

Hidrogênio e energia eólica: uma revisão sistemática

Matheus Eurico Soares de Noronha (PPGA/ESPM)

André Themoteo da Silva Melo (PGENE/UFABC)

Cristina Doritta Rodrigues (PPGA/ESPM)

Lucas Marques Moraes (PPGA/ESPM)

RESUMO ESTRUTURADO

Introdução/Problematização: O estudo apresenta os principais desafios e gargalos encontrados nas produções científicas relacionadas a hidrogênio e energia eólica.

Objetivo/proposta: Mapear artigos sobre o uso do hidrogênio como combustível e a sua associação com a energia eólica a fim de apresentar o contexto atual da produção científica e caminhos para pesquisas futuras.

Fundamentação teórica: A revisão da literatura aborda temas sobre hidrogênio como combustível, produção de hidrogênio e energia eólica e hidrogênio.

Discussão dos Resultados: As publicações têm sido desenvolvidas com pesquisas mistas, quantitativas e qualitativas, devido à necessidade de validar modelos experimentais para aplicação prática, em quatro temáticas centrais: *Green hydrogen*; Viabilidade Econômica e Custos; Novas Tecnologias; e Políticas Públicas e Estudos de Caso, com focos diferentes que convergem para um objetivo comum, o uso do hidrogênio como combustível ecologicamente correto e rentável para o atendimento do sistema de produção de energia a partir de usinas eólicas.

Considerações Finais/Conclusão: A produção de hidrogênio a partir de energia eólica tem como foco estudos que abrangem assuntos como prioridades em relação ao aspecto ambiental e ecológico, escala de produção e logística, viabilidade econômica da produção e os custos envolvidos na tecnologia, competitividade no mercado em relação a outras fontes energéticas, novas tecnologias e ecossistema de inovação, fornecimento de informações e subsídios para políticas públicas para o desenvolvimento âmbito técnico-científico. Estes caminhos devem ser estressados por pesquisadores futuros.

Contribuições do trabalho: O uso do hidrogênio como combustível, e a própria energia eólica, são temáticas pautadas há pouco tempo no ambiente de inovação industrial, apresentando um ecleticismo significativo, em que diversos países estão procurando cada vez mais investir nestas tecnologias.

Principais Referências: Sherif, S.A., Barbir, F., & Veziroglu, T.N. (2005). Wind energy and the hydrogen economy-review of the technology. *Solar Energy*, 78(5), 647–660. González-Aparicio, I., Kapetaki, Z., & Tzimas, E. (2018). Wind energy and carbon dioxide utilisation as an alternative business model for energy producers: A case study in Spain. *Applied Energy*, 222, 216–227.

Palavras-Chave: Combustível; Energia; Energia Eólica; Hidrogênio.

1. Introdução

Independentemente das possibilidades de fontes de energia para o futuro, atualmente já se verifica uma ampla necessidade de metodologias para produção, armazenamento, transporte e utilização de energias convenientes, limpas, seguras, eficientes e versáteis que possam ser entregues ao público em geral de forma massiva (Sherif et al., 2005; Alavi et al., 2016). Outrora, é fato que a eletricidade permanece sendo a forma mais conveniente de energia utilizada há séculos, podendo ser produzida a partir de várias fontes e transportada por grandes distâncias (Sherif et al., 2005; Lepszy et al., 2017).

No contexto de recentes problemas e desastres ambientais mundo afora, com destaque para o aquecimento global e o esgotamento dos combustíveis fósseis, usinas de energia eólica tem sido cada vez mais adotadas ao longo de todo o mundo para a geração de eletricidade, especialmente devido esta ser relativamente bem mais barata que outras fontes de energia renovável (Balat, 2005; Shishido et al., 2009; Alavi et al., 2016; Mostafaeipour et al., 2016; Fernández-Guillamón et al., 2019). As plantas de produção de energia eólica podem ter várias configurações e padrões de operação, e as baterias não são necessariamente a melhor solução para a estabilização da saída de energia, de modo que outros dispositivos de armazenamento de energia podem ser úteis neste processo. Ou seja, é necessário um projeto de sistema adequado de acordo com o padrão de operação dos geradores eólicos, e esses padrões de operação se tornarão ainda mais diversos no futuro (Shishido et al., 2009; Lee et al., 2010). É claro que, em termos dos problemas associados à instabilidade causada pelas turbinas eólicas na rede elétrica, a importância dos sistemas de armazenamento de energia, particularmente o hidrogênio combustível, tem sido cada vez mais significativa (Balat, 2005; Alavi et al., 2016; Fernández-Guillamón et al., 2019).

O hidrogênio destaca-se como uma alternativa de carreador de energia limpa, sendo eficiente e versátil, complementando muito bem a eletricidade, embora este tenha a vantagem de não depender de combustíveis fósseis para sua produção (Sherif et al., 2005). Shishido et al. (2009) reportam que um gerador de hidrogênio baseado na eletrólise usando energia eólica oferece uma tecnologia muito mais limpa do que a extração de hidrogênio por processamento do gás natural, que é acompanhada por emissões de dióxido de carbono, ou a geração de hidrogênio por pirólise usando energia nuclear.

Todavia, para que o hidrogênio desempenhe um papel importante no setor de energia no futuro, pelo menos a médio e longo prazo, é necessário haver uma capacidade de produção de hidrogênio para fins de energia de maneira ambientalmente responsável e econômica. Para atender tal circunstância, a potência gerada pelo sistema deve cobrir a demanda de carga no tempo correspondente e a energia excedente armazenada para uso posterior (Al-Sharafi et al., 2017). Considerando esse contexto, diversos estudos consensualmente têm verificado que a transição para uma economia de hidrogênio não é apenas uma perspectiva distante para o futuro da produção de energia renovável, mas também uma realidade que pode estar cada vez mais presente (Sherif et al., 2005; Guandalini et al., 2015; Gondal et al., 2018).

A lacuna que se busca preencher consiste em apresentar os principais desafios e gargalos encontrados nas produções científicas relacionadas a hidrogênio e energia eólica. Adicionalmente, mostrar as principais temáticas estressadas pela literatura e que necessitam do aprofundamento de novas pesquisas. Diante do exposto, o estudo objetiva mapear artigos sobre o uso do hidrogênio como combustível e a sua associação com a energia eólica situados nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus* a fim de apresentar o contexto atual da produção científica e caminhos para pesquisas futuras.

2. Revisão de literatura

2.1. Hidrogênio como combustível

O hidrogênio é um dos combustíveis com maior capacidade de armazenamento de energia dentre aqueles atualmente disponíveis no mercado, podendo armazenar energia por um longo período. Sua combustão produz apenas água, não poluindo o meio ambiente desta forma (Al-Sharafi et al., 2017). Neste sentido, muitas pesquisas foram e têm sido realizadas para investigar o potencial do uso do hidrogênio para fins de produção de energia limpa e ambientalmente correta, especialmente devido algumas características únicas, tais como (Sherif et al., 2005): pode ser produzido e convertido em eletricidade com uma eficiência relativamente alta; a matéria-prima para a produção de hidrogênio é a água, que está disponível em abundância; o hidrogênio é um combustível totalmente renovável, uma vez que o produto da hidrogenização (tanto por combustão quanto por conversão eletroquímica) é água pura ou vapor de água; pode ser armazenado como líquido, gás ou sólido (hidretos de metal); pode ser transportado por grandes distâncias através de tubulações, tanques ou caminhões ferroviários; pode ser convertido em outras formas de energia, com mais eficiência do que qualquer outro combustível, ou seja, além da combustão da chama (como os outros), o hidrogênio pode ser convertido através de combustão catalítica, conversão eletroquímica e hidratação; o hidrogênio como transportador de energia é ambientalmente compatível. Ele produz pequenas quantidades de NO_x se for queimado com ar em altas temperaturas.

Além das características descritas acima, o uso de hidrogênio como combustível proporciona um duplo benefício: primeiro, reduz a quantidade de insumos necessários para produzir combustíveis limpos; e em segundo lugar, adiciona flexibilidade ao sistema de potência elétrica, permitindo assim uma maior integração de fontes renováveis intermitentes. Espera-se que tais combustíveis renováveis ganhem grande importância no desenvolvimento de futuros sistemas de transporte baseados em fontes limpas, uma vez que podem contornar os problemas relacionados à produção de biocombustíveis, surgindo como um complemento ou substituto dos mesmos em cenários com altas taxas de energias renováveis (Sarrias-Mena et al., 2015). O hidrogênio atua ainda como um "portador de energia" armazenável que pode ser convertido de volta em eletricidade, proporcionando assim um equilíbrio entre geradores e fornecedores de eletricidade, ou usado como combustível de "emissões zero" para outras aplicações, como transporte (González et al., 2004).

2.2. Produção de hidrogênio

Atualmente, o hidrogênio é produzido principalmente a partir de combustíveis fósseis (gás natural, petróleo e carvão), sendo este usado em refinarias para processar o petróleo bruto (hidrotratamento e hidrocrackeamento), na indústria química para sintetizar vários compostos químicos (amônia, metanol, etc.) e em processos metalúrgicos como um gás de redução ou proteção (Sherif et al., 2005). A produção de hidrogênio requer matéria-prima (as fontes lógicas são combustíveis de hidrocarbonetos (CXHY) e água (H₂O) e energia. Entretanto, o maior gargalo que a produção de hidrogênio ainda enfrenta é o fato da quantidade de energia necessária para produzir hidrogênio ser sempre maior do que a energia que pode ser liberada pela utilização do hidrogênio (Sherif et al., 2005).

As tecnologias para a produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis foram desenvolvidas e são usadas para produzir o chamado hidrogênio industrial, incluindo o processamento do vapor do gás natural, oxidação parcial de hidrocarbonetos e gaseificação de carvão. No entanto, essas tecnologias são totalmente dependentes desses combustíveis fósseis e emitem CO₂, sendo que o único método que pode gerar hidrogênio a partir de combustíveis fósseis sem geração de CO₂ é o craqueamento térmico e catalítico direto de hidrocarbonetos (Sherif et al., 2005).

O uso de métodos alternativos para geração de hidrogênio necessita de tecnologias bem estabelecidas e maduras, que atualmente respondem por apenas 4% da produção total de hidrogênio. A razão para essa participação limitada se deve principalmente ao custo do hidrogênio produzido, que é mais caro do que o obtido pelas abordagens convencionais. Mas, uma grande expansão do hidrogênio eletrolítico é esperada nos próximos anos onde, em 2050, 22% da produção mundial de hidrogênio total deva vir por vias alternativas ao uso de combustíveis fósseis (Nicita et al., 2020).

2.2. Energia eólica e hidrogênio

O vento é considerado uma fonte de energia abundantemente disponível, ecologicamente correta, barata e fácil de aproveitar em muitos países. O investimento em turbinas eólicas constantemente tem subido nos últimos anos, se aproximando de um nível que possa competir com os métodos convencionais de geração de energia (Mostafaeipour et al., 2016). Outrora, a crescente participação da energia eólica no setor elétrico global requer mudanças na gestão do sistema a fim de garantir a confiabilidade e a qualidade da energia, além de manter a capacidade de reserva necessária, o que ainda dispende investimentos onerosos (González et al., 2004).

Além disso, a flutuação da eletricidade gerada pelo vento, dependendo da força do vento, desequilibra a oferta e a demanda de eletricidade do sistema elétrico. Os serviços ancilares, como o controle de tensão e frequência, atenuam estas variações na rede. Melhorias na eficiência energética das usinas eólicas e o desenvolvimento de outras aplicações para o uso do excesso de eletricidade gerada pelo vento podem auxiliar esta característica da fonte variável, além da simples alimentação na rede elétrica principal (Lee et al., 2010).

É claro que, em relação aos problemas associados à instabilidade causada pelos sistemas eólicos na rede elétrica, a importância dos sistemas de armazenamento de energia, em particular com o uso do hidrogênio, é uma questão significativa (Alavi et al., 2016). Neste sentido, diferentes estudos têm sido realizados sobre a importância da produção de hidrogênio a partir de diferentes fontes de energia renovável, principalmente a energia eólica (Olateju & Kumar, 2011; Alavi et al., 2016). É importante destacar que produção de hidrogênio a partir da força do vento contará com sistemas híbridos, com uma alta eficiência para sua viabilidade econômica (Alavi et al., 2016; Lepszy et al., 2017).

Considerando os estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACL) realizados, a produção de hidrogênio a partir da energia eólica provou ser a mais ambientalmente benigna de todas as vias de produção de hidrogênio. Isso serve como uma indicação das emissões de GEE que podem ser potencialmente abatidas com a implantação dessa tecnologia. Há uma escassez de estudos sobre a avaliação técnico-econômica detalhada do hidrogênio produzido a partir da energia do vento, como matéria-prima para a indústria química e para certos países (Olateju & Kumar, 2011; Guandalini et al., 2015).

3. Metodologia

As etapas metodológicas para a construção da revisão sistemática foram orientadas seguindo as etapas destacadas por Souza & Ribeiro (2013): (i) criar um problema de pesquisa que norteie a pesquisa; (ii) escolha o aspecto a ser analisado na literatura; (iii) filtrar os dados coletados de acordo com sua relevância para o problema de pesquisa; e (iv) analisar e interpretar os dados. Os bancos de dados escolhidos foram “Scopus” e “Web of Science” levando em consideração as áreas “*Energy fuels*”, “*Engineering electrical electronic*”, “*Engineering environmental*”, “*Green sustainable and technology*” e “*Renewable energy*”. Ressalta-se que a escolha por estes bancos de dados deve-se ao fato destes abrangerem um universo contendo as revistas mais relevantes destas áreas em todo o mundo (Peçanha & Iizuka, 2014; Schmitt et al., 2013).

Foram considerados apenas artigos científicos publicados em periódicos que utilizaram processo de “*blind review*” por pares, sem um período de tempo pré-definido na pesquisa. As palavras-chave pesquisadas foram “*Green hydrogen*”, “*Hydrogen and wind energy*”, “*Hydrogen and wind power*” e “*Hydrogen and wind source*” levando em consideração o título, *keywords* e *abstracts* para coletar os dados e obter o maior número de publicações sobre o assunto.

Num primeiro momento, foram encontrados 4.475 trabalhos científicos publicados entre 1974 e 2020. Os trabalhos que não apresentavam relação com a temática do paper ou não fossem artigos científicos foram excluídos, reduzindo o número para 133 publicações entre 1991 e 2020. Em seguida, foram excluídos os trabalhos que apresentavam duplicidade entre as duas plataformas (o mesmo trabalho aparecendo em ambas), reduzindo o número de artigos científicos para 87, sendo estes publicados entre 1991 e 2020 (Figura 1).

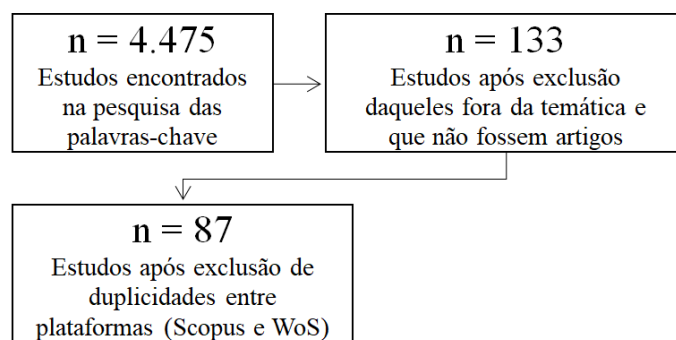


Figura 1. Diagrama de fluxo da revisão sistemática.

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Os trabalhos foram classificados de acordo com as características descritivas (periódicos, país de origem e ano de publicação) e metodológicas (método da pesquisa); além dos resultados (temática principal da pesquisa) e citações. Todos os artigos selecionados foram gerenciados por base de dados plotada no Microsoft Excel com a referência de cada publicação e suas informações básicas (resumo, palavras-chave, base de dados, tipo de trabalho dentre outras). O software Atlas T.I também foi utilizado para a separação e categorização das divisões temáticas identificadas na análise de resultados. O software também colaborou com o refinamento e segregação do material presente nas bases de dados.

4. Análise e discussão dos resultados

Considerando o escopo da pesquisa, os resultados da análise dos dados coletados indicaram que o periódico “*International Journal of Hydrogen Energy*” concentra a maior parte dos artigos mapeados sobre hidrogênio como combustível e sua relação com a energia eólica. Mesmo outros periódicos também apresentando certo destaque, estes ainda ficam bem distantes e apresentam uma produção pouco direcionada de forma objetiva para esta temática (Tabela 1). Verificou-se ainda uma ampla concentração dos periódicos nas editoras mais abrangentes, com destaque absoluto para a Elsevier, que concentra mais da metade do material bibliográfico mapeado acerca de hidrogênio e energia eólica. Além disso, verificou-se que todos os periódicos mapeados apresentavam obrigatoriedade da escrita em língua inglesa, independente do país de origem do periódico.

Tabela 1. Periódicos que mais foram citados na pesquisa (+3).

Periódico	Editora	País de origem	Frequência
International Journal of Hydrogen Energy	Elsevier	Holanda	35
Applied Energy	Elsevier	Holanda	5
Energy Procedia	Elsevier	Holanda	3
Journal of Cleaner Production	Elsevier	Holanda	3
Journal of Power Sources	Elsevier	Holanda	3
Renewable and Sustainable Energy Reviews	Elsevier	Holanda	3
Renewable Energy	Hindawi	Reino Unido	3

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Ao analisarmos os países que mais apresentaram artigos dentre os estudos mapeados sobre hidrogênio e energia eólica (Tabela 2), verifica-se que três países se destacaram na publicação de artigos acerca destes assuntos (Canadá, China e Espanha). Provavelmente os dois principais pontos comuns nestes países, e consequentemente isso é refletido nos estudos, são o fato destes três países apresentarem uma zona litorânea para aproveitamento do potencial da produção de hidrogênio, o que acaba criando um ambiente favorável para a utilização do vento (offshore) a fim de abastecer as usinas eólicas; além de estes investirem pesado na construção de um ambiente de negócios que incentiva a ciência, tecnologia e inovação, que são fundamentais quando se pensa na energia eólica como uma fonte de energia elétrica que pode ser predominante para o sistema elétrico no médio e longo prazo (Olateju & Kumar, 2011; Garmsiri et al., 2014; Olateju et al., 2014; Ramos & Iglesias, 2014; Zhang & Wan, 2014; Martin & Grossmann, 2017; Li et al., 2018; Fernández-Guillamón et al., 2019; Sun et al., 2019; Huang & Liu, 2020).

Outrora, verificam-se alguns países que também apresentam uma extensa zona litorânea, mas não possuem este ambiente que incentiva a ciência, tecnologia e inovação com o fim do aproveitamento da fonte eólica para produção do hidrogênio, sendo o Brasil como exemplo mais clássico desta constatação (Da Silva et al., 2005; Nadaleti et al., 2020a; Nadaleti et al., 2020b). Neste sentido, Da Silva et al. (2005) comenta que países como o Brasil pouco exploram a geração de energia a partir de fontes alternativas, porém, apresentam um potencial enorme para produção de energia a partir de fontes renováveis, podendo extrapolar a demanda interna de energia e dar origem a um excedente de produção de energia. Esse excedente de energia elétrica pode inclusive representar um novo mercado de energia caracterizado pela possibilidade de exportar esse excedente por meio do hidrogênio para outros países que não possuem um potencial de energia renovável tão significativo e estão dispostos a aumentar a participação das fontes renováveis em seu mix de sistemas energéticos a fim de reduzir o uso de energia não renovável.

Tabela 2. Distribuição dos artigos de acordo com o país de origem do estudo.

País	Número de artigos	Percentual (%)
Canadá	7	8,05
China	7	8,05
Espanha	7	8,05
Estados Unidos da América	6	6,90
Irã	6	6,90
Alemanha	5	5,75
Japão	4	4,60
Turquia	4	4,60
Argélia	3	3,45
Brasil	3	3,45
Itália	3	3,45
África do Sul, Bélgica, Chile, Dinamarca, Grécia, Holanda, Irlanda, Paquistão e Reino Unido	2	2,30; cada
Arábia Saudita, Argentina, Áustria, Colômbia, Coréia do Sul, Escócia, Fiji, Finlândia, França, Índia, Noruega, Polônia, Ucrânia e Vietnã	1	1,15; cada

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Esse ecleticismo acerca dos países que tem publicado estudos sobre o hidrogênio como combustível e sua relação com a energia eólica, consequentemente indicando um investimento neste tipo de tecnologia, encontra-se também relacionado com os artigos que apresentaram maior número de citações (Tabela 3). Dentre os dez artigos mais citados, não verificou-se repetição de países entre os estudos, ou seja, cada estudo fora desenvolvido em um país diferente, indicando que o desenvolvimento destas tecnologias não encontram-se concentradas em poucos centros. O paper de autoria de Sherif et al. (2005) fora destacadamente o mais citado dentre os mapeados, justificando este resultado ao fato deste paper ser uma revisão bem completa da parte tecnológica acerca da energia eólica e o uso do hidrogênio como combustível. Este estudo em questão apresenta um enfoque específico na parte econômica, indicando que todos os benefícios do hidrogênio como combustível ambientalmente benéfico só serão amplamente usufruídos quando o hidrogênio for produzido a partir de fontes de energia renováveis, onde a energia eólica apresenta um papel destacado. Além disso, o hidrogênio pode ser usado como meio de armazenamento de energia em algumas aplicações, aumentando assim a competitividade da energia eólica. Entretanto, a economia de tais sistemas integrados depende da disponibilidade de vento, custo dos componentes individuais (mais proeminentemente eletrolisadores, armazenamento de hidrogênio e células de combustível), dinâmica de uso e fatores de utilização e, finalmente, o custo de tecnologias competitivas.

Já o estudo desenvolvido por Gonzalez-Aparicio (2018), o segundo mais citado, explora em um âmbito ousado e inovador as condições necessárias para um sistema de utilização de dióxido de carbono para produção de metanol ambientalmente e economicamente viável utilizando um sistema típico de geração de energia eólica a fim de maximizar o lucro total. O cerne deste modelo de negócios proposto pelos autores baseia-se nos seguintes contextos: (i) venda da energia eólica nas licitações do dia seguinte ou intradiário do mercado de energia ou, (ii) produção de metanol para venda a terceiros. O estudo em questão apresentou em seus resultados que produzir metanol em vez de apenas vender a energia gerada pela planta eólica é mais lucrativo, onde a planta eólica pode ficar até três vezes menor que a convencional. Além disso, o produtor eólico poderia aumentar os lucros em até 33% integrando a produção de metanol em sua estratégia de negócios, em vez de vender toda a energia produzida no mercado de energia.

Tabela 3. Artigos mais citados até o momento do estudo (+50).

Nº	Artigos	Citações	Principal resultado do estudo
1	Sherif, S.A.; Barbir, F.; Veziroglu, T.N.	251	O uso do hidrogênio como combustível aumenta a competitividade do modelo de energia eólica
2	Gonzalez-Aparicio, I.; Kapetaki, Z.; Tzimas, E.	222	O produtor eólico pode aumentar os lucros integrando a produção de metanol a usina eólica, em vez de apenas produzir e vender toda a energia produzida para mercado de energia.
3	Shishido, S.; Takahashi, R.; Murata, T.; Tamura, J.; Sugimasa, M.; Komura, A.; Futami, M.; Ichinose, M.; Ide, K	168	Proposição de um novo modelo para gerador de energia eólica, onde este apresentou boa eficácia a nível experimental.
4	Guandalini, G.; Campanari, S.; Romano, M.C.	147	Avaliou o potencial de tecnologia “power-to-gas” para balanceamento de energia a fim de estimar sua eficácia em balancear a potência produzida por um grande grupo de usinas eólicas.
5	Lepszy, S.; Chmielniak, T.; Monka, P.	97	A razão entre a energia gerada a partir da usinaeólica e do sistema de armazenamento é significativa. Devido à baixa eficiência nesse processo, o desenvolvimento de cada elemento do sistema precisa ser revisitado.
6	Al-Sharafi, A.; Sahin, A.Z.; Ayar, T.; Yilbas, B.S.	92	A produção de hidrogênio através de energia renovável (solar e eólica) torna possível ter um combustível amigo do ambiente.
7	Gonzalez, A.; McKeogh, E.; Gallachoir, B.O.	71	Mesmo permitindo reduções significativas de custos, o baixo custo médio de eletricidade excedente e um alto preço de mercado do hidrogênio também são necessários para se obter a viabilidade econômica para a tecnologia
8	Sarrias-Mena, R.; Fernández-Ramírez, L.M.; García-Vázquez, C.A.; Jurado F.	63	Para potencializar o crescimento das energias renováveis, a implantação de sistemas híbridos é considerada uma alternativa viável que agrega os benefícios das diversas fontes de energia envolvidas.
9	Mostafaeipour, A.; Khayyami, M.; Sedaghat, A.; Mohammadi, K.; Shamsirband, S.; Sehati, M.-A.; Gorakifard, E.	54	A produção de hidrogênio a partir de fontes de energia renováveis, como a energia eólica, está se tornando um tema em ascensão em muitos países, principalmente devido ao impacto ambiental positivo.
10	Lee, J.-Y.; An, S.; Cha, K.; Hur, T.	50	Examinou a competitividade de uma estação de produção de hidrogênio a partir da energia eólica nos aspectos ambientais e econômicos, analisando as condições futuras em dois cenários.

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Num esforço de categorizar ou mesmo identificar padrões acerca da abrangência dos artigos mapeados, verificou-se que o modelo de pesquisa dos estudos sobre o uso do hidrogênio como combustível associado a energia eólica (Figura 2) apresenta uma preferência por modelos de pesquisa mistos (quantitativo e qualitativo) (45,98%), com os demais estudos avaliando estes temas em uma abordagem quantitativa (32,18%) ou teórica (21,84%).

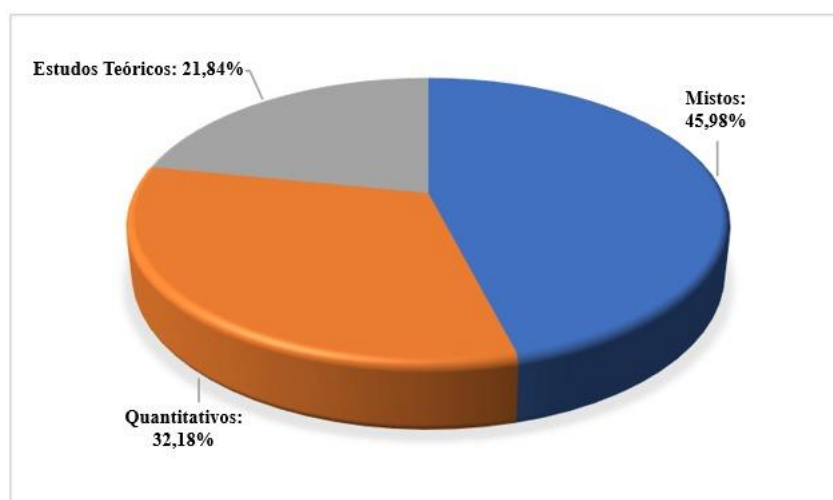


Figura 2. Artigos categorizados conforme a metodologia aplicada.

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Quando se trata da parte conceitual, verificou-se inicialmente que a temática sobre o hidrogênio como combustível e a energia eólica não poderiam ser trabalhados como tópicos separados, pois estes se encontravam presentes em todos os trabalhos mapeados. Partindo desse princípio, identificaram-se quatro grandes temáticas entre o hidrogênio como combustível e a energia eólica: 1) *Green Hydrogen*; 2) Viabilidade Econômica e Custos; 3) Novas Tecnologias; e 4) Políticas Públicas e Estudos de Caso (Tabela 4). Todas essas áreas, apesar de estarem no mesmo contexto de pesquisa e convergindo para a mesma temática (Figura 3), apresentam nuances e focos de estudo diferentes, porém, como o objetivo comum de validar o uso do hidrogênio como um combustível ecologicamente correto e economicamente viável estando em ampla associação com as plantas de produção de energia eólica.

Tabela 4. Artigos categorizados conforme a abrangência do estudo.

Área do estudo	Artigos
<i>Green hydrogen</i>	Kameyama et al. (2011); Sheth et al. (2011); Troncoso & Newborough (2011); Dagdougui et al. (2012); Zhao et al. (2018); Armijo & Philibert (2019); Ayodele & Munda (2019); Ayodele et al. (2019); Gondal (2019); Olmos et al. (2019); Amica et al. (2020); Huang & Liu (2020); Kudria et al. (2020); Nadaleti et al. (2020); Nadaleti et al. (2020); Proost (2020); Wang et al. (2020); Rabiee (2021)
Viabilidade econômica e custos	Sherif et al. (2005); Lee et al. (2010); Yumurtac & Toprak (2011); Guandalini et al. (2015); Al-Sharafi et al. (2017); Nagasawa et al. (2019); Rezaei et al. (2019); Jahangiri et al. (2019); Berg et al. (2020); Nicita et al. (2020)
Novas tecnologias	Dienhart & Siegel (1994); Yang & Aydin (2001); Shishido et al. (2009); Mueen et al. (2010); Koroneos & Katopodi (2011); Veja et al. (2011) Weidong & Zhuoyong (2012); Carr et al. (2013); Garmsiri et al. (2014); Olateju et al. (2014); Zhang & Wan (2014); Khaitan et al. (2015); Sarrias-Mena et al. (2015); Realpe-Jiménez et al. (2015); Martín (2016); Martín & Grossmann (2017); Franzen & Madlener (2017); Mueller et al. (2017); Kilikis (2017); Bhogilla et al. (2017); Lepszky et al. (2017); Ishaq et

al. (2018); Li et al. (2018); Safari & Dincer (2018); Ishaq & Dincer (2019); Fasihi & Breyer (2019); Fernández-Guillamón et al. (2019); Sun et al. (2019); Ishaq & Dincer (2020)

Políticas públicas e estudos de caso

Braun et al. (1991); Gonzalez et al. (2004); Mönnich et al. (2004); Balat (2005); Da Silva et al. (2005); Gazey et al. (2006); Schenk et al. (2007); Yang (2008); Aiche-Hamane et al. (2009); Zolezzi et al. (2010); Dagdougui et al. (2011); Olateju & Kumar (2011); Genç et al. (2012); Shi et al. (2013); Kaldellis et al. (2013); Ramos & Iglesias (2014); Al Zohbi et al. (2015); Douak & Settou (2015); Frueh (2015); Burkhardt et al. (2016); Mostafaeipour et al. (2016); Alavi et al. (2016); Ashrafi et al. (2018); Rezaei et al. (2018); Gondal et al. (2018); Blal et al. (2018); Gonzalez-Aparicio et al. (2018); Kodicherla et al. (2018); Mostafaeipour et al. (2020); Ostadi et al. (2020)

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).



Figura 3. Associação entre as áreas conceituais e seus desafios.

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Inicialmente, quando se trata de “green hydrogen”, deve-se recordar que o fato de boa parte da produção de hidrogênio a nível industrial atualmente ainda encontra-se dependente do uso de combustíveis fósseis (Nadaleti et al., 2020a; Nadaleti et al., 2020b; Proost, 2020). Entretanto, novas perspectivas apontam para uma produção de energia cada vez menos dependente desses combustíveis, especialmente utilizando fontes renováveis e ecologicamente corretas, e é aí que se enquadra o conceito de “green hydrogen”, onde a produção do hidrogênio é totalmente livre da utilização de combustíveis fósseis, não produz resíduos que agredam o meio ambiente (Ostadi et al., 2020), e pode fornecer energia proveniente de fontes limpas para alguns dos principais setores da economia, como indústria, infraestrutura e transporte (Rabiee et al., 2021).

Uma questão-chave dentro dessa temática diz respeito à variação temporal do vento e do sol, os principais fatores que influenciam a participação das energias renováveis no sistema energético global, especialmente na perspectiva de como essa variabilidade afeta os custos de produção de H₂, NH₃ ou combustíveis sintéticos à base de carbono (Troncoso & Newborough, 2011; Dagdougui et al., 2012; Armijo & Philibert, 2019). No entanto, a maioria dos estudos já realizados acerca da produção de hidrogênio ou de combustíveis ecologicamente corretos, evitou tratar essa questão da variação. Neste sentido, uma compreensão completa do papel da flexibilidade está, portanto, ainda em processo de construção, especialmente quando se considera também a questão em aberto do possível interesse em combinar as energias eólica e solar, a fim de reduzir essa variabilidade e, assim, reduzir os custos de produção dos chamados combustíveis verdes (Rezaei et al., 2018; Armijo & Philibert, 2019).

Diversos autores que pesquisaram sobre constataram que a energia eólica pode ser produzida a um custo muito baixo nas regiões com recursos eólicos suficientes, podendo ser usada para gerar hidrogênio em baixa ou larga escala (Sherif et al., 2005; Lee et al., 2010; Jahangiri et al., 2019; Rezaei et al., 2019). E para atender à demanda de consumo, o hidrogênio pode ser transportado e distribuído regionalmente, em formato gasoso ou líquido, por dutos ou, em casos especiais, em contêineres, por transporte rodoviário e ferroviário. Entretanto, este transporte de hidrogênio gasoso e líquido encontra-se sujeito a regulamentações estritas para garantir a segurança pública, o que em alguns países é muito restritivo (Yumurtac & Toprak, 2011).

Quando são trabalhadas as “Novas tecnologias”, concentram-se a atenção para os trabalhos que apresentam a premissa de testar, avaliar e, possivelmente, validar novas possibilidades tecnológicas para a produção de hidrogênio a partir de plantas eólicas (Khaitan et al., 2015; Martin, 2016; Sun et al., 2019). Nesta abordagem, a palavra de ordem acaba sendo inovação na maioria das vezes, pois a necessidade e busca por novas fontes energéticas que estejam alinhadas com a pauta ambiental cria uma demanda crescente para que os setores de tecnologia criem sistemas ou incrementem as tecnologias já existentes para produção do referido hidrogênio como combustível a partir das plantas eólicas (Dienhart & Siegel, 1994; Sarrias-Mena et al., 2015).

Na área de “Políticas públicas e estudos de caso”, tem-se o foco concentrado principalmente em estudos que levam em consideração a temática de hidrogênio como combustível e sua relação com a energia eólica apontando um ponto focal específico para abordar a referida temática, avaliando como a temática interage com aquele referido ecossistema de negócios e tecnológico de forma muito particular (Gonzalez et al., 2004; Mönnich et al., 2004; Mostafaeipour et al., 2016; Rezaei et al., 2018).

Em outra abordagem, considerando o modelo de sistema de produção de energia eólica utilizado nos estudos mapeados (Figura 4), verificou-se que a maioria destes estudos apresentou predileção pelo uso de modelos híbridos (51,72%), onde o hidrogênio é produzido por mais de uma fonte renovável de energia, geralmente eólica e solar (Dagdougui et al., 2012; Martin, 2016; Al-Sharafi et al., 2017). Além disso, verifica-se uma subsequente predileção pelo uso de sistemas onshore (39,08), onde as infraestruturas geram energia a partir do vento que sopra em localizações em terra (Sheth et al., 2011; Bhogilla et al., 2017; Lepszy et al., 2017; Sun et al., 2019), com poucas pesquisas direcionadas para sistemas offshore (9,20%), onde a energia limpa e renovável é obtida ao aproveitar a força do vento que sopra em alto-mar, onde este alcança uma velocidade maior e mais constante, devido à inexistência de barreiras (Shi et al., 2013; Fernández-Guillamón et al., 2019; Gondal, 2019).

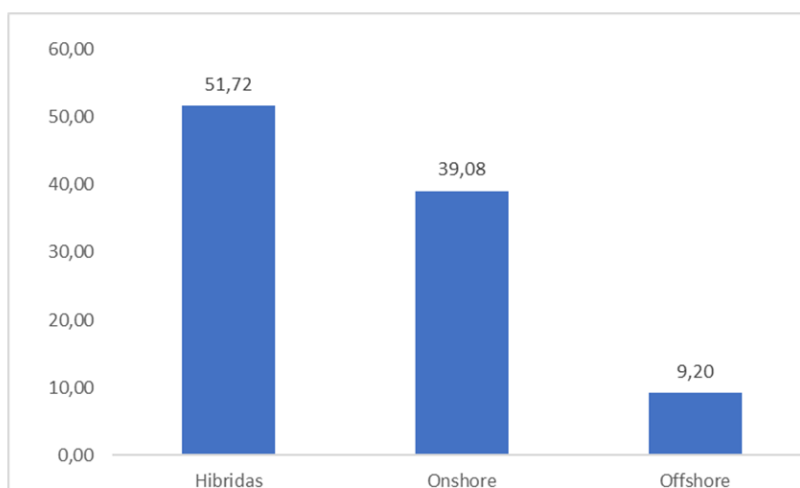


Figura 4. Percentuais de artigos mapeados conforme o modelo de planta eólica adotado.
Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Ao analisar o espaço amostral de tempo dos artigos mapeados (Figura 5), verifica-se que as publicações tiveram um início relativamente baixo nos anos 90, com uma crescente significativa nos anos 2000, especialmente a partir de 2009 (Shishido et al., 2009; Lee et al., 2010; Mostafaeipour et al., 2016).

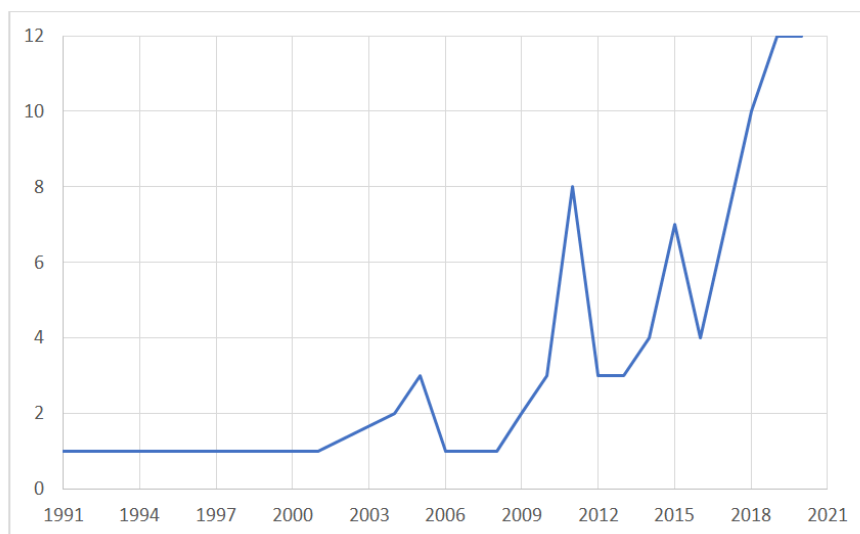


Figura 5. Número de artigos publicados por ano considerando o período de 1991 a 2020.
Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

5. Conclusão

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o uso do hidrogênio como combustível, e a própria energia eólica, são temáticas relativamente pautadas de forma significativa há pouco tempo dentro do ambiente de inovação industrial, apresentando um ecleticismo significativo, onde diversos países de forma pulverizada estão procurando cada vez mais investir nestas tecnologias, o que é expresso através do substancial crescimento do número de artigos publicados acerca destas temáticas a partir dos anos 2000.

Os estudos acerca deste tema têm sido majoritariamente desenvolvidos com modelos de pesquisa mistos (quantitativo e qualitativo), especialmente devido a necessidade de validar estes modelos experimentais para aplicação prática, podendo ser classificados em quatro temáticas centrais: 1) *Green hydrogen*; 2) viabilidade econômica e custos; 3) novas tecnologias; e 4) políticas públicas e estudos de caso, com focos diferentes que acabam convergindo para um objetivo comum, o uso do hidrogênio como combustível ecologicamente correto e rentável para o atendimento do sistema de produção de energia a partir de plantas eólicas. Quanto a perspectiva do modelo adotado para produção prática da energia eólica, verificou-se que apesar de países que apresentam uma zona litorânea significativa (offshore) instituíram indicarem um foco mais destacado em tecnologias relacionadas à energia eólica, estes são bem menos adotados que os modelos *onshore* e híbridos.

Levando em consideração esta temática, é possível traçar alguns desafios relacionados ao futuro do desenvolvimento de tecnologias relacionadas à produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, especialmente a energia eólica, destacando os seguintes pontos: a) prioridades em relação ao aspecto ambiental e ecológico; b) escala de produção e logística; c) viabilidade econômica da produção e os custos envolvidos na tecnologia; d) competitividade no mercado em relação a outras fontes energéticas; e) novas tecnologias e ecossistema de inovação; f) fornecimento de informações e subsídios para políticas públicas dentre outros pontos cruciais para o desenvolvimento da mesma no âmbito técnico-científico.

Referências

- Aiche-Hamane, L., Belhamel, M., Benyoucef, B., & Hamane, M. (2009). Feasibility study of hydrogen production from wind power in the region of Ghardaia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(11), 4947–4952.
- Al Zohbi, G., Hendrick, P., & Bouillard, P. (2015). Wind characteristics and wind energy potential analysis in five sites in Lebanon. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(44), 15311–15319.
- Alavi, O., Mostafaeipour, A., & Qolipour, M. (2016). Analysis of hydrogen production from wind energy in the southeast of Iran. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(34), 15158–15171.
- Al-Sharafi, A., Sahin, A.Z., Ayar, T., & Yilbas, B.S. (2017). Techno-economic analysis and optimization of solar and wind energy systems for power generation and hydrogen production in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 33–49.
- Amica, G., Arneodo Larochette, P., & Gennari, F.C. (2020). Light metal hydride-based hydrogen storage system: Economic assessment in Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Armijo, J., Philibert, C. (2019). Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Ashrafi, Z. N., Ghasemian, M., Shahrestani, M. I., Khodabandeh, E., & Sedaghat, A. (2018). Evaluation of hydrogen production from harvesting wind energy at high altitudes in Iran by three extrapolating Weibull methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(6), 3110–3132.
- Ayodele, T.R., & Munda, J.L. (2019). Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa. *International Journal of Hydrogen Energy*.

- Ayodele, T.R., & Munda, J.L. (2019). The potential role of green hydrogen production in the South Africa energy mix. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11(4), 044301.
- Balat, H. (2005). Wind Energy Potential in Turkey. *Energy Exploration & Exploitation*, 23(1), 51–59.
- Berg, T.L., Apostolou, D., & Enevoldsen, P. (2020). Analysis of the wind energy market in Denmark and future interactions with an emerging hydrogen market. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Bhogilla, S.S., Ito, H., Segawa, T., Kato, A., & Nakano, A. (2017). Experimental study on laboratory scale Totalized Hydrogen Energy Utilization System using wind power data. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(19), 13827–13838.
- Blal, M., Belasri, A., Benatillah, A., Hamouda, M., Lachtar, S., Sahouane, N., Labiri, S., Mostefaoui, M. (2018). Assessment of solar and wind energy as motive for potential hydrogen production of Algeria country; development a methodology for uses hydrogen-based fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(19), 9192–9210.
- Braun, G.W., Suchard, A., & Martin, J. (1991). Hydrogen and electricity as carriers of solar and wind energy for the 1990s and beyond. *Solar Energy Materials*, 24(1-4), 62–75.
- Burkhardt, J., Patyk, A., Tanguy, P., & Retzke, C. (2016). Hydrogen mobility from wind energy – A life cycle assessment focusing on the fuel supply. *Applied Energy*, 181, 54–64.
- Carr, S.J.W., Thanapalan, K.K.T., Zhang, F., Guwy, A.J., Maddy, J., Gusig, L.-O., & Premier, G.C. (2013). Integration of wind power and hydrogen hybrid electric vehicles into electric grids. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 261–270.
- Da Silva, E.P., Marin Neto, A.J., Ferreira, P.F.P., Camargo, J.C., Apolinário, F.R., & Pinto, C.S. (2005). Analysis of hydrogen production from combined photovoltaics, wind energy and secondary hydroelectricity supply in Brazil. *Solar Energy*, 78(5), 670–677.
- Dagdougui, H., Ouammi, A., & Sacile, R. (2011). A regional decision support system for onsite renewable hydrogen production from solar and wind energy sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(22), 14324–14334.
- Dagdougui, H., Ouammi, A., & Sacile, R. (2012). Modelling and control of hydrogen and energy flows in a network of green hydrogen refuelling stations powered by mixed renewable energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(6), 5360–5371.
- Dienhart, H., & Siegel, A. (1994). Hydrogen storage in isolated electrical energy systems with photovoltaic and wind energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 19(1), 61–66.
- Douak, M., & Settou, N. (2015). Estimation of hydrogen production using wind energy in Algeria. *Energy Procedia*, 74, 981–990.
- Fasihi, M., & Breyer, C. (2019). Baseload electricity and hydrogen supply based on hybrid PV-wind power plants. *Journal of Cleaner Production*, 118466.
- Fernández-Guillamón, A., Das, K., Cutululis, N.A., & Molina-García, Á. (2019). Offshore Wind Power Integration into Future Power Systems: Overview and Trends. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(11), 399.
- Franzen, S., & Madlener, R. (2017). Optimal expansion of a hydrogen storage system for wind power (H2-WESS): A real options analysis. *Energy Procedia*, 105, 3816–3823.
- Früh, W.-G. (2015). From local wind energy resource to national wind power production. *AIMS Energy*, 3(1): 101-120.

- Garmsiri, S., Rosen, M., & Smith, G. (2014). Integration of Wind Energy, Hydrogen and Natural Gas Pipeline Systems to Meet Community and Transportation Energy Needs: A Parametric Study. *Sustainability*, 6(5), 2506–2526.
- Gazey, R., Salman, S. K., & A.-D'H., D.D. (2006). A field application experience of integrating hydrogen technology with wind power in a remote island location. *Journal of Power Sources*, 157(2), 841–847.
- Genç, M.S., Çelik, M., & Karasu, İ. (2012). A review on wind energy and wind–hydrogen production in Turkey: A case study of hydrogen production via electrolysis system supplied by wind energy conversion system in Central Anatolian Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6631–6646.
- Gondal, I. (2019). Offshore Renewable energy resources and their potential in a green Hydrogen supply chain through power-to-gas. *Sustainable Energy & Fuels*.
- Gondal, I.A., Masood, S.A., & Khan, R. (2018). Green hydrogen production potential for developing a hydrogen economy in Pakistan. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(12), 6011–6039.
- González, A., McKeogh, E., & Gallachóir, B. Ó. (2004). The role of hydrogen in high wind energy penetration electricity systems: The Irish case. *Renewable Energy*, 29(4), 471–489.
- González-Aparicio, I., Kapetaki, Z., & Tzimas, E. (2018). Wind energy and carbon dioxide utilisation as an alternative business model for energy producers: A case study in Spain. *Applied Energy*, 222, 216–227.
- Guandalini, G., Campanari, S., & Romano, M.C. (2015). Power-to-gas plants and gas turbines for improved wind energy dispatchability: Energy and economic assessment. *Applied Energy*, 147, 117–130.
- Hexu, S., Zheng, L., Aibing, C., Yan, Z., & Chunxiao, M. (2019). Current Status and Development Trend of Hydrogen Production Technology by Wind Power. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 34(19), 4071-4083.
- Huang, Y.S., Liu, S.J. (2020). Chinese green hydrogen production potential development: a provincial case study. *IEEE ACCESS*, v. 8, 171968-171976.
- Ishaq, H., & Dincer, I. (2019). A comparative evaluation of OTEC, solar and wind energy based systems for clean hydrogen production. *Journal of Cleaner Production*, 118736.
- Ishaq, H., & Dincer, I. (2020). Dynamic analysis of a new solar-wind energy- based cascaded system for hydrogen to ammonia. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Ishaq, H., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2018). Performance investigation of an integrated wind energy system for co-generation of power and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(19), 9153–9164.
- Jahangiri, M., Nematollahi, O., Haghani, A., Raiesi, H. A., & Alidadi Shamsabadi, A. (2019). An optimization of energy cost of clean hybrid solar-wind power plants in Iran. *International Journal of Green Energy*, 1–14.
- Kaldellis, J. K., Kavadias, K., & Zafirakis, D. (2013). The role of hydrogen-based energy storage in the support of large-scale wind energy integration in island grids. *International Journal of Sustainable Energy*, 34(3-4), 188–201.
- Kameyama, H., Yoshizaki, K., & Yasuda, I. (2011). Carbon capture and recycle by integration of CCS and green hydrogen. *Energy Procedia*, 4, 2669–2676.
- Khaitan, S.K., Raju, M., & McCalley, J.D. (2015). Design of a novel and efficient hydrogen compressor for wind energybased storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(3), 1379–1387.

- Kılıkış, B. (2017). Exergetic comparison of wind energy storage with ice making cycle versus mini-hydrogen economy cycle in off-grid district cooling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), 17571–17582.
- Kodicherla, S.P.K., Kan, C., & Nanduri, P.M.B.R.K. (2018). Likelihood of wind energy assisted hydrogen production in three selected stations of Fiji Islands. *International Journal of Ambient Energy*, 1–10.
- Koroneos, C., & Katopodi, E. (2011). Maximization of wind energy penetration with the use of H₂ production - An exergy approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 648–656.
- Kudria, S., Ivanchenko, I., Tuchynskyi, B., Petrenko, K., Karmazin, O., & Riepin, O. (2020). Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Lee, J.-Y., An, S., Cha, K., & Hur, T. (2010). Life cycle environmental and economic analyses of a hydrogen station with wind energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(6), 2213–2225.
- Lepszy, S., Chmielniak, T., Monka, P. (2017). Storage system for electricity obtained from wind power plants using underground hydrogen reservoir. *Journal of Power Technologies*, 97(1), 61–68
- Li, Z., Guo, P., Han, R., & Sun, H. (2018). Current status and development trend of wind power generation-based hydrogen production technology. *Energy Exploration & Exploitation*, 014459871878729.
- Martín, M. (2016). Methodology for solar and wind energy chemical storage facilities design under uncertainty: Methanol production from CO₂ and hydrogen. *Computers & Chemical Engineering*, 92, 43–54.
- Martín, M., & Grossmann, I.E. (2017). Optimal integration of a self sustained algae based facility with solar and/or wind energy. *Journal of Cleaner Production*, 145, 336–347.
- Mönnich, K., Neumann, T., Strack, M., Braess, H., & Scheuerer, K. (2004). Large Scale Hydrogen Production from Wind Energy in Patagonia, Argentina. *Wind Engineering*, 28(5), 565–575.
- Mostafaeipour, A., Dehshiri, S.J.H., Dehshiri, S.S.H., & Jahangiri, M. (2020). Prioritization of potential locations for harnessing wind energy to produce hydrogen in Afghanistan. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Mostafaeipour, A., Khayyami, M., Sedaghat, A., Mohammadi, K., Shamshirband, S., Sehati, M.-A., & Gorakifard, E. (2016). Evaluating the wind energy potential for hydrogen production: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(15), 6200–6210.
- Müller, S., Groß, P., Rauch, R., Zweiler, R., Aichernig, C., Fuchs, M., & Hofbauer, H. (2017). Production of diesel from biomass and wind power – Energy storage by the use of the Fischer-Tropsch process. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 8(2), 275–282.
- Muyeen, S.M., Takahashi, R., & Tamura, J. (2010). Wind power and hydrogen generation system with cooperatively controlled three-level NPC-VSC based energy capacitor. *European Transactions on Electrical Power*, 20(8), 1071–1081.
- Nadaleti, W.C., Borges dos Santos, G., Lourenço, V.A. (2020). The potential and economic viability of hydrogen production from the use of hydroelectric and wind farms surplus energy in Brazil: A national and pioneering analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, p. 1373-1384.
- Nadaleti, W.C., dos Santos, G.B., & Lourenço, V.A. (2020). Integration of renewable energies using the surplus capacity of wind farms to generate H₂ and electricity in

- Brazil and in the Rio Grande do Sul state: energy planning and avoided emissions within a circular economy. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Nagasawa, K., Davidson, F. T., Lloyd, A. C., & Webber, M. E. (2019). Impacts of renewable hydrogen production from wind energy in electricity markets on potential hydrogen demand for light-duty vehicles. *Applied Energy*, 235, 1001–1016.
- Nicita, A., Maggio, G., Andaloro, A. P. F., & Squadrito, G. (2020). Green hydrogen as feedstock: Financial analysis of a photovoltaic-powered electrolysis plant. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Olateju, B., & Kumar, A. (2011). Hydrogen production from wind energy in Western Canada for upgrading bitumen from oil sands. *Energy*, 36(11), 6326–6339.
- Olateju, B., Monds, J., & Kumar, A. (2014). Large scale hydrogen production from wind energy for the upgrading of bitumen from oil sands. *Applied Energy*, 118, 48–56.
- Olmos, F., Hennessy, B.P., Manousiouthakis, I.V., Somiari, I., & Manousiouthakis, V.I. (2019). Thermodynamic feasibility analysis of a water-splitting thermochemical cycle based on sodium carbonate decomposition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 4041–4061.
- Ostadi, M., Paso, K.G., Rodriguez-Fabia, S., Oi, L.E., Manenti, F., Hillestad, M. (2020). Process Integration of Green Hydrogen: Decarbonization of Chemical Industries. *Energies*, 13, 4859.
- Proost, J. (2020). Critical assessment of the production scale required for fossil parity of green electrolytic hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Rabiee, A., Keane, A., Soroudi, A. (2021). Technical barriers for harnessing the green hydrogen: A power system perspective. *Renewable Energy*, 163, 1580–1587.
- Ramos, V., & Iglesias, G. (2014). Wind Power Viability on a Small Island. *International Journal of Green Energy*, 11(7), 741–760.
- Realpe-Jiménez, A., Orozco-Agamez, J., & Acevedo-Morantes, M. (2015). Wind power for hydrogen production using a spiral electrolyzer. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10, 9175–9183.
- Rezaei, M., Khozani, N.N., & Jafari, N. (2019). Wind energy utilization for hydrogen production in an underdeveloped country: An economic investigation. *Renewable Energy*.
- Rezaei, M., Mostafaeipour, A., Qolipour, M., & Arabnia, H.-R. (2018). Hydrogen production using wind energy from sea water: A case study on Southern and Northern coasts of Iran. *Energy & Environment*, 29(3), 333–357.
- Safari, F., & Dincer, I. (2018). Assessment and optimization of an integrated wind power system for hydrogen and methane production. *Energy Conversion and Management*, 177, 693–703.
- Sarrias-Mena, R., Fernández-Ramírez, L.M., García-Vázquez, C.A., & Jurado, F. (2015). Electrolyzer models for hydrogen production from wind energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(7), 2927–2938.
- Schenk, N.J., Moll, H.C., Potting, J., & Benders, R.M.J. (2007). Wind energy, electricity, and hydrogen in the Netherlands. *Energy*, 32(10), 1960–1971.
- Sherif, S.A., Barbir, F., & Veziroglu, T.N. (2005). Wind energy and the hydrogen economy-review of the technology. *Solar Energy*, 78(5), 647–660.
- Sheth, J.P., Grewal, G.S., Srinet, V., Govindan, T.P. (2011). Wind hydrogen based distributed energy system for rural India. *Water and Energy International*, 68(2), 42–45.

- Shi, S.Y., Cheng, F., & Nayel, M. (2013). Discuss hydrogen production in Jiangsu province using non-grid-connected offshore wind power. *Applied Mechanics and Materials*, 291-294, 2102–2108.
- Shishido, S., Takahashi, R., Murata, T., Tamura, J., Sugimasa, M., Komura, A., Futami, M., Ichinose, M., & Ide, K. (2009). Stabilization of wind energy conversion system with hydrogen generator by using EDLC energy storage system. *Electrical Engineering in Japan*, 168(3), 10–18.
- Troncoso, E., & Newborough, M. (2011). Electrolysers for mitigating wind curtailment and producing “green” merchant hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(1), 120–134.
- Vega, R., Ramos A., Conde, E., & Reina, P. (2011). Pre-feasibility study of hybrid wind power-H₂ system connected to electrical grid. *IEEE Latin America Transactions*, 9(5), 800–807.
- Wang, Z., Wang, H., Ji, S., Wang, X., Pollet, B. G., & Wang, R. (2020). Multidimensional regulation of Ni₃S₂Co(OH)₂ catalyst with high performance for wind energy electrolytic water. *Journal of Power Sources*, 446, 227348.
- Yang, T. C. (2008). Initial study of using rechargeable batteries in wind power generation with variable speed induction generators. *IET Renewable Power Generation*, 2(2), 89–101.
- Yang, W.-J., & Aydin, O. (2001). Wind energy-hydrogen storage hybrid power generation. *International Journal of Energy Research*, 25(5), 449–463.
- Yumurtac, Z., & Toprak, K. (2011). An economic analysis of hydrogen production using wind power. *International Journal of Renewable Energy Research*, 1, 11–17.
- Zhang, G., & Wan, X. (2014). A wind-hydrogen energy storage system model for massive wind energy curtailment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(3), 1243–1252.
- Zhao, G., Nielsen, E.R., Troncoso, E., Hyde, K., Romeo, J.S., & Diderich, M. (2018). Life cycle cost analysis: A case study of hydrogen energy application on the Orkney Islands. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Zolezzi, J.M., Garay, A., & Revecó, M. (2010). Large scale hydrogen production from wind energy in the Magallanes area for consumption in the central zone of Chile. *Journal of Power Sources*, 195(24), 8236–8243.