



Informe:
Inovação em Soluções Energéticas Sustentáveis (iSES)

Primeira edição – Hidrogênio renovável

Informe Inovação em Soluções Energéticas Sustentáveis – Informe ISES

Primeira edição – Hidrogênio renovável



Brasília, DF

Dezembro, 2021

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

Organização social supervisionada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI)

Presidente

Marcio de Miranda Santos

Diretores

Luiz Arnaldo Pereira da Cunha Junior

Regina Maria Silverio

Informe Inovação em Soluções Energéticas Sustentáveis – Informe ISES. Primeira edição – Hidrogênio renovável. Projeto Agenda Positiva da Mudança do Clima e do Desenvolvimento Sustentável. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2021.

45p.: il.

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), SCS Qd 9, Torre C, 4º andar, Ed. Parque Cidade Corporate, CEP: 70308-200 - Brasília, DF, Telefone: (61) 3424 9600, <http://www.cgee.org.br>

Todos os direitos reservados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Os textos contidos nesta publicação poderão ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos, desde que seja citada a fonte.

Referência bibliográfica:

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos- CGEE. Informe Inovação em Soluções Energéticas Sustentáveis – Informe iSES. Primeira edição – Hidrogênio renovável. Brasília, DF: 2021. 45 p.

Este relatório é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do 2ª Contrato de Gestão CGEE. – 18º Termo Aditivo/Ação: Internacionalização da CT&I Brasileira /Atividade: Inserção do CGEE em Agendas Internacionais - Projeto Agenda Positiva para a Mudança do Clima e do Desenvolvimento Sustentável 52.01.50.01/MCTI/2018.

Informe Inovação em Soluções Energéticas Sustentáveis – Informe ISES

Primeira edição – Hidrogênio renovável

Supervisão

Regina Maria Silverio

Equipe técnica do CGEE

Marcelo Khaled Poppe (Coordenador)

Bárbara Bressan Rocha

Emilly Caroline Costa Silva

Daniella Fartes dos Santos e Silva

João Pedro Arbache

Carolina Conceição Rodrigues

Jackson Max Furtunato Maia

Israel Garcia de Oliveira

Icaro Lorrán Lopes Costa

Eduardo José Lima de Oliveira

Jean Marcel da Silva Campos

Sumário

1.	Contextualização e motivação	8
2.	Hidrogênio renovável	10
3.	Aspectos metodológicos	15
4.	Panorama da produção científica global sobre hidrogênio renovável	15
4.1.	Visão geral da rede de hidrogênio renovável	17
4.2.	Caracterização da rede.....	19
4.2.1.	Cluster 1: Sistemas híbridos de energia renovável	20
4.2.2.	Cluster 2: Amônia renovável e sistemas dual-fuel.....	21
4.2.3.	Cluster 3: Produção de hidrogênio por eletrólise da água.....	22
4.2.4.	Cluster 4: Processos termoquímicos de produção de hidrogênio a partir de biomassa 23	
4.2.5.	Cluster 5: Biohidrogênio.....	24
4.2.6.	Cluster 6: Hidrogênio a partir de glicerol	25
4.2.7.	Considerações sobre as análises dos clusters	26
4.3.	Análise sobre os países.....	27
4.3.1.	Publicações brasileiras	28
5.	Panorama sobre a produção global de patentes sobre hidrogênio renovável.....	29
5.1.	Visão geral das patentes levantadas.....	30
5.2.	Principais códigos IPCs das patentes levantadas	32
5.3.	Caracterização da rede – Análise dos clusters de códigos IPC.....	34
5.3.1.	Cluster 1 – Eletrólise.....	34
5.3.2.	Cluster 2 – Células a combustível.....	35
5.3.3.	Cluster 3 – Processos catalíticos	35
5.3.4.	Cluster 4 – Processos termoquímicos	36
5.3.5.	Cluster 5 – Biohidrogênio	36
5.3.6.	Cluster 6 – Armazenamento.....	37
5.3.7.	Cluster 7 – Motores à combustão	37
5.4.	Considerações finais sobre as patentes levantadas.....	38
6.	Panorama sobre os projetos em hidrogênio renovável.....	38
6.1.	Visão geral sobre os projetos em hidrogênio renovável.....	38

6.2.	Projetos Brasileiros.....	41
6.4.	Análise por tecnologia – Biomassa.....	42
6.5.	Considerações sobre o panorama dos projetos em H2R.....	43
7.	Considerações gerais e conclusões.....	43
8.	Referências.....	44

Lista de Figuras

Figura 1: Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio. Fonte: EPE (2021)	8
Figura 2: Volume relativo de buscas de acordo com o Google Trends.....	10
Figura 3: Estrutura geológica composta por uma depressão circular na formação de uma zona de cráton no Brasil onde o gás hidrogênio é detectado fluindo. Fonte: Moretti et al. (2018)...	11
Figura 4: Os continentes sul-americano e africano se unindo na antiga era geológica que formava o supercontinente Pangea. As regiões onde as formações rochosas do cráton são encontradas no topo dos aquíferos subjacentes na América do Sul e na África são indicada ...	13
Figura 5: Classificação das rotas de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis. Fonte: Traduzido de Martinez-Burgos et al. (2021).	14
Figura 6: Processo metodológico para o levantamento de artigos científicos em hidrogênio renovável.....	16
Figura 7: Processo de aprimoramento por similaridade semântica da rede de publicações científicas	17
Figura 8: Rede de similaridade semântica das publicações científicas em H2R.	17
Figura 9: Nuvem de palavras-chave da rede de H2R	18
Figura 10: Evolução do número de publicação com o tempo.....	19
Figura 11: Rede de similaridade semântica com os 6 clusters destacados.....	19
Figura 12: Nuvem de palavras-chave do cluster 1	20
Figura 13: Cinco países que mais publicaram no cluster 1	20
Figura 14: Nuvem de palavras-chave do cluster 2	21
Figura 15: Cinco países que mais publicaram no cluster 2	21
Figura 16: Nuvem de palavras-chave do cluster 3	22
Figura 17: Cinco países que mais publicaram no cluster 3	22
Figura 18: Nuvem de palavras-chave do cluster 4	23
Figura 19: Cinco países que mais publicaram no cluster 4	24
Figura 20: Nuvem de palavras-chave do cluster 5	24
Figura 21: Cinco países que mais publicaram no cluster 5	25
Figura 22: Nuvem de palavras-chave do cluster 6	25
Figura 23: Cinco países que mais publicaram no cluster 6	26
Figura 24: Análise temporal das publicações nos clusters.....	27
Figura 25: Vinte países com o maior número de publicações científicas na rede do hidrogênio renovável.....	28
Figura 26: Mapa do número de publicações em hidrogênio renovável.	28
Figura 27: 10 países com a maior frequência de parcerias com o Brasil na rede gerada.....	29
Figura 28: Nuvem de palavras-chave das publicações brasileiras na rede gerada.....	29
Figura 29: Nuvem de palavras dos títulos das patentes em hidrogênio renovável.....	30
Figura 30: Evolução do número de patentes com o tempo a partir de 1970	31

Figura 31: Evolução do número de patentes com o tempo no período de 1960 até 1990	31
Figura 32: Países em que houve depósito de patentes	32
Figura 33: Hierarquia de área tecnológica do IPC C25b1/04	33
Figura 34: Nuvem de palavras do cluster de eletrólise	34
Figura 35: Nuvem de palavras do cluster de células a combustível	35
Figura 36: Nuvem de palavras do cluster de processos catalíticos.....	35
Figura 37: Nuvem de palavras do cluster de processos termoquímicos de obtenção de hidrogênio	36
Figura 38: Nuvem de palavras do cluster de biohidrogênio	36
Figura 39: Nuvem de palavras do cluster de armazenamento de hidrogênio	37
Figura 40: Nuvem de palavras do cluster de motores à combustão interna	37
Figura 41: Distribuição do tipo de tecnologia entre os projetos.....	39
Figura 42: 15 países com o maior número de projetos em H2R.....	39
Figura 43: Mapa do número de projetos por países no mundo	40
Figura 44: 15 países com as maiores capacidades acumuladas de produção de H2R.....	40
Figura 45: Mapa com a distribuição das capacidades divulgadas acumuladas no mundo	41
Figura 46: Fonte da energia renovável para a eletrólise.....	42
Figura 47: Distribuição das diferentes tecnologias que utilizam biomassa	42
Figura 48: Porcentagens de dados sobre eletrólise e biohidrogênio em cada análise	43

Lista de Tabelas

Tabela 1: 20 palavras-chave mais citadas na rede de publicações científicas.....	18
Tabela 2: Códigos IPCs mais frequentes por nível de subclasse, grupo e subgrupo. Fonte: Espace Net (2021)	32
Tabela 3: Tecnologias disponibilizados na base de dados da IEA (IEA, 2021b).	38
Tabela 4: Projetos brasileiros em H2R	41

1. Contextualização e motivação

As mudanças climáticas têm sido tópicos de discussão há quase 30 anos quando se realizou um dos primeiros grandes encontros internacionais sobre o clima, a conferência Rio 92. No decorrer desse período a urgência dos alertas da comunidade científica só cresceu. Hoje já é reconhecido que os continentes estão em média $1,6^{\circ}\text{C}^1$ mais quentes e que a ação humana já causou danos irreversíveis ao planeta (IPCC, 2021).

Diante desse cenário, diversos países têm buscado alternativas mais limpas principalmente para o setor de energia, um dos principais emissores de gases de efeito estufa. O uso do hidrogênio tem aparecido como uma oportunidade promissora para contribuir na transição para uma economia de baixo carbono. Porém, esse uso está condicionado a processos de produção de hidrogênio diferentes do que são praticados hoje.

A oferta de hidrogênio hoje é baseada principalmente na reforma a vapor do gás natural e na oxidação parcial de combustíveis fósseis, a exemplo do carvão (IEA, 2019). No entanto, é possível produzir hidrogênio a partir de outros processos mais sustentáveis, como a eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes de energia renovável, e a reforma da biomassa e de outros produtos como o etanol e o glicerol. A Figura 1 mostra uma representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio publicada pela EPE e que teve como referência o relatório *Hidrogênio energético no Brasil. Subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025, tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários* do CGEE (EPE, 2021; CGEE 2010). A Figura 1 também apresenta diferentes oportunidades de uso para o hidrogênio.

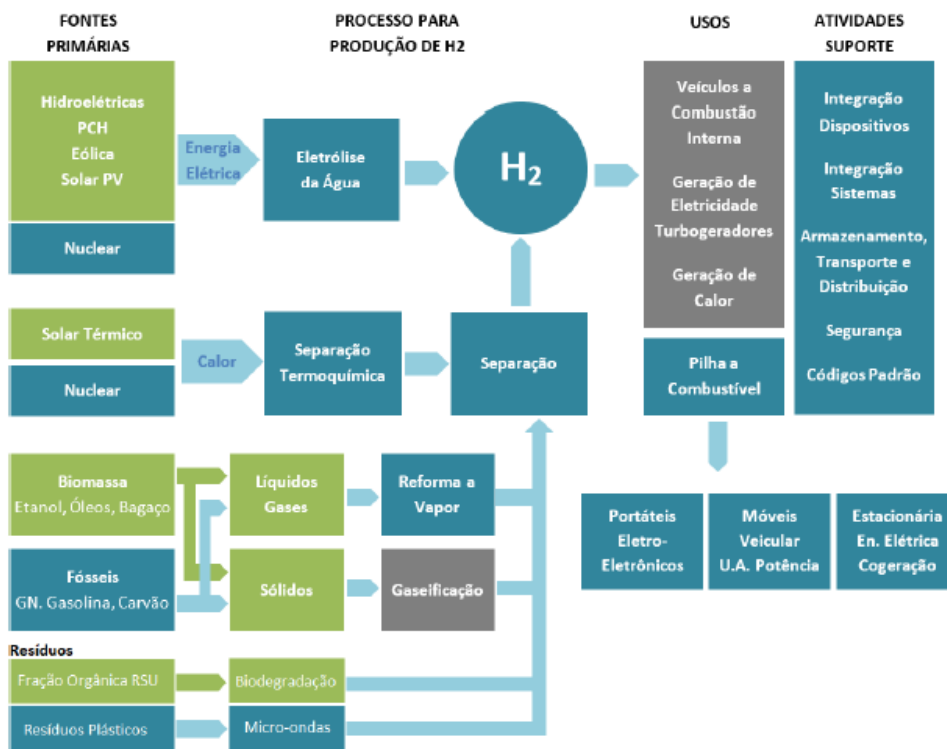


Figura 1: Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio. Fonte: EPE (2021)

¹ Como efeito das emissões antropogênicas, o planeta aqueceu em média $1,1^{\circ}\text{C}$, porém com o aquecimento nos continentes de $1,6^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2021).

Atualmente, o hidrogênio tem sido usado principalmente para a produção de amônia e nas refinarias de petróleo (IEA, 2019). Entretanto, as expectativas relacionadas ao uso futuro de um hidrogênio renovável, tratam principalmente do seu uso energético. O *European Green Deal*, por exemplo, que busca a neutralidade de carbono na Europa até 2050, aponta que a participação do hidrogênio na matriz energética da Europa deverá crescer dos atuais menos de 2% para 13-14% até 2050 (European Commission, 2020).

Além do uso energético, o hidrogênio também tem o potencial de impulsionar uma economia de baixo carbono através de produtos mais sustentáveis, como no caso da indústria siderúrgica. O estudo *Desafios e oportunidades para o Brasil com o hidrogênio verde* do instituto E+ em parceria com a Fundação Heinrich Böll Stiftung mostrou o uso do hidrogênio na indústria de aço como uma das três principais oportunidades para o hidrogênio no país.

A grande expectativa em relação ao hidrogênio está relacionada de fato a um conjunto abrangente de oportunidades. Em primeiro lugar o hidrogênio é um gás leve e de elevado poder calorífico o que permite, por exemplo, uma combustão limpa com forte teor energético para uma pequena massa de produto. O hidrogênio também pode funcionar como um vetor para armazenamento de energia renovável facilitando a conexão entre os locais de produção e centros de demanda mais distantes. O hidrogênio também tem sido considerado um caminho para a eletrificação no setor de transportes principalmente através das tecnologias de células a combustível.

Os desafios, no entanto, ainda são consideráveis. Ainda há necessidade de desenvolvimento na difusão de novas tecnologias e na infraestrutura de produção, armazenamento, transporte e distribuição de hidrogênio. Em particular, o desafio de armazenamento é digno de nota pelo fato de o hidrogênio ser extremamente leve, o que impõe restrições significativas sobre o processo de aumentar sua densidade energética. Tais processos exigem elevadas pressões para armazenamento no estado gasoso, ou criogenia para armazenamento no estado líquido, que comportam riscos. Vale ressaltar também a ausência de um arcabouço institucional, legal e regulatório adequado ao uso energético do hidrogênio.

Apesar do esforço que ainda precisa ser feito para o desenvolvimento de uma economia baseada em hidrogênio, diversos países têm lançado suas estratégias e planos nacionais, como Alemanha, Reino Unido, África do Sul, Estados Unidos, Canadá, Coreia do Sul e Chile. O Brasil também deu início ao desenvolvimento do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH), tendo como principais marcos a publicação do documento *Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio* (EPE, 2021) e das *Diretrizes para o PNH* (MME, 2021). Instituições internacionais também têm realizados esforços recentes para promover a economia do hidrogênio, como a Agência Internacional de Energia (IEA, 2019), Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2019) e a Comissão de Transições Energéticas (Energy Transitions Commission, 2021).

Outra forma de verificar o interesse crescente pelo hidrogênio a partir de fontes renováveis pode ser percebido pelo volume de buscas no Google pelo termo “*green hydrogen*” ou “hidrogênio verde” como tem sido comumente chamado o hidrogênio a partir de fontes renováveis². O gráfico da Figura 2 mostra um leve aumento nas buscas pelo termo “*hydrogen*

² Este Informe faz uso do termo **hidrogênio renovável** para se referir ao hidrogênio proveniente de fontes renováveis. No entanto, o termo “*green hydrogen*” – principalmente em inglês - tem sido o mais utilizado mundialmente. A seção 2 deste Informe apresenta os diferentes termos que têm sido utilizados e justifica a escolha do termo **hidrogênio renovável**.

production”, porém um expressivo aumento das buscas pelo termo “*green hydrogen*” que é um tipo específico de produção – limpa e sustentável – de hidrogênio.

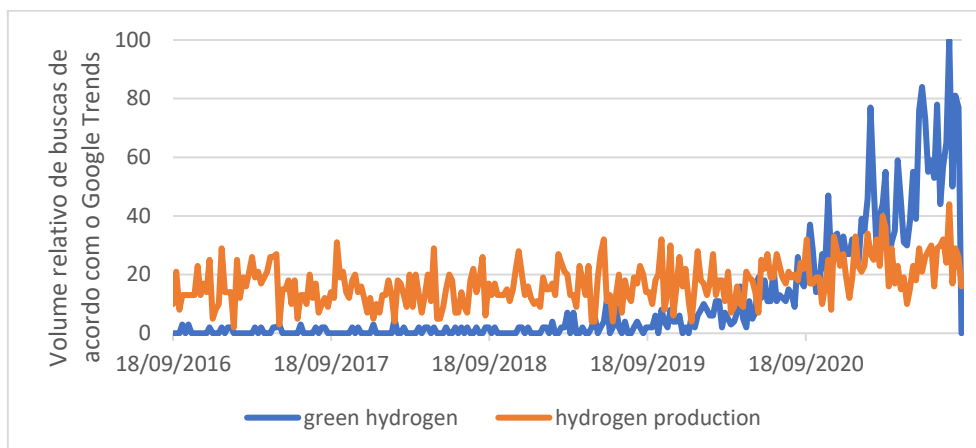


Figura 2: Volume relativo de buscas de acordo com o Google Trends.

Nesse contexto, é importante que os tomadores de decisão possam dispor de insumos de qualidade para compreender os movimentos globais relacionados ao hidrogênio renovável. De forma a somar com as contribuições já existentes, a primeira edição do Informe em Inovações Energéticas Sustentáveis (iSES) visa trazer um panorama sobre publicações científicas, patentes e projetos comerciais sobre o hidrogênio renovável (H2R) no mundo.

Além desta introdução, esse Informe ainda contém outras cinco seções. Na seção 2 são discutidos os diferentes termos e definição para o hidrogênio renovável. Na seção 3 são apresentados os principais aspectos metodológicos do Informe iSES. Nas seções 4, 5 e 6 são apresentados os resultados dos levantamentos sobre as publicações científicas, patentes e projetos comerciais em hidrogênio renovável, respectivamente. Por fim, a seção 7 apresenta as considerações finais.

2. Hidrogênio renovável

Para atender as expectativas de uma economia baseada em hidrogênio, é primordial considerar as formas sustentáveis de se obter o hidrogênio. Nos últimos cinco anos tem surgido uma classificação baseada em cores para categorizar os diversos tipos de hidrogênio com base no seu processo de produção. Na maioria dos casos o hidrogênio é dividido em cinza, azul e verde. O cinza é o hidrogênio proveniente de fontes fósseis, o azul é aquele produzido de fontes fósseis, mas com captura de carbono, e verde, se refere ao produzido a partir da eletrólise da água utilizando fontes renováveis de energia (ICLEI, 2021; Hydrogen Concil, 2021). No entanto, essa classificação não inclui ou especifica outros processos de produção. A Agência Internacional de Energia, por exemplo, divide a produção de hidrogênio a partir de fontes fósseis em três cores: preto, a partir do carvão, cinza, a partir do gás natural e marrom, a partir de lignite (IEA, 2021a). A EPE inclui o hidrogênio musgo para se referir ao hidrogênio a partir de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem captura de carbono, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica (EPE, 2021). Vale ressaltar ainda a existência do hidrogênio turquesa, gerado a partir da pirólise do metano, o vermelho (podendo ainda ser rosa ou roxo) gerado a

partir da eletrólise com uso de energia nuclear, e o branco, sendo o hidrogênio natural ou geológico (Box 1).

Box 1 Hidrogênio Natural

Fonte: Miranda, Paulo Emílio. Hydrogen Energy: Sustainable and Perennial. In: **Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies**. Academic Press. Elsevier. 2019 (1-35)

Apesar da crença mantida por tanto tempo, de que as tecnologias convencionais de produção de hidrogênio, ou as mais recentes e sofisticadas, são as formas possíveis de viabilizar o combustível hidrogênio para uso no Planeta, a exploração do hidrogênio natural está começando a se tornar realidade. Não há dúvida de que o hidrogênio é o elemento mais abundante do Universo. Na Terra, pensava-se que ele existia apenas ligado a compostos, como na água e em quaisquer hidrocarbonetos e álcoois, sendo um dos constituintes de toda a flora e fauna. O gás hidrogênio não era considerado disponível na Terra - nem misturado a outros gases, nem em alta proporção - por ser constituído por um elemento químico tão reativo. No entanto, evidências recentes indicam outra realidade. A Figura 3 mostra uma estrutura geológica circular na superfície da Terra, no Brasil, onde são feitas medições para detectar a liberação contínua de hidrogênio natural (Moretti *et al.*, 2018). Essas estruturas circulares, às vezes elípticas, que podem possuir alguns metros ou quilômetros de diâmetro, são zonas de deformação do solo, resultantes de falhas geológicas subsuperficiais, delimitadas por depressões arredondadas de alguns metros, apresentando no seu interior um fundo plano.



Figura 3: Estrutura geológica composta por uma depressão circular na formação de uma zona de cráton no Brasil onde o gás hidrogênio é detectado fluindo. Fonte: Moretti et al. (2018)

Elas também são encontradas em outros lugares, como na América do Norte, Omã, Filipinas, Mali, Turquia, Nova Caledônia e Rússia (Moretti *et al.*, 2018; Deville & Prinzhofer, 2016; Larin *et al.*, 2015). A seguir são apresentadas algumas características e alguns mecanismos relacionados à existência de hidrogênio natural na Terra (Deville & Prinzhofer, 2016):

1. A liberação de hidrogênio natural é agora entendida como surgindo em regiões de formação de cráton, que são formações rochosas na crosta continental da Terra que permaneceram estáveis por um período de tempo que se estende por 500 milhões de anos;

2. O hidrogênio é encontrado na superfície da terra e em profundidades razoavelmente rasas de até cerca de 500 m (Larin *et al.*, 2015);

3. O hidrogênio molecular natural também ocorre em formações ofiolíticas³, eventualmente associado ao nitrogênio e ao metano abiótico, cuja geração não está ligada ao craqueamento térmico da matéria orgânica, mas à redução de qualquer fonte de carbono. Ou seja, não há acúmulo de matéria orgânica associada nos locais de ocorrência, situação em que preferencialmente os hidrocarbonetos seriam produzidos.

4. O efeito da serpentinização⁴ em peridotito, uma rocha muito densa, de granulação grosseira, rica em olivina [(Mg²⁺, Fe²⁺)₂SiO₄] e ultramáfica, que é um mineral de silicato rico em magnésio (membro final de forsterita⁵) e ferro (membro final de faialita), ocorre em duas etapas (Larin *et al.* 2015):

a. A hidratação do membro final da forsterita da olivina (Mg₂SiO₄) produz muito íon hidroxila, como na equação abaixo, para torná-la uma rocha ultrabásica:



Ou ainda, de maneira simplificada:

Fosterita + água → serpentina + magnésio + íon hidroxila

b. Uma vez que o Fe²⁺ é de longe o mais importante doador de elétrons em rochas ultrabásicas, a hidratação do membro final do ferro (faialita) dos minerais de olivina induz a formação de minerais Fe³⁺, como a magnetita, levando à formação de hidrogênio, conforme descrito na equação abaixo:



Ou ainda, de maneira simplificada:

Faialita + água → magnetita + sílica + hidrogênio

A existência de aquíferos sob a superfície da terra em regiões de formação de cráton geologicamente estáveis pode representar um mecanismo de promoção contínua da formação de hidrogênio natural, desde que o Fe²⁺ esteja presente em seu entorno (como olivina, ou como qualquer outro mineral contendo ferro sendo capaz de se decompor e liberar Fe²⁺ solúvel em água). Isso pode eventualmente ser consistente com a incrível possibilidade de reabastecer poços de hidrogênio natural com gás recém-formado.

Os primeiros poços de hidrogênio realmente produzindo hidrogênio natural no mundo estão sendo explorados em Bourakebougou, no Mali, na África. Foi a busca por água naquela região que revelou a presença de ocorrência gasosa composta por 98% de hidrogênio natural puro, 1% de nitrogênio e 1% de metano, sendo o gás explorado e utilizado localmente para geração de eletricidade (Moretti *et al.*, 2018). Os poços de hidrogênio natural estão a pouco mais de 100 metros abaixo da superfície terrestre naquela região, confirmando que esse recurso energético pode estar disponível em poços rasos, para os quais a configuração tecnológica para exploração se torna mais simples e barata. Isso pode resultar na

³ Ofiolito é um complexo de rocha ígnea estratificada na crosta oceânica da Terra e no manto superior subjacente que foi elevado e exposto acima do nível do mar, colocado nas rochas da crosta continental. Significando rocha de cobra, do grego, contém rochas serpentinizadas que apresentam uma superfície escamosa, com padrão marrom esverdeado que se assemelha a pele de cobra.

⁴ Rochas serpentinizadas são formadas como resultado de processos de hidratação, como a serpentinização, quando as placas tectônicas que se espalham na crosta terrestre se levantam do oceano e elas são alteradas quimicamente pela água ou, alternativamente, quando um processo semelhante é induzido pela presença de aquíferos subjacentes que promovem o movimento da água.

⁵ O membro final é um mineral que está no extremo final de uma série de minerais em termos de pureza. Faialita Fe₂SiO₄ e forsterita Mg₂SiO₄ são membros finais da série das olivinas (Mg, Fe)₂SiO₄.

extraordinária possibilidade de extração do hidrogênio natural a um custo menor que o do hidrogênio produzido por qualquer um dos métodos conhecidos até hoje, desde a convencional reforma a vapor do gás natural e a bem desenvolvida eletrólise da água até as tecnologias inovadoras atualmente em desenvolvimento.

A partir da consideração de que os primeiros poços de hidrogênio natural do mundo estão em produção no Mali, no noroeste da África, e da comprovação da ocorrência de hidrogênio natural no nordeste da América do Sul, no Brasil (Figura 3) – e sabendo que os continentes sul-americano e africano eram unidos, em antiga era geológica, formando o supercontinente Pangeia, conforme ilustração da Figura 4, e podendo compartilhar estruturas geológicas semelhantes – foi feita uma análise do potencial de descoberta de ocorrência simultânea de regiões de formação de cráton por sobre aquíferos subjacentes nesses dois continentes, com o intuito de identificar outras regiões onde poços de hidrogênio natural provavelmente poderiam ser encontrados. O resultado da análise efetuada revela a existência de várias ocorrências coincidentes de formações rochosas de cráton sobre aquíferos subjacentes tanto na América do Sul quanto na África (Figura 4). A formação identificada na região amazônica chama atenção por sua enorme extensão.

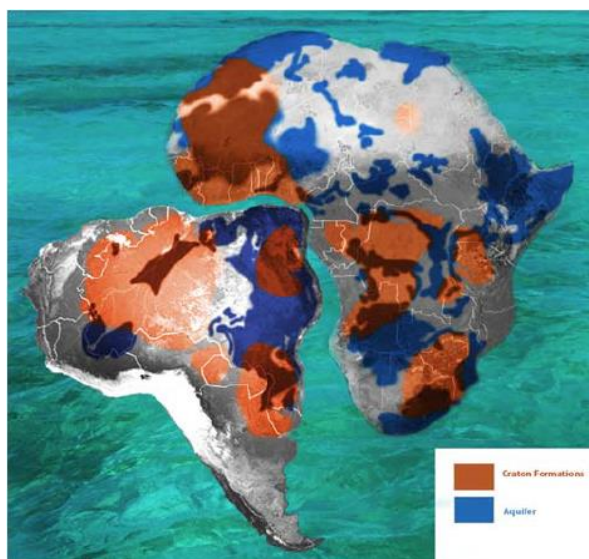


Figura 4: Os continentes sul-americano e africano unidos em antiga era geológica, formando o supercontinente Pangeia. As regiões onde as formações rochosas do cráton são encontradas no topo dos aquíferos subjacentes na América do Sul e na África

Além disso, levando em consideração que formações gasosas naturais, ricas em hidrogênio, foram encontradas no leito oceânico paleo na Nova Caledônia (ofiolito), é concebível admitir que nas vastas extensões oceânicas intercontinentais, podem existir vários locais onde é provável que hidrogênio natural seja encontrado e explorado, cuja viabilidade estará muito dependente da profundidade e das condições locais, mas irá se beneficiar da experiência já acumulada com a exploração de hidrocarbonetos no oceano. Também é importante ressaltar que uma eventual exploração futura de hidrogênio natural submarino jamais submeterá tais locais ao perigo de desastres ambientais extraordinários como os já ocorridos com a exploração de hidrocarbonetos - petróleo e gás natural - simplesmente porque o hidrogênio seria parcialmente absorvido pela água e parcialmente dissipado ao ar livre, produzindo água.

Ainda que o termo “hidrogênio verde” venha sendo usado por vezes de uma maneira mais ampla do que apenas aquele produzido a partir da eletrólise da água empregando fontes renováveis de energia, a categorização por cores ainda está difusa entre os estudiosos do tema. Por esse motivo este informe buscou evitar a classificação por cores apesar do seu aspecto didático.

O foco desse informe está em trazer contribuições sobre o **hidrogênio renovável**, isto é o hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis, independentemente do tipo de processo (eletrólise, termoquímico ou bioquímico) e da existência de captura de carbono. Uma definição de hidrogênio renovável foi proposta por Martinez-Burgos *et al.* (2021). De acordo com os autores:

“o hidrogênio renovável pode ser obtido usando água como matéria-prima por meio de processos como eletrólise (com energia renovável), termólise e fotólise; empregando diferentes tipos de resíduos como substratos para biofotólise, fermentação escura e photo-fermentação; por meio da reformulação do bio-metano; ou por processamento termoquímico (pirólise, gaseificação, combustão, liquefação) usando diferentes tipos de biomassa”

A Figura 5 apresenta a classificação utilizada por Martinez-Burgos *et al.* (2021).

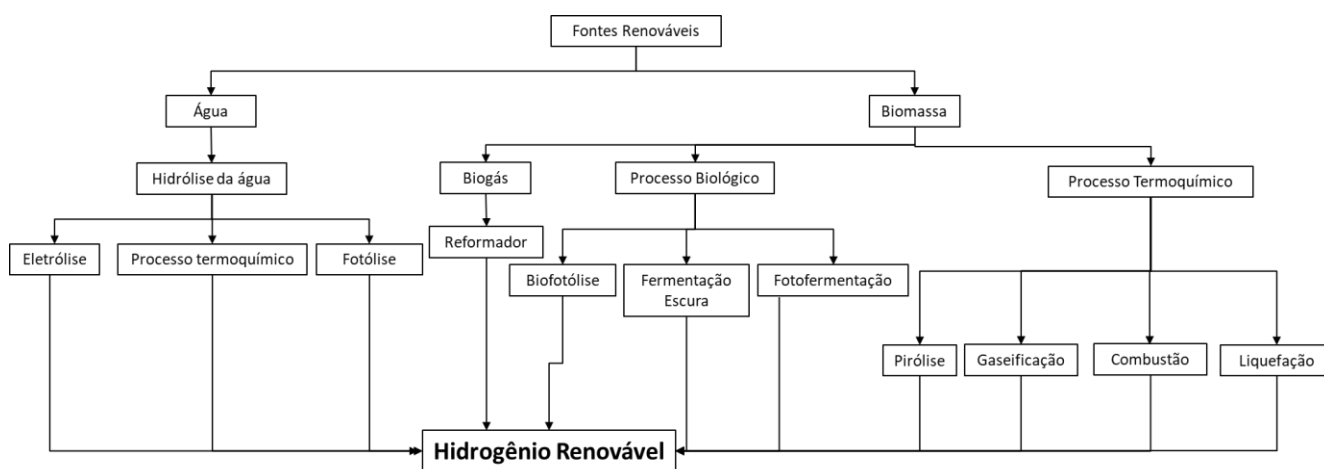


Figura 5: Classificação das rotas de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis. Fonte: Traduzido de Martinez-Burgos *et al.* (2021).

A decisão de usar o termo renovável e ampliar o escopo para além do hidrogênio de eletrólise, ou hidrogênio verde, se deu por três motivos principais. Em primeiro lugar para enfatizar que o hidrogênio pode ser “verde” mesmo que seja produzido a partir de processos diferentes do da eletrólise da água a partir de eletricidade gerada por fontes renováveis. Esse destaque é importante para evitar que oportunidades sejam perdidas, por exemplo, ainda que alguns processos biológicos atualmente tenham baixa eficiência para uma produção dedicada, eles podem gerar o hidrogênio como co-produto em processos que visam reduzir a poluição, estimular a reutilização de materiais e aproveitar resíduos e efluentes (Sarangi & Nanda, 2020).

Em segundo lugar, ampliar o escopo de análise significa olhar para processos que utilizam matérias-primas abundantes no Brasil, como o etanol e os resíduos da cana-de-açúcar, e o glicerol como co-produto da produção de biodiesel. Em terceiro lugar analisar o hidrogênio proveniente de fontes renováveis nos desafia a considerar uma economia cada vez menos dependente de recursos fósseis, ainda que utilizando processos com menos pegadas de carbono, a exemplo do hidrogênio azul.

As próximas seções apresentam os aspectos metodológicos e os panoramas globais para o hidrogênio renovável em termos de produção científica, patentes e projetos.

3. Aspectos metodológicos

A primeira edição do Informe iSES tem o objetivo de elaborar um panorama sobre publicações científicas, patentes e projetos comerciais sobre o hidrogênio renovável no mundo. Para tal, foi montado o Grupo de Trabalho do Hidrogênio Renovável do Informe iSES (GT H2R iSES) com especialistas em hidrogênio. O GT H2R iSES contribuiu principalmente em: levantar perguntas orientadoras para moldar o formato do Informe, validar as metodologias de busca de dados (artigos, patentes e projetos), sugerir os tipos de análises mais relevantes e verificar os resultados obtidos. O GT H2R iSES foi formado por oito especialistas de instituições como Unicamp (1), UFRJ (2), INT (2), EPE (2) e Instituto E+ (1). Foram realizadas cinco reuniões de trabalho em grupo e cinco reuniões individuais (representantes da instituição + equipe do CGEE), além de sugestões e revisões feitas por e-mail. Outras instituições também contribuíram com o Informe, como a Agência Internacional de Energia (IEA), principalmente com perguntas orientadoras e informações sobre os projetos comerciais de hidrogênio renovável (IEA, 2021).

Além do GT H2R iSES e de consultas individuais, o CGEE organizou, em 23/11/2021, a **Mesa de Diálogo Internacional 2021 - A Era do Hidrogênio Renovável**, com o objetivo de conhecer, por meio da participação de jovens pesquisadores do tema, quais ações estão sendo realizadas no mundo para lidar com as oportunidades e desafios do hidrogênio renovável. O evento contou com a participação simultânea de 85 participantes, dentre palestrantes, organizadores, colaboradores e plateia. A partir desse evento foi produzido o resumo executivo **Mesa de Diálogo Internacional – A Era do Hidrogênio Renovável** (CGEE, 2021). Tanto o evento quanto o resumo executivo serviram de fontes de informação para as discussões sobre contextualização do H2R e para as análises de panoramas de publicações científicas, patentes e projetos comerciais.

Durante todas as análises – publicações científicas, patentes e projetos – o principal desafio foi definir o escopo de busca. O tema “hidrogênio” envolve diversos aspectos como produção, armazenamento, transporte e uso. Para este Informe, que tem o foco em hidrogênio **renovável**, os critérios de buscas focaram principalmente na etapa de produção, o que caracteriza a renovabilidade do hidrogênio, em função do insumo utilizado.

É importante destacar que para as três análises produzidas buscou-se atingir uma amostra que fosse representativa do universo do hidrogênio, sem a ambição de garantir que todos os dados – de artigos, patentes ou projetos – fossem captados e analisados. As metodologias específicas para cada análise são discutidas nas seções 4, 5 e 6.

4. Panorama da produção científica global sobre hidrogênio renovável

Esta seção visa apresentar o panorama de publicações científicas sobre o hidrogênio renovável (H2R). Inicialmente será apresentada a metodologia utilizada para o levantamento dos dados relacionados ao H2R e em seguida serão apresentados os resultados de uma análise bibliométrica.

Para levantar as publicações científicas foi desenvolvida uma metodologia que capturasse uma amostra representativa de artigos que tratassem sobre H2R (Figura 6). Primeiramente foram levantados artigos do tipo *review* que continham o termo **green hydrogen**. Estes artigos foram analisados para identificar tipos de tecnologias e termos envolvidos com o tema. Assim, foi

definido um conjunto de 24 termos associados ao H2R que passaram pela revisão do GT H2R iSES. Tais termos eram sinônimos e similares à **green hydrogen** tais como: **renewable hydrogen**, **sustainable hydrogen** e **biohydrogen**. Essa busca levantou 13.165 artigos e constituiu a **rede coração** de publicações científicas.

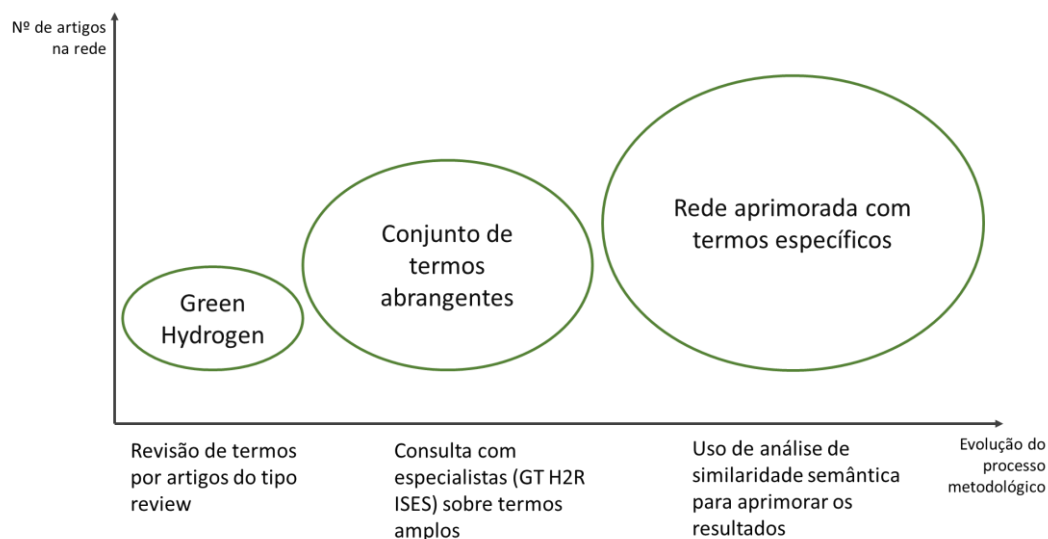


Figura 6: Processo metodológico para o levantamento de artigos científicos em hidrogênio renovável.

Visando aprimorar a rede, foram levantados 12 conjuntos de artigos com base em 12 termos relacionados a processos de produção de hidrogênio renovável. Esses termos tiveram como base o artigo de Martinez-Burgos *et al.* (2021) apresentado na seção 2 e a revisão do GT H2R iSES. Cada um desses conjuntos foi adicionado à rede coração e foram calculadas as similaridades semânticas dos títulos, resumos e palavras-chaves (Figura 7) no *software* próprio do CGEE, o Insight Net. Os artigos dos conjuntos que possuíam alto grau de similaridade semântica com a rede coração – ou os **primeiros vizinhos** – foram adicionados à rede coração. Após esse processo com os 12 conjuntos a rede final atingiu um total de 16.620 artigos científicos. É importante destacar que foi utilizada a base de dados Web of Science (WoS) considerando toda a série temporal disponível.

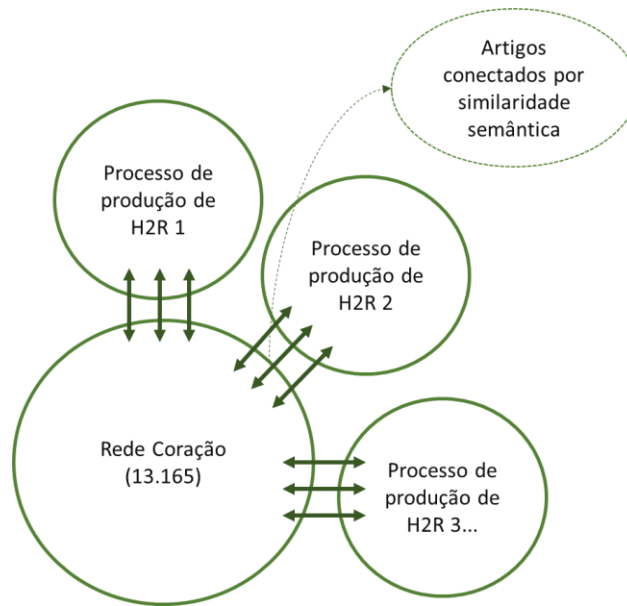


Figura 7: Processo de aprimoramento por similaridade semântica da rede de publicações científicas

4.1. Visão geral da rede de hidrogênio renovável

A rede final com 16.620 artigos conectados por similaridade semântica pode ser vista na Figura 8. Os nós mais próximos indicam artigos que tratam de assuntos semelhantes, e as cores indicam classes de modularidades calculadas pelo *software* Insight Net para identificar clusters temáticos.

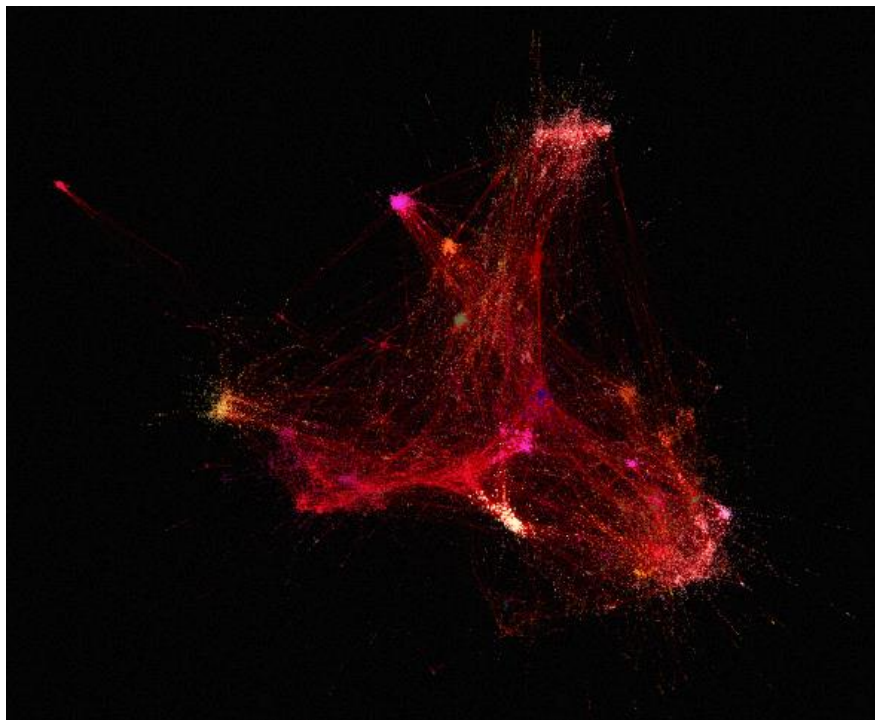


Figura 8: Rede de similaridade semântica das publicações científicas em H2R.

A Figura 9 mostra a nuvem de palavras-chave da rede completa e a Tabela 1 mostra a frequência de ocorrência das 20 primeiras palavras-chave. Depois da palavra **hidrogênio** as palavras mais citadas são **biohidrogênio** e **biomassa**, o que é interessante notar pois estas apontam para processos e matérias-primas alternativas. O “biohidrogênio” pode se referir tanto ao hidrogênio produzido a partir de processos biológicos quanto ao hidrogênio produzido a partir da biomassa⁶, em ambos os casos essas palavras indicam formas de obter H₂R por outros caminhos que o da eletrólise da água – como tem sido principalmente discutido quando se trata de **hidrogênio verde**. Outras palavras também indicam este fato, tais como: **dark fermentation**, **waste-water**, e **food waste** – processo e possíveis matérias-primas para o biohidrogênio, respectivamente.

O processo de eletrólise da água por eletricidade produzida a partir de energias renováveis também pode ser detectado através das palavras: **electrolysis**, **water** e **renewable energy**.

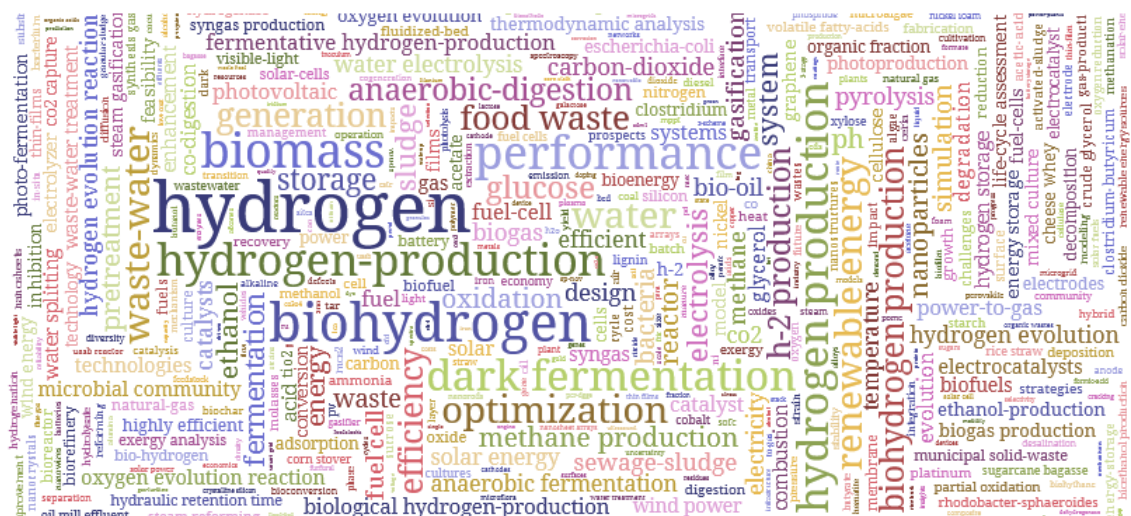


Figura 9: Nuvem de palavras-chave da rede de H₂R

Tabela 1: 20 palavras-chave mais citadas na rede de publicações científicas

	Palavra	Frequência		Palavra	Frequência
1	hydrogen	2984	11	renewable energy	830
2	biohydrogen	1749	12	generation	665
3	biomass	1335	13	food waste	662
4	performance	1303	14	biohydrogen production	605
5	hydrogen production	1207	15	efficiency	599
6	hydrogen production	1135	16	glucose	594
7	dark fermentation	1087	17	h-2 production	566
8	water	864	18	anaerobic-digestion	557
9	optimization	860	19	electrolysis	516
10	waste-water	832	20	sludge	511

A Figura 10 apresenta a evolução do número de publicações da rede ao longo dos anos. Observa-se que o número de publicações vem crescendo a partir de 2004. O menor número de

⁶ Neste Informe o biohidrogênio será tratado como aquele produzido por rotas biológicas.

publicações no ano de 2021 se dá pelo fato dos artigos iniciais da rede coração terem sido levantados em agosto de 2021. Assim, parece razoável supor que o ano de 2021 manterá a tendência de crescimento.

Visando uma caracterização mais profunda da rede, a próxima seção apresentará a análise de 6 clusters temáticos.

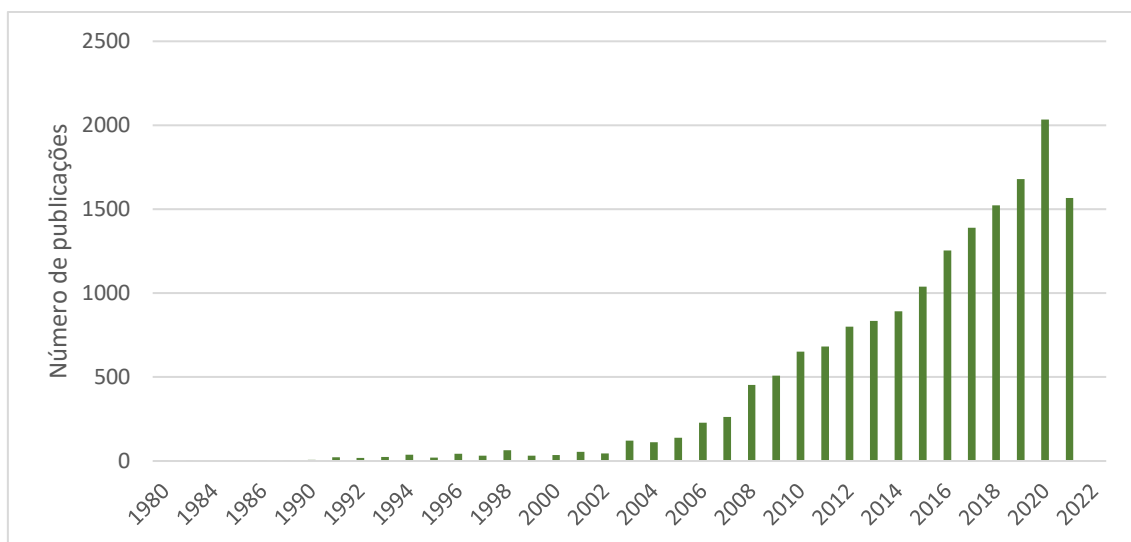


Figura 10: Evolução do número de publicação com o tempo.

4.2. Caracterização da rede

A Figura 11 apresenta a rede de similaridade semântica com os 6 clusters destacados. Para cada cluster será apresentada uma breve descrição, a nuvem de palavras-chave e os cinco países que mais publicaram no cluster.

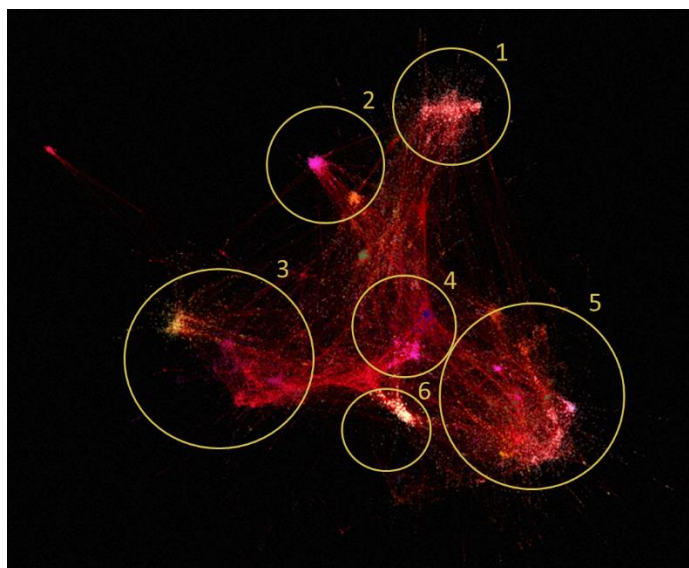


Figura 11: Rede de similaridade semântica com os 6 clusters destacados

4.2.1. Cluster 1: Sistemas híbridos de energia renovável

O cluster 1 encontra-se na parte superior da rede e tem um alto nível de concentração, o que indica que os artigos possuem temas bastante semelhantes entre eles. A nuvem de palavras-chave e os cinco países que mais publicaram no cluster 1 podem ser vistos nas Figura 12 e Figura 13, respectivamente.

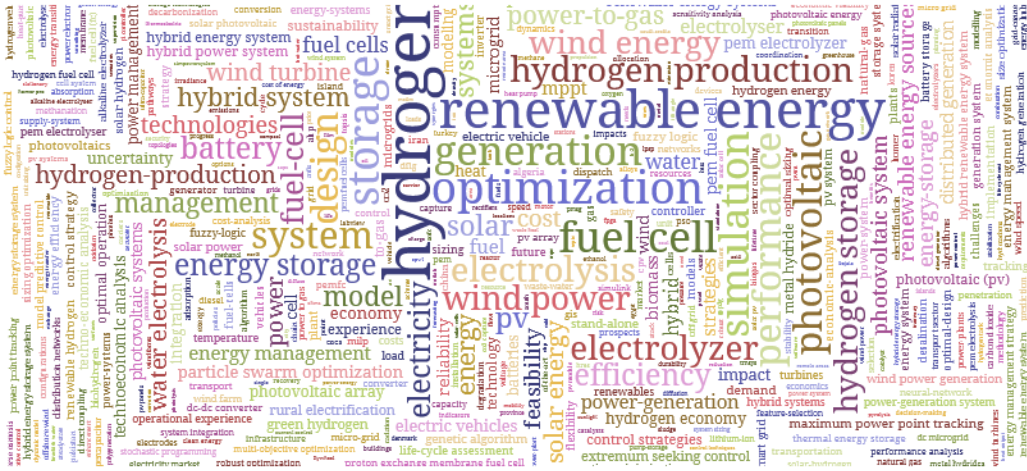


Figura 12: Nuvem de palavras-chave do cluster 1

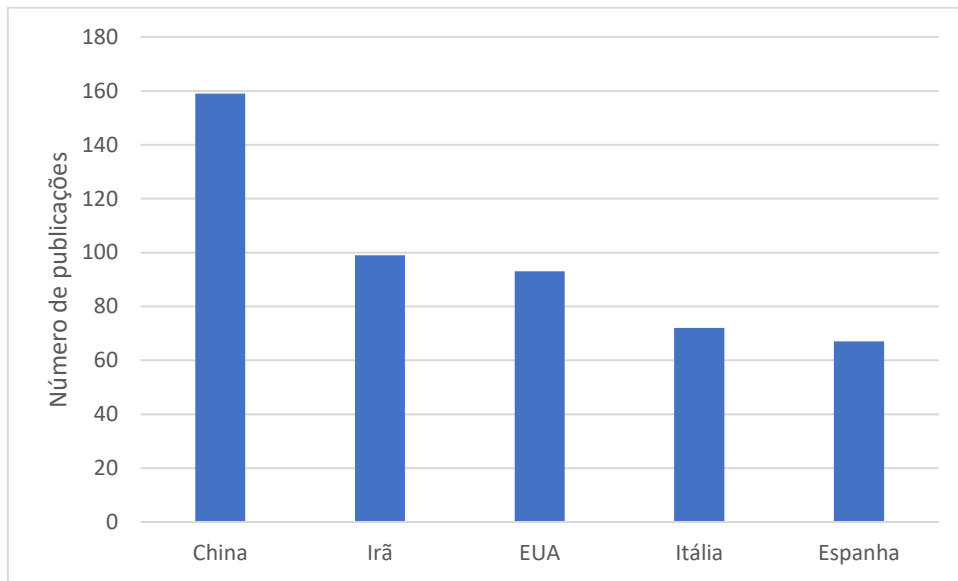


Figura 13: Cinco países que mais publicaram no cluster 1

O cluster 1 possui 1.720 artigos que tratam de temas diversos relacionados a produção e uso do hidrogênio renovável, mas principalmente num contexto de **sistemas híbridos**. Vários artigos discutem o uso de eletrolisadores como forma de armazenar a energia gerada por fontes intermitentes como eólica e solar. Muitos dos artigos são orientados sobre formas de otimizar esses sistemas híbridos de energia renovável.

Observa-se na Figura 13 que a China é o país que apresentou maior número de publicações no cluster, seguido do Irã e Estados Unidos.

A Figura 15 mostra os Estados Unidos como o país que mais publicou no cluster, seguido de China Índia, Alemanha e Itália.

4.2.3. Cluster 3: Produção de hidrogênio por eletrólise da água

O cluster 3 é maior que os anteriores, possuindo 2.479 artigos que estão espalhadas por diversos sub-clusters localizados na lateral esquerda da rede. A nuvem de palavras-chave e os cinco países que mais publicaram no cluster 3 podem ser vistos nas Figura 16 e Figura 17, respectivamente.

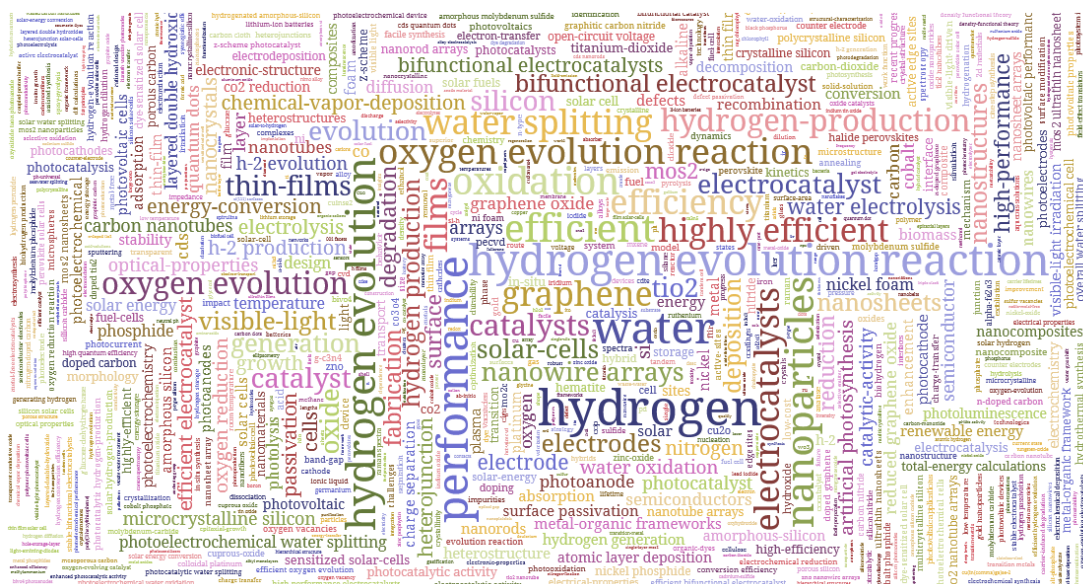


Figura 16: Nuvem de palavras-chave do cluster 3

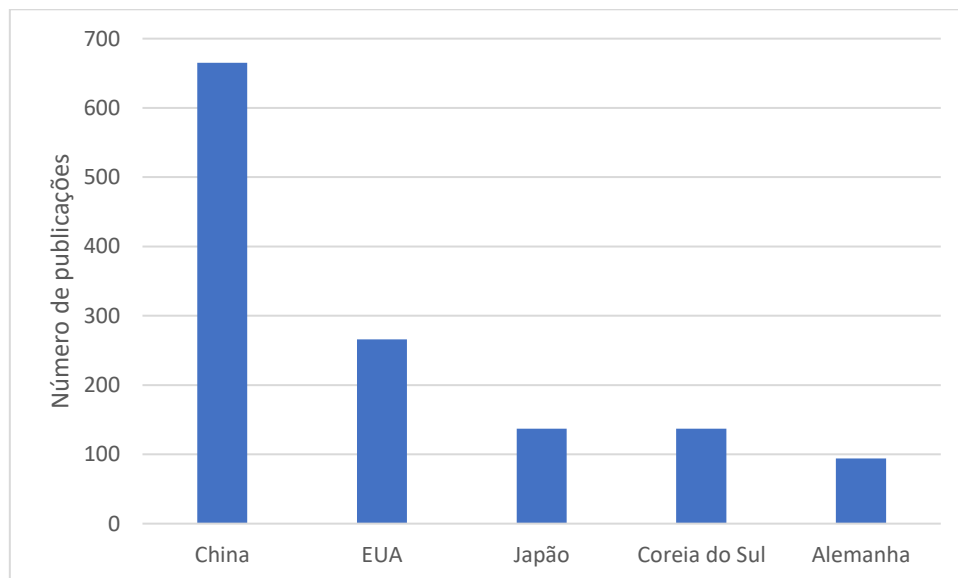


Figura 17: Cinco países que mais publicaram no cluster 3

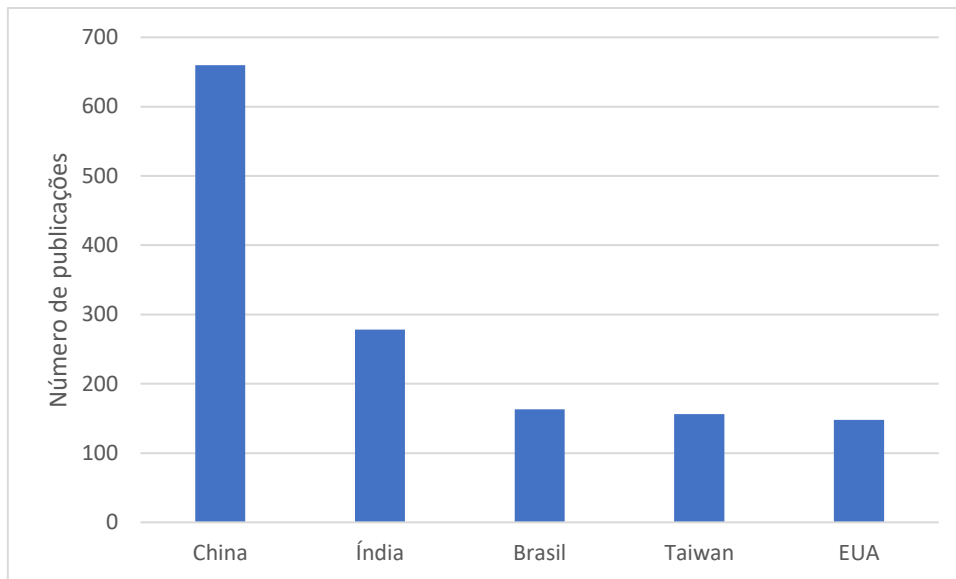


Figura 21: Cinco países que mais publicaram no cluster 5

O cluster 5 trata principalmente de processos biológicos de produção de hidrogênio, ou como é citado frequentemente no cluster, sobre a produção de **biohidrogênio**. Assim como no cluster 4, vários artigos discutem diferentes matérias-primas de partida, muitas delas na forma de resíduos, como **efluentes industriais**, **restos de comida** e **lodo de esgoto**. Outras matérias-primas que são frequentemente citadas são a **glicose**, **sacarose** e **xilose**. A produção de **biohidrogênio** é analisada considerando diversos processos, como a **fermentação escura**, **fotofermentação** e a **digestão anaeróbia**.

A análise sobre os países que mais publicam no cluster 5 mostrou que o Brasil se encontra na terceira posição, após a China e a Índia.

4.2.6. Cluster 6: Hidrogênio a partir de glicerol

O cluster 6 é o menor cluster analisado com 608 artigos. A nuvem de palavras-chave e os cinco países que mais publicaram no cluster 6 podem ser vistos na Figura 22 e Figura 23, respectivamente.

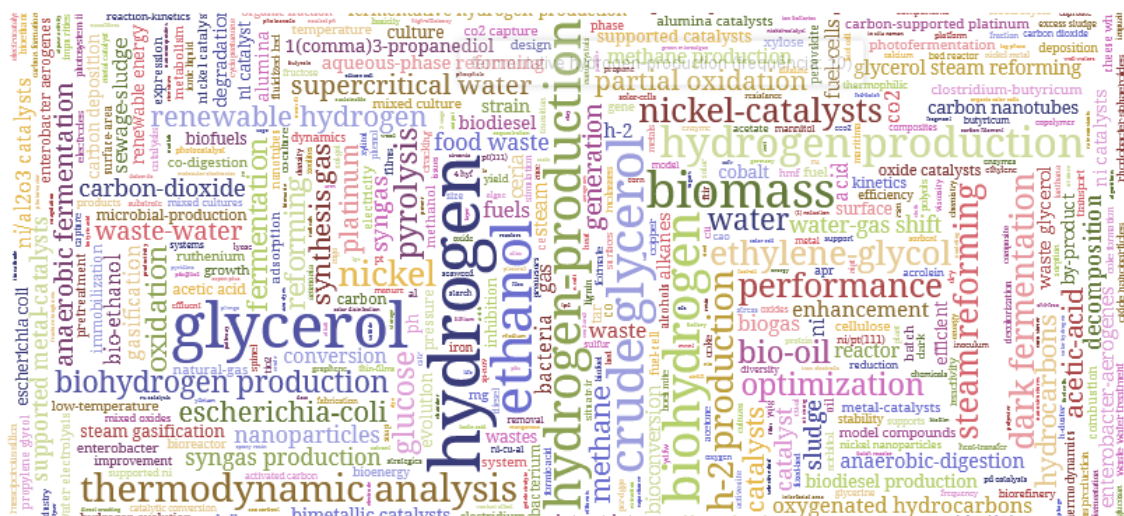


Figura 22: Nuvem de palavras-chave do cluster 6

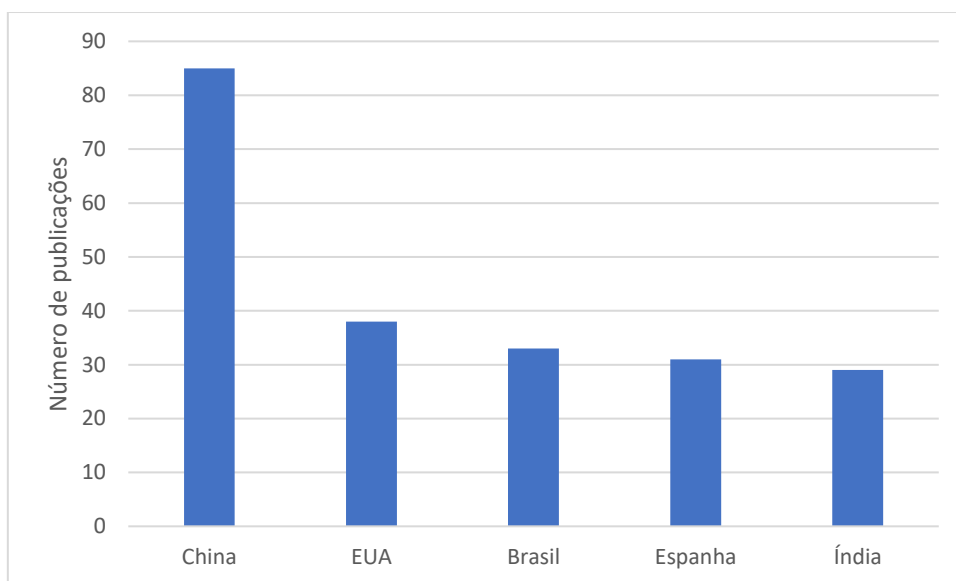


Figura 23: Cinco países que mais publicaram no cluster 6

O cluster 6 é bastante concentrado, o que indica que os artigos tendem a discutir temas muito semelhantes. O foco principal do cluster 6 é a produção de hidrogênio a partir de glicerol por processos como a reforma a vapor e reforma autotérmica. As discussões sobre o uso do glicerol são frequentemente contextualizadas sob o fato de que o glicerol é co-produto da produção de biodiesel, gerado em grandes quantidades e com elevado potencial de aproveitamento para a produção de hidrogênio.

Assim como no cluster anterior, o Brasil tem destaque entre os países que mais publicam no cluster, estando na terceira posição, após China e EUA.

4.2.7. Considerações sobre as análises dos clusters

A análise dos seis clusters correspondeu a 10.265 publicações, o que equivale a 61,8% da rede. Isso significa que vários outros temas estiveram presente na rede, mas que formaram clusters menores ou clusters de conexão, isto é, aqueles que tratam de mais de um dos temas analisados.

A partir da análise temporal dos clusters (Figura 24) é possível identificar alguns pontos de destaque, como a forte participação do cluster de biohidrogênio desde 2007 e o acelerado crescimento do cluster de eletrólise a partir de 2011, chegando a ultrapassar a quantidade de artigos de biohidrogênio no ano de 2020.

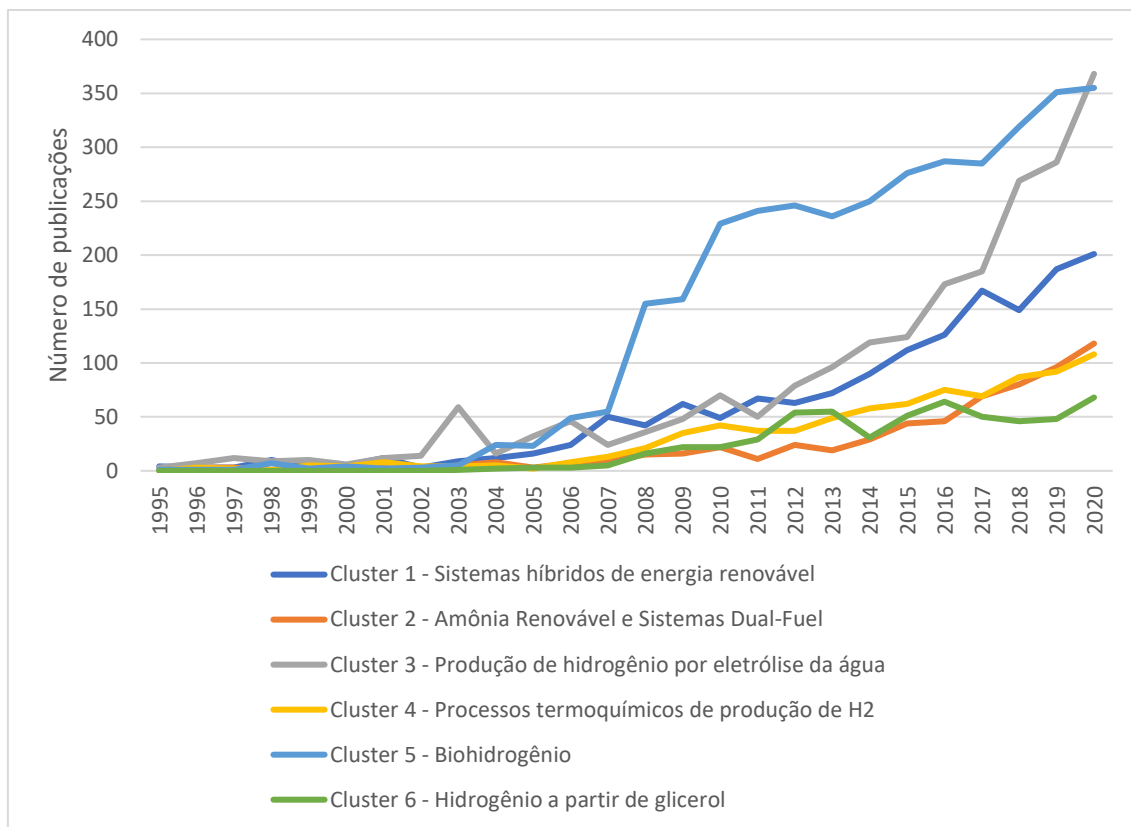


Figura 24: Análise temporal das publicações nos clusters

Os dados sobre os países que mais publicaram em cada cluster mostrou a forte participação da China e dos EUA nas publicações científicas sobre o hidrogênio renovável, estando presentes entre os cinco países que mais publicam nos seis clusters analisados. Outro país que vale destacar é a Índia, com forte presença nos clusters 2 (amônia renovável e sistemas *dual-fuel*), 4 (processos termoquímicos para a produção de H₂) e 6 (hidrogênio a partir de glicerol). O Brasil teve destaque em dois clusters, 5 (biohidrogênio) e 6 (hidrogênio a partir de glicerol), assim como Coreia do Sul, Espanha e Itália também aparecem em dois clusters.

A próxima seção irá discutir mais profundamente a distribuição da participação de cada país nas publicações da rede gerada, dando um enfoque para as produções brasileiras.

4.3. Análise sobre os países

A Figura 25 apresenta os 20 países que mais publicaram na rede gerada sobre o hidrogênio renovável, com o destaque para o Brasil na 17ª posição. A Figura 26 mostra o mapa do número de publicações em hidrogênio renovável por país.

Os resultados para a rede completa refletem os resultados vistos na análise dos clusters, onde se identificou a forte presença da China, EUA e Índia dentre os países que mais publicam sobre o tema. Percebe-se ainda uma participação expressiva de países asiáticos e a baixa participação da América do Sul, tendo apenas o Brasil como representante dentre os 20 primeiros.

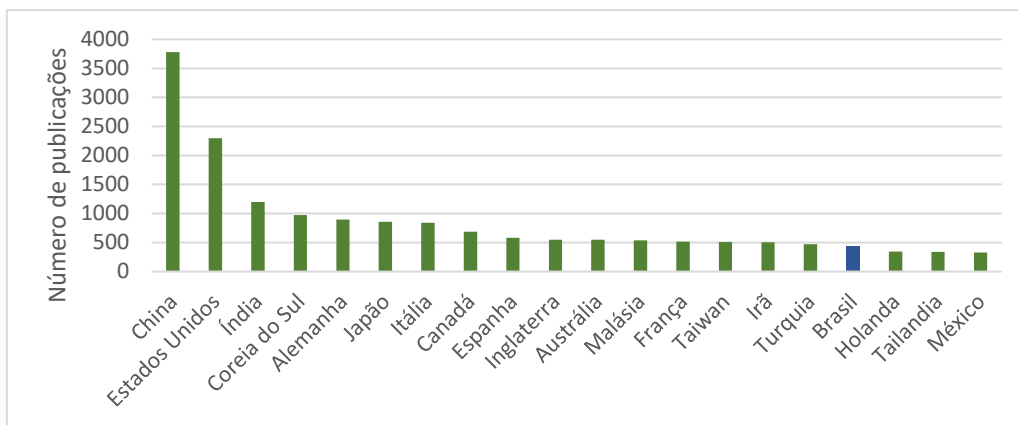


Figura 25: Vinte países com o maior número de publicações científicas na rede do hidrogênio renovável.

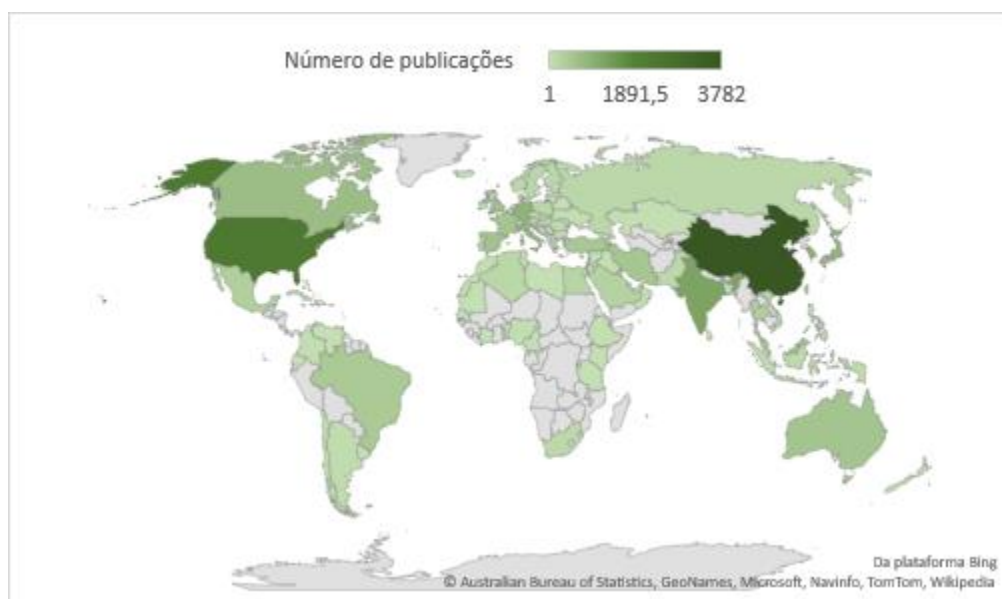


Figura 26: Mapa do número de publicações em hidrogênio renovável.

4.3.1. Publicações brasileiras

O Brasil apresentou um total de 440 artigos na rede de H2R, destes, 163 estão no cluster 5 (biohidrogênio) e 33 no cluster 6 (hidrogênio a partir de glicerol). Dos 440 artigos, 137 foram feitos em parceria com outros países. A Figura 27 apresenta os dez países que mais fizeram parceria com o Brasil na rede de H2R e a Figura 28 a nuvem de palavras-chave das publicações brasileiras.

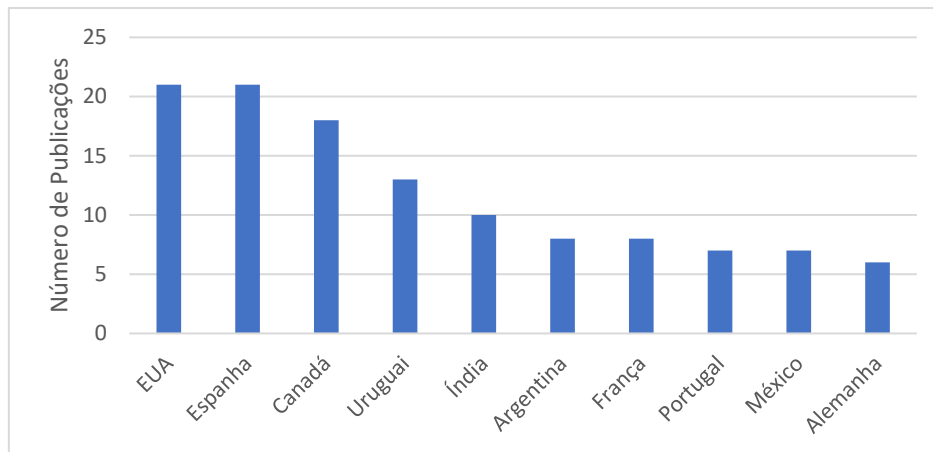


Figura 27: 10 países com a maior frequência de parcerias com o Brasil na rede gerada.



Figura 28: Nuvem de palavras-chave das publicações brasileiras na rede gerada.

A Figura 28 reflete parte do que já tinha sido constatado na análise dos clusters que é a presença do Brasil nos temas relacionados ao **biohidrogênio**. As cinco palavras-chave mais citadas são: **hidrogênio** (98), **fermentação escura** (90), **biohidrogênio** (73), **efluentes residuais** (68) e **biomassa** (54).

A seção 4 apresentou os dados de publicações científicas sobre o hidrogênio renovável, a seção 5 apresenta informações sobre a produção de patentes.

5. Panorama sobre a produção global de patentes sobre hidrogênio renovável

ano de publicação por terem sido publicadas em países diferentes ou por terem recebido alguma reformulação. Para estes casos, as patentes foram contabilizadas por cada ano em que houve um novo depósito. Para a construção do gráfico foram consideradas as patentes a partir de 1970, isto pelo fato da década de 70 ter passado por um forte crescimento de depósitos neste tópico como consequência dos choques de petróleo de 73 e 79, como mostra o gráfico da Figura 31. Entre os anos de 2001 e 2006 é possível identificar uma segunda onda de crescimento e uma terceira onda a partir de 2016 (Figura 30). O menor número de depósitos de patentes em 2021 se dá pelo fato de os dados terem sido levantados em outubro de 2021.

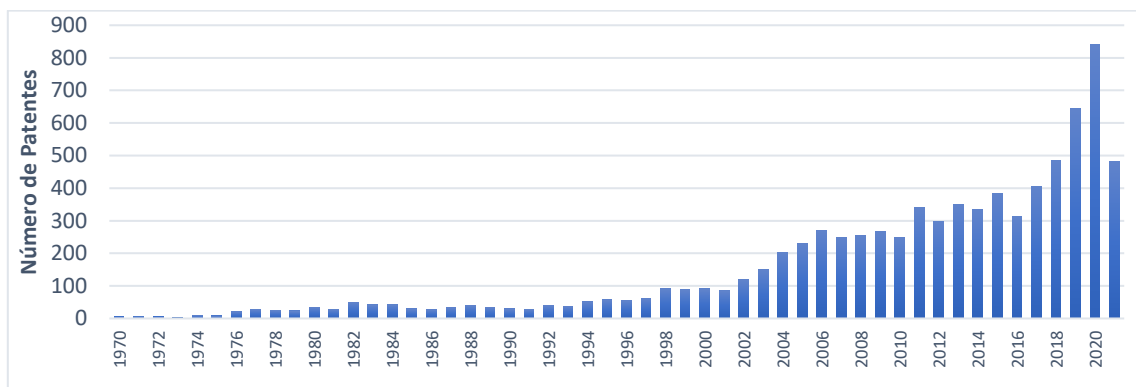


Figura 30: Evolução do número de patentes com o tempo a partir de 1970

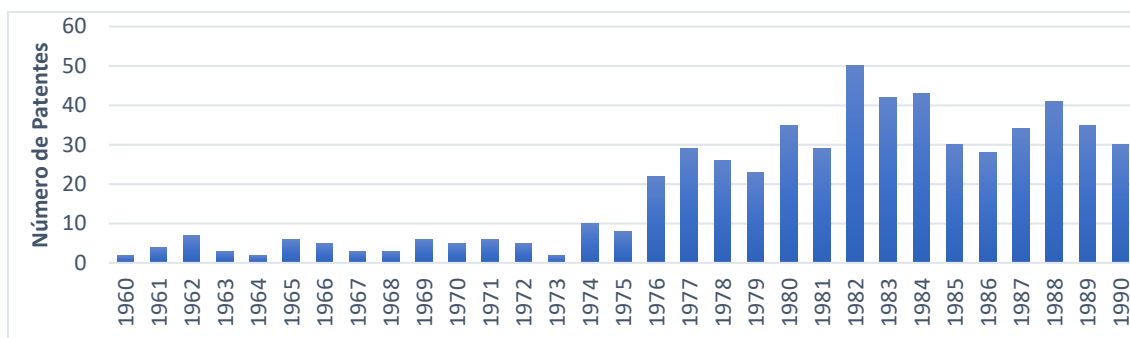


Figura 31: Evolução do número de patentes com o tempo no período de 1960 até 1990

A Figura 32 apresenta os 12 países ou organizações que receberam o maior número de pedidos de patente. Dentre os cinco primeiros tem-se China, Japão e EUA, e as organizações World Intellectual Property Organization (WIPO) e European Patent Office (EPO).

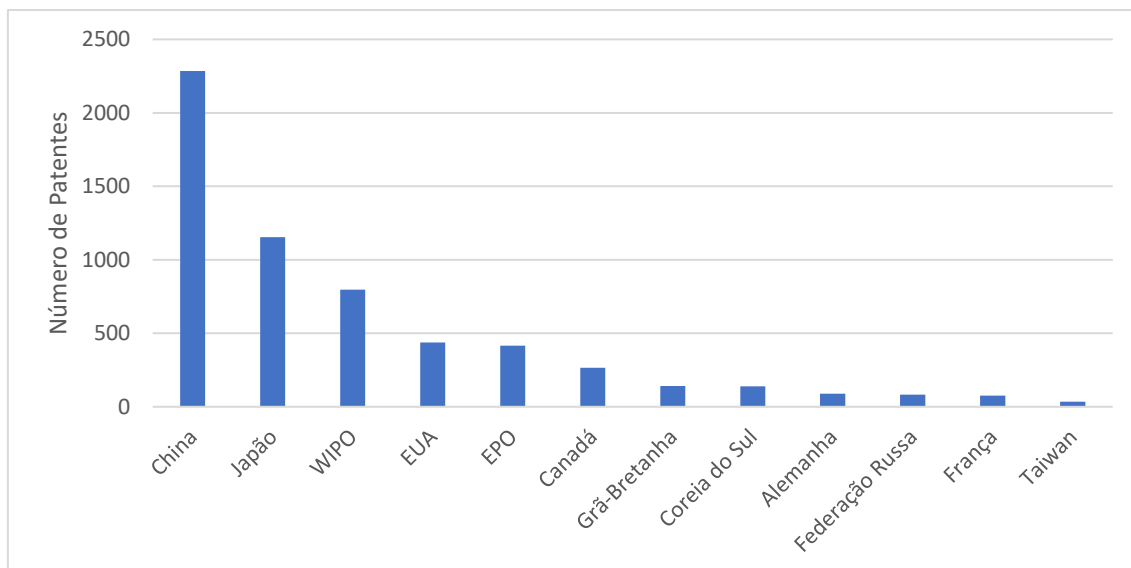


Figura 32: Países em que houve depósito de patentes

5.2. Principais códigos IPCs das patentes levantadas

O código de **classificação internacional de patentes** (International Patent Classification – IPC) fornece um sistema hierárquico de símbolos independentes de linguagem para a classificação de patentes e modelos de utilidade de acordo com as diferentes áreas da tecnologia a que pertencem (WIPO, 2021). Uma patente pode ter um ou mais códigos IPCs de acordo com o critério dos depositantes.

Assim, analisar os códigos IPC de uma patente é uma forma de identificar os assuntos que ela trata. Sendo assim, foram identificados os dez códigos IPCs mais frequentes no conjunto de patentes levantadas, independentemente deles aparecerem de forma isolada ou agregada com outros códigos. A Tabela 2 apresenta a descrição dos códigos IPCs por subclasse, grupo e subgrupo, isto é, pelos níveis mais específicos de classificação. Um exemplo de classificação completa pode ser visto na Figura 33 para o código c25b1/04.

Tabela 2: Códigos IPCs mais frequentes por nível de subclasse, grupo e subgrupo. Fonte: Espace Net (2021)

IPC	Subclasse	Grupo	Subgrupo	Ocorrência
c25b1/04	Processos Eletrolíticos ou Eletroforéticos p/ não metais	Processo eletrolítico de compostos inorgânicos ou não metais	...por eletrólise da água	1035
c01b3/04	Quim. Inorg - Elementos não metálicos	Hidrogênio (misturas, separação e purificação)	...por decomposição de compostos inorgânicos, ex. amônia	758
h01m8/06	Eletricidade - Processos ou meios, por ex. baterias para a conversão direta de energia química em energia elétrica	Células a combustível	Combinação de células de combustível com meios para produção de reagentes ou para tratamento de resíduos	670
c01b3/38	Quim. Inorg - Elementos não metálicos	Hidrogênio (misturas, separação e purificação)	... usando catalisadores	565
c01b3/06	Quim. Inorg - Elementos não metálicos	Hidrogênio (misturas, separação e purificação)	... por reação de compostos inorgânicos contendo hidrogênio ligado eletropositivamente, ex	563

			água, ácidos, bases, amônia, com agentes redutores inorgânicos	
c01b3/08	Quim. Inorg - Elementos não metálicos	Hidrogênio (misturas, separação e purificação)	com metais	388
c01b3/02	Quim. Inorg - Elementos não metálicos	Hidrogênio (misturas, separação e purificação)	Produção de hidrogênio ou de misturas gasosas contendo uma proporção substancial de hidrogênio	370
c25b9/00	Processos Eletrolíticos ou Electroforéticos p/ não metais	Células ou conjuntos de células	-	353
c01b3/32	Quim. Inorg - Elementos não metálicos	Hidrogênio (misturas, separação e purificação)	... por reação de compostos orgânicos gasosos ou líquidos com agentes de gaseificação, ex. água, dióxido de carbono, ar	344
c01b3/00	Quim. Inorg - Elementos não metálicos	Hidrogênio (misturas, separação e purificação)	-	317

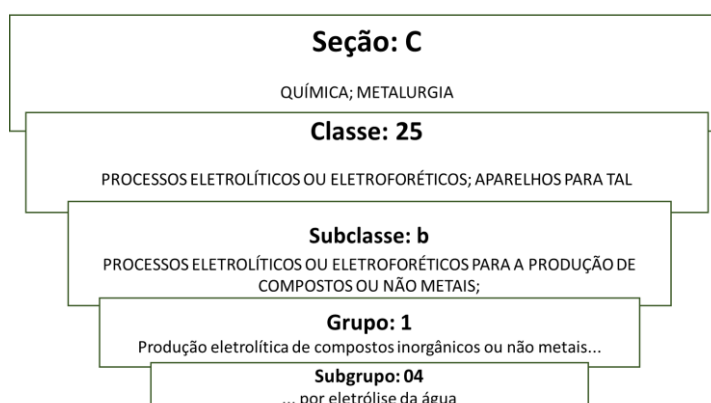


Figura 33: Hierarquia de área tecnológica do IPC C25b1/04

Como observado na Tabela 2, o código que aparece com maior frequência se refere à **produção de hidrogênio por eletrólise da água**. Observa-se também que sete dos dez códigos mais frequentes apresentam a classificação até o grupo c01b3, que trata de processos envolvendo o gás hidrogênio, o que já era esperado, principalmente por ser uma categoria de tecnologia transversal a vários processos. O terceiro código mais frequente trata de uma aplicação do hidrogênio renovável, que são as células a combustível. É importante destacar que na maior parte dos casos, os códigos IPC não aparecem isolados, por exemplo, das 670 ocorrências do código **h01m8/06** (células a combustível), 369 casos a patente possui o trecho “**hydrogen production**” no seu título, podendo indicar um processo de produção de hidrogênio para aplicação em células a combustível.

Assim, é importante analisar como os conjuntos de códigos IPC co-ocorrem nas patentes. Essa análise é apresentada na próxima seção.

5.3.2. Cluster 2 – Células a combustível

A Figura 35 apresenta a nuvem de palavras do cluster 2. Os códigos IPC mais representativos (h01m8/06, c01b3/02, c01b3/38) resgataram 1.532 patentes. As palavras mais frequentes dos títulos são: **fuel, cell, gas** e **reforming**. Associadas a outras palavras, a nuvem apresenta características de aplicação do H2R como **fuel cell** e **vehicle** (carros movidos a células a combustível) e de produção, como **reforming** e **methanol** que pode tratar da produção de H2R a partir de reforma do metanol.

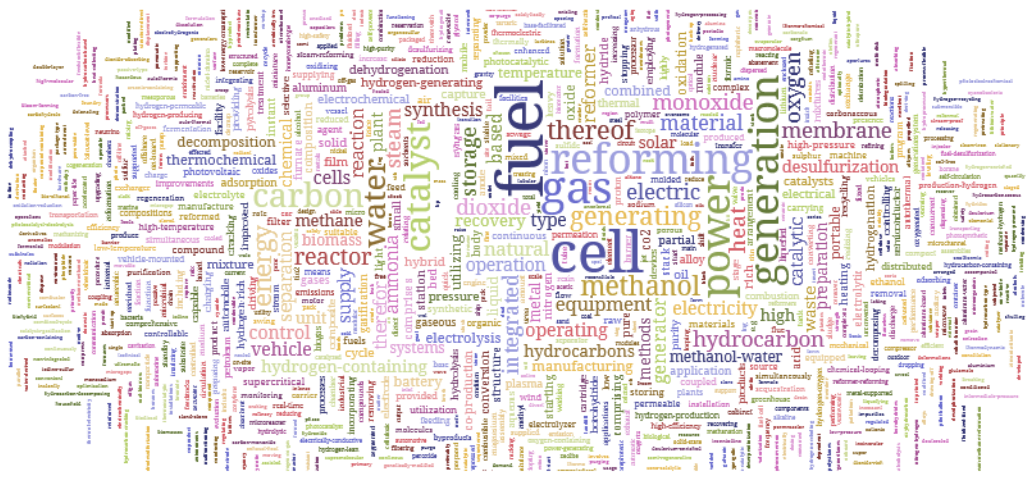


Figura 35: Nuvem de palavras do cluster de células a combustível

5.3.3. Cluster 3 – Processos catalíticos

A Figura 36 apresenta a nuvem de palavras do cluster 3. Os códigos IPCs mais representativos (c01b3/04 b01j37/02 c01b3/40) resgataram 1.039 patentes. As palavras mais frequentes dos títulos são: **catalyst, water, photocatalytic** e **gas**. Em conjunto com outras palavras como **preparation** e **composite** é possível identificar o cluster como sendo sobre **processos catalíticos** com ênfase na **fotocatálise**.

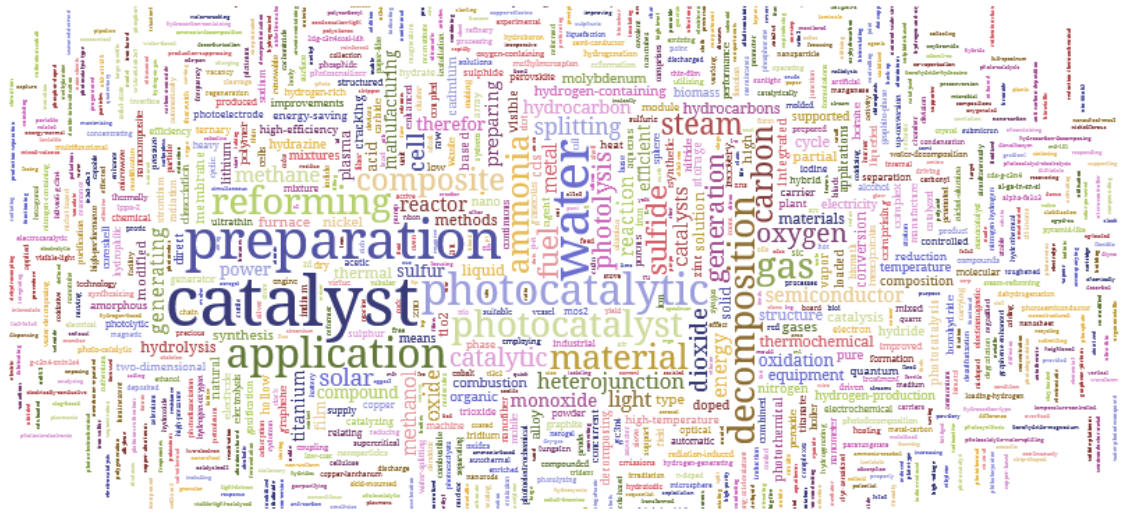


Figura 36: Nuvem de palavras do cluster de processos catalíticos

5.3.4. Cluster 4 – Processos termoquímicos

A Figura 37 apresenta a nuvem de palavras do cluster 4. Os códigos IPC mais representativos (c01b3/06, c01b13/02, c01b3/08) resgataram 977 patentes. As palavras mais frequentes dos títulos são: **water**, **hydrolysis**, **oxygen** e **gas**. Uma análise conjunta com as palavras **sodium**, **borohydride** e **aluminum** indicam processos específicos de produção de hidrogênio através da hidrólise do borohidreto de sódio e de compostos de alumínio. Já palavras como **thermochemical** e **gasification** ampliam a análise para outros tipos de processos.

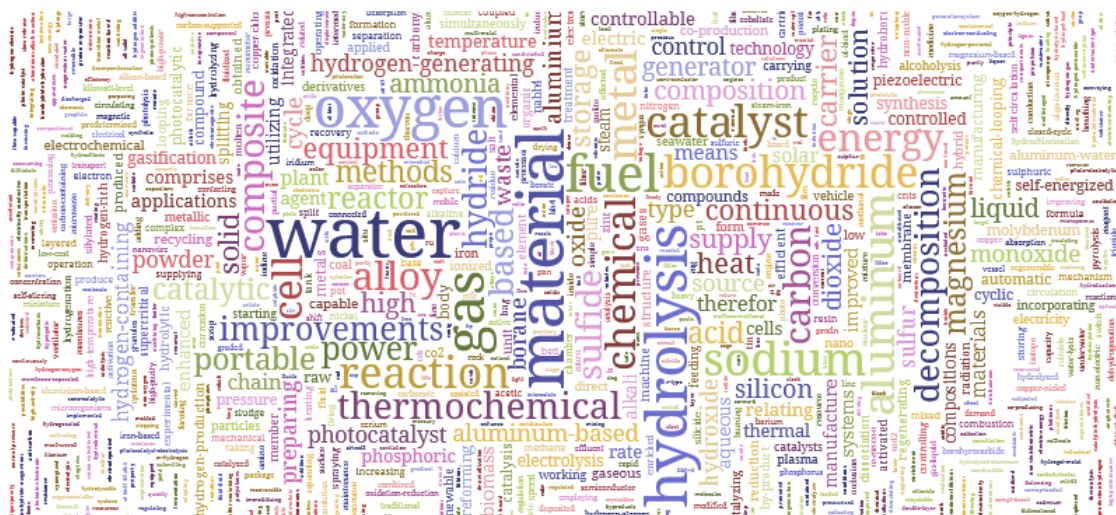


Figura 37: Nuvem de palavras do cluster de processos termoquímicos de obtenção de hidrogênio

5.3.5. Cluster 5 – Biohidrogênio

A Figura 38 apresenta a nuvem de palavras do cluster 5. Os códigos IPCs mais representativos (b09b3/00, c12p3/00, c12m1/00) resgataram 134 patentes. As palavras mais frequentes dos títulos são: **gas**, **methane**, **waste** e **fermentation**. Associados a outras palavras como **organic**, **biomass**, **biological** e **microbial** é possível identificar que este cluster trata de processos biológicos para a produção de H₂R.

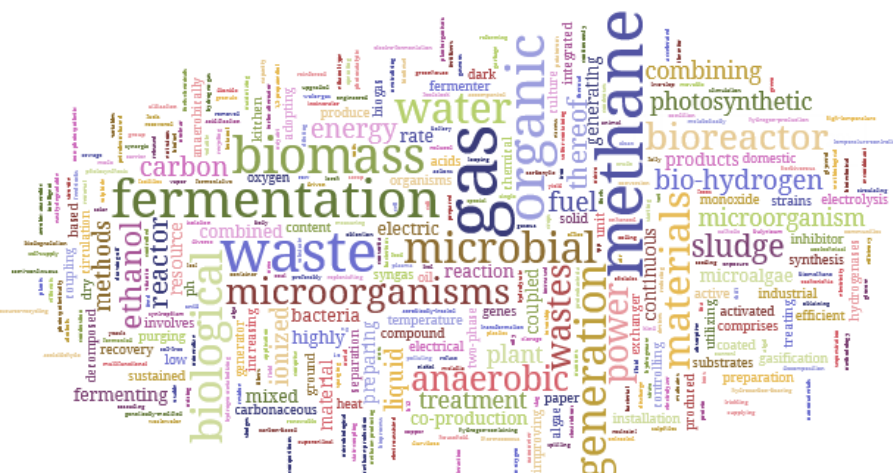


Figura 38: Nuvem de palavras do cluster de biohidrogênio

5.3.6. Cluster 6 – Armazenamento

A Figura 39 apresenta a nuvem de palavras do cluster 6. Os códigos IPC mais representativos (c01b3/00 f17c11/00 c22c1/00) resgataram 419 patentes. As palavras mais frequentes dos títulos são: **storage**, **alloy**, **material** e **battery**, com a presença significativa das 2 primeiras – **armazenamento** e **ligas metálicas**. Assim, o cluster 6 agrupa tecnologias que envolvem áreas tecnológicas relacionadas ao armazenamento de hidrogênio.



Figura 39: Nuvem de palavras do cluster de armazenamento de hidrogênio

5.3.7. Cluster 7 – Motores à combustão

A Figura 40 apresenta a nuvem de palavras do cluster 7. Os códigos IPC mais representativos (f02m25/12 f02b43/10 f02m21/02) resgataram 108 patentes. As palavras mais frequentes dos títulos são: **engine**, **combustion**, **internal** e **gas**, sendo o cluster 7 interpretada como o cluster de **motores a combustão interna**.



Figura 40: Nuvem de palavras do cluster de motores à combustão interna

5.4. Considerações finais sobre as patentes levantadas

A análise de patentes deixou clara a predominância do processo de eletrólise da água para obtenção do hidrogênio renovável. Ainda assim, houve forte presença de códigos relacionados a outros processos, como biológicos, e, principalmente, termoquímicos. A análise também enfatizou uma aplicação específica do H₂R que é a utilização em células a combustível.

Como foi dito no início da seção 5, a metodologia apresentada para a investigação das patentes ainda está em nível experimental, e será amadurecida nas próximas edições do Informe ISES. Assim, é importante citar algumas limitações da análise: (1) registros de apenas uma base de dados, (2) busca considerando apenas as patentes sob o guarda-chuva do código CPC Y02 e (3) análise sem os resumos das patentes.

6. Panorama sobre os projetos em hidrogênio renovável

Essa seção visa apresentar o panorama de projetos de produção de hidrogênio renovável. A base utilizada para este levantamento foi a *IEA Hydrogen Projects Database 2021* (IEA, 2021b) produzida pela Agência Internacional de Energia e atualizada até outubro de 2021. A base cobre todos os projetos que foram comissionados desde 2000 para a produção de hidrogênio para fins de mitigação de energia ou mudança climática. Projetos em planejamento ou construção também estão incluídos.

Para o panorama sobre os projetos **em hidrogênio renovável**, foram desconsiderados os projetos que tinham como matéria-prima recursos fósseis, independente de captura de carbono. Este filtro identificou **907 projetos** que serão analisados as próximas subseções.

6.1. Visão geral sobre os projetos em hidrogênio renovável

A base da IEA permite que sejam feitos filtros por tecnologia de produção de hidrogênio, conforme mostrado na Tabela 3. A Figura 41 apresenta a distribuição da quantidade de projetos por tecnologia agrupando as tecnologias de conversão da biomassa. A Figura 41 deixa clara a predominância dos projetos de eletrólise para a produção do H₂R.

Tabela 3: Tecnologias disponibilizados na base de dados da IEA (IEA, 2021b).

Tecnologia Geral	Tecnologia Específica
Eletrólise da Água	Eletrólise Alcalina
	Eletrólise de membrana de troca de prótons
	Células de eletrólise de óxido sólido
	Eletrólise desconhecida*
Biomassa	Reforma do biogás
	Gaseificação da biomassa
	Pirólise do metano
	Fermentação microbiana
	Gases residuais de produção de biocombustíveis
	Gaseificação de resíduos
	Reforma de resíduos
Vários**	

* Tipo de eletrólise não divulgado

**Combinação de processos

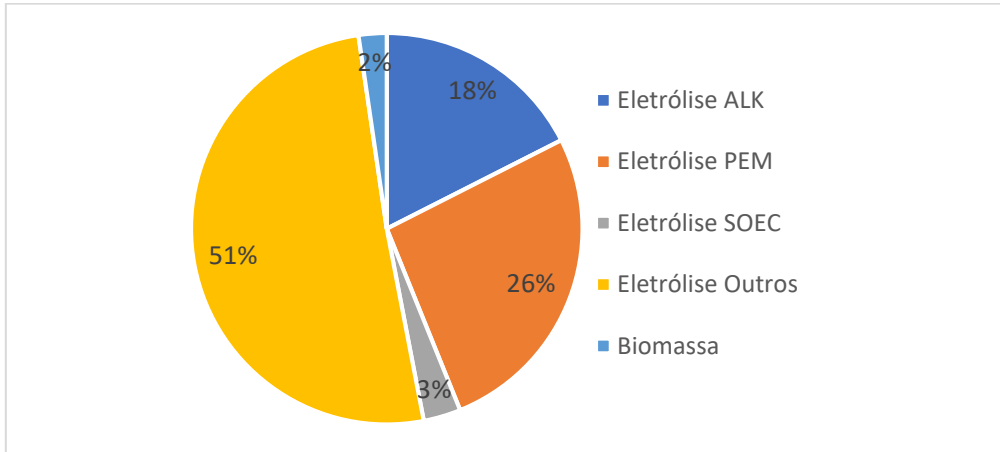


Figura 41: Distribuição do tipo de tecnologia entre os projetos

A Figura 42 apresenta os 15 países com os maiores números de projetos em H2R e a Figura 43 apresenta o mapa com a distribuição de projetos no mundo. É possível verificar a forte presença europeia. Destacam-se ainda EUA, Austrália e China com mais de quarenta projetos registrados.

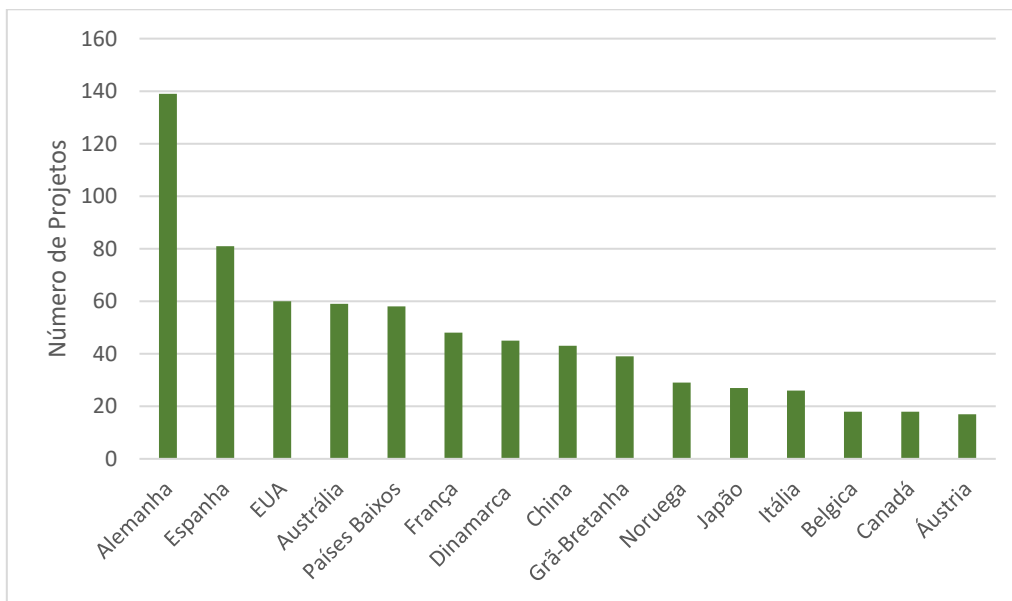


Figura 42: 15 países com o maior número de projetos em H2R

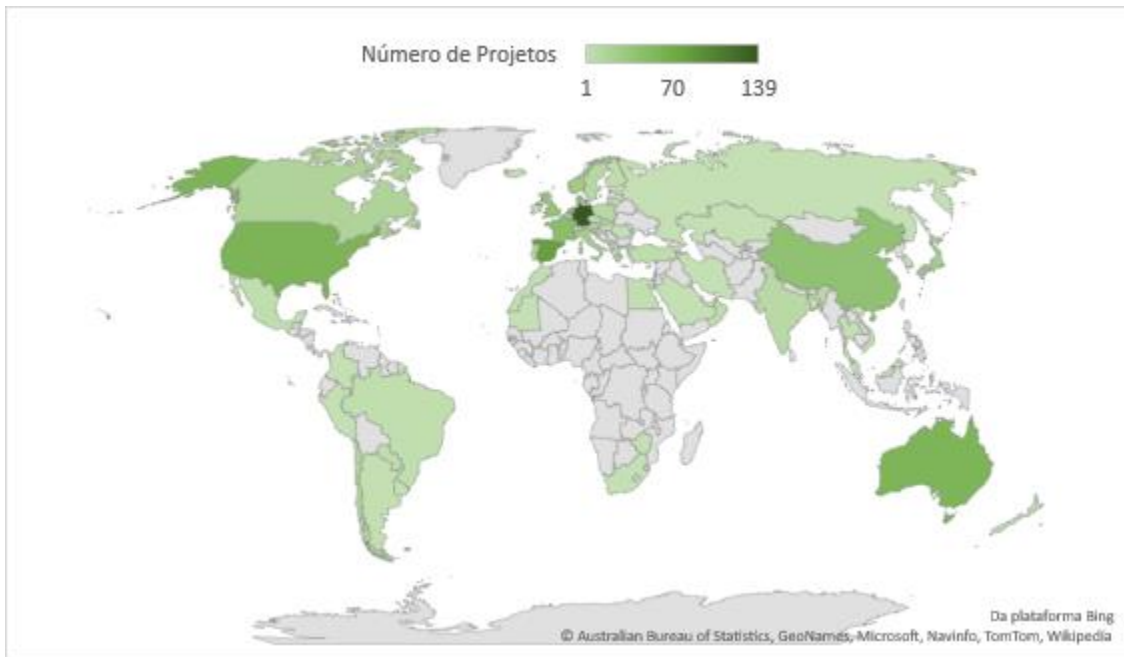


Figura 43: Mapa do número de projetos por países no mundo

Como as capacidades anunciadas das plantas variam consideravelmente, foi realizada uma análise da capacidade divulgada acumulada por país. A Figura 44 apresenta os 15 países com maior capacidade divulgada acumulada em $\text{Nm}^3\text{H}_2/\text{h}$ e a Figura 45 apresenta o mapa com a distribuição das capacidades divulgadas acumuladas no mundo. É importante destacar que dos 907 projetos de H2R, **153 não divulgaram as suas capacidades**, assim, a Figura 44 conta com dados de 83,1% dos projetos.

É possível verificar grandes diferenças entre a Figura 42 e Figura 44. Ainda que haja forte presença europeia, outros países se destacam, como Cazaquistão, Mauritânia e Omã. Na América do Sul são destacados o Chile e o Brasil.

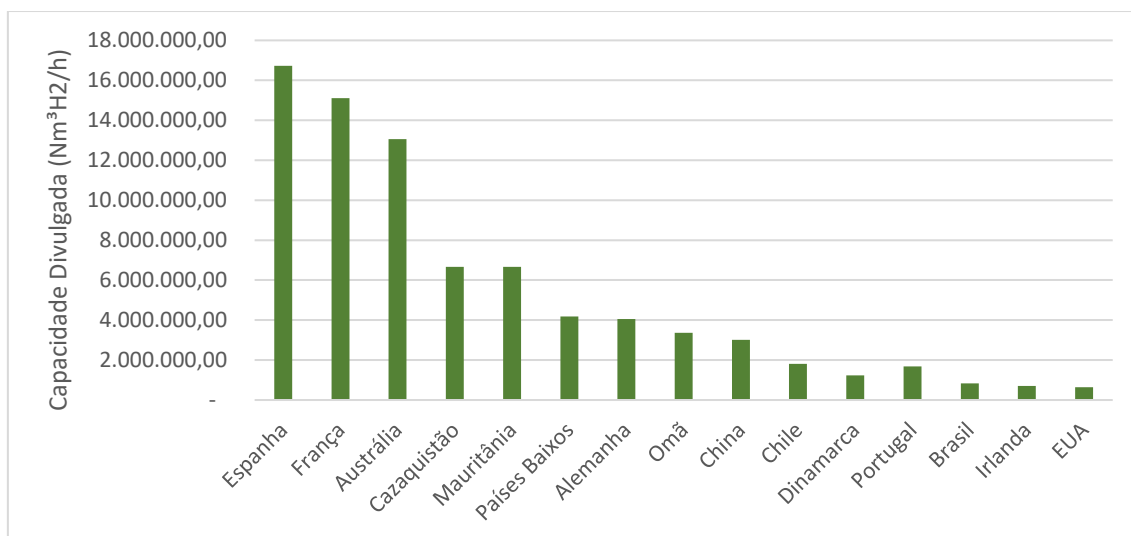


Figura 44: 15 países com as maiores capacidades acumuladas de produção de H2R

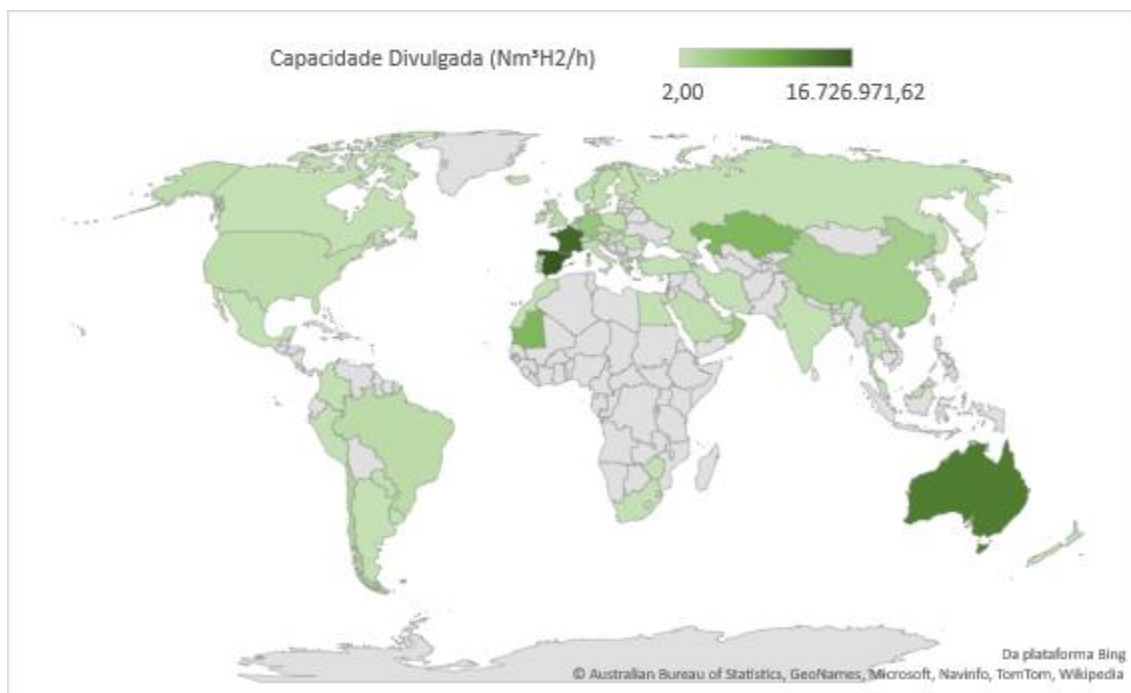


Figura 45: Mapa com a distribuição das capacidades divulgadas acumuladas no mundo

6.2. Projetos Brasileiros

A base de dados da IEA identificou quatro projetos de H2R no Brasil. As informações sobre os projetos estão disponíveis na Tabela 4. Observa-se que três projetos estão localizados no estado do Ceará que tem sido até o momento o principal *hub* para o hidrogênio renovável no país. Outro ponto a ser destacado é a presença da energia eólica *offshore* como tipo de energia renovável a ser aplicada na eletrólise.

Tabela 4: Projetos brasileiros em H2R

Nome do Projeto	Data <i>online</i>	Tecnologia	Tipo de eletricidade	Tipo de energia Renovável	Capacidade em ktH ₂ /ano
Marítimo Dragão - Qair	2023	Eletrólise - outro	Renovável dedicada	Eólica <i>offshore</i>	Não disponível
Port of Pecem - Base One	2025	Eletrólise - outro	Renovável dedicada	Hidroelétrica	600
Fortescue Future Industries - Port of Pecem	2030	Eletrólise - outro	Renovável dedicada	Eólica <i>offshore</i>	Não disponível
Porto do Açúcar Fortescue Ammonia Project	Não disponível	Eletrólise - outro	Renovável dedicada	Outras/várias	52

6.3. Análise por tecnologia – Eletrólise

O banco de dados da IEA buscou levantar algumas informações específicas para os diferentes tipos de tecnologias para a produção do H2R. No caso da eletrólise – 886 projetos - foram mapeadas as informações sobre a fonte de energia renovável que será utilizada no processo. O

gráfico da Figura 46 mostra que a energia solar fotovoltaica e eólica *onshore* e *offshore* são as mais utilizadas. Entretanto este dado é incerto uma vez que 73% dos projetos ou não divulgam essa informação, ou utilizam outras ou várias fontes de energia renovável.

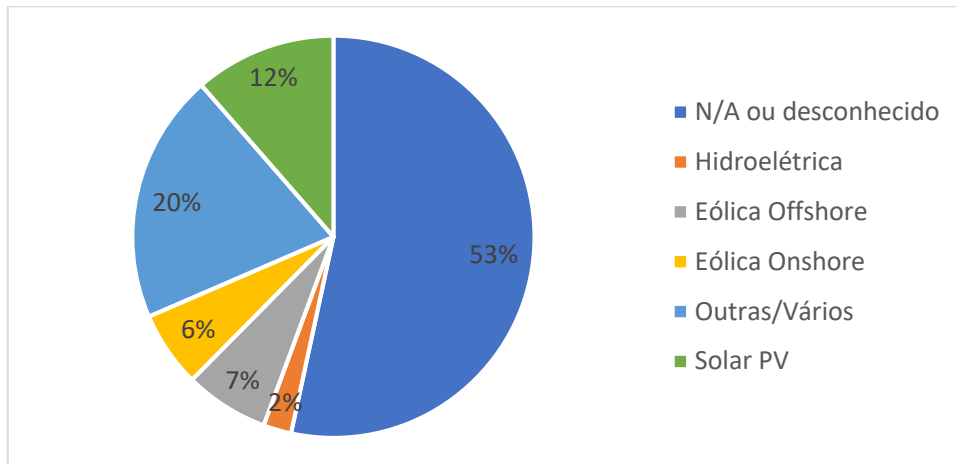


Figura 46: Fonte da energia renovável para a eletrólise.

6.4. Análise por tecnologia – Biomassa

A base de dados da IEA apresenta como uma das categorias de tecnologia a “biomassa” (21 projetos), isto é, processos que usam biomassa como matéria-prima para o hidrogênio renovável. No entanto, dentro desta ampla classificação, existem processos bastante diferentes. A Figura 47 apresenta a divisão por tecnologias dos projetos categorizados como biomassa. Ainda que 24% não apresente informação, é possível verificar que os processos termoquímicos, principalmente a gaseificação, são mais frequentes.

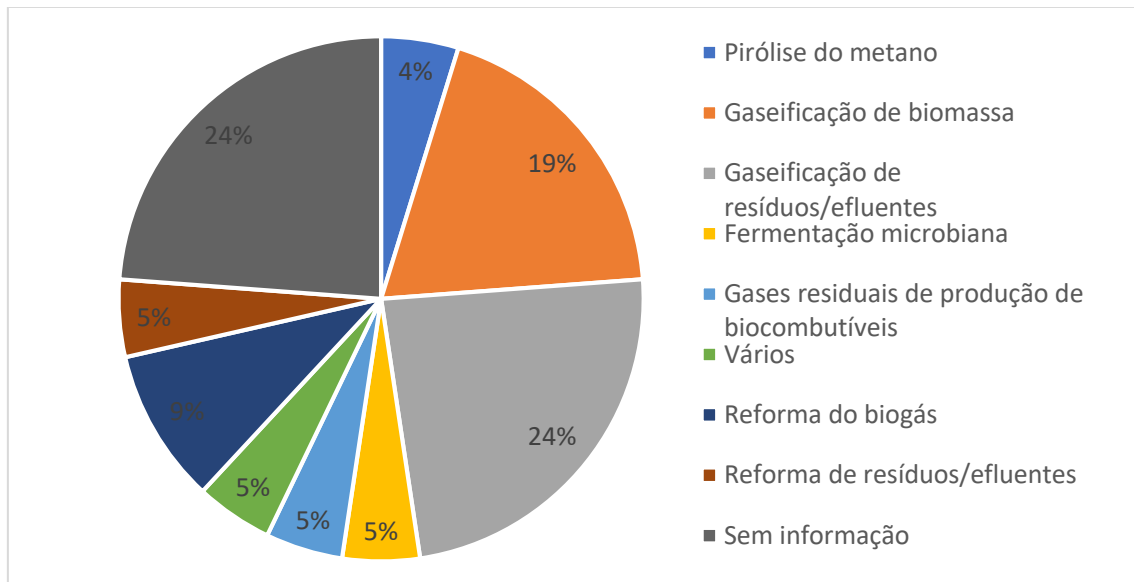


Figura 47: Distribuição das diferentes tecnologias que utilizam biomassa

6.5. Considerações sobre o panorama dos projetos em H2R

Diferentes dos dados sobre publicações científicas e patentes, as informações sobre projetos tende a ser mais difícil de ser obtida e harmonizada. A disponibilização da base de dados da IEA permitiu uma análise confiável e ampla sobre o tema, ainda que com a ausência de algumas informações.

Assim como já tinha sido visto no panorama sobre as patentes, o processo de eletrólise da água tem se mostrado a principal tecnologia para a produção de H₂R, porém não é a única. A próxima seção traz uma breve análise dos processos de produção por eletrólise e a partir de processos biológicos.

7. Considerações gerais e conclusões

Os três panoramas apresentados – publicações científicas, patentes e projetos – contribuiu para uma primeira avaliação, ainda superficial, do estágio de maturidade de algumas tecnologias do hidrogênio renovável. É relevante observar que os padrões de redes e clusters foram diferentes para cada um dos panoramas. Como última análise, verificou-se os comportamentos de dois tipos de tecnologias de produção de hidrogênio: a partir da eletrólise da água (hidrogênio eletrolítico) e a partir de processos biológicos (biohidrogênio). O hidrogênio eletrolítico foi escolhido por ser o tema mais presente nas patentes e projetos. Já o biohidrogênio foi escolhido por ser o tema mais frequente na análise de publicações científicas e por ter tido o Brasil como um dos países que mais publicam no tema na rede gerada.

A Figura 48 apresenta a participação de cada um desses temas nas redes analisadas. Nas publicações científicas, o cluster de biohidrogênio representou 22,9% da rede, enquanto o hidrogênio eletrolítico significou 14,9%. Já nas patentes, esses valores ficaram em 2,2% para o biohidrogênio e 25% para o H₂ eletrolítico. Finalmente, na análise de projetos, a participação do biohidrogênio foi de 0,2% enquanto o H₂ eletrolítico atingiu 97,7%.

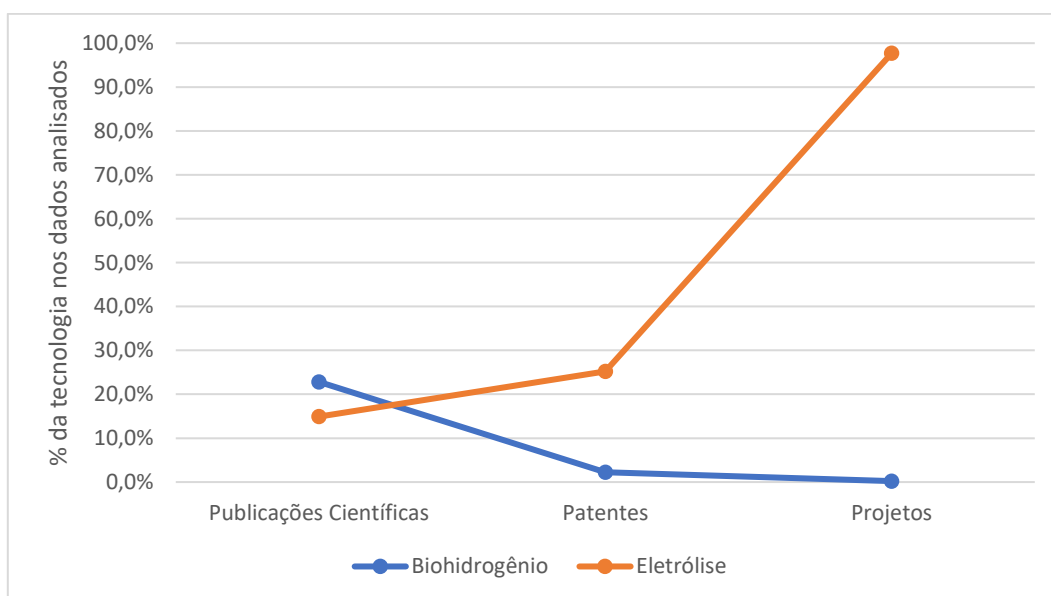


Figura 48: Porcentagens de dados sobre eletrólise e biohidrogênio em cada análise

Esses resultados deixam evidente o nível de amadurecimento muito mais avançado das tecnologias de eletrólise em comparação com os processos biológicos. Entretanto, vale destacar que a forte presença do biohidrogênio da rede de publicações científicas, indica a investigação de novas oportunidades, que podem inclusive ter o Brasil como um dos principais atores.

De modo geral, a análise ampla sobre o **hidrogênio renovável** – e não apenas o hidrogênio verde⁸ - foi capaz de capturar outras oportunidades que podem vir a compor uma parcela importante de uma futura economia do hidrogênio.

Agradecimentos

Emilio Hiroshi Matsumura
Ennio Peres da Silva
Luciano Basto Oliveira
Luiz de Oliveira
Marcelo Almeida
Mariana de Oliveira Faber
Mariana Mattos
Paulo Emílio Valadão de Miranda
Viridiana Ferreira-Leitão

8. Referências

CGEE (2010), Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Hidrogênio energético no Brasil. Subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025, tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 2010.

CGEE (2021), Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Resumo executivo: Mesa de Diálogo Internacional – A Era do Hidrogênio Renovável – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 2021.

Deville, E. Prinzhofer, A., The origin of N₂-H₂-CH₄-rich natural gas seepages in ophiolitic context: a major and noble gases study of fluid seepages in New Caledonia, Chem. Geol. 440 (2016) 139-147.

E+ Transição Energética e Heinrich Böll Stiftung (2021). Desafios e oportunidades para o Brasil com o hidrogênio verde. Maio de 2021.

Energy Transitions Commission (2021). Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy, Abril de 2021.

EPE (2021), Empresa de Pesquisa Energética, Nota técnica: Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. Fevereiro de 2021.

European Commission (2021), Decarbonising our energy system to meet our climate goals, julho de 2021.

⁸ Aqui indicado como o hidrogênio a partir da eletrólise da água utilizando fontes renováveis de energia.

Hydrogen Council (2021). Hydrogen Insights A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. Fevereiro de 2021.

ICLEI (2021), Local Governments for Sustainability, 100% renewables factsheet series – green hydrogen. 2021.

IEA (2019), International Energy Agency, The Future of Hydrogen: seizing today's opportunities. Junho de 2019.

IEA (2021a), International Energy Agency, Global Hydrogen Review 2021.

IEA (2021b), International Energy Agency, Hydrogen Projects Database, <https://www.iea.org/reports/hydrogen-projects-database>. All rights reserved.

IPCC (2021). Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - Summary for Policymakers. 2021.

IRENA (2019), International Renewable Energy Agency, Hydrogen: A renewable energy perspective. (Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, Japan). 2019.

Larin, N. Zgonnik, V. Rodina, S. Deville, E. Prinzhofer, A. V.N. Larin, Natural molecular hydrogen seepage associated with surficial, rounded depressions on the European craton in Russia, *Nat. Resour. Res.* 24 (3) (2015) 369-383. <https://doi.org/10.1007/s11053-014-9257-5>.

Martinez-Burgos, W. J., Candeo, E.S., Medeiros, A. B. P., Carvalho, J. C., Tanobe, V. O. A., Soccol, C. R. Sydney, E. Hydrogen: Current advances and patented technologies of its renewable production. *Journal of Cleaner Production.* 286 (2021).

Miranda, Paulo Emílio. Hydrogen Energy: Sustainable and Perennial. In: *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*. Academic Press. Elsevier. 2019 (1-35)

MME (2021), Ministério de Minas e Energia, Programa Nacional do Hidrogênio: Proposta de diretrizes – Brasília. Julho de 2021.

Moretti, I. Dagostino, A. Werly, J. Ghost, C. Defrenne, D. Gorintin, L., L'Hydrogène Naturel, un Nouveau Pétrole? *Pour la Sci.* (March 2018) 24-26.

Sarangi, K. Prakash; Nanda, Sonil (2020). Biohydrogen Production Through Dark Fermentation. *Chemical engineering & technology.* V. 43, p. 601-62.