

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG
ESCOLA DE ARQUITETURA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM CONFORTO AMBIENTAL, EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA E TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS SUSTENTÁVEIS

TALITA COVRE VARGAS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROGRAMAS DE CERTIFICAÇÃO DO
HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO**

BELO HORIZONTE

2025

TALITA COVRE VARGAS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROGRAMAS DE CERTIFICAÇÃO DO
HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO**

Monografia de especialização apresentada à Escola de Arquitetura e Design da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Sustentabilidade.

Orientadora: Profa. Dra. Andréa Franco Pereira

Coorientador: Prof. Dr. Rafael Augusto Seixas
Reis de Paula


BELO HORIZONTE

2025


ATA DA REUNIÃO DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE MONOGRAFIA DA ALUNA TALITA COVRE VARGAS COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO CERTIFICADO DO CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM CONFORTO AMBIENTAL, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS SUSTENTÁVEIS.

Aos vinte e quatro dias do mês de novembro de 2025, reuniu-se virtualmente às 14:00 horas, a Comissão Examinadora composta pela **Profa. Dra. Andréa Franco Pereira** - orientadora-Presidente, pelo **Prof. Dr. Rafael Augusto Seixas Reis de Paula** - coorientador e pelo **Dr. Sérgio Roberto Knorr Velho**, como membro titular externo, designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em *Conforto Ambiental, Eficiência Energética e Tecnologias Construtivas Sustentáveis* para avaliação da monografia intitulada "**Análise comparativa de Programas de Certificação do hidrogênio de baixo carbono**" de autoria da aluna **Talita Covre Vargas** como requisito final para obtenção do certificado de especialista em *Conforto Ambiental, Eficiência Energética e Tecnologias Construtivas Sustentáveis*. A citada Comissão examinou o trabalho e, por unanimidade, concluiu que a monografia atende às exigências para a obtenção do Certificado de Conclusão do Curso, atribuindo ao trabalho o conceito A, com 90 pontos, e recomenda que seja encaminhado 01 (um) exemplar para o Repositório da UFMG.


Belo Horizonte, 24 de novembro de 2025.

Documento assinado digitalmente
 ANDREA FRANCO PEREIRA
Data: 24/11/2025 16:42:30-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Andréa Franco Pereira
Orientadora-Presidente

Documento assinado digitalmente
 RAFAEL AUGUSTO SEIXAS REIS DE PAULA
Data: 24/11/2025 16:55:12-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Rafael Augusto Seixas Reis de Paula
Coorientador

Documento assinado digitalmente
 SERGIO ROBERTO KNORR VELHO
Data: 24/11/2025 17:17:46-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dr. Sérgio Roberto Knorr Velho
Membro titular externo

É possível voar mais alto quando a base é sólida. À minha mãe e ao meu companheiro Gustavo, por serem base e inspiração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Andrea Franco por me iniciar na jornada da Avaliação do Ciclo de Vida com tanta maestria. Agradeço ao professor Rafael Augusto por ser parceiro tão ativo na minha jornada com o hidrogênio. Sou infinitamente grata à minha mãe por me alimentar de tantas formas e assim possibilitar meu percurso de estudos e profissional. Agradeço, com muita admiração, ao meu companheiro Gustavo, por ser essa mente brilhante e presente, e por embarcar comigo nas minhas ambições e aventuras. Agradeço à capoeira Angola, por me ensinar a jogar na grande roda da vida. Também reconheço a mim mesma, pelo desejo e determinação com os quais sigo em frente.

RESUMO

Este estudo realiza uma análise comparativa dos principais programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono em operação ou fase avançada de desenvolvimento até fevereiro de 2025, abrangendo programas mandatórios e voluntários. O objetivo é identificar convergências e divergências técnicas e regulatórias, e implicações estratégicas para o desenho de sistemas nacionais de certificação, com foco em credibilidade ambiental, interoperabilidade e governança energética.

A certificação emerge, assim, como instrumento de governança energética, influenciando políticas industriais, estruturas de mercado e estratégias de transição. Programas mandatórios asseguram integridade climática e previsibilidade regulatória, enquanto programas voluntários ampliam o alcance e a experimentação técnica. A confiança internacional, contudo, depende menos da uniformização normativa e mais da equivalência funcional dos resultados.

Os resultados indicam que a convergência internacional se concentra em torno de metodologias de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), métricas de intensidade de carbono ($\text{gCO}_2\text{e}/\text{MJ}$ ou $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kgH}_2$), referenciais normativos como as Normas ISO 14040, 14044 e 14067 e o Protocolo de Gases de Efeito Estufa (Greenhouse Gas -GHG- Protocol). Já critérios como adicionalidade e correlação temporal e geográfica permanecem específicos do modelo europeu, sem adoção sistemática em outros contextos. Persistem diferenças relevantes nas fronteiras de sistema, modelos de rastreabilidade e grau de digitalização, que limitam a comparabilidade e demonstram que a harmonização global ainda é incipiente.

Para o Brasil, o estudo aponta que liderança e reconhecimento internacional podem ser alcançados por meio de infraestrutura de dados confiável, verificação independente e equivalência metodológica transparente. Com matriz elétrica prevalentemente renovável e experiência consolidada em rastreabilidade de biocombustíveis, o país reúne condições para desenvolver um sistema de certificação tecnicamente robusto e integrado à sua política industrial de transição energética.

Palavras-chave: certificação do hidrogênio; avaliação de ciclo de vida; emissões de carbono; interoperabilidade; governança energética.

ABSTRACT

This study conducts a comparative analysis of major low carbon hydrogen certification schemes in operation or advanced development as of February 2025, including both mandatory and voluntary schemes. The objective is to identify technical and regulatory convergences and divergences, and strategic implications for the design of national certification systems, with emphasis on environmental credibility, interoperability, and energy governance.

Hydrogen certification thus emerges as an instrument of energy governance, shaping industrial policy, market design, and transition strategies. Mandatory schemes ensure climate integrity and regulatory predictability, while voluntary schemes foster wider participation and technical experimentation. International confidence, however, relies less on normative uniformity than on functional equivalence of results.

Findings indicate that international convergence focus around life cycle assessment (LCA) methodologies, carbon intensity metrics (gCO₂e/MJ), and normative references such as ISO 14040, 14044, 14067 and the Greenhouse Gas -GHG- Protocol. In contrast, criteria such as additionality and temporal and geographical correlation remain specific to the European regulatory model, with no systematic adoption elsewhere. Persistent differences in system boundaries, traceability models, and levels of digitalisation limit comparability and reveal that global harmonisation remains incipient.

For Brazil, the study highlights that leadership and international recognition can be achieved through a robust data infrastructure, independent verification, and transparent methodological equivalence. With a predominantly renewable power matrix and established experience in biofuel traceability, the country is well positioned to develop a technically sound certification system integrated with its industrial policy for energy transition.

Keywords: hydrogen certification; lifecycle assessment; carbon emissions; interoperability; energy governance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases de amadurecimento das certificações de hidrogênio de baixo carbono (2011–2025)	32
-------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do hidrogênio em legenda de cores.....	18
Tabela 2 – Similaridades entre programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono segundo a etiqueta adotada.....	29
Tabela 3 – Critérios para demonstrar o uso de eletricidade renovável em programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono	37
Tabela 4 – Limites de emissões e fronteiras de sistema em programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono.....	40
Tabela 5 – Sistemas de TI para registro nos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono.....	49
Tabela 6 – Programas e diretrizes de certificação do hidrogênio de baixo carbono considerados no estudo.....	53
Tabela 7 – Matriz de Análise 1: Características gerais dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono.....	54
Tabela 8 – Recomendações para o desenho de características gerais em programas nacionais de certificação de hidrogênio de baixo carbono.....	59
Tabela 9 – Matriz de Análise 2: Critérios técnicos dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono.....	60
Tabela 10 – Recomendações para o desenho de critérios técnicos em programas nacionais de certificação de hidrogênio de baixo carbono.....	65
Tabela 11 – Matriz de Análise 3: Configurações operacionais dos principais programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono.....	66
Tabela 12 – Recomendações para o desenho de configurações operacionais em programas nacionais de certificação de hidrogênio de baixo carbono.....	73
Tabela 13 – Indicadores de desempenho da certificação de hidrogênio de baixo carbono à luz do Trilema Energético.....	75
Tabela 14 – Síntese de recomendações adaptadas ao contexto brasileiro.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Análise do Ciclo de Vida ou Avaliação do Ciclo de Vida
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CCS	Captura e armazenamento de carbono (<i>Carbon Capture and Storage</i>)
CCUS	Captura, utilização e armazenamento de carbono (<i>Carbon Capture, Utilization and Storage</i>)
CE	Comissão Europeia
CHCS	<i>Clean Hydrogen Certification Scheme (Coreia)</i>
CI	<i>Carbon Intensity</i> - Intensidade de Carbono
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
COGES-PNH2	Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio
CSBCH2	Sistema Brasileiro de Certificação de Hidrogênio
DfT	<i>Department for Transport</i> (Reino Unido)
DESNZ	<i>Department for Energy Security and Net Zero</i> (Reino Unido)
EA	<i>European Cooperation for Accreditation</i>
EACs	<i>Energy Attribute Certificates</i> (Certificados de Atributos de Energia)
GEE	Gases de efeito estufa
GH2 Standard	<i>Green Hydrogen Standard</i>
GHG	<i>Greenhouse Gases</i>
GoOs	<i>Guarantees of Origin</i>
HEC	<i>Hydrogen Emissions Calculator</i>
HSPA	<i>Hydrogen Society Promotion Act</i> (Japão)
IAF	<i>International Accreditation Forum</i> (Fórum Internacional de Acreditação)
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
ILUC	<i>Indirect Land Use Change</i> (Mudança Indireta no Uso da Terra)
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPHE	<i>International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy</i>
I-RECs	<i>International Renewable Energy Certificates</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
ISSO	<i>International Organization for Standardization</i>

KEEI	<i>Korea Energy Economics Institute</i>
LCA	<i>Life Cycle Analysis ou Life Cycle Assessment</i>
LCCC	<i>Low Carbon Contracts Company</i>
LCHS	<i>Low Carbon Hydrogen Standard (Reino Unido)</i>
LOHC	<i>Liquid Organic Hydrogen Carriers (Transportadores Orgânicos Líquidos de Hidrogênio)</i>
METI	<i>Ministry of Economy, Trade and Industry (Japão)</i>
MLIT	<i>Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (Japão)</i>
MME	Ministério de Minas e Energia (Brasil)
MRV	Medição, Relato e Verificação
NEA	<i>National Energy Administration (China)</i>
ONAs	Organismos Nacionais de Acreditação
PCF	<i>Product Carbon Footprint (Pegada de carbono do produto)</i>
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PHBC	Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono
PNH2	Programa Nacional do Hidrogênio
PPAs	<i>Power Purchase Agreements (Contratos de Compra de Energia)</i>
RED II	<i>Renewable Energy Directive II (Diretiva de Energias Renováveis II)</i>
RED III	<i>Renewable Energy Directive III (Diretiva de Energias Renováveis III)</i>
REGOs	<i>Renewable Energy Guarantees of Origin</i>
RFNBO	<i>Renewable Fuel of Non-Biological Origin</i>
ROS	<i>Renewable Fuels Operating System</i>
RTFO	<i>Renewable Transport Fuel Obligation (Reino Unido)</i>
SBCH2	Sistema Brasileiro de Certificação de Hidrogênio
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SCH2	Sistema de Certificação de Hidrogênio
SCH2 EU RFNBO	Sistema de Certificação de Hidrogênio <i>European Union Renewable Fuel of Non Biological Origin</i>
SHC	<i>Solid Hydrogen Carriers (Transportadores Sólidos de Hidrogênio)</i>
TI	Tecnologia da informação
UDB	<i>Union Database</i>
EU	União Europeia

UNFCCC

United Nations Framework Convention on Climate Change

(Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima)

VVBs

Verification and Validation Bodies (Organismos de Verificação e

Validação)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Contexto da certificação do hidrogênio de baixo carbono	17
2.1.1 Classificações descritivas e quantitativas do hidrogênio de baixo carbono	18
2.1.2 Certificações de hidrogênio	19
2.1.3 Cenário brasileiro	21
2.2 Características gerais dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono	23
2.2.1 Jurisdição ou abrangência.....	23
2.2.2 Entidades responsáveis	24
2.2.3 Propósitos declarados	25
2.2.4 Rotas de produção elegíveis	26
2.2.5 Etiquetas atribuídas.....	27
2.2.6 Produtos ou cadeias certificáveis.....	29
2.2.7 Situação operacional.....	30
2.3 Critérios técnicos	32
2.3.1 Adicionalidade.....	32
2.3.2 Correlação geográfica e temporal.....	34
2.3.3 Formas de uso da eletricidade renovável.....	35
2.3.4 Limite de emissões e fronteiras de sistema	38
2.3.5 Modelos de rastreabilidade	41
2.3.6 Cálculo da pegada de carbono do produto e ferramentas ACV	42
2.4 Configurações Operacionais.....	43
2.4.1 Autoridade acreditadora e normas de referência	44
2.4.2 Organismos de auditoria e normas de referência.....	46
2.4.3 Autoridade emissora e normas de referência.....	47

3. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE	50
3.1 Estrutura metodológica.....	51
3.1.1 Delimitação do estudo e escopo	51
3.1.2 Coleta e sistematização de dados.....	51
3.1.3 Construção das dimensões analíticas e das matrizes de comparação	52
3.1.4 Síntese interpretativa	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.1 Características gerais dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono	54
4.1.1 Arquiteturas de governança e soberania regulatória.....	55
4.1.2 Propósito regulatório e funções econômicas da certificação	56
4.1.4 Maturidade institucional e governança global emergente	57
4.1.5 Recomendações para formuladores de política pública: características gerais	58
4.2 Critérios técnicos dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono	60
4.2.1 Integridade climática: critérios como instrumentos de política energética	62
4.2.2 Uso da eletricidade renovável: modelos de transição e suas condições de coerência	63
4.2.3 Fronteiras de sistema e PCF: coerência metodológica como facilitador de comparabilidade.....	63
4.2.4 Rastreabilidade e governança de dados: o elo crítico da integridade operacional	64
4.2.5 Recomendações para formuladores de política pública: critérios técnicos	64
4.3 Configurações operacionais	66
4.3.1 Desenho institucional das funções de acreditação, auditoria e emissão	68
4.3.2 Lógicas operacionais e efeitos sobre confiança, custo e interoperabilidade	69
4.3.3 Arquitetura digital, rastreabilidade e governança dos dados	70
4.3.4 Maturidade operacional e regimes de implementação	71
4.3.5 Recomendações para formuladores de política pública: configurações operacionais.....	72
4.4 Discussão à luz do Trilema Energético	73
4.4.1 Segurança energética: certificação como instrumento de previsibilidade e coordenação sistêmica	75

4.4.2 Equidade energética: inclusão, custos e assimetrias institucionais	77
4.4.3 Sustentabilidade ambiental: integridade metodológica e pragmatismo operacional	78
4.4.4 Considerações sobre o desempenho dos programas de certificação à luz do Trilema Energético	80
4.5 Observações para o contexto Brasileiro	81
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	84
5.1. Temas para pesquisas futuras	86
REFERÊNCIAS.....	88
GLOSSÁRIO	96
ANEXO A – RELAÇÃO DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS POR TIPO	99

1 INTRODUÇÃO

Com a aceleração das políticas de descarbonização e o crescimento das expectativas sobre o hidrogênio como caminho para uma menor dependência dos combustíveis fósseis no mercado internacional, a certificação ganhou centralidade. Deixou de ser uma iniciativa prescindível e passou a ser condição para acessar incentivos, integrar cadeias globais de valor e oferecer segurança de que esse vetor energético cumpre o papel que promete nas transições energéticas.

A certificação do hidrogênio para uso como recurso energético de baixo carbono é um fenômeno recente. Suas primeiras expressões apareceram em iniciativas voluntárias, como o TÜV SÜD CMS 70 de 2011, o *CertifHy* NGC de 2018 e a Norma Técnica chinesa T/CAB 0078, publicada em 2020. Poucos anos depois, vieram os primeiros marcos regulatórios nacionais e regionais: o *Low Carbon Hydrogen Standard* (LCHS) no Reino Unido (2022), a *Renewable Energy Directive III* (RED III) da União Europeia (2023) e, em 2024, o *Hydrogen Society Promotion Act* (HSPA) do Japão e o *Clean Hydrogen Certification Scheme* (CHCS) da Coreia do Sul, seguidos por novos padrões voluntários na Europa. Esse conjunto de normas e regulamentos pode ser visto como a primeira geração de tentativas de estabelecer parâmetros para o que significa, de fato, reconhecer o hidrogênio como de baixo carbono.

Esse processo, no entanto, ainda está longe de apresentar uniformidade. Cada programa de certificação de diferentes países e entidades responde de forma própria a questões fundamentais, tais como os limites de emissões permitidos, as fronteiras do ciclo de vida a serem consideradas ou as regras para comprovação do uso de energia renovável. O resultado é uma multiplicidade de metodologias que levam a uma mesma molécula de hidrogênio ser classificada como “de baixo carbono” em determinada jurisdição e não ter o mesmo reconhecimento em outra.

Em termos práticos, essa diversidade de programas tem efeitos concretos, tais como custos adicionais para produtores que desejam acessar diferentes mercados, incertezas para consumidores com metas de reduções de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e desafios para governos que buscam consolidar programas políticos de impacto. Ao mesmo tempo, essa fragmentação não deve ser vista apenas como obstáculo, pois reflete também as diferenças de vocações energéticas, prioridades de mercado e contextos regulatórios que moldam as escolhas de cada jurisdição. Assim, mais do que simplesmente defender o alinhamento dos padrões

mandatórios e voluntários de certificação, é necessário compreender a relação entre a busca por harmonização dos critérios que certificam o hidrogênio como “de baixo carbono” e a preservação de especificidades e necessidades locais. É justamente nesta relação, e em suas implicações para o comércio internacional, que esta pesquisa se concentra.

1.1 Objetivo

Este estudo tem como propósito mapear e analisar os principais programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono em vigor ou em fase avançada de desenvolvimento, evidenciando suas convergências e divergências. A partir dessa comparação, busca-se identificar aspectos que possam orientar o Brasil e outros países que estejam estruturando seus próprios programas de certificação. Esta busca se torna especialmente relevante no momento de expansão da economia do hidrogênio como solução estratégica para alcançar os objetivos globais de descarbonização.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

As metas de descarbonização e a necessidade de diversificação da matriz energética projetam o hidrogênio como elemento central no debate sobre transições energéticas e mitigação das mudanças climáticas (IRENA, 2020; IEA, 2024). Diante de suas múltiplas rotas de produção, o hidrogênio de baixo carbono desponta como alternativa promissora para reduzir emissões de GEE. Contudo, sua credibilidade como recurso de descarbonização depende de parâmetros técnicos bem definidos, que fundamentem programas de certificação capazes de atestar a sustentabilidade de sua produção (IRENA COALITION FOR ACTION, 2022).

Este referencial teórico tem por objetivo contextualizar o debate internacional sobre o hidrogênio de baixo carbono. Para isso, apresenta inicialmente o panorama global e brasileiro das certificações em termos gerais e, em seguida, avança para uma revisão mais detalhada dos parâmetros e elementos que compõem os programas de certificação do hidrogênio já existentes. A revisão bibliográfica, além de oferecer o embasamento conceitual necessário, também permitiu identificar os critérios mais recorrentes nos programas internacionais, servindo como ponto de partida para a construção das “matrizes de análise” elaboradas para este estudo.

2.1 Contexto da certificação do hidrogênio de baixo carbono

A certificação do hidrogênio de baixo carbono emergiu da necessidade de traduzir técnica e objetivamente o que significa produzir o hidrogênio com pegada de carbono reduzida. Na última década, a multiplicidade de iniciativas - regulatórias, industriais e voluntárias - demonstrou que ainda não existe consenso internacional quanto às métricas, limites de emissões e fronteiras de sistema que devem ser utilizadas para caracterizar o hidrogênio “limpo”. Trata-se de um campo marcado por interesses energéticos, industriais e geopolíticos diferenciados, no qual cada jurisdição busca equilibrar rigor climático, viabilidade econômica e oportunidades estratégicas de inserção em cadeias globais de valor (DENA; WEC GERMANY, 2022; GÜL; VAN HULST, 2023).

Esse cenário heterogêneo produz, ao mesmo tempo, competição e complementaridade. Países e blocos econômicos elaboram parâmetros para legitimar sua produção doméstica e criar vantagem comparativa em mercados emergentes, enquanto certificadoras privadas e iniciativas multilaterais buscam padronização e rastreabilidade. A certificação torna-se, assim, simultaneamente um instrumento de credibilidade ambiental e um mecanismo de disputa por governança tecnológica. Essa dinâmica é confirmada por estudos acadêmicos que apontam a existência de múltiplos sistemas de rotulagem e mensuração, com diferentes graus de detalhamento, escopo e confiabilidade (VELAZQUEZ ABAD; DODDS, 2020; GALLEGOS, 2024).

No plano regulatório, iniciativas como a Diretiva de Energias Renováveis (RED III) europeia atuam como indutores de convergência, ao estabelecer critérios mandatórios para acesso ao mercado europeu, especialmente no caso dos Combustíveis Renováveis de Origem Não Biológica (*Renewable Fuels of Non-Biological Origin* - RFNBO), que exigem reduções de emissões mínimas de 70% em relação ao comparador fóssil (EUROPEAN UNION, 2023; GIZ; SAP, 2024). Em paralelo, outras jurisdições, como a China, adotam sistemas próprios baseados em intensidade de carbono (*carbon intensity* - CI), classificando hidrogênio renovável, limpo e de baixo carbono de acordo com métricas nacionais (LUI et al., 2022). A América Latina, por sua vez, avança em propostas que combinam rastreabilidade, interoperabilidade e adequação a mercados internacionais, preservando, ao mesmo tempo, características locais de suas matrizes energéticas (HARTMANN et al., 2023).

Esse mosaico institucional reforça que a certificação opera tanto como um mecanismo de padronização quanto como um espaço de disputa regulatória global, influenciando investimentos, rotas tecnológicas e posicionamento competitivo das economias exportadoras de energia.







2.1.1 Classificações descritivas e quantitativas do hidrogênio de baixo carbono

A literatura identifica duas grandes abordagens para classificar o hidrogênio: a descritiva, baseada no uso da chamada “legenda de cores”, e a quantitativa, fundada em métricas numéricas de intensidade de emissões de GEE.

A legenda de cores constitui um instrumento comunicacional que permite identificar de forma simplificada rotas de produção. Hidrogênio cinza, azul e verde tornaram-se categorias amplamente reconhecidas, mas não padronizadas. Sua utilidade reside na comunicação pública, não na comparabilidade técnica. Estudos mostram que diferentes amostras de hidrogênio rotuladas como “verde” podem apresentar intensidades de carbono significativamente distintas, dependendo da composição da matriz elétrica, eficiências operacionais e definições de fronteiras de sistema (IRENA COALITION FOR ACTION, 2022; GÜL; VAN HULST, 2023).

A Tabela 1 apresenta as principais categorias cromáticas atualmente utilizadas, reconhecendo que elas são insuficientes para mensurar desempenho ambiental real. Por não integrarem critérios como adicionalidade, correlação temporal ou medição de fugas de metano, tais classificações podem induzir percepções pouco precisas sobre a efetiva contribuição climática das diferentes rotas de produção (DENA; WEC GERMANY, 2022).

Tabela 1 – Classificação do hidrogênio em legenda de cores

Cor	Classificação	Descrição
	Hidrogênio preto	Produzido de carvão mineral (antracito) sem CCUS
	Hidrogênio marrom	Produzido de carvão mineral (hulha), sem CCUS
	Hidrogênio cinza	Produzido do gás natural sem CCUS
	Hidrogênio azul	Produzido a partir de gás natural (eventualmente, também a partir de outros combustíveis fósseis) com CCUS
	Hidrogênio verde	Produzido a partir de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar) via eletrólise da água
	Hidrogênio branco	Hidrogênio natural ou geológico

	Hidrogênio turquesa	Produzido por craqueamento térmico do metano, sem gerar CO ₂
	Hidrogênio musgo	Produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica

Fonte: EPE, 2021

A crescente necessidade de comparabilidade internacional impulsionou o avanço da abordagem quantitativa, baseada em métricas de intensidade de emissões por unidade funcional - normalmente expressas em kgCO₂e/kgH₂ ou gCO₂e/MJ - e alinhadas às práticas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Programas de certificação adotam limiares para enquadrar hidrogênio como “renovável” ou “de baixo carbono”, variando conforme as fronteiras de sistema (*well-to-gate*, *cradle-to-gate* ou *well-to-wheel*), os métodos de alocação de coprodutos, o tratamento das emissões do sistema elétrico e os fatores de captura e mitigação.

A literatura internacional aponta que limiares próximos a 28,2 gCO₂e/MJ - equivalentes a cerca de 1,0 a 4,9 kgCO₂e/kgH₂ - são recorrentes em programas que classificam o hidrogênio como renovável (IEA, 2024). Já limites para hidrogênio de baixo carbono variam significativamente, podendo situar-se entre 2,4 e 14,5 kgCO₂e/kgH₂, refletindo diferenças metodológicas e prioridades políticas (HYDROGEN COUNCIL; MCKINSEY & COMPANY, 2024).

Essa transição - de uma taxonomia cromática para métricas quantitativas baseadas em desempenho - representa avanço essencial para garantir transparência, comparabilidade e credibilidade, especialmente em setores de difícil descarbonização como siderurgia, fertilizantes e transporte de longa distância.

2.1.2 Certificações de hidrogênio

A certificação consiste no conjunto de procedimentos destinados a verificar a conformidade do hidrogênio com critérios previamente definidos. Esses critérios podem ter caráter mandatório, quando regulados por legislação nacional ou regional, ou voluntário, quando definidos por iniciativas privadas, associações industriais e mercados especializados (IRENA, 2020).

Programas mandatórios condicionam o acesso a mercados e incentivos - como ocorre no caso europeu - enquanto programas voluntários funcionam como sinalizadores de sustentabilidade, abrindo espaço para mercados premium e influenciando futuros marcos regulatórios. Ambos

coexistem e interagem, moldando trajetórias tecnológicas e decisões de investimento (IRENA COALITION FOR ACTION, 2022).

Entretanto, o avanço da certificação enfrenta obstáculos relevantes, amplamente discutidos na literatura especializada. Um dos principais desafios refere-se à heterogeneidade metodológica observada entre os diferentes programas internacionais. Divergências quanto à definição das fronteiras de sistema, aos critérios de adicionalidade, às exigências de correlação temporal e geográfica entre produção e consumo de eletricidade, aos métodos de alocação de coprodutos e à inclusão de emissões a montante resultam em valores de intensidade de carbono não comparáveis entre esquemas de certificação. Essa assimetria metodológica compromete a transparência e enfraquece a confiança dos agentes de mercado na efetividade climática dos certificados (VELAZQUEZ ABAD; DODDS, 2020; WHITE et al., 2021).

Outro conjunto de desafios decorre da fragmentação regulatória existente entre sistemas regionais, como os da União Europeia, da China e de países da América Latina. A coexistência de critérios e métricas não harmonizados gera requisitos potencialmente incompatíveis, eleva custos de transação e cria barreiras ao comércio internacional de hidrogênio e derivados, dificultando a formação de mercados transfronteiriços eficientes (GALLEGOS, 2024; LIU et al., 2022; HARTMANN et al., 2023).

Somam-se a isso os desafios de verificação e rastreabilidade, particularmente expressivos em cadeias globais de suprimento. A comprovação da origem da eletricidade utilizada nos processos de eletrólise, os fatores de captura de carbono e as emissões associadas ao armazenamento, transporte e conversão exigem sistemas robustos de auditoria e monitoramento. Esses mecanismos, além de complexos, implicam custos elevados, sobretudo para operações de exportação envolvendo longas distâncias e múltiplos modais logísticos (IPHE, 2024; HARTMANN et al., 2023).

Por fim, destacam-se os custos e barreiras administrativas associados à obtenção e manutenção da certificação. Processos de monitoramento, reporte e verificação demandam capacidades técnicas e recursos financeiros significativos, o que pode limitar a participação de pequenos produtores e de países em desenvolvimento, reforçando assimetrias institucionais e dificultando a adoção ampla desses mecanismos (GOODWIN et al., 2024).

Nesse contexto, o conceito de interoperabilidade torna-se central. Ele implica a possibilidade de diferentes programas reconhecerem mutuamente metodologias, cálculos e resultados, reduzindo necessidade de múltiplas certificações e facilitando o comércio internacional. Experiências anteriores, como a harmonização metodológica promovida pela RED no mercado de biocombustíveis, evidenciam que padrões comuns, valores padrão de emissões e auditorias robustas contribuem para credibilidade e convergência (IRENA, 2020; GALLEGOS, 2024).

Iniciativas recentes, como a abordagem modular proposta pela *International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy* (IPHE), sugerem a criação de um “núcleo comum” de requisitos mínimos, complementado por módulos adicionais. Isso permitiria alinhamento progressivo sem eliminar a flexibilidade para atender a especificidades nacionais (IPHE, 2024). A consolidação de mercados regionais e globais de hidrogênio dependerá, portanto, tanto da evolução tecnológica quanto da confiabilidade das certificações. Para países com alta disponibilidade de recursos renováveis, como o Brasil, a oportunidade reside em formular critérios interoperáveis com padrões internacionais, preservando ao mesmo tempo especificidades locais e ampliando sua inserção estratégica nas cadeias globais de transição energética.

2.1.3 Cenário brasileiro

O Brasil reúne condições singulares para o desenvolvimento de uma indústria de hidrogênio de baixo carbono, resultado de sua matriz energética diversificada, da ampla disponibilidade de fontes renováveis e da experiência acumulada com biocombustíveis (BRASIL, 2023). Nesse contexto, o país tem avançado na construção de uma estrutura normativa e regulatória capaz de viabilizar a produção, a distribuição e o consumo do hidrogênio com menor intensidade de carbono, reforçando a competitividade de seu mercado interno e ampliando as oportunidades de exportação (SIFFERT; ROCHA, 2025).

A trajetória brasileira no campo do hidrogênio remonta ao início dos anos 2000, quando foram lançadas as primeiras iniciativas que pavimentaram o caminho para os avanços recentes. Em 2003, o país aderiu à IPHE, integrando-se a um esforço global de cooperação técnica, acadêmica e mercadológica. Dois anos depois, em 2005, o Ministério de Minas e Energia (MME) publicou o *Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil*, que já projetava metas até 2025 e abordava temas como a diversificação de rotas tecnológicas, o papel

do gás natural como vetor de transição e a expansão da geração distribuída (MME, 2021). Esses primeiros passos foram fundamentais para amadurecer a agenda nacional e preparar o terreno para a retomada de iniciativas estruturais a partir de 2021.

Nesse ano, Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) instituiu o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), concebido para fortalecer o seu papel na matriz brasileira (MME, 2021). O programa ganhou uma configuração de governança própria, o Comitê Gestor do PNH2 (COGES-PNH2), responsável por articular ministérios, órgãos reguladores e instituições técnicas. A iniciativa considera múltiplas rotas de produção, a possibilidade de integração com infraestruturas já existentes como as redes de gás natural, e o estímulo a projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D). O Plano de Trabalho Trienal 2023–2025 complementou essa estratégia ao destacar a importância da certificação, indicando a necessidade de um programa nacional baseado na intensidade de emissões, alinhado a parâmetros globais (BRASIL, 2023).

Nesse cenário, merece destaque a atuação da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Em 2022, antes mesmo da promulgação do marco jurídico que viria em 2024, a CCEE lançou uma versão inicial voluntária de certificação do hidrogênio, o SCH2 (Sistema de Certificação de Hidrogênio), que funcionou por um período reduzido e posteriormente foi descontinuada, diante da transição institucional esperada para o SCH2 EU RFNBO (Sistema de Certificação de Hidrogênio *European Union Renewable Fuel of Non-Biological Origin*). Esse último nasce com o objetivo de compatibilizar os atributos do hidrogênio brasileiro com critérios determinados pela União Europeia. Neste momento, o programa se encontra em processo de avaliação pela Comissão Europeia (CE) e ainda não opera oficialmente (CCEE, s/d). Essas experiências iniciais, embora transitórias, consolidaram a expertise da instituição e contribuíram para preparar o caminho de sua atuação futura no programa nacional de certificação do hidrogênio.

O marco jurídico avançou de forma decisiva com a promulgação da Lei nº 14.948/2024, que instituiu a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PNH2). A lei estabeleceu princípios como neutralidade tecnológica e previsibilidade regulatória, além de metas para rotas renováveis, e previu a criação do Sistema Brasileiro de Certificação de Hidrogênio, SBCH2, sob supervisão da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (BRASIL, 2024a). Complementarmente, a Lei nº 14.990/2024 instituiu o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC), com

foco em estímulos fiscais, financeiros e creditícios, direcionados, sobretudo, a setores de difícil descarbonização (BRASIL, 2024b). O próximo passo é a publicação do decreto de regulamentação dessas leis, que deverá detalhar os critérios técnicos do SBCH2 como limites de emissões, fronteiras de sistema e regras de cálculo das emissões no ciclo de vida, e formalizar a definição institucional de papéis, incluindo a atuação da CCEE como gestora de registros, em articulação da ANP como autoridade supervisora, do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) como autoridade acreditadora e de demais entidades previstas na governança do SBCH2 (BRASIL, 2025).

Do ponto de vista de mercado, o Brasil se projeta em duas frentes complementares. Internamente, o hidrogênio de baixo carbono pode substituir o hidrogênio fóssil hoje predominante em setores como refino, fertilizantes e siderurgia (SIFERT; ROCHA, 2025). Externamente, o país reúne condições para se tornar exportador competitivo, especialmente em regiões com abundância solar e eólica como o nordeste brasileiro (GABRIELLI; TOKARSKI, 2024). Para que essa inserção internacional seja viável, a interoperabilidade do SBCH2 com mecanismos de certificação globais será importante, reforçando a credibilidade e o valor do hidrogênio brasileiro no comércio internacional (IEA, 2024).

2.2 Características gerais dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono

O apanhado bibliográfico mostra que as características gerais dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono pode ser observado a partir de sete dimensões centrais: 1) jurisdição ou abrangência, 2) entidades responsáveis, 3) propósitos declarados, 4) rotas de produção contempladas, 5) etiquetas atribuídas, 6) produtos ou cadeias certificáveis e 7) situação operacional. Esses elementos permitem compreender tanto a diversidade de configurações institucionais quanto os pontos de convergência que sinalizam tendências de harmonização internacional.

2.2.1 Jurisdição ou abrangência

A jurisdição é um elemento estruturante dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono, pois determina seu alcance, a autoridade regulatória e o grau de obrigatoriedade.

Nos programas mandatórios, a jurisdição define os limites territoriais de validade e a autoridade responsável pela certificação. No Japão, o *Hydrogen Society Promotion Act* (HSPA) estabelece um sistema nacional, integrado à política energética doméstica (JAPAN, 2024). De modo semelhante, a Coreia do Sul implementou o *Clean Hydrogen Certification Scheme* (CHCS), também de caráter nacional, sob coordenação de institutos públicos de energia (KTC; KTR, 2025). No Reino Unido, a certificação foi desdobrada em dois instrumentos: o *Low Carbon Hydrogen Standard* (LCHS), voltado à indústria, e o *Renewable Transport Fuel Obligation* (RTFO), destinado ao transporte, ambos restritos ao território britânico (DESNZ, 2023b; UK DFT, 2024). Já na União Europeia (UE), as *Renewable Energy Directives* II e III (RED II e RED III)¹ expandem o alcance da certificação do hidrogênio para uma jurisdição supranacional, impondo critérios uniformes aos Estados-Membros e consolidando um programa de certificação de abrangência regional (EUROPEAN UNION, 2018; 2023).

Nos programas voluntários, predomina a abrangência global, permitindo aplicação em múltiplos contextos de mercado e em operações transfronteiriças. O *Green Hydrogen Standard* (GH2 Standard), desenvolvido pela *Green Hydrogen Organisation*, e as certificações privadas TÜV SÜD CMS 70 e TÜV Rheinland H2.21 exemplificam essa lógica de reconhecimento multijurisdicional (GH2, 2023; TÜV SÜD, 2024; TÜV RHEINLAND, 2023). Os programas ISCC EU, REDcert EU e CertifHy RFNBO, embora certifiquem para consumo dentro da União Europeia, operam a nível global de forma a viabilizar a exportação de RFNBO para consumo em território europeu (ISCC SYSTEM GMBH, 2025a; REDCERT GMBH, 2024a; CERTIFHY, 2024). O padrão chinês T/CAB 0078-2020 representa um caso singular sendo formalmente voluntário mas de aplicação nacional (GROUP STANDARDS, 2020).

2.2.2 Entidades responsáveis

A natureza das entidades responsáveis varia conforme o caráter mandatório ou voluntário dos programas, determinando o grau de autoridade, legitimidade e integração com políticas energéticas.

¹ A RED II (Diretiva (UE) 2018/2001) foi aprovada em 2018, estabelecendo metas de participação de energias renováveis e criando a base jurídica para os combustíveis renováveis de origem não biológica (RFNBOs), categoria na qual o hidrogênio renovável se enquadra. Já a RED III (Diretiva (UE) 2023/2413), publicada em outubro de 2023, revisa e amplia a RED II, adaptando-a às novas metas climáticas da União Europeia no contexto do European Green Deal e do REPowerEU.

Nos programas mandatórios, a governança é exercida por órgãos governamentais centrais com autoridade para alinhar a certificação às metas nacionais de descarbonização e política industrial. A Comissão Europeia, por exemplo, implementa a RED III e garante a aplicação uniforme de critérios como adicionalidade, correlação temporal e geográfica e limites de emissões em todos os Estados-Membros (EUROPEAN UNION, 2023). No Japão, o HSPA é administrado pelo *Ministry of Economy, Trade and Industry* (METI) em cooperação com o *Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism* (MLIT), unindo competências industriais, energéticas e logísticas (JAPAN, 2024). A Coreia do Sul adota modelo similar: o CHCS é supervisionado pelo *Korea Energy Economics Institute* (KEEI), refletindo governança técnica e centralizada (KTC; KTR, 2025). No Reino Unido, o *Department for Energy Security and Net Zero* (DESNZ) e o *Department for Transport* (DfT) respondem, respectivamente, pelo LCHS e pelo RTFO (DESNZ, 2023b; UK DFT, 2024).

Nos programas voluntários, a governança é predominantemente privada, exercida por certificadoras, associações e organizações setoriais que constroem legitimidade pela confiança do mercado. A *Green Hydrogen Organisation* (GH2, 2023) e a *ISCC System GmbH* (ISCC SYSTEM GMBH, 2025a) exemplificam esse modelo, desenvolvendo metodologias de rastreabilidade, métricas de desempenho ambiental e protocolos de auditoria. Embora sem força legal direta, esses programas ganham relevância quando adotados por investidores, empresas ou governos como referência de boas práticas. A Norma Técnica chinesa T/CAB 0078-2020 é conduzida por entidade pública de cooperação indústria–universidade, desempenhando função de padronização nacional (GROUP STANDARDS, 2020).

2.2.3 Propósitos declarados

Os propósitos declarados dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono variam conforme sua natureza e jurisdição, refletindo diferentes funções institucionais, que podem ser regulatórias, técnicas ou de relatório ambiental.

Nos programas mandatórios, o objetivo central é assegurar que a produção e o uso do hidrogênio contribuam para metas nacionais ou regionais de mitigação de emissões. A RED III estabelece que apenas RFNBOs com redução mínima de 70% das emissões em relação ao combustível fóssil de referência podem ser contabilizados para metas obrigatórias (EUROPEAN UNION, 2023). No Japão, o HSPA condiciona o reconhecimento do hidrogênio

“de baixo carbono” à certificação oficial, requisito para acesso a programas de apoio e subsídios públicos (JAPAN, 2024). A Coreia do Sul, por meio do CHCS, vincula a certificação às metas da *Carbon Neutrality Act* (2020), inserindo-a como ferramenta de compatibilização entre política energética e compromissos climáticos (KOREA, 2020). No Reino Unido, o LCHS define a certificação como requisito para subsídios à indústria (DESNZ, 2023b), enquanto o RTFO regula a elegibilidade de combustíveis de transporte conforme sua intensidade de emissões (UK DFT, 2024).

Entre os programas voluntários, alguns têm foco em divulgação de atributos ambientais (*disclosure*), outros em elegibilidade financeira ou padronização técnica. O GH2 Standard visa certificar a sustentabilidade ambiental e social do hidrogênio e seus derivados, fornecendo uma linguagem comum para contratos internacionais (GH2, 2023). Programas como o ISCC EU, o REDcert EU e o CertifHy RFNBO foram desenvolvidos para demonstrar conformidade com a RED III, ainda que mantenham caráter voluntário (ISCC SYSTEM GMBH, 2025a; REDCERT GMBH, 2024a; CERTIFHY, 2024). Outros programas, como o TÜV SÜD CMS 70, o TÜV Rheinland H2.21 e a Norma chinesa T/CAB 0078-2020, funcionam como instrumentos de padronização técnica e reporte de emissões, sem obrigatoriedade legal, mas com potencial de reconhecimento internacional (GROUP STANDARDS, 2020; TÜV SÜD, 2024; TÜV RHEINLAND, 2023).

2.2.4 Rotas de produção elegíveis

É possível identificar três abordagens predominantes na definição das rotas de produção elegíveis para certificação do hidrogênio de baixo carbono, que diferem quanto ao grau de restrição tecnológica e à estratégia de política energética.

A primeira abordagem, de caráter restritivo, se limita exclusivamente à eletrólise alimentada por fontes renováveis. Nele se enquadram o RTFO britânico (UK DFT, 2024), a RED III europeia (EUROPEAN UNION, 2023), bem como os programas voluntários concebidos para demonstrar conformidade com essa diretiva - ISCC EU, REDcert EU e CertifHy RFNBO (ISCC SYSTEM GMBH, 2025a; REDCERT GMBH, 2024a; CERTIFHY, 2024) - além do GH2 Standard (GH2, 2023). Essa configuração visa maximizar a integridade ambiental ao vincular a certificação à origem renovável da eletricidade utilizada.

A segunda abordagem, de caráter inclusivo, admite múltiplas rotas tecnológicas, incluindo fósseis com captura e armazenamento de carbono (CCS, na sigla em inglês), biogênicas e eletrólise. Essa é a orientação adotada, por exemplo, pelo HSPA japonês, com foco em segurança energética e flexibilidade industrial (JAPAN, 2024). Programas como o TÜV SÜD CMS 70, o TÜV Rheinland H2.21 (TÜV SÜD, 2024; TÜV RHEINLAND, 2023) e a Norma Técnica chinesa T/CAB 0078-2020 (GROUP STANDARDS, 2020) também seguem essa lógica mais aberta, ao admitir diferentes rotas desde que compatíveis com critérios pré-definidos de ACV.

Por fim, a terceira abordagem, orientada a desempenho, define a elegibilidade das rotas de produção com base na intensidade de emissões, independentemente da tecnologia empregada. O CHCS coreano e o LCHS britânico exemplificam esse modelo, ao permitir múltiplas rotas desde que comprovada a redução líquida de emissões em relação a um patamar pré-estabelecido (KTC; KTR, 2025; DESNZ, 2023b). Essa perspectiva desloca o foco da origem tecnológica para o resultado ambiental mensurável.

2.2.5 Etiquetas atribuídas

A nomenclatura utilizada nos selos de certificação do hidrogênio de baixo carbono apresenta convergência parcial em torno de três grupos principais: Hidrogênio Renovável (ou equivalentes como *Renewable Fuel of Non-Biological Origin* – RFNBO), Hidrogênio Verde e Hidrogênio de Baixo Carbono. Cada denominação reflete diferentes abordagens metodológicas e níveis de exigência regulatória.

As etiquetas “Hidrogênio Renovável” (*Renewable Hydrogen*) e RFNBO associam a certificação à origem renovável da eletricidade usada na produção. A RED III da União Europeia define o termo RFNBO como combustível renovável de origem não biológica, abrangendo hidrogênio e seus derivados obtidos por eletrólise com eletricidade proveniente de fontes renováveis (EUROPEAN UNION, 2023b). Essa nomenclatura foi adotada pelos programas voluntários reconhecidos pela União Europeia - ISCC EU, REDcert EU 07 e CertifHy RFNBO - que seguem os mesmos critérios de elegibilidade, cálculo e rastreabilidade (ISCC SYSTEM GMBH, 2025a; REDCERT GMBH, 2024a; CERTIFHY, 2024). O TÜV Rheinland H2.21 aplica a designação “Hidrogênio Renovável” de forma análoga, mantendo a

exigência de eletricidade 100% renovável, porém com critérios de rastreabilidade próprios (TÜV RHEINLAND, 2023).

No RTFO britânico, os combustíveis renováveis, incluindo o hidrogênio, geram um *Renewable Transport Fuel Certificate* (RTFC), que são títulos regulatórios emitidos pelo DfT que comprovam o cumprimento das metas obrigatórias de descarbonização do setor de transportes (UK DfT, 2024). Embora o RTFO possa aceitar evidências de rastreabilidade provenientes de programas voluntários, a etiqueta oficial é sempre a RTFC, que atesta a conformidade dentro do contexto nacional britânico.

O termo “Hidrogênio Verde” (*Green Hydrogen*) mantém uma certa difusão em programas de caráter voluntário, ainda que com significados técnicos diversos. O GH2 Standard o define como hidrogênio produzido por eletrólise com fontes renováveis e complementado por critérios sociais e de governança ambiental (GH2, 2023). O TÜV SÜD CMS 70 diferencia *Green Hydrogen* de *Green Hydrogen+*, atribuindo à segunda categoria maior rastreabilidade e transparência na cadeia de custódia (TÜV SÜD, 2024). Já o CertifHy NGC emprega a etiqueta “*Green Hydrogen*” para rotas com origem renovável comprovada e emissões dentro do limite europeu (CERTIFHY, 2022a). Apesar das diferenças conceituais, esses programas compartilham o objetivo de comunicar desempenho ambiental elevado e credibilidade de mercado, o que explica esta adoção do termo primariamente em iniciativas privadas.

A denominação “Hidrogênio de Baixo Carbono” (*Low Carbon Hydrogen*) é amplamente utilizada, caracterizando-se pela ênfase na intensidade de emissões ao longo do ciclo de vida, em vez da origem energética. O LCHS do Reino Unido estabelece um limite de 20 gCO_{2e}/MJ como critério de elegibilidade a subsídios públicos (DESNZ, 2023b). O HSPA, do Japão, e o CHCS, da Coreia do Sul, seguem lógica semelhante, reconhecendo o hidrogênio e seus derivados que apresentem intensidade reduzida de emissões em todo o ciclo produtivo (JAPAN, 2024; KTC; KTR, 2025). Entre os programas voluntários, o CertifHy NGC aplica o termo a rotas que atendem apenas ao limite de emissões, sem necessariamente comprovar origem renovável (CERTIFHY, 2022a). A Norma chinesa T/CAB 0078-2020 também emprega as etiquetas “Hidrogênio Limpo”, “Hidrogênio Renovável” e “Hidrogênio de Baixo Carbono”, conforme o nível de emissões associado (GROUP STANDARDS, 2020).

A Tabela 2 evidencia que as denominações “renovável”, “verde” e “baixo carbono” não apenas expressam diferentes níveis de rigor técnico, mas também delinham cadeias de valor, critérios de emissões e rastreabilidade distintos.

Tabela 2 – Similaridades entre programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono segundo a etiqueta adotada

Grupo de Etiqueta	Programas incluídos	Grau de interoperabilidade	Observações
Renovável	RED III (UE) / ISCC EU / REDcert EU / CertifHy RFNBO e RTFO (Reino Unido)	Parcial	Todos exigem eletrólise renovável, com variações nas regras de correlação.
Verde	GH2 Standard, CertifHy NGC (Green Hydrogen), TÜV SÜD CMS 70 (Green Hydrogen), TÜV Rheinland H2.21 (Renewable H ₂)	Inexistente	Embora usem a etiqueta “verde”, os critérios de emissões e rastreabilidade diferem substancialmente.
Baixo Carbono	LCHS (Reino Unido), HSPA (Japão), CHCS (Coreia), CertifHy NGC (Low Carbon Hydrogen), TÜV Rheinland H2.21 (Low Carbon Hydrogen), T/CAB 0078-2020 (China)	Parcial	Convergência na adoção de limiares de emissões, mas diferentes métricas (kgCO ₂ e/kg H ₂ ou gCO ₂ e/MJ) e fronteiras de sistema (well-to-gate vs. well-to-wheel).

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

2.2.6 Produtos ou cadeias certificáveis

A literatura mostra que os programas de certificação convergem quanto à inclusão do hidrogênio puro como elemento central, mas diferem substancialmente na abrangência de derivados e vetores logísticos certificados. Observa-se, inicialmente, um conjunto de programas cuja elegibilidade se restringe ao hidrogênio puro, como o Low Carbon Hydrogen Standard (LCHS), do Reino Unido, voltado a aplicações industriais de difícil abatimento (DESNZ, 2023b); o Clean Hydrogen Certification Scheme (CHCS), da Coreia do Sul, concebido para uso doméstico alinhado à meta nacional de neutralidade de carbono (KTC; KTR, 2025); o CertifHy NGC, em sua vertente ambiental voluntária, destinado à emissão de declarações eletrônicas de atributos (CERTIFHY, 2022a); e a norma chinesa T/CAB 0078-2020, que opera como padrão técnico nacional (GROUP STANDARDS, 2020). Esses programas enfatizam rastreabilidade e controle industrial, priorizando cadeias de valor internas e setores de uso final intensivos em energia.

Em um segundo grupo, encontram-se programas que estendem a certificação a derivados energéticos e químicos, abrangendo amônia, metanol e combustíveis sintéticos. Entre eles estão

a Renewable Energy Directive III (RED III), da União Europeia, que inclui hidrogênio e seus derivados no escopo regulatório dos RFNBOs (EUROPEAN UNION, 2023); o Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO), do Reino Unido, que certifica derivados aplicáveis ao setor de transportes (UK DFT, 2024); e o Hydrogen Society Promotion Act (HSPA), do Japão, que reconhece hidrogênio e derivados como produtos de baixo carbono para fins de elegibilidade a apoio econômico (JAPAN, 2024). Essa mesma abordagem é replicada em programas voluntários alinhados à RED, como o ISCC EU, o REDcert EU e o CertifHy RFNBO, que adotam estruturas técnicas compatíveis com a diretiva europeia (ISCC SYSTEM GMBH, 2025a; REDCERT GMBH, 2024a; CERTIFHY, 2024). No campo voluntário, o GH2 Standard também certifica hidrogênio e amônia, incorporando critérios ambientais e sociais (GH2, 2023).

Por fim, observa-se um terceiro grupo composto por programas que expandem o escopo para vetores logísticos de hidrogênio, além de derivados convencionais. O TÜV SÜD CMS 70 certifica hidrogênio, amônia, metanol e ainda portadores orgânicos líquidos de hidrogênio (LOHC), incluindo, em determinados módulos, portadores sólidos (SHC) (TÜV SÜD, 2024). O TÜV Rheinland H2.21 adota lógica semelhante, incorporando vetores de transporte e armazenamento como parte da cadeia certificável (TÜV RHEINLAND, 2023). Esses programas ampliam substancialmente a fronteira do que é considerado certificável, refletindo a importância crescente de soluções logísticas no desenvolvimento de mercados internacionais de hidrogênio.

2.2.7 Situação operacional

A evolução cronológica dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono mostra fases que caracterizam o desenvolvimento institucional e amadurecimento regulatório desses mecanismos.

A fase pioneira (2011–2018) marcou o surgimento dos primeiros programas voluntários, que serviram como campo de teste para metodologias de rastreabilidade e verificação. O TÜV SÜD CMS 70, lançado em 2011, estabeleceu critérios básicos de auditoria e limites de emissões sem recorrer a sistemas digitais de rastreamento, baseando-se em inspeções presenciais (TÜV SÜD, 2024). Em 2018, o CertifHy NGC introduziu certificados eletrônicos por meio do modelo *book*

& *claim*², que dissocia atributos ambientais do fluxo físico do hidrogênio (CERTIFHY, 2023). Ambos atuaram como laboratórios de mercado, conferindo legitimidade inicial à certificação em um contexto ainda não regulado.

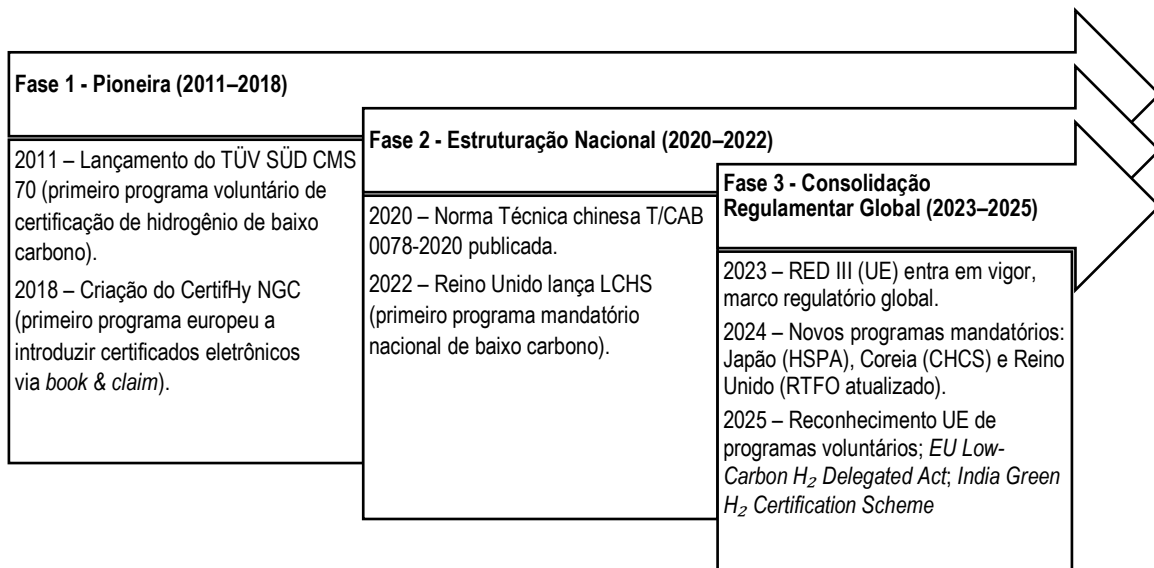
A segunda fase, de estruturação nacional (2020–2022), consolidou a transição do caráter voluntário para o regulatório. A Norma chinesa T/CAB 0078-2020 representou o primeiro marco nacional de padronização técnica (GROUP STANDARDS, 2020), enquanto o LCHS, publicado no Reino Unido em 2022, inaugurou a certificação estatal com critérios obrigatórios de emissões e rastreabilidade (DESNZ, 2023b).

A fase de consolidação regulatória global (2023–2025) ampliou o alcance jurídico e geográfico dos programas. A RED III da União Europeia (EUROPEAN UNION, 2023a; 2023b) introduziu exigências mandatórias de adicionalidade, correlação temporal e limites de emissões, influenciando novos programas nacionais como o HSPA japonês (JAPAN, 2024), o CHCS coreano (KTC; KTR, 2025) e a atualização do RTFO britânico (UK DFT, 2024). Em 2025, a Comissão Europeia reconheceu formalmente os programas voluntários ISCC EU, REDcert EU e CertifHy RFNBO como em conformidade com a RED III, ao mesmo tempo em que foram publicados novos referenciais, como o ato delegado europeu para hidrogênio de baixo carbono (EUROPEAN COMMISSION, 2025) e o *Green Hydrogen Certification Scheme* da Índia (GOVERNMENT OF INDIA, 2025). Por terem sido lançados após o período de corte desta análise, estes últimos não foram incluídos no referencial teórico e nos resultados principais.

A Figura 1 sintetiza graficamente esse processo, destacando as fases de amadurecimento da certificação do hidrogênio de baixo carbono entre 2011 e 2025.

² O modelo *book & claim* é um sistema de rastreabilidade de atributos ambientais que separa o valor ambiental do produto físico. Nesse mecanismo, o produtor registra eletronicamente os atributos de sustentabilidade (como intensidade de emissões ou origem renovável) em uma plataforma digital, enquanto o comprador pode “reivindicar” (*claim*) esses atributos sem necessidade de correspondência física entre a produção e o consumo. Esse modelo é amplamente utilizado em mercados de energia renovável e biocombustíveis, como o sistema de certificados de Garantia de Origem (GO) na Europa.

Figura 1 - Fases de amadurecimento das certificações de hidrogênio de baixo carbono (2011–2025)



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

2.3 Critérios técnicos

Os critérios técnicos são o núcleo dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono, pois definem os parâmetros que sustentam sua integridade ambiental e credibilidade regulatória. Trata-se de escolhas normativas e metodológicas que estruturam o papel do hidrogênio na descarbonização. A literatura destaca como centrais os critérios de comprovação do uso de energia renovável, que são as condições de 1) adicionalidade, 2) correlação geográfica e temporal, e os critérios de cálculo de emissões de GEE, que incluem 3) limites de emissões, 4) limites de sistema, 5) modelos de rastreabilidade e 6) metodologias de cálculo da pegada de carbono do produto (*Product Carbon Footprint - PCF*).

2.3.1 Adicionalidade

O princípio da adicionalidade consolidou-se originalmente nos mecanismos de compensação de carbono sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, 2025), como um critério de integridade ambiental destinado a assegurar que as reduções de emissões geradas por um projeto excedam o que ocorreria na ausência do incentivo climático. Seu uso formal teve início com o Protocolo de Quioto (1997) e foi operacionalizado a partir de 2001, quando o Conselho Executivo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (*CDM*

Executive Board) publicou a primeira *Tool for the Demonstration and Assessment of Additionality* (UNFCCC, 2004). De acordo com o *Standard on Demonstration of Additionality in Mechanism Methodologies* (UNFCCC, 2025), um projeto é considerado adicional se (i) superar as reduções exigidas por lei, (ii) evitar o *lock-in* de tecnologias intensivas em carbono e (iii) depender dos incentivos do mecanismo para ser implementado. Historicamente, o conceito abrange três dimensões: regulatória, relacionada ao cumprimento de exigências legais; financeira, vinculada à viabilidade econômica do projeto; e tecnológica, associada à inovação e ao desempenho relativo a práticas comuns.

Na certificação do hidrogênio de baixo carbono, o princípio da adicionalidade foi reinterpretado para o contexto elétrico-industrial, assumindo uma função de elegibilidade operacional. Para atender ao critério, a eletricidade renovável utilizada deve provir de nova capacidade de geração e não do redirecionamento de usinas já existentes. No caso europeu, isso implica que a instalação geradora não tenha recebido apoio público³, assegurando que o hidrogênio contribua efetivamente para a expansão líquida do parque renovável e não apenas para uma redistribuição de recursos energéticos já disponíveis (EUROPEAN UNION, 2023a). Assim, a adicionalidade torna-se um instrumento de integridade climática e de coordenação energética, concebido para garantir benefício líquido de emissões e evitar competição entre setores pela mesma oferta de energia renovável. Essa formulação foi reproduzida nos programas reconhecidos pela Comissão Europeia e inspirou programas voluntários como o TÜV SÜD CMS 70 e o TÜV Rheinland H2.21, que oferecem versões de selo vinculadas à adicionalidade (TÜV SÜD, 2024; TÜV RHEINLAND, 2023).

O CHCS da Coreia do Sul aproxima-se da lógica dos mecanismos de carbono ao vincular a adicionalidade à redução líquida de emissões do projeto em relação a uma linha-de-base contrafactual (KTC; KTR, 2025). No RTFO britânico, a orientação exige que a eletricidade renovável utilizada na produção de RFNBO seja “*additional renewable energy*”, ou seja, nova ou especificamente destinada à produção de combustível renovável (UK DFT, 2024), configurando, portanto, um requisito explícito de adicionalidade. Por outro lado, o LCHS,

³ O termo “apoio público” (*public support*) abrange qualquer forma de incentivo financeiro ou contratual concedido pelo Estado-Membro, incluindo tarifas feed-in (FiT), prêmios feed-in (FiP), contratos por diferença (CfD), leilões de energia com preço garantido, subsídios de investimento, mecanismos de crédito fiscal ou outras formas de assistência operacional que afetem a viabilidade econômica da planta geradora. Essa formulação é específica da União Europeia e não possui equivalentes mandatários em outras jurisdições analisadas, como Reino Unido, Coreia, Japão ou China (EUROPEAN UNION, 2023a).

também britânico, não incorpora uma exigência de adicionalidade para atender o padrão de hidrogênio de baixo carbono, conforme o governo do Reino Unido confirmou no documento de resposta à consulta pública (DESNZ, 2023a). Neste caso, o critério é substituído por um limite absoluto de intensidade de carbono (20 gCO₂e/MJ). O programa GH2 Standard emprega a adicionalidade como componente de elegibilidade e de integridade climática nos mercados voluntários (GH2, 2023). Em contraste, o HSPA japonês, o CertifHy NGC e o T/CAB 0078-2020 chinês não tratam explicitamente do tema.

2.3.2 Correlação geográfica e temporal

A correlação geográfica estabelece o vínculo espacial entre a geração de eletricidade renovável e a produção de hidrogênio, assegurando que a energia consumida pelo eletrolisador seja proveniente de um contexto elétrico verificável e compatível com a alegação de origem renovável. Esse critério conecta rastreabilidade energética, coerência territorial e integridade documental.

Na União Europeia, a RED III adota a formulação mais rigorosa, determinando que a eletricidade utilizada na produção de hidrogênio seja gerada na mesma *bidding zone*⁴ do eletrolisador (EUROPEAN UNION, 2023a). Esse princípio foi replicado em programas reconhecidos pela Comissão Europeia (ISCC SYSTEM GMBH, 2025a; REDCERT GMBH, 2024a; CERTIFHY, 2024) e também incorporado, de forma opcional, em selos voluntários como o TÜV SÜD CMS 70 e o TÜV Rheinland H2.21, em suas etiquetas alinhadas ao padrão UE (TÜV SÜD, 2024; TÜV RHEINLAND, 2023).

Programas voluntários como o GH2 Standard simplificam a exigência ao requerer apenas que geração e consumo ocorram dentro do mesmo “mercado elétrico”, sem referência a zonas de preço (GH2, 2023). Já o CHCS da Coreia do Sul adota uma abordagem física, exigindo que a eletricidade seja proveniente da mesma rede da planta de hidrogênio (KTC; KTR, 2025), enquanto o HSPA do Japão, o LCHS do Reino Unido, o CertifHy NGC e a Norma T/CAB

⁴ *Bidding zone* é a área geográfica dentro da qual os participantes do mercado de eletricidade podem negociar energia sem restrições internas de rede, compartilhando um mesmo preço marginal de mercado. No contexto da RED III e dos Delegated Acts sobre RFNBOs, a *bidding zone* é usada como unidade de referência para avaliar a correlação geográfica entre a geração renovável e o consumo de eletricidade do eletrolisador. Assim, a energia é considerada “correlacionada geograficamente” quando o eletrolisador e a unidade de geração renovável estão situados na mesma *bidding zone* ou em zonas adjacentes interconectadas sem congestão estrutural significativa (EUROPEAN COMMISSION, 2023a).

0078-2020 da China não impõem correlação geográfica (JAPAN, 2024; DESNZ, 2023b; CERTIFHY, 2022a; GROUP STANDARDS, 2020).

A correlação temporal define a janela mínima entre geração e consumo da eletricidade renovável, de modo a assegurar que a energia associada ao hidrogênio certificado corresponda a uma disponibilidade real no tempo. Na RED III, o requisito é mensal até 2029 e passa a ser horário (*hourly matching*) a partir de 2030 (EUROPEAN UNION, 2023a). O mesmo padrão é seguido pelos programas reconhecidos pela Comissão Europeia e pelos selos TÜV Rheinland H2.21 e TÜV SÜD CMS 70, também nas etiquetas alinhadas ao padrão UE (ISCC SYSTEM GMBH, 2025a; REDCERT GMBH, 2024a; CERTIFHY, 2024; TÜV SÜD, 2024; TÜV RHEINLAND, 2023).

Outros programas adotam regras menos granulares. O CHCS coreano e o LCHS britânico operam com correlação mensal (KTC; KTR, 2025; DESNZ, 2023b), enquanto o RTFO permite janelas que variam entre 30 minutos e 12 meses contínuos, conforme justificativa técnica (UK DFT, 2024). O GH2 Standard exige correlação, mas sem especificar periodicidade (GH2, 2023), e programas como o CertifHy NGC e a T/CAB 0078-2020 não fazem qualquer prescrição temporal (CERTIFHY, 2022a; GROUP STANDARDS, 2020).

2.3.3 Formas de uso da eletricidade renovável

A comprovação do uso da eletricidade renovável na produção de hidrogênio ocorre, em geral, por três vias: linha direta dedicada, contratos de compra de energia (*Power Purchase Agreements* - PPAs) respaldados por certificados de atributos, e uso de eletricidade da rede. Embora essas modalidades sejam reconhecidas por praticamente todos os programas de certificação, cada um adota parâmetros técnicos próprios para definir a rastreabilidade e a integridade da eletricidade utilizada.

A linha direta é aceita em todos os programas de certificação como a forma mais simples e robusta de rastreabilidade física. Ao estabelecer uma conexão exclusiva entre a unidade geradora e o eletrolisador, elimina incertezas sobre a origem da eletricidade e reduz a necessidade de comprovações documentais complexas, tornando auditorias mais objetivas. Nos programas europeus alinhados à RED III, contudo, essa simplicidade é condicionada: a partir de 2028, mesmo instalações em linha direta deverão comprovar adicionalidade, demonstrando

que a energia é proveniente de nova capacidade renovável construída após o início da operação do eletrolisador (EUROPEAN COMMISSION, 2023a). Em outros programas como o LCHS do Reino Unido, o CHCS da Coreia e o HSPA do Japão, a linha direta mantém caráter de comprovação automática, sem exigência adicional formal de adicionalidade, atuando como evidência suficiente de integridade física da eletricidade (DESNZ 2023b; KTC; KTR, 2025; JAPAN, 2024). De modo geral, a modalidade oferece a maior aceitabilidade regulatória entre os programas analisados, ainda que imponha menor flexibilidade operacional e custos mais elevados de integração física.

Os PPAs e Certificados de Atributos de Energia (*Energy Attribute Certificates* – EACs) constituem uma das principais formas de comprovação do uso de eletricidade renovável nos programas de certificação, equilibrando rastreabilidade ambiental e flexibilidade comercial. Nessa modalidade, o hidrogênio é reconhecido como renovável mediante contratos firmados com geradores de energia renovável, respaldados por certificados de atributos - como *Guarantees of Origin* (GoOs), *Renewable Energy Guarantees of Origin* (REGOs) ou *International Renewable Energy Certificates* (I-RECs) - que devem ser cancelados ou aposentados após o uso para evitar dupla contagem. Essa exigência é formalizada nos programas britânicos LCHS e RTFO (DESNZ, 2023b; UK DFT, 2024), bem como nos programas europeus reconhecidos pela RED III, como o ISCC EU, REDcert EU 07 e CertifHy RFNBO (EUROPEAN UNION, 2023a; ISCC SYSTEM GMBH, 2025a; REDCERT GMBH, 2024a; CERTIFHY, 2024). No GH2 Standard, a prática de aposentadoria não é expressa de forma literal, mas é substituída por exigências de rastreabilidade e exclusividade contratual equivalentes (GH2, 2023). Já programas como o HSPA do Japão, o CHCS da Coreia e a Norma T/CAB 0078-2020 da China aceitam PPAs/EACs como comprovação documental da origem renovável, sem requerer aposentadoria formal, utilizando certificados domésticos - *Non-Fossil Certificates*, *Green Energy Certificates* - ou auditorias contratuais como evidência suficiente (JAPAN, 2024; KTC; KTR, 2025; GROUP STANDARDS, 2020).

O uso de eletricidade proveniente da rede representa o ponto de maior divergência técnica entre os programas de certificação, pois envolve diferentes formas de comprovar a integridade ambiental da energia consumida. É importante distinguir entre o uso de rede mediado por PPAs, em que há rastreabilidade contratual da origem renovável, e o uso direto da rede sem PPA, em que o hidrogênio é produzido com base no mix elétrico local.

Nos programas alinhados à RED III, o uso direto da rede com base no mix elétrico local é aceito apenas em zonas com intensidade de carbono inferior a 18 gCO₂e/MJ ou participação renovável superior a 90%; fora dessas condições, exige-se adicionalidade, correlação temporal e comprovação de redespacho evitado, garantindo que o uso da rede não resulte em emissões indiretas adicionais (EUROPEAN COMMISSION, 2023a). O LCHS britânico permite o uso da rede sem PPA mediante aplicação de fatores médios oficiais publicados em seu *Data Annex* (DESNZ, 2023b), enquanto o RTFO aceita fatores regionais ajustados, desde que tecnicamente justificados e auditáveis (UK DFT, 2024). O CHCS da Coreia adota um modelo de integração física, aceitando a eletricidade de rede desde que pertencente ao mesmo sistema elétrico da planta e calculada a partir de fatores médios nacionais (KTC; KTR, 2025).

Já o HSPA japonês e a Norma T/CAB 0078-2020 chinesa aceitam o uso da rede somente mediante contratação documental da eletricidade renovável, por meio dos certificados domésticos mencionados anteriormente e que funcionam, na prática, como PPAs regulados, embora sem exigência de adicionalidade ou correlação temporal (JAPAN, 2024; GROUP STANDARDS, 2020).

A tabela 3 sistematiza os critérios de demonstração do uso da energia renovável nos programas mandatórios e voluntários observados:

Tabela 3 – Critérios para demonstrar o uso de eletricidade renovável em programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono

Escopo	Programa	Linha direta	PPA / Contrato com EACs	Uso de rede
Mandatório	Renewable Energy Directive III (UE)	Admitida; se conectada à rede, precisa cumprir adicionalidade (a partir de 2028 para novas plantas, com exceções) e correlações.	Admitido com GoOs (ou equivalentes) + adicionalidade, mesma <i>bidding zone</i> (ou equivalente local) e correlação temporal (mensal até 2029; horária a partir de 2030).	Admitido quando a rede é >90% renovável ou com intensidade <18 gCO ₂ e/MJ; exceção de redispach evitado. Se não, aplicam-se adicionalidade + correlações.
Mandatório	Low Carbon Hydrogen Standard (Reino Unido)	Admitida; contagem no local; segue as fórmulas LCHS e fatores do Data Annex.	Admitido com PPAs respaldados por REGOs/GoOs/I-RECs + correlação mensal; cálculo via HEC e fatores oficiais.	Admitido com comprovação contratual; quando não há rastreabilidade completa, usa-se fator médio oficial de rede (LHV).
Mandatório	Renewable Transport Fuel Obligation (Reino Unido)	Admitida; segue a metodologia RTFO de cálculo.	Admitido; correlação pode ser de 30 min ou média ponderada em janela de até 12 meses (se aplicada igualmente à intensidade da eletricidade).	Opcionalmente, o produtor pode usar dados regionais de rede (substituindo a média nacional) se provar separação física/congestionamento.

Mandatário	Hydrogen Society Promotion Act (Japão)	Admitida; regra focada em comprovar a origem (inclui Non-Fossil Certificates domésticos como fallback).	Admitido com PPAs e Non-Fossil Certificates/GoOs equivalentes aceitos; sem granularidade fixa de correlação.	Admitido; foco na documentação de origem; sem regra específica de correlação geográfica/temporal.
Mandatário	Clean Hydrogen Certification Scheme (Coreia)	Admitida na mesma rede física da planta; requisito de mesmo mês para correspondência temporal.	Admitido se a eletricidade for da mesma rede e com correlação mensal; não há adicionalidade no sentido da UE.	Permitido na mesma rede física com evidências operacionais; cálculo conforme regras do programa.
Voluntário (reconhecidos pela RED III)	ISCC EU, REDcert EU 07, CertifHy RFNBO	Replicam a RED: linha direta admitida; adicionalidade/correlações quando aplicável.	Replicam a RED: GoOs + adicionalidade, mesma bidding zone (ou equivalente) e correlação (mensal → horária).	Replicam a RED: >90% REN ou <18 gCO ₂ e/MJ simplificam; demais casos exigem adicionalidade + correlações.
Voluntário	Green Hydrogen Standard (GH2)	Admitida; foco em energia 100% renovável dedicada ou contratada.	PPAs/EACs aceitos; eletricidade de rede pode ser contabilizada como 100% REN proporcional a PPAs + GoOs/REGOs/I-RECs.	Admitido via PPAs + EACs críveis; sem granularidade fixa de correlação pública.
Voluntário	CertifHy NGC	n/a (não exige fluxo físico)	Atributos transacionados via certificados.	n/a
Voluntário	TÜV SÜD CMS 70	Admitida; GreenHydrogen+ aplica adicionalidade + correlações RED; GreenHydrogen admite book-and-claim.	PPAs/EACs aceitos; no modo RED-aligned seguem as regras da RED; caso contrário, aceitam entregas baseadas em certificados.	Idem coluna PPA/EACs; sem regra própria de bidding zone fora do modo RED.
Voluntário	TÜV Rheinland H2.21	Admitida; energia renovável dedicada ou contratada.	PPAs/EACs aceitos; uso de rede permitido se lastreado por certificação e cancelamento de GoOs/I-RECs; mesmo período de crédito (≤12 meses) para geração e consumo.	Permitido sob as mesmas condições de certificação/cancelamento; aplica-se “mesmo mercado/região” definido na auditoria.
Voluntário	T/CAB 0078-2020 (China)	Admitida; foco em comprovação documental conforme critérios ACV.	Admitido; aceitos certificados domésticos.	Admitido com prova de origem.

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

2.3.4 Limite de emissões e fronteiras de sistema

Os limites de emissões definem o teto máximo de intensidade de carbono que um quilograma ou mega joule de hidrogênio pode apresentar para ser reconhecido como renovável ou de baixo carbono. As fronteiras de sistema, por sua vez, delimitam até onde a análise de ciclo de vida se estende, podendo começar desde a extração das matérias-primas, e se estender até o uso final. Juntas, essas duas dimensões estabelecem o contexto sobre o qual a pegada de carbono do hidrogênio é calculada e comparada.

Na União Europeia, o limite de emissões é definido de forma relativa, com base na economia de emissões em relação a um combustível fóssil de referência. A RED III exige uma redução mínima de 70% frente ao valor de 94 gCO_{2e}/MJ, o que resulta em um limite indireto de 28,2 gCO_{2e}/MJ (EUROPEAN UNION, 2023b). Esse parâmetro é replicado pelos programas ISCC EU, REDcert EU 07, CertifHy RFNBO e TÜV Rheinland H2.21. Já o RTFO britânico e o CertifHy NGC aplicam economias de 65% e 60%, respectivamente, frente ao mesmo valor de referência (UK DFT, 2024; CERTIFHY, 2022a).

Outros programas utilizam limites absolutos, sem comparação direta. O LCHS do Reino Unido fixa 20 gCO_{2e}/MJ (DESNZ, 2023b), enquanto o GH2 Standard estabelece 1 kgCO_{2e}/kg H₂, valor compatível apenas com produção totalmente renovável (GH2, 2023). O TÜV SÜD CMS 70 adota a mesma lógica, mas diferencia por uso final: 28,2 gCO_{2e}/MJ para hidrogênio destinado a aplicações industriais e de mobilidade (como produção de amônia, aço, metanol ou uso em células a combustível) e 24 gCO_{2e}/MJ para aplicações térmicas. O HSPA japonês também diferencia os produtos, adotando 3,4 kgCO_{2e}/kg H₂ para hidrogênio puro e valores mais altos para derivados sintéticos, como e-amônia e e-metanol (JAPAN, 2024).

As unidades de medida variam entre gCO_{2e}/MJ, usada frequentemente em marcos regulatórios, e kgCO_{2e}/kg H₂, presente em programas privados. A diferença é apenas operacional: ambos os valores podem ser convertidos com base no poder calorífico inferior (PCI)⁵ de 120 MJ/kg H₂, conforme a Norma ISO 19870:2023.

A fronteira de sistema define o alcance da ACV considerado na certificação do hidrogênio, determinando até onde as emissões são contabilizadas e influenciando diretamente o resultado da avaliação climática.

Nos limites curtos (berço ao portão ou *well-to-gate*), adotados por programas como HSPA (para o hidrogênio puro), CHCS, T/CAB 0078-2020, GH2 e LCHS, contabilizam-se apenas as emissões até o portão de fábrica. Essa abordagem concentra-se exclusivamente na etapa de

⁵ O PCI representa a quantidade de energia efetivamente aproveitável na combustão, desconsiderando o calor de condensação do vapor d'água formado. No caso do hidrogênio, o PCI é de 120 MJ/kg H₂, inferior ao Poder Calorífico Superior (PCS), de 142 MJ/kg H₂. Por esse motivo, os programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono adotam o PCI como base de referência para expressar a intensidade de emissões (gCO_{2e}/MJ).

produção e facilita a verificação, mas não inclui emissões associadas ao transporte ou ao uso final.

Os limites amplos (berço à roda ou *well-to-wheel*), empregados na RED III, no RTFO, no HSPA (para combustíveis sintéticos) e no TÜV SÜD CMS 70 (selo *GreenHydrogen+*, com fronteira *well-to-use*), representam a abrangência máxima da ACV, incorporando emissões associadas ao transporte, à distribuição e ao uso final. Essa formulação busca capturar o impacto completo do combustível, assegurando coerência metodológica entre as etapas de produção e aplicação.

Os programas reconhecidos pela RED III como ISCC EU, REDcert EU 07 e CertifHy RFNBO aplicam o limite do berço ao portão de entrega (*well-to-delivery-gate*). Essa abordagem inclui as etapas de transporte, armazenamento e distribuição até o ponto de entrega, onde interrompe o cálculo, uma vez que o uso final do hidrogênio puro é considerado climaticamente neutro, já que sua combustão não gera CO₂. No documento ISCC EU 205-1, por exemplo, o termo “*emissions from fuel in use (eu)*” é mantido apenas como referência metodológica e contabilizado como zero (ISCC SYSTEM GMBH, 2025a).

A Tabela 4 sintetiza essas diferenças, convertendo os valores de intensidade para gCO_{2e}/MJ normalizados com base no PCI de 120 MJ/kgH₂ para viabilizar a comparação:

Tabela 4 – Limites de emissões e fronteiras de sistema em programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono

Programa	Limite (gCO _{2e} /MJ)	Limite de sistema
GH2 - Hidrogênio	8,3	Berço-ao-portão-de-fábrica
LCHS - Hidrogênio	20,0	Berço-ao-portão-de-fábrica
TÜV SÜD CMS 70 - Hidrogênio Aquecimento	24,0	Berço-ao-uso
HSPA - Hidrogênio	28,3	Berço-ao-portão-de-fábrica
ISCC EU / REDcert EU 07 / CertifHy RFNBO - Hidrogênio	28,2	Berço-ao-portão-de-entrega
RED III - Hidrogênio	28,2	Berço-à-roda
TÜV SÜD CMS 70 - Hidrogênio Indústria / Mobilidade	28,2	Berço-ao-portão-de-fábrica
RTFO - Hidrogênio	32,9	Berço-à-roda
TÜV Rheinland H2.21 - Hidrogênio	32,3	Berço-ao-X
CHCS - Hidrogênio	33,3	Berço-ao-portão-de-fábrica
CertifHy NGC - Hidrogênio	36,4	Berço-ao-portão-de-fábrica
HSPA Combustíveis sintéticos	39,9	Berço-à-roda
HSPA - Metano sintético	49,3	Berço-à-roda

HSPA - Amônia	46,8	Berço-ao-portão-de-fábrica
T/CAB 0078-2020 (China) Hidrogênio “limpo/renovável”	40,8	Berço-ao-portão-de-fábrica
T/CAB 0078-2020 - Hidrogênio “baixo carbono”	120,9	Berço-ao-portão-de-fábrica

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

A tabela mostra como a interação entre limite e fronteira molda o nível de ambição climática. Nos extremos mais rigorosos situam-se o GH2 Standard (≈ 8 gCO_{2e}/MJ, berço-ao-portão) e o LCHS britânico (20 gCO_{2e}/MJ), que conciliam integridade ambiental e completude metodológica. Em posição intermediária, ISCC EU, REDcert EU, CertifHy RFNBO e TÜV SÜD CMS 70 convergem em torno de 28 gCO_{2e}/MJ, com fronteiras berço-ao-portão-de-entrega (*well-to-delivery-gate*).

Já RTFO (≈ 33 gCO_{2e}/MJ) e CertifHy NGC (≈ 36 gCO_{2e}/MJ) aplicam limites mais permissivos em fronteiras curtas, enquanto o CHCS coreano e o T/CAB 0078-2020 chinês adotam faixas graduais (de 0,1 a 4 kgCO_{2e}/kg H₂ e 41–121 gCO_{2e}/MJ, respectivamente) para acomodar diferentes níveis de maturidade tecnológica. O HSPA japonês mantém o limite europeu para hidrogênio puro, mas expande o escopo e os valores para derivados sintéticos, refletindo uma abordagem orientada ao produto final, e não apenas à rota de produção.

Essa diversidade confirma que a comparabilidade entre programas depende de forma substancial do recorte metodológico utilizado para classificar o hidrogênio como compatível com objetivos de sustentabilidade.

2.3.5 Modelos de rastreabilidade

O modelo de rastreabilidade, ou cadeia de custódia, define o mecanismo pelo qual se estabelece a correspondência entre insumos sustentáveis e produtos certificados. Esse critério assegura a integridade do processo de certificação ao determinar como os atributos ambientais são associados ao hidrogênio ao longo da cadeia de valor. Entre os principais modelos empregados nas certificações de hidrogênio existentes estão o balanço de massa (*mass balance*) e o *book-and-claim*.

O balanço de massa consolidou-se como o modelo dominante em programas mandatórios e em programas voluntários que buscam alinhamento regulatório com a União Europeia e o Reino Unido. Nesse sistema, mesmo que o hidrogênio certificado se misture fisicamente a outras

correntes energéticas, a metodologia assegura equivalência entre a quantidade de insumos elegíveis utilizada e o volume final certificado. Assim, o atributo ambiental se aplica ao fluxo físico agregado, garantindo que o total certificado não ultrapasse a produção comprovadamente renovável ou de baixo carbono. A conformidade é assegurada por auditoria independente. É um método amplamente adotado por programas como o ISCC EU, REDcert EU, CertifHy RFNBO e o LCHS britânico (EUROPEAN COMMISSION, 2023; ISCC SYSTEM, 2025a; REDCERT GMBH, 2024a; CERTIFHY, 2024; DESNZ, 2023a; DESNZ, 2023b).

O modelo *book-and-claim*, em contraste, dissocia totalmente os atributos ambientais do fluxo físico. Nesse caso, o hidrogênio pode ser produzido em um local e consumido em outro sem conexão física entre origem e uso. O atributo é transferido por meio de certificados digitais, que funcionam como créditos de sustentabilidade, permitindo ao consumidor reivindicar o benefício ambiental correspondente. O CertifHy NGC (CERTIFHY, 2022a) exemplifica esse modelo, adotado também por programas como o TÜV SÜD CMS 70, que diferencia os selos *GreenHydrogen (book-and-claim)* e *GreenHydrogen+* (balanço de massa). O TÜV Rheinland H2.21 admite ambos os sistemas na etiqueta *Green Hydrogen*, mas exige o balanço de massa para a emissão do rótulo *Renewable Hydrogen*, de forma a garantir alinhamento com padrões europeus neste último (TÜV RHEINLAND, 2023).

Há ainda programas que não especificam formalmente um modelo de rastreabilidade, como o HSPA do Japão (JAPAN, 2024), a Norma T/CAB 0078-2020 da China (GROUP STANDARDS, 2020), o GH2 Standard (GH2, 2023) e o CHCS da Coreia (KTC; KTR, 2025).

2.3.6 Cálculo da pegada de carbono do produto e ferramentas ACV

O cálculo da pegada de carbono do produto (*Product Carbon Footprint* - PCF) é a etapa em que os critérios técnicos dos programas de certificação - como limites de sistema, rastreabilidade, adicionalidade e correlação temporal e geográfica - convergem para a quantificação das emissões de GEE associadas à produção de hidrogênio. A PCF não constitui um método isolado, mas um conjunto estruturado de decisões metodológicas que traduzem, em valores numéricos, as opções normativas e operacionais de cada programa de certificação.

Na União Europeia, a abordagem busca maximizar comparabilidade e harmonização entre operadores. Programas reconhecidos pela UE seguem o Regulamento Delegado 2023/1185,

que hierarquiza fontes de dados e define fatores de emissão em anexos padronizados. As bases preferenciais incluem o JRC Well-to-Wheels e o Ecoinvent, complementadas por dados oficiais nacionais (EUROPEAN COMMISSION, 2023b). A modelagem das emissões é de responsabilidade dos produtores, sujeita à verificação por auditorias independentes.

No Reino Unido, o grau de padronização varia conforme o instrumento. O RTFO utiliza guias técnicos do DfT sem ferramenta oficial de cálculo (UK DFT, 2024). Já o LCHS incorpora a planilha estruturada *Hydrogen Emissions Calculator* (HEC) para padronizar o cálculo, e o *Data Annex* com fórmulas e fatores de emissão predefinidos (DESNZ, 2023a; 2023b).

Diferentemente, o HSPA do Japão baseia-se em diretrizes ministeriais que permitem o uso de dados secundários devidamente justificados, sem anexos normativos nem calculadora oficial (JAPAN, 2024). O CHCS da Coreia do Sul referencia Normas da *International Organization for Standardization* (ISO) (ISO 14040, 14044, 14067, ISO/TS 19870) e o GHG Protocol, permitindo metodologias próprias mediante aprovação do KEEI (KTC; KTR, 2025). A Norma chinesa T/CAB 0078-2020 adota os equivalentes nacionais GB/T 24040 e GB/T 24044, sem anexos de dados nem fatorizações oficiais (GROUP STANDARDS, 2020).

Entre os programas voluntários, a referência às normas ISO é predominante, mas adaptada. O GH2 Standard aplica a ISO/TS 19870:2023, ampliando o escopo para incluir emissões fugitivas e associadas à geração renovável (GH2, 2023). O CertifHy NGC combina elementos da RED II com referências ISO adicionais, oferecendo maior margem metodológica (CERTIFHY, 2022a). Já os programas alemães TÜV SÜD CMS 70 e TÜV Rheinland H2.21 aceitam múltiplas metodologias (ISO, GHG Protocol, RED II), sem ferramentas oficiais, deixando a consistência sob responsabilidade de auditorias independentes (TÜV SÜD, 2024; TÜV RHEINLAND, 2023).

2.4 Configurações Operacionais

O funcionamento dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono se baseia em configurações operacionais que articulam consistência técnica e legitimidade institucional. Essas configurações incluem a definição das 1) autoridades acreditadoras, 2) organismos de auditoria e 3) autoridades emissoras, bem como a aplicação de normas de referência para cada, e 4) o uso de sistemas digitais voltados à rastreabilidade e ao controle das transações. Em

conjunto, esses elementos asseguram transparência, confiabilidade e coerência ao processo de certificação, ao mesmo tempo em que viabilizam a coordenação entre agentes públicos e privados na validação do hidrogênio como vetor energético de baixo carbono.

2.4.1 Autoridade acreditadora e normas de referência

A autoridade acreditadora é o elemento institucional que reconhece e supervisiona os organismos de certificação independentes, garantindo sua competência técnica, imparcialidade e conformidade com padrões reconhecidos internacionalmente. No contexto da certificação do hidrogênio de baixo carbono, essa função pode ser exercida por organismos nacionais de acreditação, por órgãos administrativos do Estado, por conselhos multissetoriais ou por entidades privadas que internalizam o processo dentro do próprio sistema de certificação. A legitimidade dessas autoridades decorre da aderência a normas técnicas e regulatórias que asseguram a credibilidade das certificações emitidas.

Na União Europeia, a base regulatória é o Regulamento (CE) n.º 765/2008, que define as funções dos organismos nacionais de acreditação (ONAs) designados pelos Estados-membros e reconhecidos pelo Fórum Internacional de Acreditação (IAF) e pela *European Cooperation for Accreditation* (EA). Esses organismos atuam de forma transversal em diferentes setores e garantem que os organismos de certificação operem em conformidade com normas internacionais, tais como ISO/IEC 17011, que regula a atuação de organismos de acreditação, ISO/IEC 17065, voltada à certificação de produtos, processos e serviços, e ISO 14065 e ISO 14064-3, que estabelecem critérios para validação e verificação de informações ambientais e emissões de gases de efeito estufa (EUROPEAN COMMISSION, 2008; 2023; ISO, 2013; 2018; 2020). Programas reconhecidos pela Comissão Europeia, tais como ISCC EU e REDcert EU, seguem esse modelo, garantindo compatibilidade com as diretrizes da RED III (ISCC SYSTEM GMBH, 2025b; REDCERT GMBH, 2024a).

Em programas administrados por autoridades públicas, a função acreditadora é exercida diretamente por órgãos governamentais, sem a intermediação de um organismo técnico independente. No Japão, o HSPA delega essa função aos ministérios METI e MLIT, que supervisionam todo o processo regulatório (JAPAN, 2020). De forma semelhante, na Coreia, o CHCS é operado pela KEEI sob supervisão estatal, conforme as regras operacionais e metodologias de cálculo de emissões baseadas nas Normas ISO 14040, ISO 14044, ISO 14067

e ISO/TS 19870 (KTC; KTR, 2025). No Reino Unido, a estrutura é igualmente centralizada: o DfT é responsável pela acreditação no RTFO, e a *Low Carbon Contracts Company* (LCCC), empresa privada de propriedade estatal, foi designada como autoridade operacional para o LCHS (UK DFT, 2025; DESNZ, 2023a; 2023b).

Em modelos de governança multissetorial, a autoridade acreditadora é constituída por conselhos ou instâncias colegiadas. O GH2 Standard instituiu o *GH2 Accreditation and Certification Body*, que opera com base em normas de asseguração, tais como ISAE 3000, ISQM 1 e ISQM 2, associadas à ISO 14065, para garantir rastreabilidade e independência técnica (GH2, 2024). O CertifHy segue lógica próxima, delegando essa função à sua Stakeholder Platform, responsável por reconhecer organismos de certificação de acordo com Normas ISO/IEC 17065 e ISO 14065, acrescidas de requisitos próprios de rastreabilidade e sustentabilidade (CERTIFHY, 2023).

Há também modelos em que a função acreditadora é internalizada. Esse é o caso do TÜV SÜD CMS 70 e do TÜV Rheinland H2.21, que conduzem acreditação e certificação sob o mesmo sistema de gestão, apoiando-se nas Normas EN ISO 14065:2020, EN ISO/IEC 17029:2019, ISO 19011 e ISO 17067, além de critérios técnicos específicos de hidrogênio (TÜV SÜD, 2025; TÜV RHEINLAND, 2025). Esses sistemas garantem consistência metodológica e agilidade, ainda que apresentem menor independência entre as funções de acreditação e verificação.

Por fim, há modelos ancorados em normas nacionais equivalentes às internacionais, como o T/CAB 0078-2020 da China, que adota os padrões GB/T 24040 e GB/T 24044, equivalentes às Normas ISO 14040 e ISO 14044, e consolida a função acreditadora em uma plataforma pública sob a autoridade da *National Energy Administration* (NEA) (GROUP STANDARDS, 2020). Esses modelos preservam a compatibilidade metodológica, mas operam sob marcos institucionais próprios, vinculados à regulação doméstica.

De modo geral, as normas de referência aplicadas às autoridades acreditadoras cumprem três funções complementares: (i) definir a estrutura institucional e procedimental da acreditação, por meio de normas ISO/IEC da série 17000; (ii) estabelecer a base metodológica de verificação ambiental e de ciclo de vida, conforme as séries ISO 14000 e ISO/TS 19870; e (iii) incorporar padrões de asseguração e governança da qualidade, como a ISAE 3000 e as ISQM 1 e 2, que

aproximam a certificação do hidrogênio de baixo carbono das práticas internacionais de auditoria e de reporte de sustentabilidade.

2.4.2 Organismos de auditoria e normas de referência

A etapa de auditoria operacionaliza as normas e critérios definidos pelas autoridades acreditadoras, convertendo-os em verificações técnicas nas plantas e cadeias de valor do hidrogênio. Os organismos encarregados dessa função, conhecidos como *Certification Bodies* (CBs) ou *Verification and Validation Bodies* (VVBs), têm a responsabilidade de avaliar a conformidade dos operadores com os requisitos de sustentabilidade, rastreabilidade e contabilização de emissões. A forma como são designados e supervisionados determina o nível de independência técnica e de reconhecimento internacional do programa.

Duas configurações predominam. A primeira é a delegação a organismos independentes, acreditados e supervisionados por uma autoridade competente ou pela entidade gestora do programa. Essa configuração, amplamente difundida em programas vinculados à RED III, também é adotada por programas voluntários de alcance global, como o GH2 Standard (ISCC SYSTEM GMBH, 2024; REDCERT GMBH, 2024a; CERTIFHY, 2023; GH2, 2024). A segunda é a auditoria internalizada, em que a verificação é conduzida por órgãos públicos ou pela própria certificadora, modelo aplicado tanto em programas nacionais, como o HSPA (Japão), o CHCS (Coreia) e o T/CAB 0078-2020 (China), quanto emificadoras privadas, como TÜV SÜD CMS 70 e TÜV Rheinland H2.21 (JAPAN, 2020; KTC; KTR, 2025; GROUP STANDARDS, 2020; TÜV SÜD, 2025; TÜV RHEINLAND, 2025).

As normas que regem a atuação desses organismos se integram às mesmas bases normativas das autoridades acreditadoras, compondo um único sistema de avaliação da conformidade. Enquanto normas como ISO/IEC 17011 e 17029 disciplinam o funcionamento das autoridades que outorgam reconhecimento formal, a ISO/IEC 17065, a ISO 14065 e a ISO 19011 orientam a execução prática das auditorias. Em conjunto, esses referenciais asseguram a coerência técnica entre quem concede o direito de auditar e quem executa a verificação.

Na União Europeia, os Regulamentos Delegados (UE) 2023/1184 e 2023/1185 complementam esse arcabouço, ao definir parâmetros específicos para a verificação de combustíveis renováveis e RFNBOs, incluindo metodologias de ciclo de vida, cálculo de emissões e rastreabilidade de

cadeia de custódia (EUROPEAN COMMISSION, 2023). Esses regulamentos reforçam a aplicação articulada das normas ISO/IEC 17065, ISO 14065, ISO 14064-3 e ISO 19011, que garantem imparcialidade, rastreabilidade e consistência entre auditorias. As séries ISO 14040, ISO 14044, ISO 14067 e ISO/TS 19870 complementam o conjunto, fornecendo a base metodológica para análise de ciclo de vida e quantificação de pegada de carbono.

Alguns programas ampliam esse repertório ao integrar normas de asseguração e controle de qualidade, como a ISAE 3000 e as ISQM 1 e 2, que já haviam sido aplicadas na acreditação e são estendidas à verificação para garantir uniformidade entre as etapas de credenciamento e auditoria (GH2, 2024). Outros, como CertifHy e TÜV SÜD CMS 70, incorporam requisitos internos adicionais, prevendo treinamento de auditores e auditorias supervisionadas (CERTIFHY, 2023; TÜV SÜD, 2025). Já a T/CAB 0078-2020 aplica as normas nacionais GB/T 24040 e GB/T 24044, que refletem metodologias ISO de ciclo de vida sob regulação doméstica (GROUP STANDARDS, 2020).

2.4.3 Autoridade emissora e normas de referência

A autoridade emissora é a instância responsável por validar e emitir os certificados que comprovam a conformidade do hidrogênio com os critérios de sustentabilidade, rastreabilidade e emissões estabelecidos pelos programas de certificação. Sua configuração institucional varia de acordo com o grau de integração com autoridades públicas ou organismos técnicos, refletindo diferentes modelos de governança.

Nos programas estatais, a emissão é realizada por órgãos públicos vinculados à política energética, como os ministérios METI e MLIT no Japão (JAPAN, 2020), o DfT e a LCCC no Reino Unido (UK DFT, 2025; DESNZ, 2023a; 2023b), o KEEI na Coreia e a plataforma pública da NEA na China (KTC; KTR, 2025; GROUP STANDARDS, 2020).

Na União Europeia, a Comissão Europeia não emite certificados diretamente, mas reconhece programas voluntários que desempenham essa função em conformidade com os atos delegados da RED III, como ISCC, REDcert e CertifHy (EUROPEAN COMMISSION, 2023).

Em programas privados, a emissão é conduzida pela própria entidade gestora ou por organismos de certificação autorizados. Alguns programas, como o GH2 Standard, atribuem essa

responsabilidade a conselhos técnicos independentes, enquanto certificadoras proprietárias, como TÜV SÜD CMS 70 e TÜV Rheinland H2.21, internalizam a função dentro de seus sistemas de gestão da qualidade (GH2, 2024; TÜV SÜD, 2025; TÜV RHEINLAND, 2025).

As normas que regem a emissão articulam três camadas complementares. A primeira é regulatória, formada por instrumentos legais e administrativos que conferem autoridade institucional e validade jurídica, como a RED III e seus atos delegados (EUROPEAN COMMISSION, 2023), o RTFO Order (UK DFT, 2025) e o HSPA (JAPAN, 2020). A segunda é de asseguração, composta por normas já aplicadas nos níveis de acreditação e auditoria, entre elas a ISO/IEC 17065, ISO 14065, ISO 14064-3, ISO 19011 e ISAE 3000, que garantem imparcialidade, rastreabilidade e consistência técnica no processo de emissão. A terceira é técnica, voltada à quantificação de emissões e à análise de ciclo de vida, com destaque para as Normas ISO 14040, ISO 14044, ISO 14067 e ISO/TS 19870, que asseguram comparabilidade metodológica entre programas e jurisdições.

Alguns programas adotam equivalentes nacionais, como os padrões chineses GB/T 24040 e GB/T 24044 (GROUP STANDARDS, 2020), enquanto outros, como o GH2 Standard, combinam normas ISO com regras internas de governança e transparência (GH2, 2024).

Em conjunto, essas normas formam o elo final da arquitetura de conformidade: conectam a credibilidade institucional da acreditação e a robustez técnica da auditoria à validade jurídica e comercial dos certificados emitidos, garantindo que o hidrogênio certificado possa ser reconhecido em diferentes mercados e sistemas regulatórios.

2.4.4 Sistemas de TI e transparência

Os sistemas de tecnologia da informação (TI) constituem a infraestrutura digital que sustenta a rastreabilidade, a integridade e o controle operacional dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono. Essas plataformas registram fluxos de produção, armazenamento, transporte e comercialização, permitindo o acompanhamento de cadeias de custódia e a emissão, transferência e cancelamento de certificados.

Na União Europeia, a *Union Database* (UDB) é a infraestrutura oficial para combustíveis renováveis e RFNBOs, de uso obrigatório para todos os programas reconhecidos sob a RED III

(EUROPEAN COMMISSION, 2024). O CertifHy EU RFNBO opera integrado à UDB, enquanto o CertifHy NGC mantém registro próprio em modelo *book-and-claim*, com autenticação pública (CERTIFHY, 2023). Outros programas, como ISCC EU e REDcert EU, garantem interoperabilidade por meio de provedores de API (respectivamente TYC Connect e Explicatis) conectados à base europeia (ISCC, 2024; REDCERT GMBH, 2024a). No Reino Unido, o *Renewable Fuels Operating System* (ROS) é utilizado para o registro e emissão de créditos sob o RTFO, e o LCHS desenvolve seu sistema digital próprio sob responsabilidade da LCCC (UK DFT, 2025; DESNZ, 2023a; 2023b).

Entre os programas internacionais e privados, a maturidade digital é diversa. O GH2 Standard encontra-se plenamente operacional, enquanto o *GH2 Registry*, sua plataforma global de rastreabilidade desenvolvida em parceria com a Trovio, está em fase de implementação com lançamento previsto para 2025 (GH2, 2024). As certificadoras TÜV SÜD e TÜV Rheinland mantêm diretórios públicos (*Certipedia*) que permitem verificar certificados emitidos, mas não funcionam como registros transacionais (TÜV SÜD, 2025; TÜV RHEINLAND, 2025).

O CHCS da Coreia encontra-se em fase de implantação, com o desenvolvimento do *Certification Information System* e a realização das primeiras certificações piloto (KTC; KTR, 2025). A China, por sua vez, já opera uma plataforma pública sob a NEA, responsável por registrar e cancelar lotes certificados (GROUP STANDARDS, 2020).

A Tabela 5 fornece uma síntese dos sistemas de TI utilizados para registros nos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono analisados.

Tabela 5: Sistemas de TI para registro nos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono

Programa	Sistema de TI	Status	Acesso	Observações
RED II/III – RFNBOs (UE)	Union Database (UDB)	Operacional	Via programas voluntários reconhecidos	Base oficial UE; rastreabilidade mínima obrigatória
ISCC EU	ISCC HUB + integração UDB via TYC Connect	Operacional, integrado	Usuários registrados (operadores, CBs, auditores)	Upload CSV, APIs, balanço de massa, auditoria integrada
REDcert EU	Base REDcert + integração UDB (Explicatis)	Operacional, integração mandatória	Usuários registrados (operadores, CBs, auditores)	Integração obrigatória com UDB; dados auditáveis

CertifHy EU RFNBO	Uso obrigatório da UDB	Reconhecido, sincronizado com UDB	Usuários registrados (via programa voluntário)	Certificados RFNBO só reconhecidos se registrados na UDB
CertifHy NGC	CertifHy Registry (book-and-claim)	Operacional desde 2018	Usuários registrados; listagens públicas	Primeiro registro book-and-claim de H ₂ ; avaliado pelo AIB
RTFO (Reino Unido)	ROS – Renewable Fuels Operating System	Operacional	Participantes RTFO (DFT)	Submissão de volumes, RTFCs, validação com HMRC
UK LCHS	Registro digital em desenvolvimento (LCCC)	Planejado p/ 2025	Participantes designados (LCCC)	Detalhes ainda não públicos; lançamento previsto 2025
GH2 Standard	GH2 Registry (parceria Trovio, go-live 2025)	Em fase de implementação	Usuários registrados, acesso previsto global	Registro digital com Trovio; emissão/transferência/cancelamento
TÜV SÜD CMS 70	Certipedia / Test Mark Directory	Operacional (consulta pública)	Consulta pública a certificados	Foco em transparência pública; sem rastreamento de cadeia
TÜV Rheinland H2.21	Certipedia / Test Mark Directory	Operacional (consulta pública)	Consulta pública a certificados	Sem base transacional; validação via diretório
Clean H2 Certification (Coreia)	Certification Information System (implementação prevista)	Previsto normativamente	Operadores e auditores via plataforma	Regra operacional prevê sistema dedicado de certificação
T/CAB 0078-2020 (China)	Plataforma pública NEA	Operacional	Operadores e auditores via plataforma pública	Usado para emissão/cancelamento de lotes de H ₂

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Esses sistemas compartilham funcionalidades básicas, como gestão de contas e perfis de usuários (operadores, verificadores e autoridades), cadastro de instalações, trilhas de auditoria e exportação estruturada de dados (CSV, XML ou APIs). O nível de transparência pública, contudo, varia amplamente: programas como ISCC EU, REDcert EU e CertifHy RFNBO disponibilizam certificados ativos e relatórios de auditoria, enquanto o RTFO e certificadoras privadas restringem o acesso a participantes credenciados. Nos programas em desenvolvimento ou implantação digital como o LCHS, o GH2 Registry e o CHCS, as regras de transparência ainda estão em fase de definição.

3. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

Este capítulo apresenta a abordagem metodológica adotada para a comparação de programas internacionais de certificação do hidrogênio de baixo carbono, considerando o desafio que orienta esta pesquisa: a necessidade de conciliar exigências crescentes de interoperabilidade global com a adaptação dos critérios de certificação às especificidades nacionais. A

metodologia busca identificar padrões técnicos e institucionais, compreender divergências estruturantes e extrair implicações relevantes para países que se encontram em processo de formulação de seus sistemas de certificação, como o Brasil.

3.1 Estrutura metodológica

A análise foi organizada em quatro etapas principais, abrangendo a delimitação do estudo, a coleta sistemática de dados, a construção das dimensões analíticas e das matrizes de comparação, e a síntese interpretativa.

3.1.1 Delimitação do estudo e escopo

Foram incluídos programas de certificação - mandatórios ou voluntários - que estabelecem critérios técnicos para verificar a intensidade de emissões de gases de efeito estufa, a origem renovável e/ou a sustentabilidade do hidrogênio e de seus derivados. O recorte abrange programas em operação ou em fase avançada de desenvolvimento até fevereiro de 2025, assegurando a atualidade do conjunto analisado.

Foram incorporados, adicionalmente, instrumentos regulatórios que, embora não constituam programas de certificação em sentido estrito, influenciam diretamente os requisitos de conformidade, como a RED III da União Europeia. Nesses casos, programas como CertifHy RFNBO, REDcert EU 07 e ISCC EU foram analisados de forma agrupada, uma vez que seguem os mesmos critérios de elegibilidade, cálculo e rastreabilidade estabelecidos pela referida diretriz.

Foram excluídas iniciativas restritas a mecanismos de apoio financeiro ou incentivos fiscais que não preveem auditoria sistemática nem certificação do hidrogênio enquanto produto energético.

3.1.2 Coleta e sistematização de dados

A coleta de dados baseou-se em três conjuntos principais de fontes: a) documentos oficiais e relatórios técnicos elaborados por agências reguladoras e pelas entidades gestoras dos programas de certificação; b) publicações institucionais e científicas produzidas por organizações internacionais voltadas à energia e ao desenvolvimento sustentável; c) artigos

acadêmicos especializados, voltados à discussão de modelos de certificação, governança do hidrogênio e metodologias de análise do ciclo de vida.

Essas fontes forneceram subsídios tanto para a revisão bibliográfica apresentada no capítulo anterior quanto para o preenchimento dos parâmetros comparativos. A relação completa das referências empregadas encontra-se sistematizada no Anexo A.

3.1.3 Construção das dimensões analíticas e das matrizes de comparação

Com base na literatura especializada, foram definidas três dimensões analíticas que orientaram a comparação entre os programas avaliados: a) características gerais, que incluem a jurisdição do programa, sua natureza regulatória, a entidade responsável, as rotas de produção contempladas e o propósito declarado; b) critérios técnicos, que abrangem limites de emissões, fronteiras de sistema, metodologias de avaliação de ciclo de vida, adicionalidade, correlação temporal e geográfica, rastreabilidade e normas técnicas associadas; c) configurações operacionais, relacionadas aos mecanismos de acreditação e auditoria, às competências institucionais, aos procedimentos de emissão de certificados, às ferramentas digitais e ao grau de transparência das informações.

Essas dimensões foram operacionalizadas por meio de matrizes de análise que permitiram organizar e comparar, em paralelo, a estrutura conceitual, metodológica e institucional dos programas. As definições utilizadas encontram-se reunidas no Glossário.

3.1.4 Síntese interpretativa

A etapa final consistiu na sistematização dos resultados extraídos das matrizes comparativas, destacando-se as implicações práticas e estratégicas associadas às diferenças de escopo, metodologia e governança. Os achados dessa síntese estruturam o capítulo seguinte e fundamentam a discussão conclusiva do estudo.

A Tabela 6 apresenta os 13 programas e diretrizes selecionados, classificados segundo categoria, jurisdição e denominação.

Tabela 6: Programas e diretrizes de certificação do hidrogênio de baixo carbono considerados no estudo

Escopo	Jurisdição	Denominação	Observações
Mandatário	União Europeia	Renewable Energy Directive III (RED III)	Estabelece critérios de elegibilidade e metodologias para combustíveis renováveis, incluindo hidrogênio e derivados; comprovação via programas de certificação reconhecidos pela Comissão Europeia.
Mandatário	Japão	Hydrogen Society Promotion Act (HSPA)	Estabelece metodologia e limites de emissões para hidrogênio limpo no Japão.
Mandatário	Coreia do Sul	Clean Hydrogen Certification Scheme (CHCS)	Estabelece metodologia e limites de emissões para hidrogênio limpo na Coreia do Sul.
Mandatário	Reino Unido	Low Carbon Hydrogen Standard (LCHS)	Estabelece metodologia e limites de emissões para hidrogênio de baixo carbono no Reino Unido.
Mandatário	Reino Unido	Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO)	Estabelece metas obrigatórias de uso de combustíveis renováveis no transporte no Reino Unido.
Voluntário	União Europeia	ISCC EU	Alinhado integralmente à RED III; permite comprovar conformidade para acesso a mercados e incentivos na UE.
Voluntário	União Europeia	REDcert EU 07	Idem ao ISCC EU; segue critérios definidos pela RED III, mas com governança distinta.
Voluntário	União Europeia	CertifHy RFNBO	Idem ao ISCC EU; segue critérios definidos pela RED III, mas com governança distinta.
Voluntário	União Europeia/EEE/Suíça	CertifHy NGC	Primeiro sistema <i>book-and-claim</i> europeu para hidrogênio de baixo carbono e renovável (2018).
Voluntário	Internacional	GH2 Standard	Define critérios próprios de sustentabilidade; aplicável a hidrogênio e amônia verdes.
Voluntário	União Europeia	TÜV SÜD CMS 70	Certificação internacional alinhada a normas ISO, aplicável a hidrogênio renovável e de baixo carbono.
Voluntário	União Europeia	TÜV Rheinland H2.21	Certificação internacional alinhada a normas ISO, aplicável a hidrogênio renovável e de baixo carbono.
Voluntário	China	T/CAB 0078-2020	Define metodologia e limites de emissões para hidrogênio de baixo carbono, limpo e renovável na China.

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da análise comparativa dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono, estruturados segundo três dimensões: 1) características gerais, que situam o escopo e a natureza de cada mecanismo; 2) critérios técnicos, que definem os parâmetros exigidos para a certificação; e 3) configurações operacionais, que descrevem as estruturas de verificação, auditoria e emissão de certificados. Os dados são organizados em

“matrizes de análise”, permitindo visualizar de forma sistemática as especificidades de cada programa e facilitar sua comparação.

4.1 Características gerais dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono

A Tabela 7 apresenta a Matriz de Análise 1. Esta Matriz compara as características gerais geral dos principais programas de certificação do hidrogênio atualmente em vigor, permitindo observar como diferentes contextos nacionais e internacionais moldam a forma como o hidrogênio é reconhecido e legitimado como vetor energético.

Tabela 7 – Matriz de Análise 1: Características gerais dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono

Programa	Jurisdição	Entidade Responsável	Propósito	Rotas	Etiqueta	Produtos	Situação Operacional
Renewable Energy Directive III (RED III) - Mandatório	União Europeia	Comissão Europeia	Conformidade regulatória para RFNBOs	Eletrólise com eletricidade renovável	Renewable Fuel of Non Biological Origin (RFNBO)	Hidrogênio e derivados	Vigente desde 2023
Hydrogen Society Promotion Act (HSPA) - Mandatório	Japão	METI e MLIT	Reconhecimento oficial e elegibilidade a apoio público	Todas	Low-Carbon Hydrogen	Hidrogênio e derivados	Vigente desde 2024
Clean Hydrogen Certification Scheme (CHCS) - Mandatório	Coreia do Sul	KEEI	Cumprimento de metas nacionais de neutralidade de carbono	Todas	n/a	Hidrogênio puro	Vigente desde 2024
Low Carbon Hydrogen Standard (LCHS) - Mandatório	Reino Unido	DESNZ	Elegibilidade a apoio público	Todas	Low-Carbon Hydrogen	Hidrogênio puro	Vigente desde 2022
Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO) - Mandatório	Reino Unido	Department for Transport (DfT)	Reduzir intensidade de GEE no transporte	Eletrólise com eletricidade renovável	Renewable Transport Fuel Certificate (RTFC)	Hidrogênio e derivados	Vigente desde 2024
GH2 (Green Hydrogen) Standard - Voluntário	Global	Green Hydrogen Organisation (GH2)	Declaração ambiental e social	Eletrólise com eletricidade renovável	GH2 Green Hydrogen / GH2 Green Ammonia	Hidrogênio e amônia	Vigente desde 2022
ISCC EU - Voluntário	União Europeia e Global	ISCC System GmbH	Conformidade com RED II/III	Eletrólise com eletricidade renovável	Renewable Fuel of Non Biological Origin (RFNBO)	Hidrogênio e derivados	Vigente desde 2025

REDcert EU 07 - Voluntário	União Europeia e Global	REDcert GmbH	Conformidade com RED II/III	Eletrólise com eletricidade renovável	Renewable Fuel of Non Biological Origin (RFNBO)	Hidrogênio e derivados	Vigente desde 2025
CertifHy RFNBO Voluntary Scheme - Voluntário	União Europeia e Global	CertifHy Scheme Operator	Conformidade com RED II/III	Eletrólise com eletricidade renovável	Renewable Fuel of Non Biological Origin (RFNBO)	Hidrogênio e derivados	Vigente desde 2023
CertifHy NGC - Voluntário	UE, EEE e Suíça	CertifHy Stakeholder Platform	Declaração ambiental	Todas	CertifHy Green Hydrogen / CertifHy Low Carbon Hydrogen	Hidrogênio puro	Vigente desde 2018
TÜV SÜD CMS 70 - Voluntário	Global	TÜV SÜD Zertifizierungsstelle	Declaração ambiental	Todas	GreenHydrogen / GreenHydrogen+	Hidrogênio e derivados	Vigente desde 2011
TÜV Rheinland H2.21 - Voluntário	Global	TÜV Rheinland Energy GmbH	Declaração ambiental	Todas	Renewable / Low-Carbon Hydrogen	Hidrogênio e derivados	Vigente desde 2021
T/CAB 0078-2020 - Voluntário	China	China Industry-University-Research Cooperation Promotion	Norma técnica de padronização nacional	Todas	Low-Carbon / Clean / Renewable H ₂	Hidrogênio puro	Vigente desde 2020

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

A comparação mostra que, embora compartilhem o objetivo de conferir credibilidade ambiental e segurança econômica ao hidrogênio de baixo carbono, os programas de certificação analisados se estruturam segundo arquiteturas institucionais distintas, orientadas por prioridades energéticas, industriais e geopolíticas específicas. O conjunto dessas diferenças constitui um repertório valioso para formuladores de política pública, permitindo compreender como decisões regulatórias moldam a competitividade tecnológica, a inserção comercial e a governança das transições energéticas.

4.1.1 Arquiteturas de governança e soberania regulatória

As arquiteturas de governança observadas expressam escolhas fundamentais sobre autoridade regulatória e legitimidade institucional. Nos modelos mandatórios, a certificação opera como instrumento de soberania regulatória, permitindo que governos definam critérios técnicos, limites de emissões e requisitos de elegibilidade alinhados às metas climáticas e industriais

nacionais. Essa configuração oferece previsibilidade regulatória e coordenação setorial, especialmente relevante em setores intensivos em capital.

No campo voluntário, prevalece a lógica da autoridade de mercado, em que certificações constroem legitimidade por meio de rastreabilidade, verificabilidade e aceitação contratual em cadeias transfronteiriças. Nesse contexto, a certificação cumpre função de linguagem comum entre compradores, investidores e operadores logísticos. Um terceiro grupo, composto por programas privados reconhecidos formalmente por regulações específicas, revela a permeabilidade entre essas duas esferas, demonstrando que governança pública e governança de mercado tendem a operar como dimensões complementares de um mesmo ecossistema regulatório.

4.1.2 Propósito regulatório e funções econômicas da certificação

A certificação desempenha simultaneamente funções regulatórias e funções de mercado. Sua dimensão regulatória manifesta-se na capacidade de estruturar mercados de elegibilidade ao condicionar o acesso a incentivos, contratos públicos ou reconhecimento setorial ao cumprimento de critérios ambientais mensuráveis. Por meio desse mecanismo, governos traduzem metas climáticas em requisitos técnicos, produzindo uma forma de regulação indireta por meio do mercado.

Sua dimensão de mercado decorre do papel da certificação como instrumento de sinalização de valor. Em programas voluntários, atributos como rastreabilidade, verificabilidade e desempenho socioambiental funcionam como ativos reputacionais capazes de influenciar decisões de compra, investimentos e estruturação de cadeias globais de suprimento. O resultado é um sistema em que inovação metodológica e coerência regulatória se retroalimentam: a escala regulatória depende da maturação técnica surgida no espaço voluntário, enquanto a legitimidade de mercado se fortalece com a institucionalização estatal.

4.1.3 Classificação de produto como estratégia industrial

A classificação do produto certificado - que envolve rotas de produção elegíveis, etiquetas atribuídas e cadeias certificáveis - constitui mecanismo central de coordenação industrial. As rotas tecnológicas indicam o grau de prioridade atribuído à integridade ambiental, à segurança

de suprimento ou à competitividade industrial. Modelos baseados exclusivamente em eletrólise renovável reforçam liderança regulatória, mas limitam a escala potencial de oferta; modelos inclusivos ampliam segurança energética e atraem investimentos industriais, embora exijam maior robustez nos sistemas de mensuração e verificação; modelos orientados a desempenho buscam conciliar flexibilidade tecnológica com rigor metodológico no cálculo de emissões.

As etiquetas atribuídas - como “renovável”, “verde” e “baixo carbono” - não representam apenas diferenciações semânticas, mas refletem graus distintos de rastreabilidade, padronização metodológica e potencial de interoperabilidade internacional. A etiqueta “renovável” tende a maior convergência técnica, ao passo que a etiqueta “verde” apresenta grande heterogeneidade metodológica, sendo utilizada sobretudo como recurso reputacional. A etiqueta “baixo carbono” oferece flexibilidade, mas depende de métricas comparáveis e fronteiras de sistema harmonizadas.

A definição dos produtos ou cadeias certificáveis, por sua vez, influencia diretamente a inserção econômica do hidrogênio. A inclusão de derivados, como amônia, metanol e combustíveis sintéticos, indica estratégia voltada à integração do hidrogênio em cadeias industriais e logísticas existentes, acelerando a descarbonização de setores difíceis de eletrificar. A certificação restrita ao hidrogênio puro reforça prioridades industriais domésticas. Já a inclusão de vetores logísticos, como LOHC e SHC, sinaliza visão sistêmica da infraestrutura necessária para mercados de médio e longo prazo.

4.1.4 Maturidade institucional e governança global emergente

A evolução dos programas de certificação demonstra que o campo não amadurece por substituição linear de modelos, mas por coevolução institucional. Programas voluntários pioneiros permitiram testar metodologias de rastreabilidade, fatores de emissão e formas de declaração ambiental em contextos experimentais. Regulações posteriores, como a legislação europeia, consolidaram critérios e formalizaram mecanismos de reconhecimento, estabelecendo coerência metodológica em escala continental. Em resposta, programas voluntários passaram a incorporar exigências regulatórias para manter credibilidade internacional, reforçando uma dinâmica de influência mútua entre inovação privada e normatização pública.

Esse processo resulta em um regime misto de governança entre programas mandatórios e voluntários, caracterizado por ajustes contínuos e por crescente convergência metodológica, ainda que preservando diversidade institucional. A maturidade do sistema decorre dessa interação: o espaço voluntário funciona como laboratório regulatório, enquanto o espaço mandatório fornece legitimidade e previsibilidade.

4.1.5 Recomendações para formuladores de política pública: características gerais

Com base na análise integrada de programas de certificação de hidrogênio de baixo carbono, é possível identificar um conjunto de diretrizes aplicáveis ao desenho de sistemas nacionais de certificação:

(a) A definição do papel estratégico do hidrogênio deve preceder o desenho da certificação. Programas bem-sucedidos alinham critérios técnicos às metas climáticas, industriais e de segurança energética da jurisdição, evitando a adoção acrítica de modelos externos.

(b) A escolha das rotas elegíveis requer equilíbrio entre integridade ambiental, escala de oferta e competitividade industrial. Critérios excessivamente restritivos reforçam credibilidade regulatória, mas podem limitar viabilidade econômica; critérios inclusivos ampliam oferta, mas demandam sistemas robustos de mensuração e verificação.

(c) A certificação deve estar vinculada a instrumentos econômicos - como subsídios, leilões, metas setoriais ou reconhecimento em mercados específicos - para evitar que se torne um mecanismo de baixa adesão.

(d) A interoperabilidade internacional deve ser considerada desde a concepção do programa. A economia do hidrogênio é transfronteiriça, e a compatibilidade metodológica com programas consolidados reduz custos administrativos e aumenta competitividade exportadora.

(e) O espaço voluntário pode ser utilizado como campo de experimentação metodológica. A incorporação seletiva de inovações - como modelos digitais de rastreabilidade, abordagens de cadeia de custódia e métricas mais granulares de emissões - fortalece a maturidade regulatória e acelera o alinhamento a padrões internacionais.

(f) A governança do sistema de certificação deve assegurar clareza institucional e previsibilidade regulatória. Configurações que combinam supervisão estatal com mecanismos de validação técnica independentes, tendem a produzir maior confiança por parte de investidores e agentes de mercado.

A Tabela 8 sintetiza recomendações estratégicas derivadas da análise das características gerais, destacando elementos essenciais para que formuladores de políticas públicas construam sistemas tecnicamente robustos, economicamente viáveis e internacionalmente interoperáveis.

Tabela 8 – Recomendações para o desenho de características gerais em programas nacionais de certificação de hidrogênio de baixo carbono

Eixo analítico – características gerais	Recomendações para formuladores de política pública
Estratégia e alinhamento político-energético	<ul style="list-style-type: none"> • Definir previamente o papel estratégico do hidrogênio no país (segurança energética, descarbonização, neointustrialização); • Evitar transposição automática de modelos estrangeiros; alinhar critérios às metas e estruturas nacionais.
Rotas de produção elegíveis	<ul style="list-style-type: none"> • Equilibrar integridade ambiental, escala de oferta e competitividade industrial; • Considerar modelos restritivos para liderar em credibilidade ambiental e modelos inclusivos para viabilizar oferta e transição industrial.
Instrumentos econômicos e incentivos	<ul style="list-style-type: none"> • Integrar certificação a políticas de fomento (subsídios, leilões, metas setoriais, compras públicas); • Evitar que a certificação se limite a um “selo declaratório” sem impacto econômico.
Interoperabilidade internacional	<ul style="list-style-type: none"> • Garantir alinhamento metodológico com padrões consolidados (limites de emissões, adicionalidade, correlação temporal e geográfica); • Facilitar acesso a mercados externos e reduzir custos administrativos para exportadores.
Inovação e experimentação metodológica	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar programas voluntários como laboratórios regulatórios (modelos digitais de rastreabilidade, book & claim, cadeias de custódia avançadas); • Incorporar gradualmente práticas validadas internacionalmente.
Governança e institucionalidade	<ul style="list-style-type: none"> • Estabelecer programas de governança mista, com supervisão estatal e auditoria independente; • Assegurar transparência, previsibilidade regulatória e clareza sobre atribuições institucionais.

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

4.2 Critérios técnicos dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono

A Tabela 9 apresenta a Matriz de Análise 2. A Matriz reúne os principais critérios técnicos dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono, mostrando como diferentes escolhas metodológicas expressam prioridades regulatórias, industriais e climáticas.

Tabela 9 – Matriz de Análise 2: Critérios técnicos dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono

Programa	Adicionalidade	Correl. geográfica	Correl. temporal	Uso de energia renovável	Limite de emissões	Limite de sistema	Cadeia de Custódia	Metodologia PCF	Ferramenta ACV
Renewable Energy Directive (RED III) - Mandatário	Exigida a partir de 2028 (com exceções)	Mesma bidding zone; interconexão com preço \geq ; offshore conectada	Mensal até 2029, horária a partir de 2030	Linha direta; rede $\geq 90\%$ renovável; rede < 18 gCO ₂ e/MJ; rede + requisitos	28,2 gCO ₂ e/MJ ($\geq 70\%$ saving)	Well-to-wheel (berço-à-roda)	Mass balance	Reg. Delegado (UE) 2023/1185; fatores oficiais + JRC/Ecoinvent	Não há ferramenta; operador aplica metodologia
Hydrogen Society Promotion Act (HSPA) - Mandatário	Não aplicável (adicionalidade em termos de saving de GEE)	Não determinado	Não exigida	Linha direta, PPA, eletricidade de rede rastreável	H ₂ : $\leq 3,4$ kgCO ₂ e/kg ($\approx 28,2$ g/MJ); amônia: 46,8 g/MJ; sintéticos: 39,9 g/MJ; metano sintético: 49,3 g/MJ	H ₂ e amônia: well-to-gate; sintéticos: well-to-wheel	Não determinado	Critérios ministeriais; Basic Policy; admite dados secundários	Não há ferramenta oficial; cálculo submetido em plano de negócios
Clean Hydrogen Certification Scheme (CHCS) - Mandatário	Não aplicável (adicionalidade em termos de redução líquida de GEE)	Eletricidade da mesma rede da planta	Mensal	Linha direta, PPA, rede rastreável	$\leq 4,0$ kgCO ₂ e/kg H ₂ (faixas decrescentes até ~ 1 kg)	Well-to-gate	Não determinado	ISO 14040/44/67; ISO/TS 19870; GHG Protocol; métodos próprios	Fórmulas fornecidas; dados primários + programas
UK Low Carbon Hydrogen Standard (LCHS) - Mandatário	Não exigida	Não exigida	Mensal	Linha direta, PPA, rede com rastreabilidade	≤ 20 gCO ₂ e/MJ	Well-to-gate	Mass balance	Fórmulas próprias; princípios de ACV	Data Annex + Hydrogen Emissions Calculator (HEC)
Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO) - Mandatário	Exigida desde 2024	Opcional	Média horária de 30 min ou até 12 meses contínuos	Linha direta, PPA, rede rastreável	$\leq 32,9$ gCO ₂ e/MJ ($\geq 65\%$ saving)	Well-to-wheel	Mass balance	Metodologia ACV; fatores DfT/BEIS; alocação energética	Somente guias oficiais + fatores governamentais

GH2 Standard - Voluntário	Exigida (expansão renovável)	Produção e consumo no mesmo mercado elétrico	Exigida (sem faixa horária definida)	Linha direta, PPA, GoO/I-REC	≤1,0 kgCO ₂ e/kg H ₂	Well-to-gate	Não determinado	ISO/TS 19870:2023; ISO 14040/44/67	Não há ferramenta
ISCC EU - Voluntário	Exigida (RED III)	Mesma bidding zone	Mensal até 2029; horária a partir de 2030	Critérios da RED III	28,2 gCO ₂ e/MJ (≥70% saving)	Well-to-delivery-gate	Mass balance	Reg. Delegado (UE) 2023/1185; fatores oficiais + JRC/ Ecoinvent	Não há ferramenta
REDcert EU 07 - Voluntário	Exigida (RED III)	Mesma bidding zone	Mensal até 2029; horária a partir de 2030	Critérios da RED III	28,2 gCO ₂ e/MJ (≥70% saving)	Well-to-delivery-gate	Mass balance	Reg. Delegado (UE) 2023/1185; fatores oficiais + JRC/ Ecoinvent	Não há ferramenta
CertifHy RFNBO - Voluntário	Exigida (RED III)	Mesma bidding zone	Mensal até 2029; horária a partir de 2030	Critérios da RED III	28,2 gCO ₂ e/MJ (≥70% saving)	Well-to-delivery-gate	Mass balance	Reg. Delegado (UE) 2023/1185; fatores oficiais + JRC/ Ecoinvent	Não há ferramenta
CertifHy NGC - Voluntário	Não exigida	Não exigida	Não exigida	GoO cancelada (rede, PPA ou linha direta)	36,4 gCO ₂ e/MJ (≥60% saving)	Well-to-gate	Book & Claim	CertifHy v1.5; RED II; ISO 14067/14064-1	Não há ferramenta
TÜV SÜD CMS 70 - Voluntário	Opcional (GreenHydrogen+ alinhado RED)	Opcional (GreenHydrogen+ alinhado RED)	Opcional (GreenHydrogen+ alinhado RED)	Linha direta, PPA, rede rastreável; exclusão dupla contagem	28,2 gCO ₂ e/MJ (indústria/mobilidade); 24 gCO ₂ e/MJ (aquecimento)	Well-to-gate; opcional well-to-use	Book & Claim (GreenHydrogen); Mass balance (GreenHydrogen/+)	ISO 14040/44/67; GHG Protocol; RED III	Não há ferramenta
TÜV Rheinland H2.21 - Voluntário	Opcional (Renewable e H ₂ alinhado RED)	Opcional (Renewable e H ₂ alinhado RED)	Opcional (Renewable e H ₂ alinhado RED)	Linha direta, PPA, rede rastreável; exclusão dupla contagem	≤3,88 kgCO ₂ e/kg H ₂ (≥70% saving)	Cradle-to-X (uso definido)	Book & Claim; Renewable H ₂ exige mass balance	ISO 14040/44/67; ISO 14064; RED III; ETS/MRR/AVR; QMA H2.21	Não há ferramenta
T/CAB 0078-2020 (China) - Voluntário	Não exigida	Não exigida	Não exigida	Linha direta, PPA, rede rastreável; exclusão dupla contagem	"Baixo carbono": ≤14,51 kgCO ₂ e/kg H ₂ ; "limpo": ≤4,9 kgCO ₂ e/kg H ₂	Well-to-gate	Não determin.	GB/T 24040/24044 (equivalentes ISO 14040/44)	Não há ferramenta

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Se a análise das características gerais mostrou quem governa os programas e com que propósito, os critérios técnicos revelam como essas escolhas se materializam na contabilidade de emissões, no uso da eletricidade e na rastreabilidade da molécula. Os resultados indicam que, em vez de uma convergência substantiva, os programas configuram arquiteturas distintas de integridade climática, custo regulatório e viabilidade operacional, refletindo prioridades nacionais e diferentes capacidades institucionais de medição e verificação.

4.2.1 Integridade climática: critérios como instrumentos de política energética

Os critérios de adicionalidade, correlação temporal e geográfica e limites de emissões operam simultaneamente como filtros técnicos e instrumentos de política energética. Eles definem não apenas o que é elegível, mas também como o hidrogênio se integra ao sistema elétrico e à estratégia industrial.

Em programas que buscam coordenação setorial, caracterizados por maior granularidade, adicionalidade e correlação funcionam como mecanismos de ordenamento: evitam competição por eletricidade renovável, sincronizam expansão de geração e demanda e orientam investimentos para regiões e tecnologias específicas. Nesses casos, rigor técnico e planejamento energético se sobrepõem.

Já programas que ancoram credibilidade principalmente em limites de emissões calculados por ACV adotam outra racionalidade: reduzir barreiras operacionais, garantir desempenho ambiental agregado e preservar flexibilidade tecnológica. A integridade climática decorre mais do resultado final do ciclo de vida do que de uma demonstração granular de simultaneidade ou geração nova.

A comparação evidencia que não existe critério neutro. Cada escolha redistribui custos, riscos, velocidade de implementação e capacidade de exportação. Compreender essa interdependência é essencial para projetar critérios tecnicamente sólidos e politicamente eficazes.

4.2.2 Uso da eletricidade renovável: modelos de transição e suas condições de coerência

As modalidades de comprovação do uso da eletricidade - linha direta, PPAs e rede - traduzem como a certificação interage com o sistema elétrico. Elas expressam concepções distintas de rastreabilidade, risco regulatório e viabilidade econômica.

A linha direta oferece máxima rastreabilidade, mas é restritiva em localização e custo. Adequase a sistemas com forte capacidade de conexão e planejamento integrado entre renováveis e hidrogênio. Os PPAs renováveis representam o meio-termo mais recorrente: deslocam a rastreabilidade para o contrato, permitindo previsibilidade financeira e mitigação de limitações da rede. São particularmente relevantes em países cujos sistemas elétricos ainda não conseguem suportar granularidade horária ou adicionalidade rígida. O uso da eletricidade de rede, por sua vez, torna visível a dependência dos critérios técnicos à estrutura elétrica nacional. Sistemas renováveis permitem modelos simplificados com limites de emissões; sistemas carbonizados exigem camadas adicionais de garantia climática.

Assim, a combinação das regras em torno dos diferentes modelos de uso da eletricidade renovável depende seja da ambição climática, que da maturidade do sistema elétrico que do modelo industrial de transição.

4.2.3 Fronteiras de sistema e PCF: coerência metodológica como facilitador de comparabilidade

Os limites de emissões só são comparáveis quando associados a fronteiras de sistema e metodologias de ACV consistentes. A análise mostra que diferenças de recorte, como berço-ao-portão, berço-ao-portão-de-entrega ou berço-à-roda, alteram radicalmente os resultados, mesmo quando a tecnologia é semelhante.

Programas mais rígidos tendem a padronizar cálculos, fatores e hierarquias de dados para garantir segurança regulatória e auditabilidade. Já programas mais flexíveis permitem parametrização local e uso de dados primários, aumentando aderência ao contexto industrial, mas dificultando interoperabilidade.

O achado central é que a ambição climática não está no valor absoluto do limite, mas na coerência interna entre limite, fronteira e metodologia. Sem essa coerência, perde-se comparabilidade e aumentam-se custos de transação, prejudicando exportadores e fragmentando mercados.

4.2.4 Rastreabilidade e governança de dados: o elo crítico da integridade operacional

A rastreabilidade - seja ela física (balanço de massa) ou documental (*book-and-claim*) - é onde critérios técnicos se tornam sistemas verificáveis. É também onde emergem os maiores desafios institucionais.

O balanço de massa oferece integridade elevada, mas exige infraestruturas sofisticadas de medição, digitalização e auditoria, nem sempre disponíveis em mercados emergentes. Modelos contratuais/documentais ampliam escalabilidade e facilitam o comércio, mas dependem de governança de dados, prevenção à dupla contagem e credibilidade das entidades verificadoras.

A análise evidencia ainda duas fragilidades recorrentes. A primeira refere-se à ênfase excessiva nos critérios para o uso da eletricidade em detrimento de critérios para os demais insumos do processo produtivo, o que compromete a consistência da PCF. A segunda diz respeito ao baixo nível de digitalização dos sistemas de monitoramento e verificação, ainda fortemente dependentes de planilhas e auditorias manuais, o que eleva custos operacionais, aumenta riscos de erro e limita a interoperabilidade entre sistemas.

4.2.5 Recomendações para formuladores de política pública: critérios técnicos

Com base na leitura crítica dos critérios técnicos, é possível extrair um conjunto de orientações para países que desejam estruturar ou revisar seus programas de certificação de hidrogênio de baixo carbono.

(a) Tratar critérios técnicos como ferramentas de política pública, e não como fins em si. A definição de adicionalidade, correlação e limites de emissões deve refletir o papel pretendido para o hidrogênio na matriz energética e na estratégia industrial, evitando importar parâmetros sem considerar a realidade elétrica e produtiva nacional.

(b) Priorizar coerência entre limite, fronteira de sistema e metodologia de cálculo. Programas tecnicamente robustos alinham o valor do limite à abrangência da ACV e à qualidade dos dados utilizados, facilitando tanto a credibilidade interna quanto a negociação de equivalências com outros programas.

(c) Combinar rastreabilidade física e documental de forma proporcional à capacidade institucional. Escolhas metodológicas de alta granularidade podem ser reservadas a mercados ou contratos específicos, enquanto soluções mais simples, mas bem verificadas, permitem ampla adesão sem comprometer a integridade mínima.

(d) Planejar desde o início a infraestrutura de dados e a digitalização do MRV. Programas nacionais de certificação tendem a ganhar em credibilidade e reduzir custos quando a verificação é apoiada por plataformas interoperáveis, bases auditáveis e processos parcialmente automatizados.

(e) Utilizar fases de transição e pilotos regulatórios. A adoção gradual de critérios mais exigentes, como por exemplo uma correlação temporal mais granular ou a inclusão de mais etapas na ACV, pode ser condicionada à maturidade do sistema elétrico, à disponibilidade de dados e à evolução da capacidade técnica dos operadores.

A Tabela 10 sintetiza recomendações estratégicas derivadas da análise dos critérios técnicos, destacando elementos essenciais para que formuladores de políticas públicas construam sistemas tecnicamente robustos, economicamente viáveis e internacionalmente interoperáveis.

Tabela 10 – Recomendações para o desenho de critérios técnicos em programas nacionais de certificação de hidrogênio de baixo carbono

Eixo analítico: critérios técnicos	Recomendações para formuladores de política pública
Integridade climática (adicionalidade, correlação, limites)	<ul style="list-style-type: none"> • Tratar critérios como instrumentos de política energética e industrial, e não como requisitos isolados; • Ajustar adicionalidade e correlação à estrutura elétrica nacional, evitando reproduções acríticas de modelos externos; • Alinhar limites numéricos à fronteira de sistema e à metodologia ACV adotada, garantindo coerência e credibilidade.

Uso da eletricidade renovável	<ul style="list-style-type: none"> • Combinar linha direta, PPAs e uso de rede conforme a maturidade do sistema elétrico e os objetivos de expansão renovável; • Modular exigências de granularidade temporal e geográfica de acordo com o nível de flexibilidade e de infraestrutura da rede; • Prever trajetórias de transição que permitam aumento gradual de rigor à medida que o sistema evolui.
Fronteiras de sistema e PCF	<ul style="list-style-type: none"> • Tornar explícitas as fronteiras adotadas e justificar sua adequação aos objetivos do programa; • Harmonizar metodologias de ACV com padrões internacionais, criando condições para reconhecimento mútuo e redução de custos de conformidade; • Implementar mecanismos de comparação ajustada entre fronteiras distintas, prevenindo assimetrias de competitividade.
Rastreabilidade e governança de dados	<ul style="list-style-type: none"> • Escolher modelos de rastreabilidade proporcionais à capacidade institucional e ao nível de risco do mercado-alvo; • Priorizar desde o início a digitalização do MRV, com plataformas interoperáveis, trilhas de auditoria e prevenção à dupla contagem; • Expandir a verificação para além da eletricidade, incorporando insumos e etapas relevantes do ciclo de vida.

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

4.3 Configurações operacionais

A Tabela 11 apresenta a Matriz de Análise 3. A Matriz compara as principais características operacionais dos programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono, destacando como cada sistema define responsabilidades institucionais, aplica normas técnicas e organiza seus mecanismos de verificação e rastreabilidade.

Tabela 11 – Matriz de Análise 3: Configurações operacionais dos principais programas de certificação do hidrogênio de baixo carbono

Programa	Autoridade acreditadora	Normas de referência da acreditação	Organismos de auditoria	Normas de referência da auditoria	Autoridade emissora	Normas de referência para emissão	Transparência
Renewable Energy Directive (RED III) - Mandatório	Autoridades nacionais competentes ou organismos reconhecidos pelo Reg. (CE) n.º 765/2008	Regulamento (CE) n.º 765/2008; ISO 14065; ISO 14064-3	Organismos de certificação independentes reconhecidos pelas autoridades nacionais	Regulamentos Delegados 2023/1184 e 2023/1185; ISO/IEC 17065; ISO 19011	Programas voluntários reconhecidos pela Comissão Europeia	RED III e atos delegados; ISO 14040/44/67; ISO 14064-3	Alta – Union Database (UDB); acesso público a certificados e auditorias
Hydrogen Society Promotion Act (HSPA) - Mandatório	Processo centralizado sob METI e MLIT	Atos administrativos sob HSPA	Auditoria conduzida pelo Estado (METI/MLIT)	HSPA (sem Norma ISO específica)	METI e MLIT (ministérios competentes)	Atos regulatórios nacionais sem referência a normas ISO	Baixa – sem plataforma digital pública; registros internos
Clean Hydrogen Certification Scheme (HCS) - Mandatório	KEEI (agência operacional sob supervisão estatal)	Operational Rules da KEEI	Certification Testing and Evaluation Agency (KEEI)	ISO 14040/44/67; ISO/TS 19870; GHG Protocol; IPHE v3	Presidente da Certification Operating Agency (KEEI)	Regras operacionais e métodos de ACV e GEE baseados em normas ISO	Em desenvolvim. – Certification Information System

UK Low Carbon Hydrogen Standard (LCHS) - Mandatório	Sem processo formal de acreditação; LCCC designada diretamente pelo governo	Indefinido (programa em desenvolvimento)	Organismos independentes a serem designados pelo governo	Requisitos em futura orientação de implementação	Low Carbon Contracts Company (LCCC)	Normas em desenvolvimento; base legal em atos governamentais	Em desenvolvimento. – registro digital LCCC
Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO) - Mandatório	Department for Transport (DfT)	RTFO and SAF Mandate Third-Party Assurance Guidance	Organismos independentes reconhecidos por lista do DfT	ISAE 3000; ISO 14064-3; ISO 14065; ISQM 1/2	RTFO Administrator (DfT)	RTFO Order 2007 e guias técnicos oficiais	Baixa – sistema ROS com acesso restrito
GH2 Standard - Voluntário	GH2 Accreditation and Certification Body (multissetorial)	ISAE 3000; ISO 14064-3; ISQM 1/2; ISO 14065	Organismos independentes reconhecidos pela GH2	Mesmas normas de asseguração internacional e verificação GEE	GH2 Accreditation and Certification Body	GH2 Standard 2024 e normas ISAE/ISO integradas	Alta – GH2 Registry em lançamento; acesso público planejado
ISCC EU - Voluntário	Organismo nacional acreditado segundo Reg. 765/2008 e membro do IAF	Reg. (CE) 765/2008; ISO 14065; ISO/IEC 17065	Organismos de certificação independentes acreditados	ISO/IEC 17065; ISO 14065; ISO 19011; ISAE 3000	CBs aprovados em nome da ISCC	Regras ISCC e referências ISO 14040/44/67	Alta – Union Database (UDB) integrada; certificados públicos
REDcert EU 07 - Voluntário	Organismo nacional de acreditação conforme Reg. 765/2008	Reg. (CE) 765/2008; ISO/IEC 17065; ISO 14065	CBs independentes reconhecidos pela REDcert	ISO/IEC 17065; ISO 19011	CBs aprovados pela REDcert GmbH	Regras REDcert e referência a normas ISO 14065/17065	Alta – Union Database (UDB); certificados ativos e NCs públicas
CertifHy EU RFNBO - Voluntário	Organismo acreditado membro do IAF ou NAB reconhecido pela UE	Reg. (CE) 765/2008; ISO/IEC 17065; ISO 14065	CBs independentes aprovados pela CertifHy Stakeholder Platform	ISO/IEC 17065; ISO 14065; ISO 19011; ISAE 3000	CBs autorizados em nome da CertifHy	RED II/III e Regs. 2023/1184-1185; ISO 14064-3 e 14065	Alta – Union Database (UDB); registro público de certificados
CertifHy NGC Scheme - Voluntário	CertifHy Stakeholder Platform	ISO/IEC 17065 e ISO 14065	CBs independentes aprovados pela Plataforma	Mesmas normas de verificação e auditoria da versão RFNBO	CBs autorizados pela CertifHy NGC	Regras CertifHy internas com base ISO 14065/17065	Alta – CertifHy Registry; consulta pública a certificados
TÜV SÜD CMS 70 - Voluntário	TÜV SÜD Industrie Service GmbH (autocredenciada)	EN ISO 14065:2020; EN ISO/IEC 17029:2019	Organismos internos da TÜV SÜD	ISO/IEC 17065; ISO 17067; ISO 19011; requisitos técnicos de hidrogênio	TÜV SÜD Zertifizierungsstelle “Klima und Energie”	Normas ISO 14040/44/67 e requisitos internos CMS 70	Média – Certipedia; lista de certificados válidos
TÜV Rheinland H2.21 - Voluntário	TÜV Rheinland Energy GmbH (autocredenciada)	EN ISO 14065; EN ISO/IEC 17029	CBs internos ou aprovados pela TÜV Rheinland	EN ISO 14064-1/2/3; EN ISO 14067; ISO/IEC 17065; ISO 19011	TÜV Rheinland Energy GmbH	Normas ISO 14040/44/67 e verificação GEE segundo ISO 14064	Alta – test marks digitais públicos com dados de origem energética
T/CAB 0078-2020 (China) - Voluntário	Plataforma pública sob a National Energy	T/CAB 0078-2020; GB/T 24040 e 24044	Organismos de verificação reconhecidos pela NEA ou	GB/T 24040 e 24044 (ACV)	Plataforma pública de serviços	T/CAB 0078-2020 e padrões GB/T	Média – plataforma NEA para registro e

	Administration (NEA)	(equivalentes ISO 14040/44)	associações setoriais		reconhecida pela NEA	equivalentes à ISO 14040/44	cancelamento de lotes de H ₂
--	----------------------	-----------------------------	-----------------------	--	----------------------	-----------------------------	-----------------------------------------

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

A comparação entre os programas evidencia que, embora partilhem o objetivo comum de garantir integridade e confiabilidade às certificações de hidrogênio de baixo carbono, eles se apoiam em configurações operacionais distintas. Essas diferenças refletem capacidades institucionais, prioridades industriais e modos próprios de traduzir normas técnicas em práticas verificáveis. Essa diversidade indica modelos alternativos de coordenação regulatória, úteis para países que buscam estruturar seus próprios programas de certificação.

4.3.1 Desenho institucional das funções de acreditação, auditoria e emissão

A forma como um programa organiza quem acredita, quem audita e quem emite certificados é determinante para sua credibilidade e para sua aceitação externa. O ponto central é como a distribuição de funções molda autonomia técnica, capacidade de supervisão e custos de implementação.

Sistemas que distribuem funções entre instituições distintas tendem a criar um ambiente de alta confiança, pois reduzem conflitos institucionais e permitem revisões independentes ao longo da cadeia de conformidade. Essa arquitetura facilita reconhecimento internacional e padronização metodológica, mas exige recursos técnicos significativos, tanto do Estado quanto do setor privado, e tende a elevar custos iniciais.

Configurações que concentram parte dessas funções no Estado reforçam coerência regulatória e permitem integrar a certificação a prioridades industriais e energéticas. No entanto, a centralização reduz o grau de independência técnica percebida, o que afeta portabilidade internacional e pode exigir futuras adaptações para garantir equivalência metodológica.

Sistemas colegiados e multissetoriais operam como mecanismos de coordenação: ampliam transparência, integram múltiplas expertises e reforçam governança de mercado. Seu desafio é garantir consistência metodológica quando a decisão depende de corpos deliberativos mais amplos.

Modelos em que acreditação e auditoria são internalizadas pela própria certificadora oferecem agilidade e padronização, mas concentram risco institucional e limitam a confiança externa por reduzirem a separação funcional entre etapas críticas.

O resultado que cada configuração produz um equilíbrio distinto entre credibilidade, custo e controle institucional, e essa escolha deve refletir o papel estratégico que o país atribui ao hidrogênio: exportação, competitividade industrial, inovação tecnológica ou segurança energética.

4.3.2 Lógicas operacionais e efeitos sobre confiança, custo e interoperabilidade

As escolhas práticas de implementação — como o grau de separação institucional, o desenho dos processos de auditoria e o uso de sistemas digitais — organizam-se em torno de duas lógicas operacionais predominantes, que estruturam as configurações operacionais de uma certificação.

A primeira lógica é orientada à segurança institucional, priorizando verificações independentes, cadeias de supervisão bem definidas e critérios rigorosos de competência técnica. Essa abordagem fortalece a confiança do mercado e reduz o risco de inconsistências metodológicas ou fraudes, ao ancorar a certificação em mecanismos formais de controle e responsabilização. Em contrapartida, ela eleva o custo regulatório, ao demandar auditorias mais especializadas, maior volume de evidências documentais e estruturas permanentes de supervisão.

A segunda lógica é orientada à eficiência operacional, buscando simplificar procedimentos, reduzir tempos de auditoria e padronizar fluxos de decisão. Essa abordagem favorece escalabilidade, reduz barreiras de entrada e amplia a participação de pequenos e médios operadores. Contudo, sua adoção exige contrapesos institucionais como maior transparência de dados, verificações amostrais ou critérios mais restritivos de habilitação, para preservar a integridade do sistema.

A análise mostra que os programas mais consistentes combinam essas lógicas de maneira funcional. A segurança institucional sustenta a credibilidade e o reconhecimento externo, enquanto a eficiência operacional assegura viabilidade econômica e expansão do mercado. As decisões sobre como equilibrar essas lógicas moldam a trajetória do programa, influenciando

diretamente seu custo de implementação, seu grau de confiança e sua capacidade de interoperar com sistemas internacionais.

4.3.3 Arquitetura digital, rastreabilidade e governança dos dados

À medida que as cadeias de valor do hidrogênio se tornam mais longas e complexas, incorporando conversão em derivados, transporte internacional e múltiplos agentes, a rastreabilidade passa a depender crescentemente de infraestruturas digitais capazes de registrar, validar e reconciliar dados ao longo de toda a cadeia.

Sistemas integrados e interoperáveis reduzem riscos de fraude e inconsistência ao permitir a verificação automatizada de volumes certificados, insumos energéticos associados, transferências, cancelamentos e eventuais conversões. Essa automação diminui custos de conformidade, reduz dependência de controles manuais e cria condições para a operação de mercados mais sofisticados, nos quais a rastreabilidade precisa acompanhar transações frequentes e cadeias logísticas complexas.

Em contraste, arquiteturas fragmentadas ou pouco integradas elevam custos administrativos, dificultam o reconhecimento entre programas e ampliam a necessidade de verificações *ex post*. Nesses casos, a confiança depende excessivamente da atuação individual dos auditores, o que limita escalabilidade e aumenta o risco operacional, sobretudo em contextos transfronteiriços. A digitalização também reconfigura o lugar da confiança institucional. Parte da credibilidade do sistema passa a residir na governança dos dados, incluindo padrões de interoperabilidade, regras de acesso e transparência, trilhas de auditoria, APIs e integração com bases externas. Isso indica que soluções digitais não operam à margem da regulação, mas integram o próprio desenho institucional da certificação.

A tendência observada é que programas que aspiram interoperar internacionalmente precisam tratar a arquitetura digital como infraestrutura regulatória essencial, planejada desde a concepção do sistema, e não como camada acessória adicionada após a definição das regras.

4.3.4 Maturidade operacional e regimes de implementação

A maturidade operacional dos programas de certificação é correlacionada à capacidade destes programas de articular governança institucional, metodologia técnica e infraestrutura operacional de forma coerente ao longo do tempo. As trajetórias observadas refletem diferentes combinações de capacidade estatal, ambição regulatória e pressão de mercado, que se traduzem em características distintas de implementação.

Programas mais maduros tendem a apresentar alinhamento funcional entre regras, auditorias e sistemas digitais, o que reduz incertezas regulatórias, limita custos de supervisão e facilita o reconhecimento externo. Essa coerência interna permite que a certificação opere como infraestrutura estável de mercado, em vez de um mecanismo ad hoc de verificação.

Em estágios intermediários, observa-se a adoção de estratégias graduais, nas quais referenciais internacionais são incorporados de forma seletiva para fortalecer credibilidade, enquanto configurações institucionais e capacidades técnicas são ajustadas progressivamente. Esse percurso reduz barreiras iniciais de entrada, mas exige clareza sobre o ponto de chegada para evitar fragmentação metodológica ou dependência prolongada de soluções transitórias.

Já em contextos emergentes, a utilização de esquemas globais como referência inicial cumpre função pragmática de redução de risco e aprendizado institucional. No entanto, sem uma estratégia explícita de internalização e adaptação, esse caminho tende a limitar autonomia regulatória e a capacidade de moldar o sistema às prioridades industriais e energéticas nacionais.

A evidência central é que maturidade operacional decorre da consistência entre desenho institucional, regras técnicas e capacidade de implementação. Países que tratam a certificação como política pública estruturante - e não apenas como requisito técnico - constroem credibilidade mais rapidamente, reduzem custos de ajuste ao longo do tempo e ampliam sua capacidade de integração a programas internacionais de certificação.

4.3.5 Recomendações para formuladores de política pública: configurações operacionais

A análise integrada das configurações operacionais sugere que a credibilidade de um sistema nacional de certificação depende da coerência entre suas funções institucionais e seus instrumentos técnicos. Para países que pretendem estruturar seus programas, recomenda-se:

(a) Garantir clareza institucional desde o início. Separação mínima entre acreditação, auditoria e emissão reduz conflitos e fortalece confiança pública e privada.

(b) Alinhar normas operacionais ao nível de ambição industrial. Modelos mais restritivos exigem maior capacidade técnica; modelos mais flexíveis demandam salvaguardas para evitar perda de integridade.

(c) Tratar a infraestrutura digital como componente regulatório, não como ferramenta acessória. Sistemas interoperáveis e auditáveis reduzem risco de fraude e ampliam reconhecimento internacional.

(d) Projetar mecanismos de supervisão proporcionais ao risco. Quanto maior o grau de concentração institucional, maiores devem ser os controles de integridade.

(e) Priorizar escalabilidade e custo de implementação. Programas que equilibram rigor técnico e viabilidade operacional criam condições reais para expansão do mercado de hidrogênio.

(f) Incorporar, quando possível, mecanismos compatíveis com padrões internacionais. Isso reduz barreiras comerciais e acelera integração a cadeias globais de suprimento.

A Tabela 12 sintetiza recomendações estratégicas derivadas da análise das configurações operacionais, destacando elementos essenciais para que formuladores de políticas públicas construam sistemas tecnicamente robustos, economicamente viáveis e internacionalmente interoperáveis.

Tabela 12 – Recomendações para o desenho de configurações operacionais em programas nacionais de certificação de hidrogênio de baixo carbono

Eixo analítico	Recomendações para formuladores de política pública
Desenho institucional das funções (acreditação, auditoria, emissão)	<ul style="list-style-type: none"> • Definir a separação mínima entre funções para assegurar independência técnica; • Determinar o grau de envolvimento estatal em coerência com a estratégia industrial e energética; • Estabelecer mecanismos formais de supervisão contínua, independentemente do modelo institucional adotado.
Lógicas operacionais (segurança institucional e eficiência)	<ul style="list-style-type: none"> • Balancear rigor técnico e viabilidade operacional; • Ajustar a qualificação técnica dos auditores à complexidade das rotas e mercados-alvo; • Implementar mecanismos proporcionais de monitoramento para reduzir riscos de fraude sem criar barreiras excessivas.
Infraestrutura digital, rastreabilidade e governança de dados	<ul style="list-style-type: none"> • Tratar plataformas digitais como parte da regulação, garantindo rastreabilidade granular e auditabilidade independente; • Adotar padrões interoperáveis de intercâmbio de dados compatíveis com iniciativas internacionais; • Planejar a arquitetura digital para facilitar integração futura a mercados globais.
Maturidade operacional e escalabilidade	<ul style="list-style-type: none"> • Ajustar o desenho operacional às capacidades institucionais existentes, prevendo expansão modular; • Implementar procedimentos de forma progressiva, assegurando integridade e comparabilidade; • Articular a certificação com instrumentos econômicos e estratégias de industrialização desde o início.
Interoperabilidade e reconhecimento internacional	<ul style="list-style-type: none"> • Alinhar normas de acreditação, auditoria e emissão a referenciais internacionais consolidados; • Adotar metodologias compatíveis com mercados prioritários para exportação; • Desenvolver processos de validação documental e rastreabilidade digital que permitam equivalência futura entre programas.
Governança, transparência e confiança de mercado	<ul style="list-style-type: none"> • Estabelecer requisitos de transparência compatíveis com a maturidade institucional. • Criar salvaguardas à independência técnica, especialmente em modelos com concentração de funções. • Integrar participação de partes interessadas para aumentar legitimidade e previsibilidade regulatória.

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.4 Discussão à luz do Trilema Energético

O Trilema Energético avalia o desempenho dos sistemas energéticos a partir de três dimensões interdependentes: segurança, equidade e sustentabilidade ambiental. A forma como essas dimensões são equilibradas condiciona a resiliência e a legitimidade das trajetórias de transição energética. Neste estudo, o *World Energy Trilemma Framework* (World Energy Council, 2024) é utilizado como lente analítica para examinar a certificação do hidrogênio de baixo carbono

enquanto instrumento de governança, cujas escolhas regulatórias e operacionais afetam simultaneamente essas três dimensões.

Aplicado à certificação do hidrogênio, o Trilema evidencia que decisões como a definição de critérios de adicionalidade, fronteiras de sistema, limites de emissões e procedimentos de auditoria não são neutras. Cada uma dessas escolhas redistribui custos, riscos e oportunidades ao longo da cadeia do hidrogênio, com implicações diretas para a previsibilidade do sistema, a acessibilidade aos mercados e a integridade ambiental dos resultados certificados.

A segurança energética relaciona-se à capacidade da certificação de reduzir incertezas por meio de rastreabilidade, estabilidade institucional e padronização metodológica; a equidade diz respeito à possibilidade de participação de diferentes países, agentes econômicos e organismos de certificação sob requisitos proporcionais e transparentes; a sustentabilidade ambiental depende do rigor e da coerência das metodologias de análise de ciclo de vida, dos limites de emissões e dos critérios complementares de integridade climática.

Embora o Trilema não capture integralmente assimetrias de poder, disputas geopolíticas e barreiras institucionais mais amplas, o framework é útil para explicitar padrões de desempenho e dilemas recorrentes nos programas de certificação analisados, sem pretensão de esgotar a complexidade desses processos.

A Tabela 13 apresenta indicadores de desempenho derivados da análise comparativa, articulando as três matrizes analíticas dos programas de certificação - características gerais, critérios técnicos e configurações operacionais - às três dimensões do Trilema Energético. Esses indicadores permitem avaliar de forma sistemática como diferentes escolhas regulatórias e operacionais influenciam a capacidade dos sistemas de certificação de promover segurança energética, equidade regulatória e sustentabilidade ambiental, servindo como base para a discussão que se segue.

Tabela 13 – Indicadores de desempenho da certificação de hidrogênio de baixo carbono à luz do Trilema Energético

Dimensão do Trilema	Características gerais	Crítérios técnicos	Configurações operacionais	Principais tensões observadas
Segurança energética	<ul style="list-style-type: none"> • Grau de previsibilidade regulatória (estabilidade das regras ao longo do tempo); • Clareza sobre elegibilidade de rotas, produtos e usos finais; • Capacidade de integração da certificação às estratégias energéticas e industriais. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nível de correspondência entre produção de hidrogênio e disponibilidade de recursos energéticos; • Definição clara de fronteiras de sistema e limites de emissões; • Consistência metodológica ao longo do ciclo de vida. 	<ul style="list-style-type: none"> • Existência de registros digitais confiáveis e auditáveis; • Separação funcional entre acreditação, auditoria e emissão; • Capacidade de reduzir riscos regulatórios e de mercado. 	Segurança concentrada em jurisdições com alta capacidade institucional, dados confiáveis e infraestrutura digital; menor previsibilidade em contextos regulatórios emergentes.
Equidade energética	<ul style="list-style-type: none"> • Diversidade de vias de acesso à certificação (mandatórias e voluntárias); • Grau de flexibilidade para adaptação a diferentes contextos nacionais. 	<ul style="list-style-type: none"> • Complexidade dos requisitos de dados e granularidade temporal; • Custo relativo de conformidade por porte de projeto; • Exigência de dados primários ao longo da cadeia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Grau de concentração do mercado de certificação e auditoria; • Acessibilidade para organismos locais e regionais; • Transparência e previsibilidade nos processos de reconhecimento. 	Assimetria entre países, agentes econômicos e certificadores; risco de exclusão regulatória por limitações institucionais, e não por desempenho ambiental.
Sustentabilidade ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Alinhamento explícito da certificação a metas climáticas; • Clareza sobre o papel da certificação na transição energética. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rigor dos limites de emissões; - Exigência de adicionalidade e correlação temporal/geográfica; • Coerência entre metodologia, fronteira de sistema e métricas de desempenho. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso consistente de normas ISO e referenciais de ACV; • Capacidade de verificação independente e auditabilidade; • Grau de digitalização do MRV. 	Trade-off estrutural entre integridade climática máxima e viabilidade operacional; risco de fragmentação metodológica em modelos excessivamente flexíveis.

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.4.1 Segurança energética: certificação como instrumento de previsibilidade e coordenação sistêmica

Na perspectiva do Trilema Energético, a segurança energética associada à certificação do hidrogênio de baixo carbono não se restringe à garantia de suprimento físico, mas se expressa na capacidade de reduzir incertezas, ordenar decisões de investimento e coordenar a expansão da oferta energética de forma consistente com os objetivos de longo prazo. A certificação atua, nesse contexto, como uma infraestrutura de confiança, ao transformar atributos técnicos como

rastreabilidade, intensidade de emissões e origem da eletricidade em parâmetros estáveis para planejamento energético e industrial.

A análise comparativa evidencia que diferentes programas contribuem para a segurança energética ao tornar previsíveis as condições de elegibilidade, padronizar critérios de desempenho e ancorar expectativas de mercado. Independentemente da configuração institucional adotada, a certificação reduz riscos regulatórios ao estabelecer regras claras sobre quais rotas tecnológicas, fontes de energia e configurações operacionais são reconhecidas como compatíveis com metas climáticas e industriais. Essa previsibilidade favorece decisões de investimento em infraestrutura, contratos de longo prazo e integração do hidrogênio em cadeias produtivas estratégicas.

Um dos principais mecanismos de contribuição à segurança energética é a rastreabilidade da eletricidade e da molécula, que permite vincular a produção de hidrogênio à disponibilidade efetiva de recursos energéticos. Ao exigir correspondência, ainda que em diferentes graus, entre consumo e geração de eletricidade renovável, os sistemas de certificação contribuem para evitar pressões descoordenadas sobre a rede elétrica, sinalizando a necessidade de expansão da oferta, reforços de transmissão ou soluções de flexibilidade. Nesse sentido, a certificação opera como instrumento indireto de ordenamento do sistema energético, alinhando a expansão do hidrogênio às capacidades reais do setor elétrico.

Outro vetor relevante é a padronização metodológica, especialmente no uso de métricas de ciclo de vida e limites de emissões. Ao estabelecer referenciais comuns para avaliação de desempenho climático, a certificação reduz assimetrias de informação entre produtores, consumidores, investidores e formuladores de política pública. Essa redução de assimetria fortalece a segurança ao permitir comparações consistentes entre projetos, diminuir riscos de *lock-in* tecnológico e evitar investimentos em rotas que, no médio prazo, possam perder elegibilidade regulatória ou de mercado.

Além disso, a certificação contribui para a segurança energética ao facilitar a integração do hidrogênio em mercados regionais e internacionais. Sistemas que asseguram rastreabilidade, verificação independente e registros confiáveis ampliam a portabilidade do produto certificado, diversificando mercados de destino e reduzindo dependências excessivas de rotas ou parceiros

específicos. Essa diversificação de mercados e contratos reforça a resiliência das cadeias de suprimento associadas ao hidrogênio.

Por fim, a análise revela que a capacidade da certificação de fortalecer a segurança energética está fortemente condicionada à qualidade da infraestrutura institucional e digital que a sustenta. Jurisdições com sistemas consolidados de dados, MRV digitalizado e capacidades técnicas de verificação tendem a extrair maiores ganhos de previsibilidade e coordenação. Em contextos onde essas condições ainda estão em desenvolvimento, o potencial da certificação como instrumento de segurança existe, mas depende de investimentos graduais em governança de dados e capacidade institucional para se materializar plenamente.

4.4.2 Equidade energética: inclusão, custos e assimetrias institucionais

Diferentemente da segurança e da sustentabilidade, que tendem a ser tratadas como objetivos técnicos, a equidade emerge da interação entre requisitos regulatórios, capacidades institucionais e estrutura de mercado. A análise comparativa indica que a equidade na certificação do hidrogênio não se limita ao acesso à energia ou a mercados, mas se expressa em múltiplos níveis interdependentes: entre países, entre agentes econômicos, entre organismos de certificação e na própria arquitetura de interoperabilidade internacional.

No plano entre países, programas baseados em metodologias altamente detalhadas e requisitos extensivos de dados, como aqueles ancorados na RED III, pressupõem a existência de infraestrutura avançada de MRV, equipes técnicas especializadas e sistemas digitais interoperáveis. Países com menor capacidade institucional enfrentam, assim, custos relativos mais elevados para demonstrar conformidade, o que cria um risco de exclusão regulatória. Nesses casos, a limitação não decorre da intensidade real de emissões, mas da dificuldade em atender às exigências formais de comprovação, deslocando a equidade do plano ambiental para o plano institucional.

No plano dos agentes econômicos, a assimetria se aprofunda. Pequenos produtores e operadores de menor escala tendem a ser desproporcionalmente afetados por custos fixos associados à certificação, como auditorias recorrentes, contratação de PPAs renováveis, implantação de sistemas de monitoramento e aquisição de serviços técnicos especializados. Critérios que exigem elevada granularidade temporal ou dados primários ao longo de múltiplas etapas da

cadeia produtiva são, na prática, mais facilmente absorvidos por grandes conglomerados do que por projetos emergentes. Embora programas voluntários aparentem oferecer maior flexibilidade, muitos reproduzem essas mesmas barreiras ao depender de auditorias internacionais e de infraestrutura de dados sofisticada, relativizando a ideia de que a voluntariedade, por si só, promove inclusão.

No plano institucional, a equidade também se relaciona à distribuição de oportunidades no mercado de certificação. A exigência de conformidade com normas internacionais, a necessidade de experiência prévia em mercados globais e a concentração da demanda em poucos esquemas amplamente reconhecidos tendem a favorecer grandes certificadoras internacionais. Como consequência, organismos locais ou de menor porte enfrentam dificuldades para se inserir nesse mercado, o que limita o desenvolvimento de capacidades nacionais e regionais de verificação. Assim, sistemas concebidos para garantir integridade climática podem, inadvertidamente, reforçar a concentração do mercado de serviços de certificação.

Por fim, a equidade se manifesta no nível sistêmico, por meio da capacidade de interoperar entre diferentes regimes técnicos e jurídicos. Quanto mais complexos e opacos são os processos de equivalência metodológica entre programas, maior o risco de fragmentação regulatória e de desvantagem competitiva para exportadores que precisam atender simultaneamente a múltiplos requisitos. Nesse contexto, clareza normativa, previsibilidade nos mecanismos de reconhecimento mútuo e credibilidade das autoridades acreditadoras tornam-se componentes centrais de uma concepção ampliada de equidade, entendida não apenas como acesso formal a mercados, mas como possibilidade real de participação em condições minimamente simétricas em um mercado global de certificação.

4.4.3 Sustentabilidade ambiental: integridade metodológica e pragmatismo operacional

Na dimensão da sustentabilidade ambiental, a certificação do hidrogênio de baixo carbono atua como o principal mecanismo de tradução de objetivos climáticos abstratos em critérios operacionais verificáveis. Por meio da definição de limites de emissões, fronteiras de sistema, metodologias de análise de ciclo de vida e regras de rastreabilidade, a certificação estabelece quais trajetórias tecnológicas e energéticas são reconhecidas como compatíveis com metas de

descarbonização. A análise comparativa dos programas examinados permite identificar três estratégias predominantes de operacionalização da sustentabilidade.

A primeira estratégia pode ser caracterizada como de integridade máxima, associada a programas que combinam limites estritos de emissões, elevada granularidade temporal, como a correlação horária entre produção de hidrogênio e geração de eletricidade renovável, a rastreabilidade física rigorosa e o uso de fatores de emissão oficiais. Programas como a RED III e o GH2 Standard se aproximam desse modelo. Eles oferecem alto grau de integridade climática e comparabilidade internacional, reduzindo margens de ambiguidade metodológica. Contudo, essa robustez vem acompanhada de custos elevados de conformidade e de riscos de inviabilidade econômica em contextos caracterizados por matrizes elétricas mais intensivas em carbono, custos elevados de renováveis ou menor maturidade institucional e de dados.

A segunda estratégia corresponde a modelos de sustentabilidade intermediária, observados em programas como o LCHS do Reino Unido e em determinados critérios adotados na Coreia do Sul. Nesses casos, a integridade ambiental é assegurada prioritariamente por limites absolutos de emissões e por forte coerência metodológica, especialmente no alinhamento entre fronteira de sistema, dados utilizados e métricas de desempenho. A rastreabilidade tende a ser mais flexível, frequentemente baseada em instrumentos contratuais ou documentais, e a ênfase recai na consistência e verificabilidade dos resultados finais, mais do que na exigência da máxima granularidade em todas as etapas do processo. Essa abordagem reduz custos de conformidade e facilita a expansão industrial, sem necessariamente comprometer a robustez ambiental, desde que os parâmetros de cálculo sejam transparentes, auditáveis e tecnicamente fundamentados.

A terceira estratégia pode ser descrita como de sustentabilidade adaptativa, presente em programas que adotam fronteiras de sistema mais curtas, maior flexibilidade quanto ao uso da eletricidade de rede e limites de emissões calibrados às condições domésticas. Japão e China exemplificam essa abordagem, utilizando a certificação como instrumento de transição progressiva. Nesses casos, a prioridade é ampliar a adoção de tecnologias de menor intensidade de carbono no curto e médio prazo, permitindo que os critérios de sustentabilidade evoluam gradualmente à medida que se expandem a participação de fontes renováveis, a disponibilidade de dados confiáveis e a capacidade institucional de auditoria e verificação.

De forma integrada, a análise evidencia que a sustentabilidade ambiental, no contexto da certificação, é marcada por um *trade-off* estrutural entre rigor metodológico e viabilidade operacional. Sistemas mais rígidos tendem a maximizar a integridade climática e a comparabilidade internacional, mas podem restringir a adesão e aprofundar assimetrias entre jurisdições. Sistemas mais flexíveis ampliam a participação e a escalabilidade, mas exigem salvaguardas adicionais para evitar perda de comparabilidade e fragmentação dos padrões. O Trilema Energético contribui para explicitar esse equilíbrio entre rigor e pragmatismo, ainda que não capture integralmente as disputas políticas, industriais e distributivas que permeiam as escolhas de fronteira, metodologia e limites numéricos de emissões.

4.4.4 Considerações sobre o desempenho dos programas de certificação à luz do Trilema Energético

A leitura integrada das três dimensões do Trilema Energético evidencia que os programas de certificação de hidrogênio de baixo carbono operam como infraestruturas de governança energética, capazes de influenciar simultaneamente decisões técnicas, institucionais e de mercado. Ao estabelecer critérios verificáveis de desempenho climático, regras de rastreabilidade e procedimentos de validação, a certificação transforma atributos técnicos do hidrogênio em parâmetros estáveis de coordenação entre produtores, consumidores, investidores e formuladores de política pública.

No que se refere à segurança energética, os resultados mostram que a certificação contribui ao reduzir incertezas regulatórias, padronizar expectativas e ancorar decisões de investimento de longo prazo. Ao tornar previsíveis as condições de elegibilidade e ao vincular a produção de hidrogênio à disponibilidade efetiva de recursos energéticos, os programas analisados reforçam a estabilidade sistêmica e a integração do hidrogênio às estratégias energéticas e industriais. Esses ganhos, contudo, são distribuídos de forma desigual, dependendo da capacidade institucional, da qualidade dos dados e da maturidade das infraestruturas digitais de cada jurisdição.

Quanto à equidade, a análise revela que os programas de certificação podem tanto ampliar quanto restringir a participação de países, agentes econômicos e organismos de verificação. Requisitos metodológicos complexos, custos fixos elevados e elevada granularidade de dados tendem a favorecer jurisdições com maior capacidade institucional, grandes produtores e

certificadoras globais, aprofundando assimetrias regulatórias. A equidade, nesse contexto, deixa de ser apenas uma questão de acesso a mercados e passa a depender da possibilidade real de cumprir e demonstrar conformidade sob condições minimamente simétricas.

Na dimensão da sustentabilidade ambiental, a certificação materializa objetivos climáticos por meio de escolhas metodológicas que envolvem limites de emissões, fronteiras de sistema, critérios de adicionalidade e formas de rastreabilidade. A coexistência de estratégias de maior rigor, modelos intermediários e abordagens adaptativas indica que não há um único caminho para assegurar integridade climática. Em vez disso, observa-se um equilíbrio estrutural entre rigor metodológico, viabilidade operacional e escalabilidade, no qual a comparabilidade internacional aumenta à medida que se elevam as exigências técnicas, mas à custa de maiores barreiras de entrada.

De forma transversal, a análise também evidencia que a digitalização e a governança de dados tornam-se elementos centrais para o desempenho dos sistemas de certificação. A capacidade de operar plataformas interoperáveis, assegurar auditabilidade e prevenir dupla contagem passa a condicionar não apenas a sustentabilidade ambiental, mas também a segurança regulatória e a equidade entre jurisdições, configurando um novo eixo de diferenciação institucional no mercado emergente de certificação do hidrogênio.

Dessa forma, a certificação do hidrogênio de baixo carbono pode ser compreendida como um mecanismo de governança climática e industrial, no qual segurança, equidade e sustentabilidade são continuamente negociadas por meio de escolhas regulatórias e operacionais. O desafio central para formuladores de política pública consiste em promover convergência metodológica suficiente para viabilizar mercados internacionais e assegurar integridade climática, sem impor processos de homogeneização que inviabilizem trajetórias nacionais diferenciadas de desenvolvimento energético e industrial.

4.5 Observações para o contexto Brasileiro

A análise desenvolvida ao longo desta pesquisa indica que o Brasil dispõe de condições estruturais favoráveis para a construção de um sistema nacional de certificação de hidrogênio de baixo carbono tecnicamente robusto, institucionalmente confiável e compatível com os mercados internacionais. Ao mesmo tempo, os resultados comparativos mostram que a

credibilidade de um sistema de certificação não decorre da adoção literal de modelos externos, mas da capacidade de traduzir princípios comuns como integridade metodológica, rastreabilidade e verificabilidade em configurações regulatórias coerentes com as características do sistema energético, da base industrial e das capacidades institucionais de cada país.

À luz das discussões realizadas na seção anterior, especialmente quanto aos efeitos da certificação sobre segurança energética, equidade regulatória e sustentabilidade ambiental, a Tabela 14 sintetiza eixos estratégicos que podem orientar o desenho do Sistema Brasileiro de Certificação de Hidrogênio (SBCH2). Esses eixos refletem decisões regulatórias centrais identificadas na análise comparativa e articulam três dimensões fundamentais: coerência metodológica, viabilidade operacional e inserção internacional.

Tabela 14 – Síntese de recomendações adaptadas ao contexto brasileiro

Eixo estratégico	Direcionamento para o contexto brasileiro	Justificativa à luz dos achados da pesquisa
Coerência metodológica e limites de emissões	<ul style="list-style-type: none"> • Definir limites de emissões alinhados à matriz elétrica nacional e às rotas industriais prioritárias; • Adotar fronteiras de sistema e metodologias de ACV consistentes com padrões internacionais (ISO e GHG Protocol). 	A pesquisa demonstrou que comparabilidade global depende menos da uniformidade regulatória e mais da equivalência técnica verificável; coerência metodológica fortalece credibilidade externa.
Uso da eletricidade e critérios de adicionalidade	<ul style="list-style-type: none"> • Adotar abordagem faseada para adicionalidade, considerando maturidade da rede e gargalos regionais; • Permitir diferentes modalidades de contratação (linha direta, PPAs e rede rastreada). 	Modelos internacionais mostram que adicionalidade rígida é custosa em sistemas heterogêneos; no Brasil, matriz limpa e restrições regionais exigem calibragem contextual.
Rastreabilidade e infraestrutura de dados	<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolver plataforma digital nacional de MRV, interoperável, com dados auditáveis e padrões mínimos de rastreabilidade para energia e cadeia de custódia. 	Os resultados evidenciam que integridade climática depende tanto dos critérios quanto da governança de dados; ausência de digitalização fragiliza o sistema.
Governança e institucionalidade	<ul style="list-style-type: none"> • Estruturar o SBCH2 com funções claramente distribuídas entre acreditação, auditoria e emissão; • Promover participação técnica independente e coordenação interinstitucional. 	A pesquisa mostrou que credibilidade decorre da separação funcional e da previsibilidade institucional; modelos concentrados demandam salvaguardas robustas.
Viabilidade econômica e escalabilidade	<ul style="list-style-type: none"> • Adotar requisitos proporcionais ao porte dos projetos; prever fases de transição e incentivos para pequenos e médios produtores e para regiões em formação de clusters. 	Critérios excessivamente granulares criam barreiras de entrada; equidade regulatória exige proporcionalidade e escalabilidade operacional.

Integração com política industrial e exportação	<ul style="list-style-type: none"> • Alinhar certificação a cadeias industriais estratégicas (aço verde, fertilizantes, combustíveis sintéticos) e às exigências de mercados prioritários de exportação. 	A certificação pode atuar como instrumento de neointustrialização; alinhamento com mercados-alvo reduz incerteza regulatória.
Reconhecimento internacional e interoperabilidade	<ul style="list-style-type: none"> • Buscar equivalência técnica com programas consolidados (especialmente RED III e LCHS), sem dependência de transposição integral de modelos externos. 	A análise indica que equivalência funcional é mais eficiente que harmonização rígida; preserva autonomia regulatória sem perda de competitividade.

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

O primeiro eixo refere-se à coerência metodológica e à definição de limites de emissões. Os resultados mostram que a comparabilidade internacional depende menos da uniformidade normativa e mais da equivalência técnica verificável. Para o Brasil, isso implica adotar metodologias de análise de ciclo de vida e fronteiras de sistema alinhadas a padrões consolidados, como ISO e GHG Protocol, ao mesmo tempo em que se reconhecem as especificidades da matriz elétrica nacional e das rotas industriais prioritárias. Esse equilíbrio é decisivo para assegurar credibilidade externa sem comprometer a autonomia regulatória.

O segundo eixo trata do uso da eletricidade e da aplicação dos critérios de adicionalidade. Conforme discutido na análise do Trilema, critérios excessivamente rígidos podem elevar custos e reduzir a escalabilidade, sobretudo em sistemas elétricos heterogêneos. No contexto brasileiro, marcado por uma matriz de baixa intensidade de carbono, mas com gargalos regionais de transmissão e despacho, recomenda-se uma abordagem faseada, que permita diferentes modalidades de contratação de energia renovável e a evolução gradual dos requisitos à medida que se expandem a infraestrutura e a capacidade do sistema elétrico.

A rastreabilidade e a governança de dados constituem outro eixo central. A análise evidenciou que a integridade climática e a previsibilidade regulatória dependem cada vez mais da qualidade da infraestrutura digital que sustenta a certificação. Nesse sentido, a criação de uma plataforma nacional de MRV, interoperável, auditável e integrada à cadeia de custódia, emerge como condição necessária para reduzir custos de conformidade, prevenir riscos de dupla contagem e viabilizar o reconhecimento internacional do SBCH₂.

No plano institucional, a tabela destaca a importância de uma governança clara e distribuída, com separação funcional entre acreditação, auditoria e emissão de certificados, apoiada por coordenação interinstitucional e participação técnica independente. Como demonstrado na análise comparativa, configurações institucionais previsíveis e transparentes são determinantes

para reduzir riscos regulatórios, fortalecer a confiança do mercado e ampliar a portabilidade das certificações.

A síntese também enfatiza a necessidade de proporcionalidade regulatória e escalabilidade operacional. Critérios excessivamente granulares tendem a criar barreiras de entrada para pequenos e médios produtores e a reforçar a concentração de mercado. Para o contexto brasileiro, recomenda-se a adoção de fases de transição e instrumentos diferenciados que permitam a participação de projetos de diferentes portes e regiões, favorecendo a formação de clusters e o desenvolvimento regional.

Outro eixo estratégico refere-se à integração entre certificação, política industrial e exportação. Os achados indicam que a certificação pode atuar como instrumento estruturante da neointustrialização, desde que alinhada a cadeias produtivas estratégicas, como aço verde, fertilizantes e combustíveis sintéticos, e às exigências dos mercados prioritários de destino. Esse alinhamento reduz incertezas regulatórias e amplia o potencial de atração de investimentos produtivos.

Por fim, a tabela reforça a importância do reconhecimento internacional baseado em equivalência técnica, e não em harmonização rígida. A análise mostrou que a preservação da autonomia regulatória é compatível com a competitividade internacional, desde que o sistema brasileiro seja capaz de demonstrar, de forma transparente e verificável, resultados equivalentes aos de programas consolidados.

Em conjunto, a Tabela 14 oferece um roteiro sintético e operacional para o desenvolvimento do SBCH2, traduzindo os principais achados desta pesquisa em prioridades estratégicas adaptadas à realidade brasileira. Trata-se de um conjunto de diretrizes que permite articular integridade climática, viabilidade econômica e inserção internacional, posicionando a certificação como componente central da governança da transição energética e industrial no país.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A certificação do hidrogênio de baixo carbono consolida-se como uma infraestrutura regulatória internacional em formação, na qual se articulam verificação climática, política

industrial e governança de mercado. A análise comparativa realizada nesta pesquisa demonstra que esse campo evolui por meio de um processo de coevolução entre programas voluntários e mandatórios: inovações metodológicas desenvolvidas no espaço voluntário - como abordagens de rastreabilidade, métricas de ciclo de vida e soluções digitais de MRV - são progressivamente incorporadas por modelos regulatórios formais, que, por sua vez, conferem escala, previsibilidade e legitimidade institucional.

Apesar da diversidade observada em etiquetas, rotas tecnológicas e configurações institucionais, identifica-se uma convergência crescente em torno de um núcleo técnico comum, fundamentado em análise de ciclo de vida, métricas de intensidade de carbono e verificação independente, ancoradas nas normas ISO e no GHG Protocol. Essa base compartilhada cria condições para interoperabilidade funcional entre esquemas, ainda que persistam diferenças relevantes quanto a fronteiras de sistema, requisitos de rastreabilidade e modelos de governança, que continuam a limitar o reconhecimento mútuo pleno.

A comparação entre os programas analisados indica que as divergências são menos conceituais e mais institucionais. Enquanto programas europeus privilegiam controle físico, padronização normativa e alta comparabilidade, modelos asiáticos e programas voluntários tendem a enfatizar flexibilidade operacional, integração industrial e adaptação às condições domésticas. Essa diversidade sugere que a credibilidade global da certificação do hidrogênio não dependerá da uniformização dos modelos, mas da capacidade de demonstrar equivalência técnica verificável, transparência metodológica e consistência nos resultados ambientais.

Um achado central da pesquisa é que o principal desafio dos programas de certificação reside no equilíbrio entre rigor metodológico e viabilidade operacional. Sistemas excessivamente exigentes garantem elevada integridade climática e comparabilidade internacional, mas podem impor custos elevados e restringir a escalabilidade, especialmente em contextos de menor maturidade institucional. Por outro lado, modelos mais flexíveis ampliam a adesão e a difusão tecnológica, mas exigem salvaguardas adicionais para evitar fragmentação metodológica e perda de credibilidade.

Nesse contexto, a digitalização dos sistemas de monitoramento, reporte e verificação emerge como elemento estruturante. A convergência entre acreditação, auditoria e rastreabilidade em plataformas digitais interoperáveis tende a reduzir custos de conformidade, mitigar riscos de

dupla contagem e fortalecer a confiança transnacional. À medida que esses sistemas se consolidam, a certificação deixa de operar apenas como instrumento de verificação ambiental e passa a desempenhar um papel mais amplo como infraestrutura de governança energética global.

Em síntese, a certificação do hidrogênio de baixo carbono configura-se como um regime de governança climática, no qual integridade climática, coordenação regulatória e dinâmica de mercado são continuamente negociadas. O avanço desse regime dependerá menos da imposição de padrões únicos e mais da construção de mecanismos de equivalência, transparência e governança de dados capazes de acomodar trajetórias nacionais diferenciadas sem comprometer a credibilidade ambiental e a funcionalidade dos mercados internacionais.

5.1. Temas para pesquisas futuras

O avanço dos sistemas de certificação do hidrogênio de baixo carbono ainda requer investigações que integrem seus aspectos técnicos, econômicos e institucionais. A partir dos resultados desta pesquisa, destaca-se como próxima fronteira analítica o exame comparativo das fórmulas de cálculo da pegada de carbono adotadas por diferentes programas de certificação. Um estudo quantitativo, baseado em parâmetros de fronteira de sistema, fatores de emissão e hipóteses de substituição energética, permitiria identificar onde e por que surgem as principais divergências metodológicas, contribuindo para o aperfeiçoamento da comparabilidade e da transparência internacional.

Outra vertente promissora de pesquisa diz respeito ao adensamento das cadeias de valor associadas à economia do hidrogênio, especialmente em contextos com baixo grau de industrialização e alta disponibilidade de recursos renováveis, como o brasileiro. Investigações nessa linha poderiam mapear, sob uma perspectiva de planejamento econômico e industrial, as estratégias de integração produtiva, as dependências tecnológicas e os benefícios potenciais de políticas voltadas à agregação de valor local, como a formação de polos industriais e o desenvolvimento de insumos e equipamentos nacionais.

Complementarmente, temas como a integração entre certificação e mercados de carbono e os riscos de dupla contagem de créditos, a digitalização das infraestruturas de MRV e a análise dos efeitos da certificação sobre a competitividade exportadora permanecem como campos de

interesse. Tais estudos podem aprofundar a compreensão da certificação do hidrogênio não apenas como instrumento de verificação ambiental, mas como pilar de governança e desenvolvimento econômico em transições energéticas.

REFERÊNCIAS

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Implementação do marco regulatório de hidrogênio de baixo carbono. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/relatorios/arquivos/implementacaomarcoregulatoriohidrogenio.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025.

ARGUS. *EU RFNBO rules divide hydrogen industry*. Argus Media, 2024. Disponível em: <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2738521-eu-rfnbo-rules-divide-hydrogen-industry>. Acesso em: 3 out. 2025.

BRASIL. Plano de Trabalho Trienal 2023-2025. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/PlanodeTrabalhoTrienalPNH2.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025.

BRASIL. Lei n. 14.948, de 2 de agosto de 2024a. Dispõe sobre a política nacional do hidrogênio de baixa emissão de carbono, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2024a. Edição extra. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14948-2-agosto-2024-796030-publicacaooriginal-172539-pl.html>. Acesso em: 13 mar. 2025.

BRASIL. Lei n. 14.990, de 27 de setembro de 2024b. Institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC); e altera a Lei n. 14.948, de 2 de agosto de 2024. Brasília, 2024b. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14990-27-setembro-2024-796410-publicacaooriginal-173227-pl.html>. Acesso em: 13 mar. 2025.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. *Diretrizes Principais na Regulamentação do H2*. Brasília: MME, 2025. Disponível em <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-discute-diretrizes-na-regulamentacao-do-hidrogenio-de-baixa-emissao-de-carbono/DiretrizesdasnormaseprocedimentosparaimplementaodaPoliticaNacionaldoHidrognio deBaixaEmissodeCarbonoedoProgramaNacionaldoHidrognio.pdf>. Acesso em: 26 set. 2025.

CCEE - CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Manual para a Certificação de Hidrogênio. Versão 1.1. São Paulo: CCEE, 2023. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/documents/80415/919444/Manual%20para%20a%20Certificação%20de%20Hidrogênio%20REV1.1.docx/3b73a55e-3ed3-aeb1-8c92-e6d9c6b8a8d2>. Acesso em: 27 ago. 2025.

CCEE - CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. CCEE SCH2 EU RFNBO Scheme. São Paulo: CCEE, s/d. Disponível em: https://www.ccee.org.br/mercado/certificacoes_de_energia. Acesso em: 27 ago. 2025.

CERTIFHY. CertifHy Scheme. Last update: 28 abr. 2022. Version 2.0. Certification Scheme for Hydrogen, CertifHy Stakeholder Platform, 2022a. Disponível em: https://www.certifhy.eu/wp-content/uploads/2022/06/CertifHy_Scheme-Documents_V2.0_2022-04-28_endorsed_CLEAN.pdf. Acesso em: 27 ago. 2025.

CERTIFHY. CertifHy Scheme Subsidiary Document, Procedure 1.1 - Certificate Issuing. Last update: 28 abr. 2022. CertifHy Stakeholder Platform, 2022b. Disponível em: https://www.certifhy.eu/wp-content/uploads/2022/06/CertifHy_Scheme-Documents_V2.0_2022-04-28_endorsed_CLEAN.pdf. Acesso em: 05 set. 2025.

CERTIFHY. Requirements for Certification Bodies and Auditors. Last update: 08 feb. 2023. CertifHy Stakeholder Platform, 2023. Disponível em: https://www.certifhy.eu/wp-content/uploads/2023/03/CertifHy-GO-System-Documents_CB_Requirements_230208.pdf. Acesso em: 05 set. 2025.

CERTIFHY. EU RFNBO Voluntary Scheme – GHG Emissions & Sustainability v1.5. Bruxelas: CertifHy, 2024. Disponível em: https://www.certifhy.eu/wp-content/uploads/2025/01/CertifHy-VS-Documents-GHG-Sustainability-Emissions_V1.5_FORMATED.pdf. Acesso em: 27 ago. 2025.

DENA; WEC GERMANY. Global Harmonisation of Hydrogen Certification. Berlin, 2022. Disponível em: https://www.weltenergie.de/wp-content/uploads/2022/01/dena_WEC_Harmonisation-of-Hydrogen-Certification_digital_final.pdf. Acesso em: 13 mar. 2025.

DESNZ - DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO. *Low Carbon Hydrogen Certification Scheme - Government Response*. London, Outubro 2023a. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/653b74e880884d000df71bf3/low-carbon-hydrogen-certification-scheme-consultation-response.pdf>. Acesso em: 05 set. 2025.

DESNZ - DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO. *UK Low Carbon Hydrogen Standard: Greenhouse Gas Emissions Methodology and Conditions of Standard Compliance*. Version 3. London, Dezembro 2023b. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6584407fed3c3400133bfd47/uk-low-carbon-hydrogen-standard-v3-december-2023.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2025.

DIGITAL CATAPULT. *Green Hydrogen Certifier: Building Digital Trust in the Hydrogen Economy*. London: Digital Catapult, 2024. Disponível em: https://www.digicatapult.org.uk/wp-content/uploads/2024/09/Hydrogen-Certifier-report-final.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 24 out. 2025.

ENERGYTAG. *Hourly matching exists today – you just have to look*. 2022. Disponível em: <https://energytag.org/hourly-matching-exists-today-you-just-have-to-look/>. Acesso em: 3 out. 2025.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *24/7 Hourly Matching of Electricity*. 2025. Disponível em: <https://www.epa.gov/green-power-markets/247-hourly-matching-electricity>. Acesso em: 3 out. 2025.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. Nota Técnica n. 003/2021. Brasília, 23 fev. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-bases-para-a-consolidacao-da-estrategia-brasileira-do-hidrogenio>. Acesso em: 05 set. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. Commission Delegated Regulation (EU) supplementing Directive (EU) 2024/1788 of the European Parliament and of the Council by specifying a

methodology for assessing greenhouse gas emissions savings from low-carbon fuels. Brussels, 8 July 2025. Disponível em: https://energy.ec.europa.eu/publications/commission-delegated-regulation-eu-specifying-methodology-assessing-greenhouse-gas-emissions-savings_en. Acesso em: 27 ago. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - REPowerEU Plan. Brussels, 18 May 2022. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc930f14-d7ae-11ec-a95f-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF. Acesso em: 27 ago. 2025.

EUROPEAN UNION. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (RED II). Brussels: European Parliament and Council, 2018. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj/eng>. Acesso em: 27 ago. 2025.

EUROPEAN UNION. Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652 (RED III). Brussels: European Parliament and Council, 2023. Disponível em <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>. Acesso em: 27 ago. 2025.

EUROPEAN UNION. COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2023/1184, of 10 February 2023, supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a Union methodology setting out detailed rules for the production of renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin. *Official Journal of the European Union*, L 157, 20 June 2023a, p. 11-19. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/1184/oj. Acesso em: 27 ago. 2025.

EUROPEAN UNION. COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2023/1185, of 10 February 2023, supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a minimum threshold for greenhouse gas emissions savings for recycled carbon fuels and by specifying a methodology for assessing greenhouse gas emissions savings from renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin and from recycled carbon fuels. *Official Journal of the European Union*, L 157, 20 June 2023b, p. 20-33. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/1185/oj. Acesso em: 27 ago. 2025.

FICHTNER - GMBH & CO. KG. *In-Depth Analysis of Green Hydrogen Certification Processes in the EU: Advisory Report as Guidance for the Development of Digital Solutions*. Bonn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2024. Relatório elaborado no âmbito do International Hydrogen Ramp-up Programme (H2Uppp) do German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK). Disponível em: https://h2lac.org/wp-content/uploads/2024/07/7046_1-240331H2Uppp-Green-Hydrogen-Certification-Schemes-extended-report-1.pdf. Acesso em: 24 out. 2025.

FLA - FINANCE & LEASING ASSOCIATION. Government publishes transport decarbonisation plan. London, 2021. Disponível em: <https://fla.org.uk/government-publishes-transport-decarbonisation-plan/>. Acesso em: 2 out. 2025.

GABRIELLI, José Sérgio; TOKARSKI, André Pereira R. Estudos regulatórios para a certificação do hidrogênio verde no Brasil. *Revista Princípios*, v. 170, p. 93-112, maio/ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.14295/principios.2675-6609.2024.170.005>. Acesso em: 13 mar. 2025.

GALLEGOS, F. Bridging the gap: certification schemes for sustainable hydrogen in global trade. *Journal for European Environmental & Planning Law*, v. 21, n. 3-4, p. 239-273, 2024. DOI: 10.1163/18760104-21030005. Disponível em: <https://doi.org/10.1163/18760104-21030005>. Acesso em: 06 mar. 2025.

GH2 - GREEN HYDROGEN ORGANISATION. The Green Hydrogen Standard. Version 1.1. jan. 2023. Disponível em: https://gh2.org/sites/default/files/2023-01/GH2_Standard_A5_JAN%202023_1.pdf. Acesso em: 27 ago. 2025.

GH2 - GREEN HYDROGEN ORGANISATION. Accreditation and Certification. In: Green Hydrogen Standard. s/d. Disponível em: <https://www.greenhydrogenstandard.org/standard/accreditation-and-certification>. Acesso em: 06 set. 2025.

GH2 - GREEN HYDROGEN ORGANISATION. Green Hydrogen Organisation and Trovivo announce partnership to establish a global registry for green hydrogen and green hydrogen derivative certification. Rotterdam: Green Hydrogen Organisation, 13 maio 2024. Disponível em: <https://gh2.org/article/green-hydrogen-organisation-and-trovivo-announce-partnership-establish-global-registry-green>. Acesso em: 24 out. 2025.

GIZ; SAP. In-Depth Analysis of Green Hydrogen Certification Processes in the EU: Advisory Report as Guidance for the Development of Digital Solutions. [S.l.]: GIZ, 2024. Disponível em https://h2lac.org/wp-content/uploads/2024/07/7046_1-240331H2Uppp-Green-Hydrogen-Certification-Schemes-extended-report-1.pdf. Acesso em: 13 mar. 2025.

GOODWIN, Daniel; GALE, Fred; LOVELL, Heather; BEASY, Kim; MURPHY, Hannah; SCHOEN, Marion. Sustainability certification for renewable hydrogen: an international survey of energy professionals. *Energy Policy*, v. 192, p. 114231, 2024. DOI: 10.1016/j.enpol.2024.114231. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114231>. Acesso em: 06 mar. 2025.

GOVERNMENT OF INDIA - MINISTRY OF NEW AND RENEWABLE ENERGY. Green Hydrogen Certification Scheme of India. National Green Hydrogen Mission, Apr. 2025. Disponível em: <https://cdnbbsr.s3waas.gov.in/s3716e1b8c6cd17b771da77391355749f3/uploads/2025/05/202505052107647402.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2025.

GROUP STANDARDS - PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. T/CAB 0078-2020 – Low Carbon Hydrogen, Clean Hydrogen and Renewable Hydrogen Standard and Confirmation. Beijing: China Industry-University-Research Cooperation Promotion Association, 2020. Disponível em: <https://www.antpedia.com/standard/en/1949734495.html>. Acesso em: 13 mar. 2025.

GÜL, Timur; VAN HULST, Noé. Why clearer terminology for hydrogen could unlock investment and scale up production. IEA Commentary, 29 jun. 2023. Disponível em:

<https://www.iea.org/commentaries/why-clearer-terminology-for-hydrogen-could-unlock-investment-and-scale-up-production>. Acesso em: 05 set. 2025.

HARTMANN, Nuria; PRADELLI, Valentina; MÁRQUEZ, Juan Sebastián; GISCHLER, Christiaan; BOECK DAZA, Eric Fernando; GALEANO, Paola. *Guide for the Implementation of a Hydrogen Certification System in Latin America and the Caribbean*. Washington, D.C.: Inter-American Development Bank, Dec. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.18235/0005315>. Disponível em: <https://doi.org/10.18235/0005315>. Acesso em: 06 mar. 2025.

HYDROGEN COUNCIL; MCKINSEY & COMPANY. *Hydrogen Insights 2024*. Setembro de 2024. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2024/09/Hydrogen-Insights-2024.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025.

HYDROGEN COUNCIL. *Hydrogen Certification 101*. Julho de 2023. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/08/Hydrogen-Certification-101.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Countries & Regions*. s/d. Disponível em: <https://www.iea.org/countries>. Acesso em: 26 oct. 2025

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global Hydrogen Review 2024*. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025.

IPHE - INTERNATIONAL PARTNERSHIP FOR HYDROGEN AND FUEL CELLS IN THE ECONOMY. *Comparison of Hydrogen Certification Schemes*. Dezembro de 2024. Disponível em: https://www.iphe.net/_files/ugd/45185a_95745afdccf3442983d841adf5735d8c.pdf. Acesso em: 13 mar. 2025.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Green Hydrogen: A Guide to Policy Making*. Abu Dhabi: IRENA, 2020. Disponível em: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00976.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Shaping Sustainable International Hydrogen Value Chains*. Abu Dhabi: IRENA, 2024. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Shaping_sustainable_hydrogen_value_chains_2024.pdf. Acesso em: 13 mar. 2025.

IRENA COALITION FOR ACTION. *Decarbonising End-Use Sectors: Green Hydrogen Certification*. Abu Dhabi: IRENA, 2022. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_Green_Hydrogen_Certification_Brief_2022.pdf. Acesso em: 13 mar. 2025.

IRENA; RMI. *Creating a Global Hydrogen Market: Certification to Enable Trade*. Abu Dhabi: IRENA, 2023. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jan/IRENA_Creating_a_global_hydrogen_market_2023.pdf. Acesso em: 13 mar. 2025.

ISCC SYSTEM GMBH. ISCC EU 202-6 Renewable Fuels of Non-Biological Origin (RFNBOs) and Recycled Carbon Fuels (RCFs). Version 1.4, 2025a. Disponível em: https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2025/01/ISCC_EU_202-6_RFNBOs_and_RCF_v1.4-1.pdf. Acesso em: 27 ago. 2025.

ISCC SYSTEM GMBH. ISCC EU 103 Requirements for Certification Bodies and Auditors. Version 4.2. Valid from: 21 May 2025b. © 2025 ISCC System GmbH. Disponível em: https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2025/04/ISCC_EU_103_Requirements_for_CBs_and_Auditors_v4.2.pdf. Acesso em: 05 set. 2025.

JAPAN. Hydrogen Society Promotion Act. Tokyo: Government of Japan, 2024. Disponível em: <https://laws.e-gov.go.jp/law/506AC0000000037>. Acesso em: 27 ago. 2025.

KOREA, REPUBLIC OF. 2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea: Towards a Sustainable and Green Society. The Government of the Republic of Korea, dez. 2020. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS1_RKorea.pdf. Acesso em: 27 ago. 2025.

KTC e KTR. Operational Rules for the Clean Hydrogen Certification Operating Agency. Seoul, 2025. Disponível em: https://www.keei.re.kr/boardDownload.es?bid=0024&list_no=125275&seq=1. Acesso em: 27 ago. 2025.

LEGETT, M. AND GILLENWATER, M. “Limitations of Hourly Matching Claims for Scope 2 Reporting.” Evergreen and Greenhouse Gas Management Institute, 2025. Disponível em: <https://ever.green/papers/hourly-matching>. Acesso em: 3 out. 2025.

LIU, Wei; WAN, Yanming; XIONG, Yalin; GAO, Pengbo. Green hydrogen standard in China: standard and evaluation of low-carbon hydrogen, clean hydrogen, and renewable hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 58, p. 24584-24591, 2022. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.193. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.193>. Acesso em: 06 mar. 2025.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2): Propostas e Diretrizes. Brasília: Ministério de Minas e Energia, jul. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogênioRelatríodiretrizes.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025.

REDCERT GMBH. Scheme Principles for the Production of RFNBO and RCF. Version EU 01. Bonn: REDcert GmbH 2024a. Disponível em: https://www.redcert.org/images/REDcert_EU_210525/SP_Production_of_RFNBO_and_RCF_Vers01.pdf. Acesso em: 27 ago. 2025.

REDCERT GMBH. Scope and basic scheme requirements. Version EU 07. Bonn: REDcert GmbH 2024b. Disponível em: https://www.redcert.org/images/REDcert_EU_210525/SP_EU_Basic_Vers07.pdf. Acesso em: 05 set. 2025.

SAP. *Green Proof for Hydrogen and Derivatives: Digital Solutions to Support Certification*. Walldorf: SAP SE; GIZ H2Uppp, 2023. Disponível em: https://h2lac.org/wp-content/uploads/2024/07/7047_2-H2Uppp-Green-Proof-Digital-Solutions-to-support-certification-Report-by-SAP-1.pdf. Acesso em: 24 out. 2025.

SIFFERT, Nelson; ROCHA, Katia. O Mercado do hidrogênio de baixo carbono no Brasil: perspectivas e desafios até 2030. Brasília, fevereiro de 2025. (Texto para Discussão, n. 3082). DOI: <https://dx.doi.org/10.38116/td3082-port>. Acesso em: 13 mar. 2025.

TÜV RHEINLAND. Standard H2.21: Renewable and Low-Carbon Hydrogen Fuels. Köln: TÜV Rheinland, 2023. Disponível em <https://www.tuv.com/content-media-files/master-content/global-landingpages/images/hydrogen/tuv-rheinland-hydrogen-standard-h2.21-v2.1-2023-en.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2025.

TÜV SÜD. TÜV SÜD Standard CMS 70: Erzeugung von Grünem Wasserstoff und Wasserstoff-Derivaten. Version 07/2024. Certification Body “Climate and Energy” – TÜV SÜD, 2024. Disponível em: <https://www.tuvsud.com/de-at/-/media/de/industry-service/pdf/allgemein/tv-sd-standard-cms-70grundundoptionaleanforderungen072024deen.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2025.

UK DFT – UNITED KINGDOM DEPARTMENT FOR TRANSPORT. RTFO Guidance for Renewable Fuels of Non-Biological Origin. London: Department for Transport, January 2024. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/675855ec82c7cd4258eb64aa/rtfo-guidance-for-renewable-fuels-of-non-biological-origin.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2025.

UK DFT – UNITED KINGDOM DEPARTMENT FOR TRANSPORT. RTFO and SAF Mandate Third Party Assurance Guidance. London: Department for Transport, January 2025. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/67626ca7d20fc50099e1907f/rtfo-and-saf-mandate-third-party-assurance-guidance-2025.pdf>. Acesso em: 05 SET. 2025.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Kyoto, 1997. Disponível em: https://unfccc.int/kyoto_protocol. Acesso em: 5 out. 2025.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. *Tool for the Demonstration and Assessment of Additionality (Version 01)*. CDM Executive Board, Bonn, 2004. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools>. Acesso em: 5 out. 2025.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. *Article 6.4 Mechanism – Standard: Demonstration of additionality in mechanism methodologies, n. A6.4-SBM015-A11*, Version 1.0. 14 fev. 2025. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/A6.4-SBM015-A11.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2025.

VELAZQUEZ ABAD, Anthony; DODDS, Paul E. Green hydrogen characterisation initiatives: definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy*, v. 138, p. 111300,

2020. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111300. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111300>. Acesso em: 06 mar. 2025.

WHITE, Lee V.; FAZELI, Reza; CHENG, Wenting; AISBETT, Emma; BECK, Fiona J.; BALDWIN, Kenneth G. H.; HOWARTH, Penelope; O'NEILL, Lily. Towards emissions certification systems for international trade in hydrogen: the policy challenge of defining boundaries for emissions accounting. *Energy*, v. 215, pt. A, p. 119139, 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119139. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119139>. Acesso em: 06 mar. 2025.

WORLD ENERGY COUNCIL. *World Energy Trilemma 2024: Evolving with Resilience and Justice*. London: World Energy Council, 2024. Disponível em: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/2024_World_Energy_Trilemma_Full_Report_FINAL.pdf?v=1741277068. Acesso em: 02 out. 2025.

GLOSSÁRIO

Adicionalidade: Capacidade de um projeto de gerar reduções de emissões que não ocorreriam na ausência da intervenção. No contexto do hidrogênio, significa que a eletricidade renovável utilizada deve provir de capacidade nova e adicional, criada para alimentar o eletrolisador e não deslocar energia já existente (UNFCCC, 2025; IRENA, 2023).

Autoridade acreditadora: Entidade responsável por avaliar e monitorar a competência técnica, independência e integridade de organismos de certificação, garantindo que operem conforme normas internacionais, como a ISO 17065 (HYDROGEN COUNCIL, 2023).

Autoridade emissora: Organismo responsável por emitir certificados após validação e verificação realizadas por entidades certificadoras, garantindo que as informações estejam em conformidade com os requisitos do programa (HYDROGEN COUNCIL, 2023).

Cadeia de custódia: Processo de transferência sequencial e rastreamento de materiais e recursos ao longo da cadeia de suprimentos, que pode ocorrer via modelos *mass balance* ou *book and claim* (IRENA; RMI, 2023; HYDROGEN COUNCIL, 2023).

Correlação geográfica: Critério que exige proximidade física ou conexão entre a fonte de energia renovável e a planta de produção de hidrogênio, geralmente dentro da mesma rede interconectada (IRENA; RMI, 2023).

Correlação temporal: Relação entre o momento em que a energia renovável é gerada e o momento em que é consumida para produzir hidrogênio, podendo ser anual, mensal ou horária, conforme o grau de rigor do programa (IRENA; RMI, 2023; IEA, 2024).

Entidade responsável: Organização pública ou privada que desenvolve e supervisiona um programa de certificação, definindo critérios, governança e procedimentos de auditoria (HYDROGEN COUNCIL, 2023).

Etiqueta atribuída ao produto: Selo ou marca que indica o cumprimento de requisitos definidos por um programa de certificação, como 'hidrogênio renovável' ou 'de baixo carbono' (HYDROGEN COUNCIL, 2023).

Ferramenta de ACV: Instrumento digital ou metodológico usado para calcular as emissões de gases de efeito estufa associadas à produção de hidrogênio segundo metodologias de ACV.

Jurisdição: Área geográfica de aplicação de um programa de certificação, podendo ser nacional, regional ou internacional.

Limite de emissões: Valor máximo de intensidade de carbono permitido para classificação do hidrogênio como de baixo carbono ou renovável, expresso em $\text{kgCO}_2\text{e/kgH}_2$ ou $\text{gCO}_2\text{e/MJ}$ (IRENA; RMI, 2023).

Limite de sistema: Delimitação do ciclo de vida considerada no cálculo das emissões, por exemplo, do 'berço ao portão' (produção) ou 'berço à roda' (uso final) (IRENA; RMI, 2023).

Metodologia de PCF: Procedimento de cálculo que determina a intensidade de emissões associada ao ciclo de vida do hidrogênio, baseado em normas ISO 14067 e ISO 14040/44.

Normas de referência: Conjunto de padrões técnicos e internacionais que orientam as diferentes etapas do processo de certificação, incluindo a acreditação dos organismos (como a ISO 17065), a condução das auditorias (com base em normas como a ISO 19011) e a emissão dos certificados de conformidade, assegurando consistência, credibilidade e reconhecimento internacional dos resultados (HYDROGEN COUNCIL, 2023).

Propósito declarado: Objetivo formal de um programa de certificação, por exemplo, comprovar conformidade regulatória, viabilizar acesso a incentivos ou promover práticas sustentáveis.

Produtos ou cadeias certificáveis: Abrangência do programa em relação aos produtos (hidrogênio e derivados, como amônia e combustíveis sintéticos) e suas cadeias de custódia.

Rotas de produção contempladas: Tecnologias e processos aceitos para produção de hidrogênio, como eletrólise, reforma com captura de carbono (CCS) ou rotas baseadas em biomassa.

Situação operacional: Estado atual do programa de certificação, podendo estar em desenvolvimento, fase piloto ou operação plena.

Transparência: Princípio que assegura abertura e acesso público às informações de certificação, incluindo metodologias, resultados de auditoria e certificados emitidos (IRENA; RMI, 2023).

Uso de energia renovável: Critério que define o percentual mínimo ou condição obrigatória de uso de eletricidade proveniente de fontes renováveis na produção de hidrogênio.

ANEXO A – RELAÇÃO DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS POR TIPO

Tipo 1 – Documentos oficiais e relatórios técnicos

(agências reguladoras e entidades gestoras de programas de certificação)

- ANP (2024). Implementação do marco regulatório de hidrogênio de baixo carbono.
- Brasil (2023). Plano de Trabalho Trienal 2023–2025.
- Brasil (2024a). Lei n. 14.948 – Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono.
- Brasil (2024b). Lei n. 14.990 – Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC).
- CCEE (2023). Manual para a Certificação de Hidrogênio – Versão 1.1.
- CCEE (s/d). CCEE SCH2 EU RFNBO Scheme.
- CertifHy (2022a). CertifHy Scheme – Version 2.0.
- CertifHy (2022b). Procedure 1.1 – Certificate Issuing.
- CertifHy (2023). Requirements for Certification Bodies and Auditors.
- CertifHy (2024). EU RFNBO Voluntary Scheme – GHG Emissions & Sustainability.
- DESNZ (2023a). Low Carbon Hydrogen Certification Scheme – Government Response.
- DESNZ (2023b). UK Low Carbon Hydrogen Standard – Methodology and Conditions of Compliance.
- EPA (2025). 24/7 Hourly Matching of Electricity.
- EPE (2021). Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio.
- European Commission (2022). REPowerEU Plan.
- European Commission (2025). Delegated Regulation – Metodologia para low-carbon fuels.
- European Union (2018). Directive (EU) 2018/2001 – RED II.
- European Union (2023). Directive (EU) 2023/2413 – RED III.
- European Union (2023a). Commission Delegated Regulation (EU) 2023/1184 – Metodologia RFNBO.
- European Union (2023b). Commission Delegated Regulation (EU) 2023/1185 – Reduções mínimas de emissões.
- Government of India – MNRE (2025). Green Hydrogen Certification Scheme of India.

- Group Standards – PR China (2020). T/CAB 0078-2020 – Low Carbon Hydrogen, Clean Hydrogen and Renewable Hydrogen Standard and Confirmation.
- Japan (2024). Hydrogen Society Promotion Act.
- Korea, Republic of (2020). 2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea.
- KTC; KTR (2025). Operational Rules for the Clean Hydrogen Certification Operating Agency.
- MME (2021). Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2): Propostas e Diretrizes.
- MME (2025). Diretrizes principais na regulamentação do hidrogênio de baixa emissão de carbono.
- REDcert GmbH (2024a). Scheme Principles for the Production of RFNBO and RCF.
- REDcert GmbH (2024b). Scope and basic scheme requirements – Version EU 07.
- TÜV Rheinland (2023). Standard H2.21 – Renewable and Low-Carbon Hydrogen Fuels.
- TÜV SÜD (2024). Standard CMS 70 – Green Hydrogen and Derivatives.
- UK DfT (2024). RTFO Guidance for Renewable Fuels of Non-Biological Origin.
- UK DfT (2025). RTFO and SAF Mandate Third Party Assurance Guidance.
- ISCC System GmbH (2025a). ISCC EU 202-6 – RFNBOs and RCFs.
- ISCC System GmbH (2025b). ISCC EU 103 – Requirements for Certification Bodies and Auditors.

Tipo 2 – Publicações institucionais e científicas

(organizações internacionais, think tanks e instituições técnicas)

- Argus (2024). EU RFNBO rules divide hydrogen industry.
- DENA; WEC Germany (2022). Global Harmonisation of Hydrogen Certification.
- Digital Catapult (2024). Green Hydrogen Certifier: Building Digital Trust in the Hydrogen Economy.
- EnergyTag (2022). Hourly matching exists today – you just have to look.
- Fichtner (2024). In-Depth Analysis of Green Hydrogen Certification Processes in the EU.
- FLA (2021). Government publishes transport decarbonisation plan.
- GH2 – Green Hydrogen Organisation (2023). The Green Hydrogen Standard.

- GH2 – Green Hydrogen Organisation (2024). Global registry for green hydrogen and derivatives.
- GH2 – Green Hydrogen Organisation (s/d). Accreditation and Certification (Green Hydrogen Standard).
- GIZ; SAP (2024). In-Depth Analysis of Green Hydrogen Certification Processes in the EU.
- Hydrogen Council (2023). Hydrogen Certification 101.
- Hydrogen Council; McKinsey & Company (2024). Hydrogen Insights 2024.
- IEA (2024). Global Hydrogen Review 2024.
- IEA (s/d). Countries & Regions.
- IRENA (2020). Green Hydrogen: A Guide to Policy Making.
- IRENA (2024). Shaping Sustainable International Hydrogen Value Chains.
- IRENA Coalition for Action (2022). Decarbonising End-Use Sectors: Green Hydrogen Certification.
- IRENA; RMI (2023). Creating a Global Hydrogen Market: Certification to Enable Trade.
- IPHE (2024). Comparison of Hydrogen Certification Schemes.
- SAP; GIZ H2Uppp (2023). Green Proof for Hydrogen and Derivatives.
- UNFCCC (1997). Kyoto Protocol.
- UNFCCC (2004). Tool for the Demonstration and Assessment of Additionality.
- UNFCCC (2025). Article 6.4 Mechanism – Standard on Additionality.
- World Energy Council (2024). World Energy Trilemma 2024.

Tipo 3 – Artigos acadêmicos e textos analíticos especializados

- Gabrielli, J. S.; Tokarski, A. P. R. (2024). Estudos regulatórios para a certificação do hidrogênio verde no Brasil.
- Gallegos, F. (2024). Certification schemes for sustainable hydrogen in global trade.
- Goodwin, D.; Gale, F.; Lovell, H. et al. (2024). Sustainability certification for renewable hydrogen.
- Gül, T.; Van Hulst, N. (2023). Why clearer terminology for hydrogen could unlock investment and scale up production.

- Hartmann, N.; Pradelli, V.; Márquez, J. S. et al. (2023). Hydrogen certification system implementation in Latin America and the Caribbean.
- Leggett, M.; Gillenwater, M. (2025). Limitations of Hourly Matching Claims for Scope 2 Reporting.
- Liu, W.; Wan, Y.; Xiong, Y.; Gao, P. (2022). Green hydrogen standard in China: evaluation of low-carbon, clean, and renewable hydrogen.
- Siffert, N.; Rocha, K. (2025). O mercado do hidrogênio de baixo carbono no Brasil: perspectivas e desafios até 2030.
- Velazquez Abad, A.; Dodds, P. E. (2020). Green hydrogen characterisation initiatives and guarantees of origin.
- White, L. V.; Fazeli, R.; Cheng, W. et al. (2021). Emissions certification systems for international hydrogen trade.