

Principais desafios do hidrogênio

“Na adversidade, a virtude vem à luz”
Aristófanes⁴⁶



Embora tenha grandes benefícios e esteja pronto para se posicionar como um transportador de energia essencial para a descarbonização, o desenvolvimento do hidrogênio verde enfrenta vários desafios ao longo de toda a cadeia de suprimentos.

Produção de hidrogênio renovável

O primeiro elo da cadeia de suprimentos é a produção do próprio hidrogênio verde, sendo que um dos principais desafios a serem enfrentados é seu alto custo em comparação com as alternativas convencionais. Atualmente, o custo nivelado do hidrogênio verde (LCOH⁴⁷) é de duas a três vezes maior do que os custos de produção do hidrogênio azul, que é produzido a partir de combustíveis fósseis com captura de CO₂ (CCUS)⁴⁸.

Para entender como essa diferença de custo poderia ser reduzida, primeiro é preciso observar que, normalmente, entre 66% e 75% do LCOH é contabilizado pelos custos operacionais, principalmente o custo da eletricidade renovável necessária, enquanto os custos de capital representam entre 25% e 33%. Portanto, a principal chave para diminuir o custo da produção de hidrogênio está na redução dos custos operacionais. Esses custos dependem principalmente de três fatores: o preço da eletricidade, a eficiência da instalação e o grau de carga, sendo o primeiro o mais importante.

A redução do preço da eletricidade e o grau de cobrança dependem, em grande parte, da estrutura regulatória (pedágios e encargos aplicáveis, critérios de adicionalidade/intensidade de emissão/correlação temporal e geográfica a serem definidos para considerar o hidrogênio e seus derivados como renováveis, possibilidade de injeção na rede de gás etc.), enquanto o aumento do desempenho da instalação e, portanto, a redução da quantidade de eletricidade necessária para produzir 1 kg de hidrogênio renovável, exige melhorias na tecnologia de eletrólise e um projeto e operação mais otimizados.

Com relação à contribuição do CAPEX para o LCOH, ela pode ser reduzida na medida em que os custos de produção caem como resultado de custos unitários mais baixos devido ao desenvolvimento tecnológico, mudanças nos materiais usados, economias de escala e efeitos da curva de aprendizado, otimização da capacidade de produção e da cadeia de suprimentos.

Portanto, há espaço para reduzir os custos da eletrólise, mas, a curto e médio prazo, pode haver flutuações de preço causadas por desalinhamentos na cadeia de suprimentos, devido ao crescimento da demanda por eletrolisadores, que é mais urgente do que o desenvolvimento da capacidade de produção.

Além do custo de produção do hidrogênio, a produção de hidrogênio renovável em larga escala também enfrenta desafios associados aos principais insumos da eletrólise: água e eletricidade renovável.

- ▶ Para produzir 1 kg de hidrogênio, 9 a 10 litros de água destilada devem ser fornecidos aos eletrolisadores. Se o uso de água para resfriamento da planta e a água rejeitada (o volume de água, rico em sais dissolvidos, obtido como subproduto da purificação da água) também forem levados em conta, o volume necessário pode chegar a 20-27 litros por kg de hidrogênio.

Isso significa que os projetos precisam planejar adequadamente a captação de água a ser usada. Embora o volume de água necessário, em comparação com outros usos atuais da água, seja muito pequeno, essa é uma questão cada vez mais sensível devido aos períodos de seca e estresse

⁴⁶Aristófanes, dramaturgo grego antigo. Nascido por volta de 446 a.C., é considerado um dos maiores representantes do gênero cômico na literatura clássica.

⁴⁷El LCOH (Levelized Cost of Hydrogen) es una variable que indica cuánto cuesta en promedio producir 1 Kg de Hidrógeno considerando todos los costes, tanto de capital como de operación, involucrados en su producción a lo largo de la vida útil de la instalación.

⁴⁸IRENA. "Green Hydrogen Overview". (2021).

hídrico que, infelizmente, estão se tornando mais frequentes como resultado das mudanças climáticas. Por outro lado, os projetos também precisam obter autorização para descarregar a água rejeitada mencionada acima, que é principalmente água limpa com uma concentração maior de sais resultante do processo de osmose.

- ▶ O outro grande desafio da produção de hidrogênio em larga escala provavelmente será a obtenção de toda a eletricidade renovável necessária. A título de indicação, com as tecnologias atuais, são necessários de 50 a 60 kWh de eletricidade para produzir 1 kWh de hidrogênio. Se o uso do hidrogênio e de seus derivados também for expandido para novos setores industriais e para o transporte pesado, será necessária uma grande quantidade de eletricidade. Isso implica a instalação de uma grande capacidade de energia eólica e solar, além da necessária para a eletrificação direta de outros setores, como mobilidade leve ou ar condicionado, com os consequentes desafios de conexão à rede, uso do solo etc.

Infraestrutura de transporte do hidrogênio

Atualmente, o hidrogênio é transportado principalmente por rodovias, em caminhões carregados com cilindros de hidrogênio em diferentes pressões, ou por dutos. É importante destacar os desafios relacionados a esse último modo de transporte de hidrogênio, seja por injeção na rede de gás existente (mistura) ou em uma rede dedicada exclusivamente ao transporte de hidrogênio.

Os dutos de gás natural existentes não podem ser usados diretamente para o transporte de hidrogênio em altas concentrações devido à fragilização do aço que o hidrogênio produz em contato direto com o duto. Conforme discutido acima,

a mistura de hidrogênio com gás natural é considerada uma opção para a saída de hidrogênio das instalações de produção. No entanto, isso é sempre considerado em concentrações muito baixas, que atualmente variam entre 3% e 5% por volume⁴⁹; e mesmo nessas concentrações, a vida útil dos dutos pode ser significativamente afetada.

Além disso, devido à própria operação da rede de gás e da mecânica dos fluidos, não é fácil garantir que as concentrações volumétricas máximas permitidas não sejam excedidas em seções da rede, pois a concentração real de hidrogênio no gás que flui por uma parte da rede depende dos fluxos em um determinado momento, do número e da localização dos pontos de injeção etc. Além disso, os pontos de injeção precisam ser cuidadosamente projetados e localizados para evitar altas concentrações ao seu redor.

Por outro lado, é importante ter em mente que diferentes tipos de usuários estão conectados à mesma rede de gás e, uma vez que o hidrogênio é injetado na rede, não é possível saber quanto hidrogênio está saindo da rede em cada ponto. Quando o gás é usado como combustível, é improvável que as baixas concentrações de hidrogênio tenham um efeito significativo além das variações no valor calorífico do gás (já que a proporção da mistura é volumétrica e a intensidade energética do hidrogênio por volume é muito menor do que a do metano, portanto, quanto maior a proporção da mistura, menor o valor calorífico por unidade de volume do gás resultante). Por outro lado, as indústrias que usam o metano como insumo, principalmente no setor petroquímico, podem ter seus processos afetados pela menor pureza do gás natural.

Uma alternativa (ou evolução) ao blending é a criação de redes

⁴⁹Energy Sci Eng: Howarth RW, Jacobson MZ. "How green is blue hydrogen?". (2021).





dedicadas exclusivamente ao transporte de hidrogênio. Nesse sentido, o “repurposing” ou a conversão da rede de gás existente para o transporte de hidrogênio permite uma economia significativa de custos e de tempo (permitting, desapropriação etc.). No entanto, a transição de um vetor para o outro apresenta novos desafios: quando o transporte de gás natural deve ser interrompido e a infraestrutura deve ser adaptada ao hidrogênio?

Uma possibilidade é começar em seções com dois pipelines paralelos, transformando primeiro um deles. A limitação é que isso provavelmente só será possível em uma pequena parte da rede. Além disso, isso dependerá do fato de a produção e o consumo estarem localizados nos volumes certos exatamente nessas áreas. Outra possibilidade seria não fazer o repurposing de gasodutos existentes, mas construir hidrodutos greenfield novos paralelos à rede existente usando terras e direitos de passagem disponíveis. Nesse caso, um dos principais problemas a serem resolvidos é onde construir as novas estações de compressão de hidrogênio, pois há uma grande probabilidade de não haver espaço suficiente.

Na Espanha, a Enagás anunciou o início do processo não vinculante de “Call for Interest” para os primeiros componentes essenciais da Rede Troncal Espanhola de Hidrogênio. Esse processo tem como objetivo avaliar o nível de interesse dos principais participantes do setor de energia na criação das infraestruturas necessárias para o transporte de hidrogênio renovável.

Uso do hidrogênio

Outro fator importante para que o hidrogênio renovável seja uma alavanca eficaz na descarbonização global é que é necessário não apenas produzi-lo, mas também transformar os usos finais e criar a demanda necessária para justificar o investimento em sua produção e distribuição. Isso implica a necessidade de investir em infraestrutura de fornecimento, tecnologias de produção e armazenamento e criar as políticas certas para incentivar e garantir a adoção.

Conforme discutido ao longo deste documento, a maioria dos usos finais atuais do hidrogênio está concentrada em aplicações industriais, como a produção de amônia ou metanol, ou outros usos, como o refino de petróleo. No entanto, o hidrogênio renovável também precisa ser usado em outros setores, como transporte e geração de energia.

- ▶ No setor de transportes, o hidrogênio renovável pode ser usado em veículos com células de combustível para oferecer uma alternativa de combustível limpo e livre de emissões. No entanto, para que esses veículos sejam adotados em massa, é necessário desenvolver uma infraestrutura de abastecimento de hidrogênio para atender às necessidades dos usuários em diferentes regiões. Isso implica um investimento significativo na construção de estações de hidrogênio e na reforma das estações de combustível fóssil existentes.
- ▶ Em termos de geração de eletricidade, o hidrogênio renovável pode ser usado para equilibrar a variabilidade das fontes renováveis, como a energia eólica e solar. Entretanto, para que isso seja viável, é necessário desenvolver tecnologias de produção e armazenamento de hidrogênio em larga escala. Além disso, também são necessários incentivos e regulamentações adequados para estimular o investimento em projetos de armazenamento de hidrogênio.
- ▶ Outro fator importante na transformação dos usos finais do hidrogênio é a necessidade de uma transição justa e equitativa. A transformação dos setores de fabricação de veículos que dependem de combustíveis fósseis para usar o hidrogênio renovável pode ter um grande impacto sobre os trabalhadores e as comunidades que dependem desses setores. Portanto, são necessárias políticas e programas para garantir que eles tenham acesso a oportunidades de emprego e treinamento para novas habilidades na economia do hidrogênio renovável.

Mercado de hidrogênio

Atualmente, o hidrogênio é um gás industrial que geralmente é produzido nas mesmas instalações em que será consumido. Portanto, ainda não existe um mercado maduro para ele. Isso significa que não há um índice de preço de referência estabelecido no mercado, o que se traduz em custos mais altos pagos pelos consumidores, pois há pouca transparência e concorrência nos preços. Isso é agravado pela baixa demanda por hidrogênio de baixo carbono no momento, o que significa que os projetos precisam ser integrados desde a produção até a infraestrutura e o uso final.

Entretanto, à medida que o setor de hidrogênio se desenvolve, é de se esperar que os mercados se desenvolvam. Embora seja possível traçar alguns paralelos entre o desenvolvimento desses mercados e o do gás natural (com base no GNL), há algumas particularidades:

- ▶ Enquanto os combustíveis fósseis são extraídos de depósitos geológicos localizados em áreas geográficas muito específicas, o hidrogênio pode ser produzido em praticamente qualquer lugar, desde que haja água e eletricidade. Isso favorece a criação de oferta e dilui o poder de mercado dos produtores.
- ▶ Os custos de transporte de hidrogênio por navio (medidos em quantidade de energia por quilômetro) são muito mais altos do que no caso do GNL devido à sua menor densidade de energia por volume e ao seu ponto de ebulição muito baixo. Além disso, se o hidrogênio for transportado em outra forma (metanol, amônia, LOHC, etc.), as perdas de conversão correspondentes (especialmente relevantes se ele não for usado diretamente na mesma forma em que é transportado) devem ser adicionadas. Isso também significa que o custo do transporte de hidrogênio sob pressão por

duto é muito menor do que por navio e, portanto, o fator de localização é mais relevante na formação de preços do que no caso do GNL.

- ▶ Por isso, a competitividade nos mercados será fortemente influenciada pelo custo agregado tanto da produção quanto do transporte do hidrogênio até a demanda final ou local de referência (não apenas ou principalmente pelo custo de produção).

Por fim, é necessário enfatizar que o produto não deve ser o hidrogênio em si, mas o hidrogênio verde/de baixa emissão. Portanto, é preciso haver uma definição e um sistema de certificação relativamente homogêneos e confiáveis. Sem isso, não é possível saber se o hidrogênio gerado atende a critérios semelhantes e não se está pagando por um hidrogênio sujo, ou não tão limpo, ao preço do hidrogênio verde.

Além disso, um grande desafio para a implantação do mercado de hidrogênio é atender aos requisitos de acesso ao financiamento. Na União Europeia, os leilões do Fundo de Inovação existem para apoiar a produção de hidrogênio renovável não biológico na Europa. Esses leilões representam uma iniciativa fundamental para acelerar a transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis, mas também exigem uma estrutura financeira sólida e um planejamento cuidadoso para garantir que os projetos de hidrogênio possam ter acesso ao financiamento necessário para seu desenvolvimento e sucesso a longo prazo. Além disso, o Plano Industrial do Pacto Verde anunciou o lançamento do primeiro leilão para a produção de hidrogênio renovável no outono de 2023, com um orçamento do Fundo de Inovação de 800 milhões de euros a ser pago como um prêmio fixo aos produtores de hidrogênio renovável. Também merece destaque o EU Hydrogen Bank, um leilão europeu que fornecerá até 800 milhões de euros para produtores de hidrogênio renovável.



Por fim, há alavancas que poderiam acelerar e incentivar a descarbonização da indústria, introduzindo o hidrogênio nesses mercados. Um instrumento de política que poderia ajudar nesse contexto são os contratos de carbono por diferença (CCfDs), contratos de longo prazo para pagar a diferença entre o preço atual do carbono e o custo real da redução de CO₂. No âmbito da UE, a Comissão planeja lançar CCfDs como parte de seu esquema REPowerEU para apoiar a mudança da atual produção de hidrogênio em processos industriais do gás natural para as energias renováveis.

Regulação

A regulação do hidrogênio verde é um aspecto essencial, pois desempenha um papel fundamental no desenvolvimento e na implementação desse vetor energético. Alguns dos principais desafios em nível regulatório são os seguintes⁵⁰

- ▶ Criar marcos regulatórios específicos para o hidrogênio verde, evitando que ele seja tratado da mesma forma que outros gases comuns na indústria, por exemplo, limitando sua produção a áreas industriais.
- ▶ Definição do que é considerado hidrogênio verde ou renovável, limitando as condições e as emissões máximas de gases de efeito estufa permitidas no processo de produção, cujo perímetro deve ser especificado.
- ▶ Desenvolvimento dos incentivos financeiros e não financeiros necessários para estimular o investimento em instalações de produção de hidrogênio renovável.
- ▶ Criação de esquemas de garantia de origem para hidrogênio renovável ou de baixa emissão, facilitando o surgimento de um mercado de hidrogênio.

⁵⁰HyLaw: “EU policy paper” (2019).

Resumo de atuações regulatórias por continente e país

Âmbito	Europa		América do Norte		América do Sul		Ásia + Oceania	
	União Europeia	Reino Unido	EE.UU.	Canadá	Colômbia	Chile	China	Austrália
Estratégia nacional para o hidrogênio	EU Hydrogen Strategy REPowerEU	UK Hydrogen Strategy	National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap	Hydrogen strategy for Canada	Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia	Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde	“Medium and long-term plan for the development of hydrogen energy industry (2021-2035)”	Australia’s National Hydrogen Strategy
Meta de capacidade instalada em 2030	44 GW (Fit-for-55) 65 GW (REPowerEU)	10 GW	-	-	1-3 GW	5 GW	“Medium and long-term plan for the development of hydrogen energy industry (2021-2035)”	Australia’s National Hydrogen Strategy
Marco legal e regulatório	Fit-for-55 Renewable Energy Directive (2009/28/EC) 2 actos delegados	Low Carbon Hydrogen Standard (LCHS) Industrial Carbon Capture Business Model (ICC BM) UK Emissions Trading Scheme (ETS)	Bipartisan Infrastructure Law (BIL) Inflation Reduction Act (IRA)	Clean Hydrogen Investment Tax Credit	Decreto 1476 de 2022	Ley 21.305 de Eficiencia Energética	14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and the Outline of Long-Term Goals for 2035	Commonwealth Hydrogen Regulation Guarantee of Origin scheme
Apoio ao investimento e à inovação	NextGenerationEU IPCEI Hy2Tech IPCEI Hy2Use European Hydrogen Bank European Clean Hydrogen Alliance	Hydrogen Investment Roadmap Powering Up Britain: Net Zero Growth Plan	Clean Hydrogen Electrolysis Program	Net Zero Accelerator (NZA) Clean Fuels Fund	Ley 2099 de 2021	CORFO	National Key R&D Programs (NKPs)	Hydrogen Headstart Program
Regulação do hidrogênio na rede de gás	EU Directive on Gas and Hydrogen Networks CertifyHy	Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution	HyBlend	G-25—Policy on the use of gas meters in hydrogen-blending activities in the natural gas network	-	-	-	National Gas Law (NGL) National Energy Retail Law (NERL)
Regulação para adaptar o H₂ para o transporte	‘Sustainable and Smart Mobility Strategy’ together with an Action Plan CertifyHy	Targeting net zero - next steps for the Renewable Transport Fuels Obligation: Hydrogen and renewable fuels of non biological origin	Alternative Fuel Excise Tax Credit Alternative Fuel Infrastructure Tax Credit Carbon Reduction Program (CRP)	Emissions Reduction Plan 2030	-	Ley 21.305 de Eficiencia Energética	-	Commonwealth regulation relevant to hydrogen mobility and transport

Detalhe do marco regulatório em diferentes zonas geográficas

União Europeia

- Estratégia de hidrogênio publicada. A estratégia da UE sobre o uso de hidrogênio foi adotada em 2020 e está focada em permitir a produção e o uso de hidrogênio renovável para ajudar a descarbonizar a economia da UE de maneira econômica, de acordo com o Green Deal Europeu, e contribuir para a recuperação econômica após a crise da COVID-19. Hoje, as bases estabelecidas nessa estratégia já estão sendo cumpridas, pois os primeiros 20 pontos de ação definidos em julho de 2020, quando essa estratégia foi adotada, já haviam sido atendidos nos primeiros quatro meses de 2022.

Além disso, com a publicação do plano REPowerEU no segundo trimestre de 2022, a Comissão Europeia completa a estratégia proposta em 2020, ao mesmo tempo em que aumenta suas ambições em relação ao hidrogênio renovável como um importante vetor energético para se afastar das importações de combustíveis fósseis da Rússia.

- Marco legal e regulatório. Em termos de regulação, em 2021, a UE aprovou o pacote "Fit for 55", que inclui uma série de propostas legislativas para promover a redução das emissões líquidas de gases de efeito estufa. Além disso, em fevereiro de 2023, a Comissão Europeia deu mais um passo para definir o marco regulatório do hidrogênio e sua relação com outros padrões existentes, especificando a definição de hidrogênio renovável em dois atos delegados. O primeiro ato estabelece os requisitos para considerar os combustíveis à base de hidrogênio como combustíveis renováveis¹. O segundo define como as reduções de emissões devem ser calculadas ao usar esse tipo de combustível².

Além disso, a REPowerEU estabeleceu uma meta de produção de 10 milhões de toneladas de RFNBOs até 2030, o que equivaleria a 500 TWh de eletricidade renovável (14% do total de eletricidade consumida na UE)³.

- Apoio ao investimento e à inovação. Nos últimos anos, a UE vem promovendo várias iniciativas para incentivar o investimento e a inovação no mercado de hidrogênio. O programa de recuperação pós-crise da COVID-19, "NextGenerationEU", envolveu grandes investimentos em projetos de transição verde e digitalização. Posteriormente, em 2020, o hidrogênio foi integrado aos Grandes Projetos de Interesse Europeu Comum (IPCEI Hy2Tech e IPCEI Hy2Use). Por fim, nos últimos meses, vem se consolidando o "European Hydrogen Bank", uma proposta que busca criar uma entidade financeira especializada em projetos de hidrogênio na União Europeia. Seu objetivo é mobilizar investimentos privados e públicos para acelerar o desenvolvimento de projetos de hidrogênio verde e contribuir para a transição energética.
- Regulação do hidrogênio na rede de gás. Em 2021, a Comissão Europeia propôs a reforma da Diretiva de Gás da UE de 2009 como parte do pacote proposto para o mercado de hidrogênio e gás descarbonizado. A reforma visa criar uma estrutura legal para redes de hidrogênio semelhante à estrutura existente para gás e eletricidade, ampliando os direitos do consumidor e regulamentando a integração do hidrogênio nas redes de energia da UE. Essa proposta avançou no Parlamento e no Conselho da UE em 2022 e 2023 como parte de um processo legislativo em andamento.

Além disso, estão sendo promovidas iniciativas para criar um sistema robusto de garantias de origem para o hidrogênio renovável, um exemplo disso é o CertifHy, que forneceu a base para o primeiro esquema não governamental de garantia de origem para o hidrogênio.

- Legislação para adaptar o hidrogênio ao transporte. O desenvolvimento do transporte de hidrogênio na Europa é apoiado pela Estratégia de Mobilidade Sustentável e Inteligente da Comissão Europeia, publicada em 2021⁴, que estabelece uma série de marcos para alcançar um transporte inteligente e sustentável na Europa. Entre esses marcos, destaca-se que, até 2030, espera-se que pelo menos 30 milhões de veículos de

emissão zero estejam nas estradas europeias e que o tráfego ferroviário de alta velocidade dobre. Além disso, planeja-se que as viagens coletivas programadas em distâncias curtas sejam neutras em carbono e que o hidrogênio desempenhe um papel importante para atingir essas metas, especialmente como fonte de energia limpa para veículos com emissão zero e para aplicações marítimas.

Reino Unido

- Estratégia de hidrogênio publicada. Em agosto de 2021, o Reino Unido publicou sua estratégia nacional de hidrogênio, a UK Hydrogen Strategy⁵. O documento descreve os objetivos e o caminho a ser seguido para atingir a meta "Net Zero by 2050". Posteriormente, em agosto de 2023, o "Department of Business, Energy and Industrial Strategy" publicou uma atualização da estratégia, aumentando a meta de capacidade instalada para 2030 para 10 GW.
- Marco legal e regulatório. O Low Carbon Hydrogen Standard (LCHS) estabelece os requisitos necessários para definir o hidrogênio gerado com baixas emissões de carbono, incluindo as emissões no ponto de produção e a metodologia para seu cálculo. Além disso, foram realizados estudos para avaliar o impacto das políticas existentes no desenvolvimento da produção de hidrogênio, incluindo o Industrial Carbon Capture Business Model (ICC BM) e o UK Emissions Trading Scheme (ETS)⁶.
- Apoio ao investimento e à inovação. Em 2023, o Hydrogen Investor Roadmap⁷ foi atualizado, definindo detalhes do financiamento de projetos de hidrogênio, apoiando até £11 bilhões de investimentos privados até 2030. Além disso, em abril de 2023, o plano "Powering Up Britain: Net Zero Growth"⁸ foi publicado, detalhando os últimos desenvolvimentos na entrega de apoio financeiro para incentivar a primeira implantação em larga escala de instalações de produção de hidrogênio eletrolítico e habilitado para CCUS.
- Regulação do hidrogênio na rede de gás. De acordo com a regulação "Gas Safety (Management) Regulations 1996", o conteúdo atual de hidrogênio nas redes de gás é limitado a 0,1% por volume. Entretanto, por meio do "Ten Point Plan"⁹, os testes necessários para misturar até 20% de hidrogênio na rede de distribuição de gás estão sendo promovidos até o final de 2023.
- Legislação para adaptar o hidrogênio ao transporte. Desde 2008, o Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO)¹¹ estabelece a obrigação de demonstrar que uma porcentagem dos combustíveis distribuídos provém de fontes renováveis. Além disso, em julho de 2022, o Departamento de Transportes publicou o documento "Targeting net zero - next steps for the Renewable Transport Fuels Obligation: Hydrogen and renewable fuels of non biological origin"¹².

¹EU Commission, "Delegated regulation on Union methodology for RFNBOs" (2023)

²EU Commission, "Delegated regulation for a minimum threshold for GHG savings of recycled carbon fuels" (2023)

³EU Commission, "Commission sets out rules for renewable hydrogen". (2023).

⁴European Commission - "Sustainable and Smart Mobility Strategy". (2021)

⁵HM Government, "UK Hydrogen Strategy" (2023)

⁶Department for Business, Energy & Industrial Strategy, "Carbon Capture, Usage and Storage" (2022).

⁷HM Government, "Developing the UK Emissions Trading Scheme (UK ETS)" (2022).

⁸Department for Business, Energy & Industrial Strategy, "Hydrogen Investment Roadmap" (2023).

⁹Department for Business, Energy & Industrial Strategy, "Powering Up Britain: Net Zero Growth Plan" (2023).

¹⁰HM Government, "The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution" (2020)

¹¹Department for Transport, "Renewable Transport Fuel Obligation: Compliance Guidance" (2022).

¹²Department for Transport, "Targeting Net Zero" (2022).

EUA

- Estratégia de hidrogênio publicada. Em setembro de 2022, o Departamento de Energia dos EUA (DOE) publicou uma versão preliminar da "National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap", estabelecendo a base estratégica para o desenvolvimento do hidrogênio limpo nos Estados Unidos.
- Estrutura legal e regulatória. Em novembro de 2021, o Congresso dos EUA assinou a "Bipartisan Infrastructure Law" (BIL)¹³. Essa legislação histórica autoriza e destina US\$ 62 bilhões para o Departamento de Energia dos EUA (DOE), incluindo US\$ 9,5 bilhões para hidrogênio limpo.

Além disso, em agosto de 2022, o presidente sancionou o "Inflation Reduction Act" (IRA), que permite incentivos adicionais para o hidrogênio, incluindo um crédito fiscal de produção que impulsionará ainda mais o mercado americano de hidrogênio limpo.

- Apoio ao investimento e à inovação. Para apoiar o investimento e a inovação, foram criados programas como o Clean Hydrogen Electrolysis Program, que visa melhorar a eficiência e a relação custo-benefício das tecnologias de eletrólise, e a alocação de US\$ 8 bilhões para centros regionais de hidrogênio limpo, permitindo o desenvolvimento de redes de produtores de hidrogênio limpo e sua infraestrutura de conexão.
- Regulação do hidrogênio na rede de gás. Além disso, a regulação do hidrogênio na rede de gás está sendo abordada por meio da iniciativa HyBlend, que se concentra na superação de barreiras técnicas para a mistura de hidrogênio em gasodutos de gás natural, incluindo pesquisa de compatibilidade de materiais, ciclo de vida e análise técnico-econômica.
- Regulação para adaptar o hidrogênio ao transporte. O US Department of Energy tem aprovado algumas leis e incentivos fiscais para promover e adaptar o hidrogênio para o transporte. Isso inclui o "Alternative Fuel Tax Credit", que oferece um crédito fiscal de US\$ 0,50 por galão para determinados combustíveis alternativos, como o hidrogênio liquefeito, e a "Alternative Fuel Tax Exemption", um incentivo fiscal que se aplica a equipamentos de combustível, incluindo o hidrogênio liquefeito. Também foi aprovado o "Carbon Reduction Program (CRP)", que inclui atividades de financiamento do estado para a implantação de veículos movidos a combustíveis alternativos.

Canadá

- Estratégia de hidrogênio publicada. Em dezembro de 2020, o governo canadense publicou sua estratégia para o hidrogênio, estabelecendo metas ambiciosas em termos de produção e uso.
- Marco legal e regulatório. O governo do Canadá introduziu recentemente três créditos fiscais destinados a incentivar a transição para uma economia de emissões líquidas zero em seu orçamento para 2023. O mais relevante para o hidrogênio é o Crédito Fiscal para Investimento em Hidrogênio Limpo, um crédito fiscal reembolsável que incentiva a produção de hidrogênio limpo, com créditos que variam de 15% a 40%, dependendo da intensidade de carbono do hidrogênio.
- Apoio ao investimento e à inovação. Em termos de iniciativas destinadas a promover a inovação e estimular o investimento, vários programas foram desenvolvidos, incluindo: (1) Net Zero Accelerator (NZA) é um programa de US\$ 8 bilhões que apoia projetos que permitem a descarbonização de grandes emissores, tecnologia limpa e transformação industrial; e (2) Clean Fuels Fund, um fundo de US\$ 1,5 bilhão criado em 2021 para reduzir o risco de investimento de capital necessário para construir novas instalações de produção de combustíveis

limpos ou expandir as existentes, incluindo conversões de instalações.

- Regulação do hidrogênio na rede de gás. O boletim "G-25 – Policy on the use of gas meters in hydrogen-blending activities in the natural gas network" estabelece os requisitos de tempo e as condições para permitir que concentrações de gás natural de 5 a 25% de hidrogênio sejam injetadas na rede.
- Legislação para adaptar o hidrogênio ao transporte. Por fim, um plano de redução de emissões "Emissions Reduction Plan 2030" foi publicado, estabelecendo uma meta de 35% do total de vendas de veículos médios e pesados com emissão zero até 2030, criando uma oportunidade estratégica significativa para os fabricantes de veículos movidos a célula de combustível de hidrogênio.

Colômbia

- Estratégia de hidrogênio publicada. No início de 2021, o governo colombiano, em colaboração com organizações multilaterais e institutos de pesquisa, começou a desenvolver um roteiro para estabelecer a base para o mercado de hidrogênio no país. O chamado Roadmap do Hidrogênio¹⁴ estabelece as bases para:
 - Atingir uma capacidade de produção entre 1 GW e 3 GW de produção de hidrogênio verde e 50 kt de hidrogênio azul até 2030.
 - Definir um preço-alvo para a geração de hidrogênio verde de 1,7 USD/kg.
 - Atingir 40% de consumo de hidrogênio verde do total de H₂ atualmente consumido no setor industrial.
- Marco legal e regulatório. Em relação ao status regulatório atual, a Lei 2099 de 2021, por meio dos artigos 21 e 23, abre uma cláusula geral de competência ao Governo Nacional para definir os mecanismos de promoção da inovação, pesquisa, produção, armazenamento, distribuição e uso do hidrogênio.
- Apoio ao investimento e à inovação. Além disso, o Decreto 1476 de 2022 estabelece disposições destinadas a definir os mecanismos, condições e incentivos para promover a inovação, a pesquisa, a produção, o armazenamento, a distribuição e o uso de hidrogênio para a prestação de serviços públicos de eletricidade, armazenamento de energia e descarbonização de setores como transporte, gás, hidrocarbonetos e mineração.

Chile

- Estratégia de hidrogênio publicada. O governo chileno apresentou em outubro de 2020 um conjunto de políticas com o objetivo de criar uma indústria de hidrogênio verde, a Estratégia Nacional de Hidrogênio Verde. Ela está dividida em três etapas, cada uma com um objetivo diferente:
 - Primeiro (2020 - 2025): o objetivo é acelerar o uso de H₂ verde em refinarias, produção de amônia e veículos de transporte. Também incentiva a adoção da blending, com até 20% de hidrogênio nas redes de gás.
 - Segundo (2025 - 2030): a experiência adquirida permitiria uma forte entrada nos mercados internacionais por meio de exportações, com uma capacidade de produção de H₂ por eletrólise de até 5 GW até essa data.
 - Terceiro (a partir de 2030): o objetivo seria posicionar o Chile como líder global na exportação de combustíveis limpos, alcançando 25 GW de produção de hidrogênio por meio de eletrolisadores, bem como um preço de hidrogênio verde abaixo de US\$ 1,5/kg.

¹³BIL: Bipartisan Infrastructure Law signed by President Biden on November 15, 2021.

¹⁴Ministério da Energia, Governo da Colômbia, "Hoja de Ruta del hidrógeno en Colombia".(2021).

- Marco legal e regulatório. Em termos de regulamentações, a Lei 21.305 sobre Eficiência Energética, publicada em fevereiro de 2021, definiu o hidrogênio como um combustível, o que permite ao Ministério da Energia regular seu uso, revisar e atualizar as regulamentações do mercado de eletricidade para permitir a participação do hidrogênio no setor, atualizar as regulações de gás natural para introduzir cotas de hidrogênio verde e facilitar o processamento de licenças para projetos envolvendo hidrogênio.
- Apoio ao investimento e à inovação. Dentro da estrutura de reativação econômica sustentável e da estratégia nacional de hidrogênio, a CORFO (Corporación de Fomento de la Producción) promove o acesso ao financiamento para projetos de hidrogênio, acelerando a implementação de iniciativas para a produção de hidrogênio verde e facilitando a criação de alianças industriais e comerciais ao longo de sua cadeia de valor.
- Legislação para adaptar o H₂ ao transporte. A Lei 21.305 sobre Eficiência Energética inclui benefícios fiscais para carros com "emissão zero", incluindo carros a hidrogênio.

China

- Estratégia de hidrogênio publicada. A Comissão Nacional de Desenvolvimento e Reforma e a Administração Nacional de Energia publicaram conjuntamente o Plano de Médio e Longo Prazo para o Desenvolvimento da Indústria de Energia de Hidrogênio (2021-2035) em 2022. É o primeiro plano de médio e longo prazo para implementar o uso de hidrogênio na China até 2035. Anos antes, em 2018, foi criada a The National Alliance of Hydrogen and Fuel Cell (NAHFC). Por outro lado, o governo chinês declarou a meta de alcançar a neutralidade de carbono em 2060, atingindo o máximo de emissões em 2030.
- Marco legal e regulatório. A China não tem uma estrutura legislativa abrangente para o hidrogênio, portanto, algumas províncias decidiram incluir sua própria estratégia no 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and the Outline of Long-Term Goals for 2035. Os documentos compilam o progresso no desenvolvimento do setor local de hidrogênio, a construção de usinas e sua operação. Por exemplo, o NEV industry action plan publicado pela província de Shanxi em 2019 delineou planos sobre o uso de células de combustível de hidrogênio em veículos e a província de Guangdong também realizou um exercício semelhante por meio do "Implementation Plan for Accelerating the Development of Hydrogen Fuel Cell Vehicle Industry", publicado em 2020.
- Apoio ao investimento e à inovação. A maior fonte de investimento vem dos National Key R&D Programs (NKPs), fundos de pesquisa aplicada que são uma importante fonte de financiamento público de P&D. Desde 2016, mais de 60 projetos NKP com foco em tecnologias de hidrogênio foram anunciados. Esses projetos promovem a pesquisa em tecnologias de eletrolisadores e visam melhorar a produção de hidrogênio renovável.
- Regulação do hidrogênio na rede de gás. Estão em andamento projetos em que o hidrogênio é transportado pela rede de gás por meio de blending com gás natural. A China National Petroleum Corporation transportou hidrogênio na cidade de Yinchuan, no noroeste da China. O hidrogênio foi transportado com sucesso ao ser misturado a um gasoduto de gás natural.
- Regulação para adaptar o hidrogênio ao transporte. Desde a publicação do 13th Five-Year Plan (2016), o ímpeto para o desenvolvimento de veículos movidos a hidrogênio foi estimulado, chegando a 7700 FCEVs até o final de 2020.

Austrália

- Estratégia de hidrogênio publicada. A Austrália desenvolveu uma estratégia nacional de hidrogênio que estabelece uma estrutura para o desenvolvimento, a produção e a exportação de hidrogênio verde.
- Marco legal e regulatório. Atualmente, o "Commonwealth Hydrogen Regulation" fornece orientação regulatória sobre a compreensão de quais leis federais existentes podem ser aplicadas a projetos de hidrogênio. Além disso, no orçamento de 2023-24, foram destinados US\$ 38,2 milhões para a criação de um esquema de Garantias de Origem que certificará a energia renovável e rastreará e verificará as emissões de produtos de energia limpa. Esse esquema é essencial para o comércio internacional de hidrogênio, pois fornecerá uma medida de confiabilidade e sustentabilidade para o hidrogênio produzido na Austrália. Ele também ajudará novos projetos a obter financiamento e aumentará a eficácia dos esforços do governo para ampliar a energia renovável e o setor de hidrogênio.
- Apoio ao investimento e à inovação. A Austrália estabeleceu o programa "Hydrogen Headstart" de US\$ 2 bilhões, que impulsiona a produção e o uso do hidrogênio verde como fonte de energia limpa e sustentável no país, ao mesmo tempo em que estimula o investimento em projetos de hidrogênio em larga escala.
- Regulação do hidrogênio na rede de gás. Em 2022, o Ministério da Energia reformou a "National Gas Law and Regulations". As reformas garantirão que as disposições regulatórias existentes e as proteções ao consumidor funcionem como pretendido quando o hidrogênio e os gases renováveis forem incorporados à rede de gás. Anteriormente, a "National Gas Law (NGL)" e a "National Energy Retail Law (NERL)" referiam-se apenas ao "gás natural". Com os projetos em andamento para introduzir o hidrogênio e o biometano na rede de gás, essa terminologia foi atualizada para oferecer segurança regulatória para o setor emergente.
- Regulação para adaptar o H₂ ao transporte. Dentro dos "Commonwealth regulations", há uma seção dedicada exclusivamente a cobrir todos os regulamentos federais que regem veículos movidos a hidrogênio, embarcações movidas a hidrogênio ou amônia ou o transporte de hidrogênio ou amônia como carga.

- Desenvolvimento de regulações específicas para promover o transporte com veículos de emissão zero, garantindo um lugar para veículos movidos a célula de combustível de hidrogênio.
- Criação de marcos específicos para o transporte marítimo movido a gás, incluindo o hidrogênio verde.
- Evolução das regulações de transporte de gás por dutos para determinar as condições de conexão/injeção de produtores de hidrogênio na rede (mistura, conexão e injeção, equipamentos, porcentagens máximas, pedágios aplicáveis, considerações de segurança etc.).

Muitos países já estão enfrentando esses desafios, publicando estratégias de hidrogênio que definem medidas e metas concretas para promover o hidrogênio verde, criando uma estrutura legal e regulatória com regulamentos específicos para o tratamento do hidrogênio ao longo da cadeia de valor e definições específicas para o hidrogênio verde, apoiando o investimento e a inovação, promovendo mecanismos de garantia de origem, promovendo o transporte de veículos com emissão zero etc.

Embora alguns países tenham demonstrado maior comprometimento do que outros, os impulsos regulatórios e estratégicos buscam o mesmo objetivo: alcançar a descarbonização por meio do aproveitamento do hidrogênio. Para obter uma visão geral do posicionamento de alguns países, foram compiladas várias ações em andamento ou propostas futuras que foram apresentadas em relação ao hidrogênio renovável, entre as quais se destacam as seguintes:

- ▶ Publicação das Estratégias Nacionais de Hidrogênio, que definem medidas e objetivos elaborados por cada país para promover a produção, a distribuição e o uso do hidrogênio

como um combustível limpo e sustentável. Dentro dessas estratégias, as metas nacionais de capacidade instalada de hidrogênio são definidas para o horizonte de 2030.

- ▶ Criação de um marco legal e regulatório, incluindo medidas legais para facilitar a produção e a distribuição de hidrogênio, bem como o estabelecimento de padrões de segurança e qualidade.
- ▶ Apoio ao investimento e à inovação para apoiar e impulsionar o desenvolvimento de tecnologias inovadoras e mais sustentáveis para promover projetos de hidrogênio em toda a cadeia de valor.
- ▶ Regulação do hidrogênio na rede de gás (blending) que define os requisitos técnicos e de segurança para a mistura de hidrogênio com gás natural em redes de distribuição de gás.
- ▶ Adaptação do hidrogênio como combustível de transporte, estabelecendo regulamentos para a instalação de pontos de reabastecimento e a infraestrutura necessária para o transporte de hidrogênio verde.

Por fim, deve-se observar que as empresas também enfrentam desafios significativos em sua estratégia, operações e compromisso com a sustentabilidade nesse novo cenário energético:

- ▶ **Definição da estratégia:** as organizações devem definir seu posicionamento estratégico com relação ao hidrogênio, compreendendo os projetos existentes, mantendo-se atualizadas com os desenvolvimentos regulatórios, analisando o mercado potencial e os clientes ou compradores em potencial, avaliando possíveis alianças comerciais para fortalecer sua posição etc.



- ▶ **Implementação da estratégia:** a implementação da estratégia implicará o desenvolvimento de novos projetos, cujas decisões de investimento devem ser acompanhadas pelas análises técnico-econômicas correspondentes, como a avaliação do local ideal para a produção de hidrogênio renovável ou a análise e a solicitação do possível auxílio financeiro disponível.
- ▶ **Implementação do projeto:** o gerenciamento do portfólio de projetos deve incluir uma correta identificação, avaliação e gerenciamento dos possíveis riscos nos projetos, aplicando metodologias específicas de gestão.
- ▶ **Governança e organização:** a implementação da estratégia definida pode exigir uma reorganização interna e o recrutamento de talentos qualificados. O impacto sobre a governança das informações e a qualidade dos dados relacionados ao hidrogênio também precisará ser considerado.
- ▶ **Operação e governança dos negócios:** no nível operacional, será necessário adaptar processos e sistemas para controlar a qualidade, a segurança e a lucratividade dos projetos, desenvolver estratégias comerciais adaptadas, avaliar contratos de hidrogênio, modelar preços, avaliar a execução de hedging etc.
- ▶ **Vinculação às metas de sustentabilidade:** O desenvolvimento do hidrogênio também oferece uma oportunidade para as empresas atingirem suas metas de sustentabilidade, monitorando a conformidade com seus compromissos e indicadores-chave.

Cronograma do marco regulatório e legislativo europeu do hidrogênio

Várias ações foram realizadas na União Europeia para adotar um marco regulatório para o hidrogênio:

- ▶ Em dezembro de 2015, foi celebrado o Acordo de Paris⁵¹, um acordo global sobre mudanças climáticas com o objetivo de reduzir as emissões globais de gases de efeito estufa.
- ▶ Em dezembro de 2018, a Diretiva Europeia de Energia Renovável (RED)⁵² foi revisada e incluiu uma nova meta geral da UE para o consumo de energia renovável até 2030 de 32%, incluindo uma seção para o transporte.
- ▶ Em dezembro de 2019, a Comissão Europeia propôs o Pacto Verde Europeu⁵³, um pacote de iniciativas políticas com o objetivo de posicionar a UE como a primeira região neutra para o clima até 2050, identificando o hidrogênio como um meio de combater as mudanças climáticas.
- ▶ Em julho de 2020, foi publicado o Roteiro Europeu do Hidrogênio⁵⁴, colocando essa fonte de energia no centro do plano de descarbonização da UE.
- ▶ Em dezembro de 2020, o hidrogênio foi integrado aos Projetos Importantes de Interesse Europeu Comum (IPCEI)⁵⁵.

⁵¹United Nations, "The Paris Agreement". (2015).

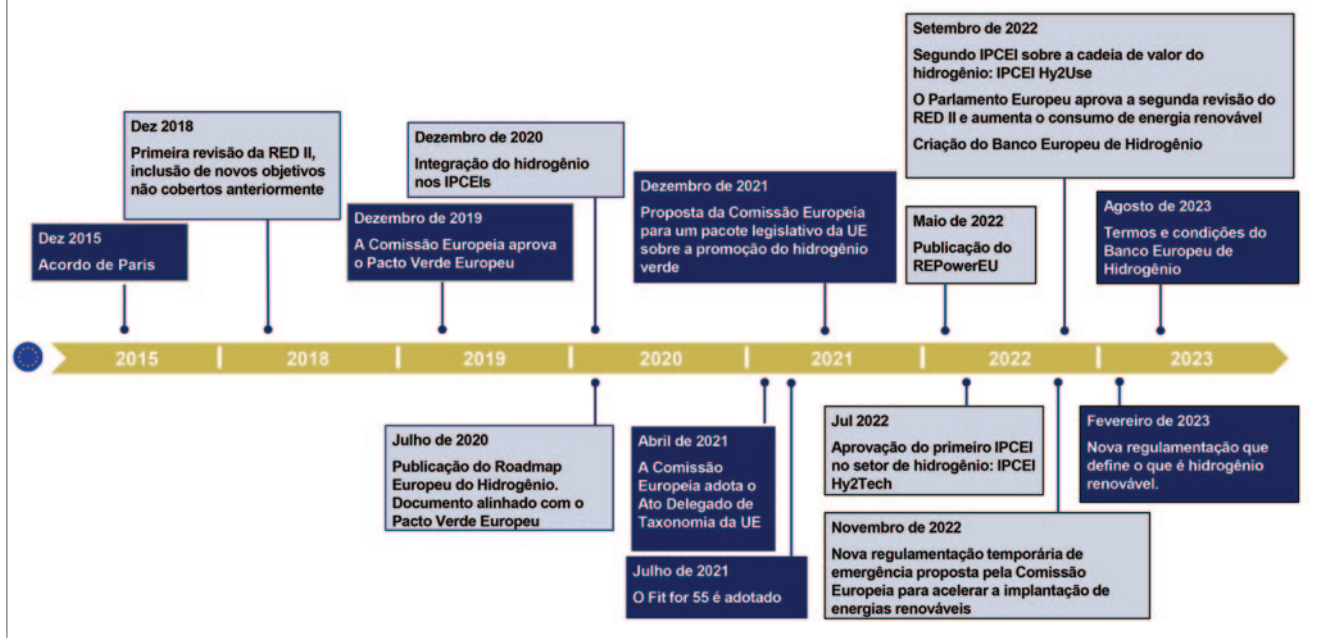
⁵²RED: "Renewable Energy Directive". Aprovada em 2016, é um documento legislativo que define os objetivos da política energética da Comunidade Europeia no campo das energias renováveis e a estrutura legal para seu desenvolvimento.

⁵³EU Commission, "A European Green Deal". (2019).

⁵⁴EU Commission, "Hydrogen". (2020).

⁵⁵EU Commission, "IPCEIs on Hydrogen". (2020).

Figura 22. Timeline regulatório UE.



- ▶ Em abril de 2021, a Comissão Europeia adotou o Ato Delegado de Taxonomia da UE⁵⁶, incentivando a produção de hidrogênio renovável, mas permitindo que as usinas de hidrogênio azul de alta eficiência também atendam aos padrões de classificação europeus.
- ▶ Em julho de 2021, foi adotado o pacote "Fit for 55"⁵⁷, um conjunto de propostas legislativas e emendas à legislação existente da UE que ajudará a UE a reduzir suas emissões líquidas de gases de efeito estufa e alcançar a neutralidade climática.
- ▶ Em dezembro de 2021, a Comissão Europeia propôs um Pacote Legislativo da UE sobre a descarbonização do gás e a promoção do hidrogênio verde⁵⁸, com o objetivo de criar um mercado de hidrogênio e desenvolver uma infraestrutura dedicada, além de estabelecer a criação de uma Rede Europeia de Operadores de Redes de Hidrogênio (ENHR) para garantir o desenvolvimento e o gerenciamento da rede de hidrogênio.
- ▶ Além disso, em 2021, foi aprovado o primeiro projeto de garantias verdes de origem na UE, o "CertifHy".
- ▶ Em maio de 2022, o documento REPowerEU⁵⁹ foi publicado, estabelecendo uma meta de 10 milhões de toneladas de produção doméstica de hidrogênio verde até 2030 e revisando para cima as metas estabelecidas pelo Roadmap do Hidrogênio.
- ▶ Em julho de 2022, foi aprovado o IPCEI Hy2Tech⁶⁰, que inclui 41 projetos de inovação para desenvolver tecnologias de hidrogênio. Além disso, em setembro de 2022, o IPCEI Hy2Use também foi aprovado, complementando o IPCEI Hy2tech para o desenvolvimento da infraestrutura de hidrogênio.
- ▶ Em setembro de 2022, o Parlamento Europeu aprovou a revisão da RED II⁶¹ para aumentar a participação das energias renováveis no consumo final de energia da UE para 45% em 2030 (em comparação com os 32% propostos inicialmente).
- ▶ Em novembro de 2022, a Comissão Europeia propôs um novo regulamento emergencial temporário para acelerar a implantação de fontes de energia renováveis⁶².
- ▶ Em fevereiro de 2023, a definição de hidrogênio renovável é estabelecida em dois atos delegados. O primeiro ato estabelece os requisitos para considerar os combustíveis à base de hidrogênio como combustíveis renováveis⁶³. O segundo define como as reduções de emissões devem ser calculadas ao usar esse tipo de combustível⁶⁴.
- ▶ Em agosto de 2023, foram publicados os termos e condições do "European Hydrogen Bank", que visa incentivar e apoiar o investimento na produção de hidrogênio renovável.

⁵⁶EU Commission, "Ato Delegado de Taxonomia da UE" (2021).

⁵⁷EU Commission, "Fit for 55". (2021)

⁵⁸EU Commission, "Perguntas e respostas sobre o pacote de hidrogênio e gás descarbonizado" (2021).

⁵⁹EU Commission, "REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition" (2022).

⁶⁰EU Commission, "Remarks by Executive Vice-President Vestager on IPCEI in the hydrogen technology value chain". (2022).

⁶¹Balkan Green Energy News, "O parlamento europeu vota para aumentar a meta de energias renováveis para 2030 para 45%" (2022).

⁶²EU Commission, "REPowerEU: Commission steps up green transition away from Russian gas by accelerating renewables permitting (2022).

⁶³EU Commission, "Regulamentação delegada sobre a metodologia da União para RFNBOs" (2023).

⁶⁴EU Commission, "Delegated regulation for a minimum threshold for GHG savings of recycled carbon fuels" (2023).

