado. A etiqueta estipula que o ativo deve ter uma pegada de carbono inferior a 2 kg de CO ₂ equivalente por quilo de hidrogênio.

Fonte: elaborado pelos autores, com base em CCEE (2023).

Tendo em vista que o H₂ pode ser produzido a partir de fontes com intensidades de dióxido de carbono (CO₂) muito distintas, padrões para diferentes tipos de H₂, ao longo da cadeia de abastecimento, são requeridos.

Dessa forma, a certificação do H₂ se caracteriza pela avaliação do ciclo de vida de tecnologias de H₂ e pelo compartilhamento de informações e resultados analíticos em determinadas categorias de certificados (GH2, 2022).

Torna-se, assim, fundamental que os padrões de certificação sejam acordados internacionalmente por meio de uma estrutura regulatória harmonizada, com códigos e normas que permitam aos compradores se assegurar da garantia de origem do H₂ (Riemer *et al.*, 2022). Atualmente, existem diversas iniciativas em curso, com destaque para o CertifHy, devido a sua abrangência e maturidade, e para a certificação da Austrália e da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia (IPHE, 2022).

6. METODOLOGIAS DE ESTUDO DE PEGADAS DE CARBONO

A certificação da intensidade de insumos nas cadeias de suprimento adota várias metodologias, entre as quais destaca-se a avaliação de ciclos de vida (ACV). A avaliação do ciclo de vida incorpora o exame das condições de produção da cadeia de suprimento como um todo, destacando as origens das matérias-primas e insumos intermediários. O fornecimento sustentável e responsável também é submetido à análise das condições em que a produção desses materiais ocorre.

A fonte desses materiais envolve não somente os processos de extração mineral, mas também a reciclagem, a utilização dos estoques existentes e as produções intermediária e conjunta.

A avaliação do ciclo de vida é uma ferramenta utilizada para medir e quantificar os impactos ambientais associados a um produto ou serviço ao longo de todas as etapas do seu ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas até o descarte final. Essa avaliação considera diversas categorias de impacto ambiental, incluindo as emissões de gases de efeito estufa.

Produzir H₂V demanda, de um lado, a mobilização de recursos naturais não disponíveis para as principais fontes consumidoras — em especial, ventos e irradiação solar —, e, de outro, a superação de desafios econômicos, tecnológicos e regulatórios, que pode reforçar a liderança do Brasil na produção de energias limpas e criar as condições para uma nova etapa de industrialização, que utilize fontes de energia renováveis, diferenciando seus produtos e agregando-lhes valor

No âmbito do RenovaBio, política brasileira de incentivo ao uso de biocombustíveis, a ACV desempenha um papel fundamental na quantificação da pegada de carbono dos biocombustíveis. Através da ACV, é possível calcular e comparar as emissões de GEEs ao longo do ciclo de vida de diferentes biocombustíveis, levando em consideração fatores como a produção das matérias-primas, os processos de conversão e distribuição e o uso final.

Essa avaliação do ciclo de vida, incluindo a mensuração das emissões de GEEs, é utilizada para determinar a intensidade de carbono dos biocombustíveis. A intensidade de carbono representa a quantidade de emissões de CO₂ equivalente produzidas durante a produção e o uso de um biocombustível específico. Essa métrica é crucial para a atribuição de créditos de descarbonização (CBIOS) no âmbito do RenovaBio.

Dessa forma, o RenovaBio se baseia na ACV e nas pegadas de carbono para promover a sustentabilidade dos biocombustíveis. Através da ACV, é possível estimar as emissões de GEEs ao longo do ciclo de vida dos biocombustíveis, levando em conta fatores como o tipo de matéria-prima utilizada, os processos de produção e a eficiência energética. Essas informações são essenciais para a fixação de metas de redução das emissões e para a geração de créditos de descarbonização no âmbito do RenovaBio, impulsionando a produção e o uso de biocombustíveis com menor pegada de carbono e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

Já a RenovaCalc é uma ferramenta desenvolvida pelo governo brasileiro para calcular a intensidade de carbono dos biocombustíveis. Ela é utilizada para avaliar o desempenho ambiental dos biocombustíveis em relação às emissões de GEEs ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a produção até o uso final. A RenovaCalc leva em consideração fatores como a matéria-prima utilizada, os processos de produção e o transporte dos biocombustíveis. Com base nessas informações, é gerada uma pontuação que reflete seu nível de emissões em comparação ao dos combustíveis fósseis.

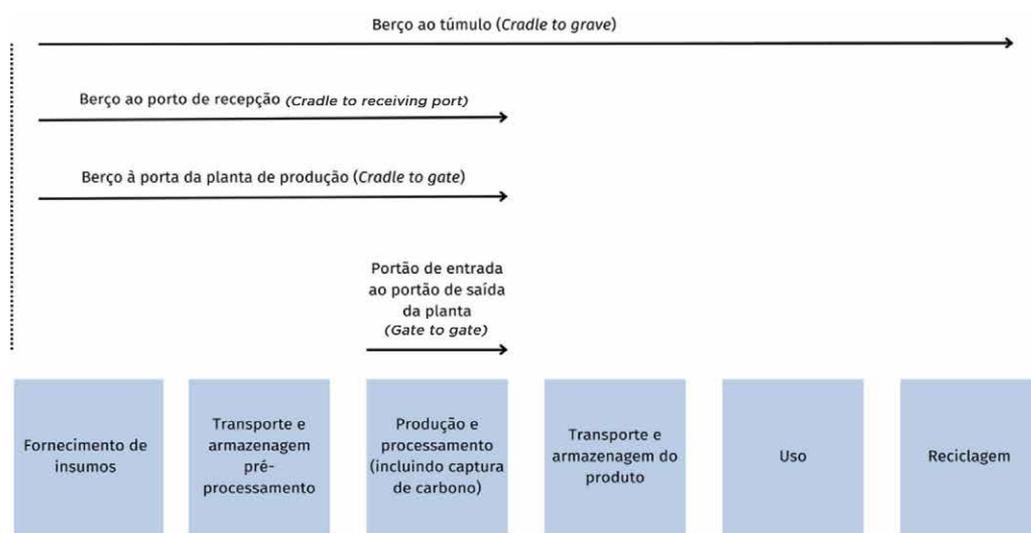
O RenovaBio e a RenovaCalc estão interligados, já que a RenovaCalc é uma ferramenta utilizada no âmbito do RenovaBio para calcular e verificar a redução de emissões proporcionada pelos biocombustíveis. A RenovaCalc desempenha um papel importante na certificação dos produtores e na emissão dos créditos de descarbonização (CBIOs), que são utilizados pelas distribuidoras de combustíveis fósseis para atender às metas do RenovaBio.

A RenovaCalc tem como objetivo avaliar diferentes rotas de produção de biocombustíveis, incluindo etanol de cana-de-açúcar de primeira e segunda geração, etanol de milho, biodiesel, biometano e bioquerosene. Essa ferramenta combina dados de inventário de ciclo de vida dos processos de produção, obtidos na base de dados Ecoinvent, com os parâmetros técnicos fornecidos pelos produtores de biocombustíveis.

As emissões de gases de efeito estufa (GEEs) de cada etapa do ciclo de vida do biocombustível são estimadas de acordo com o método do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006). A soma dessas emissões resulta na intensidade de carbono do biocombustível, medida em toneladas de dióxido de carbono equivalente por megajoule (tCO_2eq/MJ). Essa intensidade de carbono é então comparada à intensidade de carbono do combustível fóssil equivalente, e a diferença gera uma nota de eficiência energético-ambiental para o biocombustível. Essa nota também proporciona acesso a créditos de descarbonização, que têm valor de mercado.

Em resumo, a RenovaCalc é uma ferramenta estruturada que utiliza dados técnicos e de inventário de ciclo de vida para avaliar o desempenho ambiental e energético de diferentes rotas de produção de biocombustíveis. Além disso, ela fornece informações sobre as emissões de GEEs, permitindo a obtenção de créditos de descarbonização, o que promove a sustentabilidade dos biocombustíveis.

Figura 1 — Estrutura geral de contabilização de emissões, conforme o CertifHy



Fonte: CertifHY (2022).

Os sistemas de certificação precisam se desenvolver em várias direções para conquistar a legitimidade necessária para estimular o comércio internacional de hidrogênio. Entre as diversas dimensões dos desafios, destacam-se a abrangência da certificação, a arquitetura institucional dos sistemas de certificação e sua comercialização, a transparência e rastreabilidade dos dados e a periodicidade dos certificados

7. CONCLUSÕES

A expansão do uso do hidrogênio, mediante a ampliação do seu mercado internacional, necessitará de profundas transformações na estrutura de produção e consumo desse combustível e exigirá, entre outras coisas, a montagem de sistemas de certificação amplamente aceitos, com transparência e rastreabilidade para facilitar as trocas entre países que produzem mais e aqueles que consomem o produto, tanto para usos energéticos como na qualidade de matéria-prima para subprodutos.

A certificação tem servido como um importante instrumento para possibilitar a identificação de produtos por origem, especialmente na indústria de bebidas e comidas, mas também serve para distinguir produtos com características especiais. O sistema de certificação tem se constituído em ferramenta fundamental para o cumprimento dos requisitos da regulação, e para isso ele precisa ter legitimidade, com transparência e auditorias independentes.

As certificações são instrumento de políticas orientadas pelos mercados, que visam incentivar práticas sustentáveis ou certos tipos de produtos, mais do que equalizar as ações entre todos os atores setoriais para impedir certos comportamentos e procedimentos.

Uma das conclusões deste relatório preliminar aponta a necessidade da construção de sistemas de certificação da produção de H_2V e derivados. Sem uma definição internacional sobre os padrões de certificação, dificilmente ocorrerá o desenvolvimento do comércio de hidrogênio renovável. O relatório sugere como próximos passos da pesquisa o estudo sobre a profundidade do sistema de certificação e a padronização dos atributos e abrangências dele.

Uma das tendências identificadas nos sistemas de certificação é a passagem da escala discreta de cores, para definir os tipos de hidrogênio, para uma escala contínua, em que os diversos graus de emissões podem ser aferidos. Esse sistema também possibilita o uso de certificações nos setores que venham a utilizar o hidrogênio nos seus próprios processos produtivos.

As atuais experiências de certificação apresentam abrangência e critérios próprios, mas procuram destacar os efeitos sobre as mudanças climáticas, em especial as emissões de carbono e de outros gases de efeito estufa. Procuram privilegiar as práticas mais eficientes, atendendo a diferentes preocupações socioambientais e atuando em diferentes níveis da cadeia produtiva.

Os sistemas de certificação precisam se desenvolver em várias direções para conquistar a legitimidade necessária para estimular o comércio internacional de hidrogênio. Entre as diversas dimensões dos desafios, destacam-se a abrangência da certificação, a arquitetura institucional dos sistemas de certificação e sua comercialização, a transparência e rastreabilidade dos dados e a periodicidade dos certificados.

Além das experiências de certificação internacionais, no Brasil já há também tentativas de implantação de sistemas de certificação em fase inicial, buscando-se adaptá-los aos padrões dos outros países. Enquanto a tentativa da CEEE foca o H₂V, o Bureau Veritas vai até as fontes de energia utilizadas na sua produção. Enquanto este último inclui atributos como as condições de segurança, manejo da terra e água e outros impactos ambientais, o primeiro se concentra nos agentes conectados ao sistema de geração de eletricidade no Brasil. Ambos precisam ampliar suas atividades para buscar resolver os problemas já identificados internacionalmente.

Há uma outra experiência já implantada no Brasil, voltada para estimular biocombustíveis no programa RenovaBio, que certifica a emissão de carbono no ciclo de vida deles, do berço à porteira, atribuindo-lhes nota e certificado de eficiência energética, negociados em bolsa de valores. O sistema de certificação (RenovaCalc) está em pleno vigor e já em fase de expansão e desenvolvimento.

Para a continuidade das pesquisas, sugerimos uma abordagem especificamente voltada aos desafios dos sistemas de certificação nacionais, análise mais detalhada das experiências brasileiras e comparação das certificações com o RenovaCalc. Além disso, são sugeridos os seguintes tópicos para expansão do trabalho:

1. promover a convergência dos padrões de certificação a serem desenvolvidos pelos diferentes países que participam da economia do H₂;
2. definir limites para a abordagem do ciclo de vida dos produtos (do berço à porteira ou ao túmulo);
3. calcular a pegada de carbono do produto, do berço à porteira.

* Professor titular aposentado da Universidade Federal da Bahia (UFBA). Pesquisador do Instituto de Estudos Estratégicos de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis Zé Eduardo Dutra (Ineep).

** Coordenador do curso de Direito e professor titular do Programa de Mestrado em Direito Constitucional Econômico da Unialfa. Pesquisador bolsista do Ineep.

Este artigo é resultado parcial de uma pesquisa realizada no âmbito do Ineep.

► Texto recebido em 25 de agosto de 2024; aprovado em 30 de agosto de 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Proposta de diretrizes**: programa nacional do hidrogênio. Brasília: MME, jul. 2021. Disponível em: <www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogenioRelatriodiretrizes.pdf>. Acesso em: 12 maio 2023.

_____. Serviços e Informações do Brasil. **Obter certificação de produtos orgânicos**: produção primária vegetal. Brasília, 30 jul. 2024. Disponível em: <www.gov.br/pt-br/servicos/obter-certificacao-de-produtos-orgnicos-producao-primaria-vegetal>. Acesso em: 23 set. 2024.

BRITTO, Gustavo; FREITAS, Elton; ROMERO, João Prates. Competitividade industrial e inovação na abordagem da complexidade: uma análise do caso brasileiro. In: BARBOSA, Nelson et al. (Ed.). **Indústria e desenvolvimento produtivo no Brasil**. Rio de Janeiro: Elsevier; FGV, 2015. p. 417-438.

CASTRO, Nivalde de; LEAL, Luiza Masseno; ELIZEU, Bruno. **Principais iniciativas e desafios para a certificação do hidrogênio**. Rio de Janeiro: UFRJ, [s.d.]. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/02/Castro_2023_02_14.pdf>. Acesso em: 9 maio 2023.

CASTRO, Nivalde de; SANTOS, Vitor; AQUINO, Thereza. **O Brasil e as estratégias da Alemanha para o hidrogênio verde**. Rio de Janeiro: UFRJ, [s.d.]. Disponível em: <www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/23_Castro301.pdf>. Acesso em: 9 maio 2023.

CCEE. **Manual para certificação de hidrogênio**. São Paulo: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 22 jun. 2023. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/documents/80415/919444/Manual%20para%20a%20Certifica%C3%A7%C3%A3o%20de%20Hidrog%C3%AAnio%20REV1.1.docx/3b73a55e-3ed3-aeb1-8c92-e6d9c6b8a8d2>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

CEBRI. **As contribuições do hidrogênio verde para a transição energética**: perspectivas e condições núcleo energia. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Relações Internacionais, nov. 2022. Disponível em: <https://cebri.org/media/documentos/arquivos/CEBRI_Australia_Hidrogenio_pt.pdf>. Acesso em: 25 maio 2023.

CERTIFHY. **CertifHy-SD carbon footprint calculation**. [S.l.]: February 14, 2023. Disponível em: <www.certifhy.eu/wp-content/uploads/2023/03/CertifHy_Carbon-footprint-calculation_220214.pdf>. Acesso em: 9 maio 2023.

EPE. **BEN**: relatório síntese 2021. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2021. Disponível em: <www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2021_PT.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe**. Brussels: European Commission, 2020a. Disponível em: <https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2023.

_____. **Communication on the European Green Deal**. Brussels: European Commission, December 11, 2019. Disponível em: <https://commission.europa.eu/document/daef3e5c-a456-4fbb-a067-8f1cbe8d9c78_en>. Acesso em: 22 jun. 2023.

_____. **EU strategy for energy system integration**. Brussels: European Commission, 2020b. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2020:299:FIN>>. Acesso em: 2 jul. 2023.

FERNANDES, Gláucia et al. Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil. **FGV Energia**, jan. 2023. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/33175/opiniao_artigo_hidrogenio_verde_matriz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 jun. 2023.

GALA, Paulo. **Complexidade econômica**: uma nova perspectiva para entender a antiga questão da riqueza das nações. 1. ed. Rio de Janeiro: Contraponto; Centro Internacional Celso Furtado de Políticas para o Desenvolvimento, 2017.

GH2. **The green hydrogen standard**. Geneva: Green Hydrogen Organization, 2022. Disponível em: <https://gh2.org/sites/default/files/2022-05/GH2_Standard_2022_A5_11%20May%202022_FINAL_REF%20ONLY%20%281%29.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2023.

HAUSMANN, Ricardo et al. **The atlas of economic complexity**: mapping paths to prosperity. Cambridge: Center For International Development, Harvard University, 2011.

HYDROGEN COUNCIL; MCKINSEY & COMPANY. **Hydrogen insights 2022**: an updated perspective on hydrogen market development and actions required to unlock hydrogen at scale. [S.l.]: Hydrogen Council, September 2022. Disponível em: <<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/09/Hydrogen-Insights-2022-2.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2024.

IEA. **Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity**. [S.l.]: IEA, April 2023. Disponível em: <www.iea.org/reports/towards-hydrogen-definitions-based-on-their-emissions-intensity>. Acesso em: 18 maio 2023.

IPHE. **Methodology for determining the greenhouse gas emissions associated with the production of hydrogen**. [S.l.]: IPHE, November 2022. Disponível em: <www.iphe.net/_files/ugd/45185a_03457347901844c3856e196689f3227c.pdf>. Acesso em: 23 set. 2024.

LOUREIRO, Maria L.; UMBERGER, Wendy J. Estimating consumer willingness to pay for country-of-origin labeling. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 28, n. 2, p. 287-301, August 2003. Disponível em: <www.jstor.org/stable/40987187>. Acesso em: 30 maio 2023.

MADIN, Elizabeth M. P.; MACREADIE, Peter I. Incorporating carbon footprints into seafood sustainability certification and eco-labels. **Marine Policy**, v. 57, p. 178-171, July 2015.

MATHIESEN, Brian Vad et al. REPowerEU and Fitfor55 science-based policy recommendations for achieving the energy efficiency first principle. **sEnergies**, 2022. Disponível em: <https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/477603968/sEnergies_D6.4_FINAL.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2023.

MAZZUCATO, Mariana. **O estado empreendedor**: desmascarando o mito do setor público vs. setor privado. 1. ed. São Paulo: Portfolio-Penguin, 2014.

OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. Brasília: Ipea, ago. 2022. (Texto para discussão, n. 2787). Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf>. Acesso em: 23 set. 2024.

RAINFOREST ALLIANCE. **Programa de certificação 2020**. [S.l.]: Rainforest Alliance, 2024. Disponível em: <www.rainforest-alliance.org/pt-br/para-empresas/programa-de-certificacao-2020/#standard>. Acesso em: 10 maio 2023.

RIEMER, Matia et al. **Future hydrogen demand**: a cross-sectoral, global meta-analysis. **Fraunhofer**, 2022. Disponível em: <<https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/e4910b11-a81d-4c4d-8845-9ea36141a655/details>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

ZAPAROLLI, Domingos. Ventos promissores a caminho. **Pesquisa Fapesp**, v. 275, jan. 2019. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/ventos-promissores-a-caminho/#:~:text=O%20potencial%20de%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de>>. Acesso em: 3 jun. 2023.

ZHOU, Yuanrong. Can the inflation reduction act unlock a green hydrogen economy?. **ICCT**, January 3, 2023. Disponível em: <<https://theicct.org/ira-unlock-green-hydrogen-jan23>>. Acesso em: 24 maio 2023.