EVENTO ON-LINE
ConBRepro
XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
02 a 04 de dezembro de 2026
Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

Hidrogênio verde e mercado de carbono: Mapeamento de metodologias de linha de base em mecanismos de crédito de carbono

Felipe Dalla Vecchia Lourenço
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Santa Catarina
Caroline Rodrigues Vaz
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Santa Catarina
Mauricio Uriona Maldonado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Santa Catarina

Resumo: As emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) seguem em trajetória ascendente, enquanto o hidrogênio verde (H_2V) se destaca como vetor estratégico para a descarbonização industrial, logística e energética. No Brasil, apesar do elevado potencial de produção de H_2V a partir de fontes renováveis, seu custo nivelado (LCOH) ainda limita a competitividade frente ao hidrogênio convencional, reforçando a relevância dos créditos de carbono como mecanismo de viabilização financeira. Este artigo teve como objetivo identificar metodologias de linha de base aplicáveis ao H_2V e seus derivados em mecanismos de crédito de carbono regulados e voluntários, por meio de uma *Scoping Review* (ARKSEY; O'MALLEY, 2005), considerando o MDL, o PACM e programas avaliados pelo ICVCM. Foram identificadas seis metodologias tecnicamente distintas, aprovadas ou em desenvolvimento: AM0124, A6.4-PNM001, A6.4-PMM006, GCCNMT002, GS4GG PAA M400-01 e M400-02. Os resultados indicam concentração em aplicações relacionadas à amônia verde e diferentes estágios de desenvolvimento, evidenciando lacunas metodológicas e oportunidades para avaliação e aprimoramento das abordagens existentes.

Palavras-chave: Hidrogênio verde; Metodologias de linha de base; Créditos de carbono.

Green hydrogen and carbon market: Mapping baseline methodologies in carbon credit mechanisms

Abstract: Global greenhouse gas (GHG) emissions continue to rise, while green hydrogen (GH_2) stands out as a strategic vector for industrial, logistics, and energy decarbonization. In Brazil, despite its high potential for producing green hydrogen from renewable sources, its levelized cost of hydrogen (LCOH) still limits its competitiveness compared with conventional hydrogen, reinforcing the relevance of carbon credits as a mechanism for financial viability. This article aimed to identify baseline methodologies applicable to green hydrogen and its derivatives within regulated and voluntary carbon credit mechanisms through a Scoping Review (ARKSEY; O'MALLEY, 2005), considering the CDM, PACM, and programs assessed by the ICVCM. Six technically distinct methodologies, approved or under development, were identified: AM0124, A6.4-PNM001, A6.4-PMM006, GCCNMT002, GS4GG PAA M400-01, and M400-02. The results indicate a concentration on applications related to green ammonia and different stages of development, highlighting methodological gaps and opportunities for evaluating and improving existing approaches.

Keywords: Green hydrogen; Baseline methodologies; Carbon credits.

1. Introdução

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) representam um desafio global premente, impulsionado pelo uso irrestrito de combustíveis fósseis (IEA, 2021). Crippa *et al*. (2025) indicam que as emissões globais de GEE continuam a crescer, atingindo novos recordes anualmente, apesar dos esforços de mitigação. No Brasil, as emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) atingiram 2,145 bilhões de toneladas em 2024, das quais 24% foram provenientes dos setores de processos industriais e energia (SEEG, 2025).

Uma alternativa relevante para reduzir parte dessas emissões consiste na substituição do hidrogênio convencional, cinza ou marrom, por hidrogênio verde (H_2V), vetor energético que pode ser aplicado na descarbonização de processos industriais, na produção de fertilizantes por meio da amônia verde e no transporte de cargas e passageiros (IPCC, 2023). Enquanto a produção global de hidrogênio emitiu cerca de 920 milhões de toneladas de CO_2eq em 2023, com o hidrogênio cinza gerando entre 10 e 26 kg CO_2eq por kg de H_2 (IEA, 2024), o H_2V, produzido por eletrólise da água a partir de energias renováveis, pode reduzir entre 60% e 90% dessas emissões (HOVOGEN, 2026; IRENA, 2020).

O Brasil reúne condições favoráveis para o desenvolvimento de uma economia baseada em H_2V, em razão de seus recursos naturais e da configuração de sua matriz elétrica, que manteve 86,8% de participação de fontes renováveis em 2025 (EPE, 2026; LO FARO; CANTANE; NARO, 2023). Segundo Silva e Abreu (2026), o país deverá deter, em 2030, o menor custo de produção de hidrogênio verde a partir de fontes eólicas entre as nações analisadas. Entretanto, apesar do potencial técnico estimado em 1,8 bilhão de toneladas anuais (MCKINSEY & COMPANY, 2021; IRENA, 2022), o setor ainda carece de mecanismos financeiros que assegurem a viabilidade dos investimentos, uma vez que o custo nivelado de produção (LCOH) do H_2V, entre US$ 2,94 e 7,38/kgH_2 (CELA, 2024), permanece pouco competitivo frente ao hidrogênio cinza, cujo custo varia entre US$ 1,00 e 2,50/kgH_2 (IEA, 2022), mesmo com os incentivos fiscais do Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro) e do Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC), instituídos pela Lei nº 14.948/2024 (BRASIL, 2024).

Nesse contexto, os projetos de crédito de carbono emergem como alternativa complementar para mitigar esse descasamento financeiro (IRENA, 2022). Existem metodologias de linha de base internacionalmente aprovadas, como a AM0124 do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que estabelece parâmetros para a contabilização de reduções de emissões pela produção de hidrogênio verde (UNFCCC, 2023). Contudo, tais metodologias fundamentam-se em cenários contrafactuais que pressupõem a substituição de hidrogênio fóssil, desconsiderando as particularidades de matrizes energéticas já majoritariamente renováveis, como a brasileira (PIOVANI *et al*., 2023). Esse cenário começou a se alterar apenas recentemente: ao longo de 2026, a Gold Standard aprovou suas primeiras metodologias voluntárias dedicadas ao segmento, a GS4GG (*Gold Standard for the Global Goals*) PAA M400-01, para amônia verde, e a GS4GG PAA M400-02, para hidrogênio verde, com parâmetros próprios de adicionalidade e correlação temporal (GOLD STANDARD, 2026a, 2026b), o que evidencia que a lacuna metodológica identificada permanece um problema atual, e não apenas histórico.

Do ponto de vista da produção científica, o campo das metodologias de linha de base voltadas ao hidrogênio verde e a seus derivados, como fertilizantes e amônia verde, constitui uma fronteira ainda em consolidação, marcada pela escassez de consenso e pela dispersão dos critérios adotados entre os organismos certificadores (ALONSO *et al*., 2025). Estudos recentes sobre o potencial do hidrogênio verde no Brasil concentram-se em aspectos de viabilidade econômica, custo nivelado e competitividade setorial, sem avançar sobre o panorama metodológico que deveria orientar a contabilização das emissões

evitadas em projetos nacionais (SANTOS JÚNIOR; CARVALHO; SILVA, 2025; SILVA *et al*., 2025). Verifica-se, assim, uma lacuna na literatura quanto à identificação sistematizada de quais metodologias de linha de base, entre os mecanismos regulados e voluntários de crédito de carbono, são efetivamente aplicáveis ao H_2V e a seus derivados, e em que estágio normativo se encontram, condição prévia e necessária a qualquer análise posterior de convergência, aderência ou aprimoramento metodológico.

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo identificar o conjunto de metodologias de linha de base aplicáveis ao hidrogênio verde e a seus derivados nos mecanismos de crédito de carbono regulados e voluntários, mapeando seu organismo emissor, escopo de aplicação e estágio normativo vigente. Para tanto, foi empregada uma *Scoping Review*, segundo o protocolo de Arksey e O'Malley (2005), estruturada na delimitação do universo de mecanismos a serem consultados e na aplicação de filtros sucessivos de elegibilidade.

Além desta introdução, este artigo apresenta os procedimentos metodológicos; o referencial teórico sobre hidrogênio verde, mercado de carbono e o conceito de linha de base e adicionalidade; os resultados e a discussão da busca sistemática realizada; e, por fim, as conclusões do estudo, suas contribuições e limitações.

2. Procedimentos metodológicos

A identificação das metodologias de linha de base aplicáveis ao hidrogênio verde e a seus derivados foi conduzida por meio da etapa de identificação de estudos relevantes prevista no protocolo de *Scoping Review* de Arksey e O'Malley (2005). A busca partiu da delimitação do universo de mecanismos de crédito de carbono a serem consultados, segmentado em regulados e voluntários, conforme ilustra a Figura 1.

No âmbito regulado, foram definidos como bases de pesquisa o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e o Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (PACM), instituído pelo artigo 6.4 do Acordo de Paris, por se tratarem dos dois únicos mecanismos centralizados e geridos diretamente pela United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), sendo o segundo o sucessor formal do primeiro, uma vez que a Conferência das Partes na qualidade de Reunião das Partes do Protocolo de Quioto (CMP20), realizada durante a COP30, decidiu pela extinção gradual do MDL até 31 de dezembro de 2026, com a transição de parte de suas metodologias e recursos remanescentes para o PACM (UNFCCC, 2025).

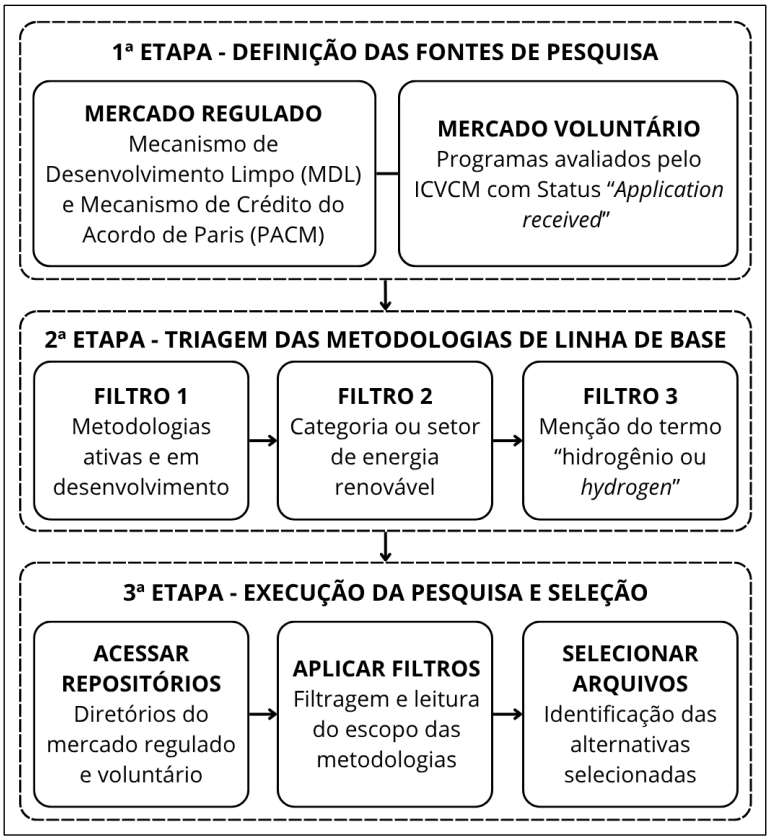
Já no âmbito voluntário, em coerência com a recomendação dos autores do protocolo de buscar fontes capazes de assegurar abrangência ao mapeamento, optou-se por não realizar uma seleção arbitrária de programas, mas por utilizar como universo de busca a totalidade dos programas que figuravam com status "*Application received*" no processo de avaliação do Integrity Council for the Voluntary Carbon Market (ICVCM), organismo independente reconhecido como o principal órgão de governança do mercado voluntário de carbono, responsável por avaliar a aderência dos programas de certificação aos Core Carbon Principles (CCPs), *benchmark* global de integridade adotado pelo mercado (ICVCM, 2024).

Definido o universo de busca, a *Scoping Review* avançou para a etapa de seleção dos estudos, operacionalizada por meio de três filtros sucessivos e cumulativos, aplicados às metodologias disponíveis em cada uma das bases selecionadas. O primeiro filtro restringiu o levantamento às metodologias ativas e em desenvolvimento, excluindo-se versões retiradas, descontinuadas ou substituídas sem continuidade nos marcos normativos vigentes de cada programa. O segundo filtro delimitou a busca à categoria ou setor de energia renovável, ou nomenclatura correlata adotada por cada programa, tal como *"Energy industries (renewable/non-renewable sources)"* no MDL e no PACM, por ser o enquadramento sob o qual a produção de hidrogênio verde por eletrólise é tipicamente

classificada nesses repositórios. O terceiro filtro, por sua vez, exigiu a menção explícita do termo “hidrogênio” ou “*hydrogen*” no corpo de cada documento de metodologia pré-selecionado pelos dois primeiros filtros, de modo a captar tanto metodologias dedicadas exclusivamente ao hidrogênio quanto metodologias mais amplas de energia renovável que contemplem, entre suas condições de aplicabilidade, projetos de eletrólise.

Em razão da inexistência de uma interface unificada de consulta entre os programas de crédito de carbono selecionados, a busca ocorreu de forma manual, acessando diretamente o repositório oficial de metodologias de cada mecanismo ou programa, seguida da leitura do escopo e das condições de aplicabilidade de cada documento separadamente, de modo a verificar a ocorrência do termo delimitado. Na lógica do protocolo de Arksey e O'Malley (2005), este procedimento corresponde à etapa de mapeamento dos dados, cujos resultados são apresentados na Seção 4 deste artigo.

Figura 1 - Etapas metodológicas de identificação das metodologias de linha de base



Fonte: elaborado pelos autores (2026), com base em Arksey e O'Malley (2005)

3. Referencial teórico

3.1 Hidrogênio verde e mecanismos de crédito de carbono

O hidrogênio (H) é o elemento químico mais simples da tabela periódica e, apesar de sua abundância no universo, não é encontrado de forma livre na atmosfera terrestre, estando sempre associado a outros elementos, o que exige processos de separação para sua obtenção (ALMEIDA *et al*., 2019). Quando submetido a esses processos, o hidrogênio é classificado não como uma fonte primária de energia, mas como um vetor energético, cujo elevado poder calorífico mássico, cerca de 120 MJ/kg, aproximadamente três vezes superior ao da gasolina, possibilita sua utilização como combustível de alta eficiência (SMINK, 2021).

Diferentes rotas tecnológicas classificam os tipos de hidrogênio conforme sua origem e sua intensidade de emissões: o hidrogênio cinza é obtido por reforma a vapor do metano ou

gaseificação de derivados fósseis; o hidrogênio azul utiliza a mesma rota associada à captura e armazenamento de carbono (CCS); e o hidrogênio verde, foco deste artigo, é produzido pela eletrólise da água, processo eletroquímico que dissocia a molécula H_2O em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) por meio de corrente elétrica contínua, com uso exclusivo de eletricidade proveniente de fontes renováveis (IEA, 2024). Conforme Chatenet *et al*. (2022), as principais tecnologias comerciais para essa eletrólise, alcalina (AWE), de membrana de troca protônica (PEM) e de óxidos sólidos (SOE), apresentam diferentes níveis de maturidade, custo e eficiência energética.

A relevância do H_2V para a transição energética decorre justamente de seu potencial de descarbonização quando comparado às rotas fósseis: a produção por eletrólise a partir de energia renovável dedicada pode alcançar valores inferiores a 1 kg CO_2eq por kg de H_2 produzido, ante os 10 a 26 kg CO_2eq por kg de H_2 da reforma a vapor (IEA, 2024). É justamente esse diferencial de emissões evitadas que fundamenta a possibilidade de conversão de projetos de H_2V em créditos de carbono, desde que existam metodologias de linha de base reconhecidas capazes de quantificar e certificar tais reduções (IRENA, 2022).

O mercado de carbono, por sua vez, constitui um instrumento econômico voltado à mitigação das mudanças climáticas por meio de mecanismos de comércio atrelados a ações de redução ou evitamento de emissões de GEE (PATERSON, 2012). Originado no Protocolo de Quioto de 1997, o mercado de carbono evoluiu para sistemas regulados e voluntários, ambos com foco na criação de incentivos financeiros para a transição a economias de baixo carbono, abrangendo permissões de emissão (*allowances*) e créditos de compensação (*carbon offset*), que operam em escalas nacional e internacional (NEWELL *et al.,* 2014). A principal “moeda” transacionada nesses mercados é o crédito de carbono, unidade mensurável de redução ou remoção de GEE equivalente a uma tonelada de dióxido de carbono equivalente, certificada por padrões internacionais reconhecidos (KOLLMUSS *et al.,* 2008).

3.2 Metodologias de linha de base e o princípio da adicionalidade

No âmbito regulado, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), instituído pelo Protocolo de Quioto, permite que projetos em países em desenvolvimento gerem créditos de carbono a partir da demonstração de adicionalidade, requisito segundo o qual somente devem ser certificadas reduções de emissões que não ocorreriam na ausência do projeto (WARA, 2007). Com a assinatura do Acordo de Paris, o artigo 6.4 estabeleceu o Mecanismo de Crédito do Acordo de Paris (PACM), gerido pela UNFCCC como sucessor formal do MDL, absorvendo parte de suas metodologias e de seus recursos remanescentes (UNFCCC, 2025). Paralelamente, o mercado voluntário de carbono consolidou-se como alternativa que permite a empresas e indivíduos compensar emissões residuais por meio da aquisição de créditos oriundos de projetos certificados por padrões avaliados pelo Integrity Council for the Voluntary Carbon Market (ICVCM), organismo responsável por avaliar a aderência desses programas aos Core Carbon Principles (ICVCM, 2024).

Em ambos os mercados, a certificação de créditos depende da existência de uma metodologia de linha de base, documento técnico-normativo que estabelece o cenário contrafactual de emissões, isto é, o que ocorreria na ausência do projeto, além dos parâmetros de monitoramento, quantificação e demonstração da adicionalidade das reduções alcançadas, condição essencial para a integridade ambiental dos créditos gerados (WORLD BANK GROUP, 2016).

A literatura internacional aponta fragilidades estruturais na lógica da adicionalidade desde a concepção do MDL. Wara (2007) argumenta que o mecanismo funcionou mais como instrumento político e de subsídio do que como mercado eficiente de reduções, uma vez que sua verificação está sujeita a incentivos entre desenvolvedores de projeto e avaliadores, diagnóstico reforçado por Schneider (2007, 2009) em avaliações sistemáticas

de projetos registrados no MDL. Michaelowa *et al*. (2019a, 2019b) destacam que os critérios de adicionalidade precisam ser recalibrados conforme o contexto regulatório e energético de cada país, sob risco de se tornarem barreiras artificiais desconectadas de seu propósito original, enquanto Cullenward e Victor (2020) generalizam essa crítica para os mecanismos de mercado climático como um todo. Evidências mais recentes reforçam esse diagnóstico: Calel *et al.* (2025) estimaram que ao menos 52% dos créditos aprovados no âmbito do MDL foram concedidos a projetos que teriam sido construídos independentemente do mecanismo, e Newlin e Moffa (2025) argumentam que o tratamento binário da adicionalidade distorce os mercados de carbono ao ignorar situações de adicionalidade parcial.

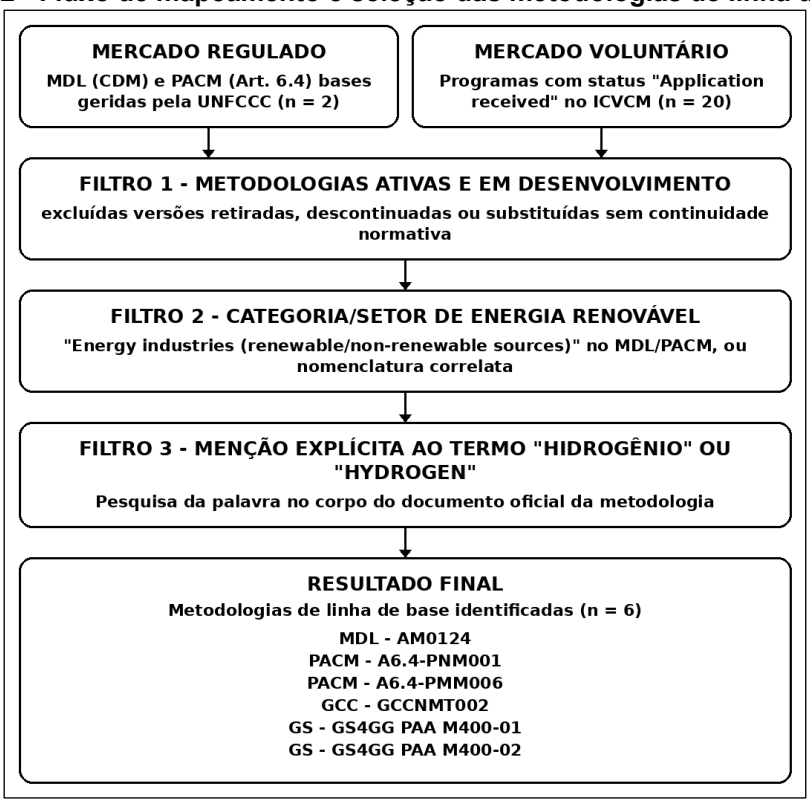
Essa fragilidade metodológica assume contornos particulares quando aplicada ao hidrogênio verde em contextos elétricos já majoritariamente renováveis, como o brasileiro. Metodologias de linha de base internacionalmente consolidadas, como a AM0124, pressupõem cenários de referência fóssil-dependentes, penalizando estruturalmente projetos sustentados por matrizes elétricas limpas (PIOVANI *et al.,* 2023), fenômeno que a literatura recente já reconhece, ainda que de forma incipiente, como um obstáculo à mobilização de recursos climáticos para o setor. É justamente esse descompasso entre os critérios normativos internacionais e a realidade de matrizes elétricas renováveis que reforça a importância de mapear, de forma sistemática e atualizada, quais metodologias de linha de base existem hoje para o H_2V e a seus derivados, antes de se avançar para etapas de avaliação comparativa ou de aprimoramento metodológico.

4. Resultados

No âmbito regulado do mercado de carbono, o universo de busca foi delimitado ao MDL e ao PACM. No MDL, a busca conduzida no repositório oficial de metodologias confirmou a AM0124 - *Hydrogen production from electrolysis of water*, em sua versão 1.1, como uma metodologia de grande escala ativa e vigente desde 27 de setembro de 2023, enquadrada nos escopos setoriais 1 ("*Energy industries - renewable/non-renewable sources*") e 5 ("Chemical industries"), aprovada pelos três filtros de elegibilidade, inclusive pela menção explícita ao termo "*hydrogen*" já no próprio título da metodologia. No PACM, a aplicação dos três filtros identificou duas propostas de metodologia em distintos estágios do fluxo de desenvolvimento normativo do artigo 6.4: a A6.4-PNM001 - *Production of Ammonia through electrolysis of water, air separation and synthesis of hydrogen and nitrogen*, com avaliação inicial concluída pela Secretaria da UNFCCC em 20 de maio de 2024, e a A6.4-PMM006 - *Fertilizer production with renewables-based ammonia*, ambas enquadradas na categoria de energia e mencionando explicitamente o termo "*hydrogen*" ao longo de todo o documento.

No âmbito voluntário, em 2026, vinte programas de certificação compunham o universo de busca por figurarem com status "*Application received*" no ICVCM (ICVCM, 2026). A aplicação cumulativa dos três filtros a esses vinte programas produziu resultados positivos em apenas dois programas. O primeiro correspondeu ao Global Carbon Council (GCC), que retornou a metodologia GCCNMT002 - *Methodology for the Production of Low-Carbon Ammonia*, encontrada, no momento da busca, em fase de desenvolvimento e consulta pública às partes interessadas, na versão draft V1.0-2025. O segundo correspondeu à Gold Standard (GS), que retornou duas metodologias distintas e já aprovadas: a GS4GG PAA M400-01 - *Green Ammonia Production*, aprovada em 3 de junho de 2026, e a GS4GG PAA M400-02 - *Green Hydrogen Production*, aprovada em 2 de setembro de 2026, sendo esta última a primeira metodologia voluntária dedicada especificamente à produção de hidrogênio verde por eletrólise (GOLD STANDARD, 2026a, 2026b). As três metodologias do mercado voluntário mencionam explicitamente o termo "*hydrogen*" ao longo do corpo do documento, superando os três filtros de elegibilidade, conforme sintetiza a Figura 2.

Figura 2 - Fluxo de mapeamento e seleção das metodologias de linha de base



Fonte: elaborado pelos autores (2026)

Ao final da aplicação cumulativa dos três filtros às bases regulada e voluntária, a *Scoping Review* convergiu para seis metodologias de linha de base tecnicamente distintas, aprovadas ou em desenvolvimento, aplicáveis ao hidrogênio verde e a seus derivados em mecanismos de crédito de carbono, sintetizadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Metodologias de linha de base identificadas para o H_2V e seus derivados

Metodologia	Organismo / mecanismo	Mercado	Produto	Versão / status (Seção 4)
AM0124 - Hydrogen production from electrolysis of water	MDL / UNFCCC	Regulado	Hidrogênio	v.1.1 - ativa desde 27/09/2023
A6.4-PNM001 - Production of Ammonia through electrolysis of water, air separation and synthesis of hydrogen and nitrogen	PACM (Art. 6.4) / UNFCCC	Regulado	Amônia	Avaliação inicial concluída em 20/05/2024
A6.4-PMM006 - Fertilizer production with renewables-based ammonia	PACM (Art. 6.4) / UNFCCC	Regulado	Amônia (fertilizante)	Em avaliação, estágio normativo distinto da A6.4-PNM001
GCCNMT002 - Methodology for the Production of Low-Carbon Ammonia	Global Carbon Council (GCC)	Voluntário	Amônia	*Draft* V1.0-2025 - consulta pública
GS4GG PAA M400-01 - Green Ammonia Production	Gold Standard (GS)	Voluntário	Amônia	v.1.0 - aprovada em 03/06/2026
GS4GG PAA M400-02 - Green Hydrogen Production	Gold Standard (GS)	Voluntário	Hidrogênio	v.1.0 - aprovada em 02/09/2026

Fonte: elaborado pelos autores (2026)

Observa-se, a partir do Quadro 1, que apenas duas das seis metodologias identificadas, a AM0124 e a GS4GG PAA M400-02, referem-se diretamente à produção de hidrogênio propriamente dita; as demais quatro metodologias, a A6.4-PNM001, a A6.4-PMM006, a GCCNMT002 e a GS4GG PAA M400-01, voltam-se à produção de amônia verde ou de fertilizantes a partir de amônia renovável, o que reflete a tendência setorial de utilizar o hidrogênio verde como insumo intermediário para produtos de maior facilidade de transporte e comercialização internacional. Observa-se, ainda, uma maturação normativa heterogênea entre os mercados: três das seis metodologias, a AM0124 e as duas metodologias da Gold Standard, já se encontram plenamente aprovadas, ao passo que as demais três, do PACM e do Global Carbon Council, permanecem em distintos estágios de avaliação ou consulta pública, sem aprovação normativa definitiva até o momento da busca.

4.1 Discussões

Os resultados confirmam empiricamente o diagnóstico de Alonso *et al.* (2025) quanto à dispersão de critérios metodológicos no campo do hidrogênio verde: das seis metodologias mapeadas, três organismos distintos, UNFCCC, Global Carbon Council e Gold Standard, adotam abordagens normativas próprias, sem convergência explícita quanto a parâmetros de linha de base ou de adicionalidade, o que corrobora a caracterização do campo como uma fronteira ainda em consolidação.

A predominância de metodologias voltadas à amônia verde, quatro das seis identificadas, sobre as duas dedicadas ao hidrogênio molecular (AM0124 e GS4GG PAA M400-02), dialoga com a literatura sobre a cadeia de valor do H_2V, na qual a amônia é frequentemente adotada como vetor de exportação por sua maior densidade energética volumétrica e pela infraestrutura logística já consolidada para fertilizantes nitrogenados. Essa constatação amplia a aderência potencial dessas quatro metodologias ao cenário nacional, dado que a maior parte dos projetos brasileiros anunciados contempla rotas de amônia verde para exportação, ainda que nenhuma delas tenha sido concebida especificamente para matrizes elétricas predominantemente renováveis como a brasileira.

Ademais, a convergência cronológica entre a transição institucional do MDL para o PACM, decidida na COP30 (UNFCCC, 2025), e o surgimento das propostas A6.4-PNM001 e A6.4-PMM006, ambas ainda sem aprovação definitiva, sugere que o novo mecanismo do Acordo de Paris tende a se tornar o principal locus regulatório para metodologias de H_2V no mercado regulado. Já no mercado voluntário, apenas dois entre vinte programas avaliados pelo ICVCM apresentaram metodologias aplicáveis ao H_2V, o que indica maturidade normativa ainda incipiente em amplitude; contudo, o fato de a Gold Standard ter aprovado duas metodologias distintas em um único ano sugere maior celeridade normativa nesse programa do que a observada no PACM, confirmando, sob nova evidência empírica, a lacuna identificada por Piovani *et al.* (2023) quanto à desconexão entre o potencial de H_2V e os instrumentos normativos disponíveis para sua conversão em créditos de carbono.

Por fim, cabe destacar que, das seis metodologias identificadas, três já se encontram plenamente aprovadas e operacionais: a AM0124, consolidada desde 2023 no MDL, e as duas metodologias da Gold Standard, aprovadas ao longo de 2026, o que evidencia maior celeridade normativa do mercado voluntário frente ao PACM, cujas propostas permanecem em avaliação desde 2024 e 2025. Esse dinamismo, contudo, não elimina a fragilidade de fundo discutida na Seção 3.2: a única metodologia plenamente consolidada no mercado regulado, a AM0124, ainda se apoia em um cenário de linha de base fóssil-dependente (PIOVANI *et al.*, 2023), o que restringe sua aderência a contextos elétricos como o brasileiro e reforça a necessidade de avaliação criteriosa de todas as seis metodologias, inclusive as já aprovadas, ao contexto elétrico nacional.

5. Conclusões

Este artigo teve como objetivo identificar o conjunto de metodologias de linha de base aplicáveis ao hidrogênio verde e a seus derivados nos mecanismos de crédito de carbono regulados e voluntários. A relevância desse mapeamento decorre da necessidade, apontada pela literatura, de superar a lacuna metodológica que hoje limita a conversão do potencial brasileiro de produção de H_2V em créditos de carbono efetivamente certificáveis, condicionada à existência de metodologias de linha de base reconhecidas internacionalmente.

Metodologicamente, o objetivo foi alcançado por meio de uma *Scoping Review*, conduzida segundo o protocolo de Arksey e O'Malley (2005), que delimitou o universo de busca aos dois mecanismos regulados geridos pela UNFCCC, o MDL e o PACM, e à totalidade dos programas voluntários em avaliação pelo ICVCM, submetendo-os a três filtros sucessivos de elegibilidade quanto à vigência normativa, ao enquadramento setorial em energia renovável e à menção explícita ao hidrogênio.

Como resultado, foram identificadas seis metodologias de linha de base tecnicamente distintas, aprovadas ou em desenvolvimento: a AM0124 do MDL, plenamente aprovada e voltada diretamente à produção de hidrogênio; a A6.4-PNM001 e a A6.4-PMM006, ambas do PACM e em distintos estágios de avaliação normativa; a GCCNMT002, do Global Carbon Council, em consulta pública; e a GS4GG PAA M400-01 e a GS4GG PAA M400-02, ambas da Gold Standard e já plenamente aprovadas, a segunda voltada diretamente à produção de hidrogênio verde. Constatou-se, ainda, a predominância de metodologias voltadas à amônia verde (quatro das seis identificadas) em detrimento do hidrogênio molecular (duas das seis), e uma maturidade normativa mais avançada no mercado voluntário, através da Gold Standard, do que no mecanismo do art. 6.4 do Acordo de Paris.

Este mapeamento contribui para a literatura acadêmica ao consolidar, de forma sistematizada e atualizada, um panorama até então disperso entre diferentes repositórios normativos, subsidiando formuladores de políticas públicas e desenvolvedores de projetos de H_2V interessados na certificação de créditos de carbono no Brasil. Como limitação, destaca-se a natureza dinâmica dos repositórios consultados, cujo status pode ser atualizado a qualquer momento, recomendando-se a atualização periódica deste mapeamento. Como agenda futura, sugere-se analisar o grau de convergência entre as seis metodologias identificadas e sua aderência ao contexto elétrico brasileiro, subsidiando propostas de aprimoramento sensíveis à particularidade de matrizes elétricas predominantemente renováveis.

Referências

ALMEIDA, F. A. *et al.* Gestão ambiental e energética: fundamentos e aplicações. São Paulo: Atlas, 2019.

ALONSO, Ander Martinez *et al.* The effect of carbon taxonomy on renewable hydrogen production: a techno-economic and environmental assessment. International Journal of Hydrogen Energy, 2025.

ARKSEY, Hilary; O'MALLEY, Lisa. Scoping studies: towards a methodological framework. International Journal of Social Research Methodology, v. 8, n. 1, p. 19-32, 2005.

BRASIL. Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono; institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro); cria o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC). Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, ano 162, n. 149, p. 2, 5 ago. 2024.

CALEL, R.; COLMER, J.; DECHEZLEPRÊTRE, A.; GLACHANT, M. Do carbon offsets offset carbon? American Economic Review, 2025.

CELA - CLEAN ENERGY LATIN AMERICA. Índice CELA de LCOH de hidrogênio verde no Brasil. São Paulo: CELA, 2024. Disponível em: cela.com.br. Acesso em: 28 abr. 2026.

CHATENET, M. *et al.* Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. Chemical Society Reviews, v. 51, 2022.

CRIPPA, M.; GUIZZARDI, D.; PAGANI, F.; BANJA, M.; MUNTEAN, M. *et al.* GHG emissions of all world countries: 2025 report. Luxembourg, 2025.

CULLENWARD, D.; VICTOR, D. Making Climate Policy Work. Cambridge, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2026: relatório síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2026.

GOLD STANDARD. PAA-M400-01: Green Ammonia Production. v. 1.0. [S. l.]: Gold Standard for the Global Goals, 2026a.

GOLD STANDARD. PAA-M400-02: Green Hydrogen Production. v. 1.0. [S. l.]: Gold Standard for the Global Goals, 2026b.

HOVOGEN. Green hydrogen production: life cycle assessment and carbon intensity analysis. London: Hovogen, 2026. Relatório técnico.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Hydrogen Review 2022. Paris, 2022.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Hydrogen Review 2024. Paris, 2024.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector. Paris, 2021.

INTEGRITY COUNCIL FOR THE VOLUNTARY CARBON MARKET (ICVCM). Assessment Status. 2026. Disponível em: https://icvcm.org/assessment-status/. Acesso em: 14 jul. 2026.

INTEGRITY COUNCIL FOR THE VOLUNTARY CARBON MARKET (ICVCM). Core carbon principles. [S. l.]: Integrity Council for the Voluntary Carbon Market, 2024.

IPCC. Climate change 2023: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Green hydrogen: a guide to policy making. Abu Dhabi: IRENA, 2020.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Green hydrogen for industry: a guide to policy making. Abu Dhabi: IRENA, 2022. Disponível em: https://prod-cd.irena.org/Publications/2022/Mar/Green-Hydrogen-for-Industry. Acesso em: 28 abr. 2026.

KOLLMUSS, A.; ZINK, H.; POLYCARP, C. Making sense of the voluntary carbon market: a comparison of carbon offset standards. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2008.

LO FARO, A.; CANTANE, D.; NARO, G. Hydrogen economy in Brazil: challenges and opportunities for a low-carbon industry. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023.

MCKINSEY & COMPANY. Green hydrogen: an opportunity to create sustainable wealth in Brazil and the world. São Paulo: McKinsey & Company, 2021.

MICHAELOWA, A.; SHISHLOV, I.; BRESCIA, D. Evolution of international carbon markets: lessons for the Paris Agreement. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 10, n. 6, e613, 2019a.

MICHAELOWA, A.; HERMWILLE, L.; OBERGASSEL, W.; BUTZENGEIGER, S. Additionality revisited: guarding the integrity of market mechanisms under the Paris Agreement. Climate Policy, v. 19, n. 10, p. 1211-1224, 2019b.

NEWELL, R. G.; PIZER, W. A.; RAIMI, D. Carbon markets: past, present, and future. Annual Review of Resource Economics, v. 6, p. 191-215, 2014.

NEWLIN, J.; MOFFA, A. Partial additionality: the blunt metric distorting carbon markets. N.Y.U. Environmental Law Journal, v. 33, 2025.

PATERSON, M. Who and what are carbon markets for? Politics and the development of climate policy. Climate Policy, v. 12, n. 1, p. 82-97, 2012.

PIOVANI, Juliane; SALAZAR HERRERA, Victoria Alejandra; TRIGOSO, Federico; GOMES DE FREITAS, Adriano. Perspectives for the production of green hydrogen in Brazil. International Symposium on Energy: Energy Transition, Green Hydrogen and Sustainable Industry, v. 1, 2023.

SANTOS JÚNIOR, E.; CARVALHO, R. B.; SILVA, D. J. C. Green hydrogen in Brazilian industry: pathways to decarbonization and sustainable competitiveness. Revista de Gestão Social e Ambiental, 2025.

SCHNEIDER, L. Is the CDM Fulfilling its Environmental and Sustainable Development Objectives? An Evaluation of the CDM and Options for Improvement. Berlin, 2007.

SCHNEIDER, L. Assessing the additionality of CDM projects: practical experiences and lessons learned. Climate Policy, v. 9, n. 3, p. 242-254, 2009.

SILVA, G. H. R. *et al.* Renewable energy perspectives: Brazilian case study on green hydrogen production. AIMS Energy, v. 13, n. 2, p. 449-470, 2025.

SILVA, Pedro Henrique Rosan; ABREU, Victor Hugo Souza. Hidrogênio verde como vetor da descarbonização energética no Brasil. Revista Vértices, [S. l.], v. 27, n. 3, 2026.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG); OBSERVATÓRIO DO CLIMA (OC). Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970-2024), 2025.

SMINK, V. Hydrogen as key to decarbonization. Energy Reports, v. 7, p. 45-56, 2021.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). AM0124: hydrogen production from electrolysis of water. [S. l.]: UNFCCC, 2023.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Matters relating to the clean development mechanism. Belém, 2025.

WARA, M. Is the global carbon market working? Nature, v. 445, p. 595-596, 2007.

WORLD BANK GROUP. Carbon credits and additionality: past, present, and future. Washington, D.C.: World Bank, 2016.