

ENERGIA EÓLICA OFFSHORE E PRODUÇÃO DE AÇO VERDE: UMA ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E DE MERCADO

Jéssica Rayany Rodrigues Silva¹, Mayara Adrielly Leal de Oliveira Rodrigues², Andressa Medeiros Santiso³, David Cassimiro de Melo⁴, Eloísa Conceição Nascimento Silva⁵, Mario Orestes Aguirre González⁶

1, 2, 3, 4, 5, 6 CREATION Research Group – Grupo de pesquisa em Inovação de Produtos e Processos para Energias Renováveis/Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção/UFRN

jessica.rodrigues.115@ufrn.edu.br ; mayara.leal.702@ufrn.edu.br ; andressamsantiso@gmail.com ; david.cassimiro.096@ufrn.edu.br ; eloisa.nascimento.093@ufrn.edu.br ; mario.gonzalez@ufrn.br

RESUMO

Os países estão empenhados em direcionar esforços para a descarbonização mundial, visando alcançar as metas estabelecidas pelo Acordo de Paris. Nesse contexto, o hidrogênio (H₂) desponta como o pilar central da transformação energética necessária para conter o aquecimento global, uma vez que essa fonte de energia pode desempenhar um papel significativo na descarbonização de setores, como a produção de materiais metálicos e o aço. Embora a tecnologia de redução direta do ferro por hidrogênio (DRI-H₂) para a fabricação de aço ainda não esteja comercialmente disponível, o número de projetos de demonstração está em constante crescimento. Essa indústria tem como principal requisito a disponibilidade de hidrogênio e eletricidade verdes e de baixo custo. Considerando que, dentre todas as opções de eletricidade renovável, a energia eólica *offshore* tem o maior potencial para a produção de H₂V, este artigo tem por objetivo analisar o cenário internacional de tecnologias e projetos de H₂V, produzido a partir da energia eólica *offshore*, voltados para a produção de aço verde via DRI-H₂. A pesquisa foi conduzida em duas etapas: pesquisa teórica e estudo de caso. Com base na análise realizada, podemos inferir que: (i) Projetos comerciais de H₂V já poderão ser observados no período entre 2025-2030; (ii) O principal requisito para o setor é a disponibilidade de grande quantidade de energia elétrica renovável e H₂V de baixo custo; (iii) Na produção de aço verde, a eletrólise SOEC se destaca por possuir maior eficiência na conversão de energia; (iv) A rota DRI-H₂ apresenta viabilidade técnica e vantagens competitivas e em relação à rota convencional; e (v) O setor terá uma importante contribuição na geração de empregos verdes e mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Assim, podemos inferir que o mercado do aço verde se encontra em fase de planejamento e se prepara para uma expansão considerável nos próximos anos. Ainda, devido à grande quantidade de energia renovável requerida no processo, apontam-se as usinas eólicas *offshore* como sendo uma das principais fornecedoras dessa energia.

Palavras-chaves:

Aço Verde; Hidrogênio Verde; Eólica *Offshore*; Descarbonização; DRI-H₂; Siderurgia.

ABSTRACT

Countries are committed to directing efforts towards global decarbonization, with the aim of achieving the goals established by the Paris Agreement. In this context, hydrogen (H₂) is considered as the central pillar of the necessary energy transformation to address global warming, as it can significantly contribute to decarbonizing sectors such as metal production and steel manufacturing. While the technology of direct reduction of iron by hydrogen (DRI-H₂) for steel production is not yet commercially available, the number

of demonstration projects is consistently increasing. The primary requirement of this industry is the availability of green and cost-effective hydrogen and electricity. Considering that offshore wind energy has the highest potential among all renewable electricity options for H₂ production, this article aims to analyze the international scenario of H₂ production from offshore wind energy, specifically for the production of green steel through DRI-H₂. The research was conducted in two stages: theoretical research and a case study. Based on the analysis conducted, it can be inferred: (i) Commercial H₂ production projects can be observed between 2025-2030; (ii) The primary requirement for the sector is the availability of a substantial amount of renewable electricity and low-cost H₂; (iii) In the production of green steel, the solid oxide electrolysis cell (SOEC) stands out for its higher energy conversion efficiency; (iv) The DRI-H₂ route demonstrates technical feasibility and competitive advantages compared to the conventional route; and (v) The sector will significantly contribute to the creation of green jobs and the mitigation of greenhouse gas emissions. Thus, we can infer that the green steel market is in the planning phase and is preparing for substantial expansion in the next years. Furthermore, due to the considerable amount of renewable energy required in the process, offshore wind power is identified as one of the primary suppliers of this energy.

Keywords:

Green Steel; Green Hydrogen; Offshore wind; Decarbonization; DRI-H₂; Steelmaking;

1. INTRODUÇÃO

Em 2015, em Paris, os participantes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima concordaram em unir esforços para limitar o aumento da temperatura global a 2°C, ou até 1,5°C, até 2050. Para alcançar essa meta, é essencial adotar uma profunda descarbonização, a qual se dará por meio da eletrificação, eficiência energética e uso de fontes renováveis, sobretudo o hidrogênio verde (H₂V) (IRENA, 2022b).

Ademais, o *Hydrogen Council* (2017) afirma que o hidrogênio (H₂) é o pilar central da transformação energética necessária para limitar o aquecimento global. Nessa perspectiva, estima-se que até 25% das emissões de gases do efeito estufa (GEE) poderiam ser reduzidas por meio do H₂ 2050 (WORLD BANK, 2022), o que pode representar até 80 gigatoneladas (GT) de GEE (HYDROGEN COUNCIL, 2022a).

A implantação de projetos e o desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio estão crescendo gradualmente, com progresso significativo nas etapas de produção e usos finais (HYDROGEN COUNCIL, 2022b). O setor privado anunciou mais de 1.500 projetos até meados de 2022 (IRENA, 2022g), o que indica um interesse global nas cadeias de valor de hidrogênio. Esse interesse se dá, uma vez que o H₂ poderá ajudar significativamente a descarbonizar setores difíceis de descarbonização, como a produção de ferro e aço (WORLD BANK, 2022).

Algumas tecnologias-chave de hidrogênio, como a redução direta do ferro por hidrogênio (DRI-H₂) para a fabricação de aço, ainda não estão disponíveis comercialmente. No entanto, o número de projetos de demonstração está aumentando, e espera-se que alguns se tornem disponíveis comercialmente em um período de médio prazo. Sobre o uso do DRI-H₂, um ano após o início da operação do primeiro projeto piloto, foram anunciados planos para o desenvolvimento de várias usinas DRI-H₂ em escala comercial, sobretudo na Europa (IEA, 2022a).

Considerando que, dentre todas as opções de eletricidade renovável, a energia eólica *offshore* tem o maior potencial para a produção de H₂V devido à competitividade econômica que pode ser alcançada por meio de suas constantes inovações tecnológicas e economia de escala (GWEC, 2021), surgiu o seguinte questionamento da pesquisa: **"Qual é o panorama internacional em relação ao desenvolvimento de projetos de produção de aço verde que utilizam hidrogênio verde proveniente da energia eólica *offshore*?"**. Diante disso, este artigo tem por objetivo analisar o cenário internacional de tecnologias e projetos de hidrogênio verde, produzido a partir da energia eólica *offshore*, voltados para a produção de aço verde por meio da redução direta do ferro (DRI-H₂).

O artigo está estruturado em cinco seções: a presente seção, seção 1, apresenta uma

contextualização sobre o tema, a seção 2 compreende o método da pesquisa; a seção 3 apresenta a fundamentação teórica sobre as temáticas de: eólica *offshore*, hidrogênio verde e aço verde; a seção 4 traz o estudo de caso de um projeto de produção de aço verde via DRI-H2 com o H₂ proveniente da eólica *offshore*; a seção 5 contempla a discussão dos resultados; e pôr fim a seção 6 apresenta as conclusões do estudo e recomendações.

2. MÉTODO DO ESTUDO

Cada pesquisa tem suas características, logo é necessário que elas sejam explicitadas para um melhor entendimento quanto aos seus propósitos, sua natureza, seu objetivo, sua abordagem, tipo de argumentação lógica e seu procedimento técnico (WILLIAMS, 2007; GONZÁLEZ; TOLEDO, 2012).

Este estudo é caracterizado como pesquisa aplicada, já que sua finalidade é identificar o cenário internacional relacionado ao desenvolvimento de projetos de produção de aço verde que utilizam o H₂V eletrolítico, produzido a partir da eólica *offshore*. Quanto à classificação dos objetivos, o estudo possui características exploratórias e descritivas. A característica exploratória se deu por meio da necessidade de um levantamento bibliográfico e documental e a descritiva pelo estabelecimento de correlações entre as variáveis encontradas. Por conseguinte, a pesquisa possui abordagem qualitativa, pois os objetos de estudo foram investigados de forma teórica. Dentre os procedimentos, os métodos de pesquisa bibliográfica e estudo de caso foram utilizados.

2.1 Procedimento da pesquisa

O procedimento da pesquisa se deu em duas etapas: (i) pesquisa teórica e (ii) estudo de caso. A (i) pesquisa teórica englobou uma revisão bibliográfica, utilizando como tema (a) eólica *offshore*; (b) hidrogênio verde; e (c) aço verde. A pesquisa foi realizada por meio de artigos científicos, obtidos por meio de buscas nas bases de dados Scopus e Science Direct, e relatórios técnicos divulgados por agências e empresas do setor.

Em uma segunda instância, foi realizado o (ii) estudo de caso, o qual consistiu em uma análise documental, e coleta de dados por meio de sites institucionais e relatórios técnicos. Para este estudo foi analisado o *Tees Green Hydrogen*, localizado no Reino Unido, uma vez que este é o projeto em fase mais avançada para esta tecnologia.

3. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A base teórica contempla os temas: eólica *offshore*, hidrogênio verde, aço verde e o panorama atual de mercado do aço verde.

3.1 Eólica *offshore*

A geração de eletricidade a partir da energia eólica pode ser explicada da seguinte forma: a energia cinética fornecida pelos ventos é transformada em mecânica, que, por sua vez, aciona um gerador de energia que transforma a energia mecânica em elétrica (ALLAMEHZADEH, 2016). Dentre os locais de instalação de parques eólicos, existem duas modalidades: *onshore*, cujo parque eólico é instalado dentro da costa continental, e *offshore*, instalado em ambiente marítimo. De acordo com o IRENA, estima-se que a capacidade instalada global acumulada em eólica *offshore* alcance aproximadamente 380 GW em 2030 e mais de 2.000 GW em 2050 (IRENA, 2021). Entre todas as fontes de energias renováveis, a eólica *offshore* é a modalidade de energia que apresenta fatores de capacidade médio anual mais altos, variando de 40 a 50% (GWEC, 2021), no entanto, em determinadas regiões, como no Brasil, pode ser superior a 60% (NUNES, 2020).

A média global do custo nivelado de energia eólica *offshore* (LCOE) para sistemas fixos e flutuantes são de US\$ 85/MWh e US\$ 132/MWh, respectivamente (STEHLY *et al.*, 2020). Não obstante, uma projeção de redução no LCOE de 35–49% e 17–40% para as turbinas eólicas *offshore* de fundação fixo e flutuante, respectivamente, é prevista para os anos de 2035 a 2050 (KUMAR *et al.*, 2022), atingindo custos menores que a eólica *onshore*. Em contrapartida com as projeções, em 2022, a energia eólica *offshore* atingiu valores menores que a eólica *onshore* no leilão de energia realizado no Reino Unido com

um valor de £37,35/MWh (aproximadamente US\$ 47,78/MWh) demonstrando um potencial de redução de custos da tecnologia ainda mais acelerado (TCE, 2022).

Apesar dos benefícios citados, há limitações na transmissão eficiente da eletricidade *offshore*, pois é necessário o uso de linhas de transmissão de alta tensão para transferência (GONDAL, 2019). Portanto, é conveniente a implementação de um vetor de energia sustentável para minimizar os impasses da transmissão de eletricidade.

3.2 Hidrogênio Verde

O hidrogênio é o elemento mais abundante no universo, encontrado principalmente na água e em compostos orgânicos (DAWOOD; ANDA; SHAFIULLAH, 2020). A cadeia de valor do hidrogênio verde consiste nas etapas de: produção, armazenamento, transporte e aplicações (EISILY *et al.*, 2022).

Conforme Nikolaidis e Poullikkas (2017), a produção do hidrogênio pode ser dividida em duas principais categorias: biomassa e divisão da água. De forma comercial, a rota mais comum utiliza como matéria prima a água, mais precisamente o processo de eletrólise. Este, consiste na decomposição eletroquímica da água em hidrogênio e oxigênio, por meio de uma corrente elétrica (GALITSKAYA; ZHDANEEV, 2022).

Sobre os sistemas de armazenamento, Hren *et al.* (2023), afirmam que existem dois métodos, sendo eles: (i) físico, que consiste na compressão, liquefação ou criocompressão; e (ii) químico, que consiste nos transportadores orgânicos líquidos (LOHCs) e hidretos metálicos. As formas de armazenamento mais utilizadas atualmente são o hidrogênio comprimido e líquido, geralmente transportados por vasos de alta pressão e tanques criogênicos. Ademais, a transformação do hidrogênio em outros portadores de energia, como amônia e metanol, é bastante mencionada atualmente (OLABI *et al.*, 2023).

Sobre o transporte, o hidrogênio pode ser transportado usando diferentes modais, incluindo dutos, rodovias, ferrovias e transporte marítimo (DONG *et al.*, 2022).

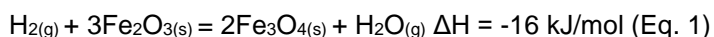
Em relação às aplicações, uma vez que o hidrogênio é um produto com grande versatilidade, possui diversas aplicações: (i) geração de energia elétrica por meio de células de combustível; (ii) injeção em rede de dutos (iii) aquecimento; utilização no setor de mobilidade/transporte e utilização no setor industrial (HU, 2020). Tratando-se das utilizações industriais, destacam-se os setores: químico, petroquímico, e siderúrgico, por meio da produção de materiais metálicos, ferro e aço através do método DRI-H2 (LOISEL, 2019).

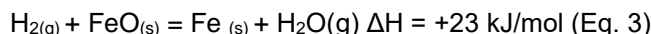
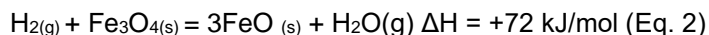
3.3 Aço Verde

Avanços tecnológicos recentes na siderurgia, juntamente com reduções de custos em tecnologias de energias renováveis, apontam que o setor siderúrgico possui potencial para reduzir significativamente suas emissões de gases de efeito estufa (VOGL, 2018; VOGL, 2021).

A maior parte da produção global de aço é realizada através da rota de Alto-forno/Forno Básico de Oxigênio (BF-BOF), a qual reduz o minério de ferro -hematita- (Fe_2O_3) a ferro metálico (Fe), utilizando coque e combustíveis fósseis. A rota do Forno de Arco Elétrico de Redução Direta (DR-EAF) é a principal alternativa à rota BF-BOF, onde o minério é reduzido a ferro diretamente (DRI) utilizando gás natural ou gás de síntese ($\text{H}_2 + \text{CO}$) (WANG *et al.*, 2021). De acordo com Rechberger *et al.* (2020), a substituição completa do gás natural por H_2 pode reduzir em 91% a quantidade de CO_2 emitido no processo e, termodinamicamente, a eficiência da redução do ferro usando hidrogênio é maior quando comparado a outros métodos. Logo, a tecnologia DRI-H2 tem sido considerada tecnicamente a mais promissora (LEDARI *et al.*, 2023).

O processo de redução DRI-H2 ocorre em três etapas. Primeiro a Hematita (Fe_2O_3) é convertida em Magnetita (Fe_3O_4) e nas etapas subsequentes, a Magnetita é convertida em Wüstita (FeO) e, finalmente, em ferro metálico (Fe), conforme as Equações 1, 2 e 3.





A tecnologia DRI-H2 está atualmente bem estabelecida com um Technology Readiness Level (TRL) de 6–8 (MIDREX, 2021).

3.4 Panorama atual do aço verde: Perspectivas do mercado

A produção de aço é altamente intensiva em uso de energia, cerca de 8% da demanda global, e em emissões de gases do efeito estufa, respondendo por e 7% (2,6 Gt CO₂) das emissões totais do sistema energético. Para atender às metas globais de energia e clima, as emissões da indústria siderúrgica devem cair em pelo menos 50% até 2050 (IEA, 2020). Ademais, a indústria siderúrgica desempenha um papel vital na economia global, com mais de US\$ 2,5 trilhões em receita e emprega cerca de 6 milhões de pessoas em todo o mundo (IEA, 2020).

A demanda global por aço está prevista para aumentar em mais de um terço até 2050, passando de 1,9 Gt em 2019 para mais de 2,5 Gt em 2050, sendo acrescida sobretudo pelo aço verde, o qual está previsto para representar 15% da produção até 2050. Nesse contexto, é esperado para o setor que o uso de fontes fósseis diminua em 40%, ao passo que o consumo de eletricidade dobre. Aproximadamente 30% dessa eletricidade, equivalente a cerca de 700 TWh, será direcionada à geração de hidrogênio eletrolítico, demandando cerca de 165 GW de capacidade de eletrolisadores em 2050 (IEA, 2020).

Considerando o aço verde, produzido pelo método DRI-H2, os custos atuais estimados de produção estão variando entre US\$ 650 e US\$ 715/ton, enquanto o custo do aço cinza é de US\$ 550/ton (IRENA, 2022e). Ao analisar os elementos de custo para cada tipo de aço, tem-se que a eletricidade é o principal custo do aço verde, seguido pelo minério de ferro. No caso do aço cinza, o minério de ferro é o elemento com maior custo, seguido pelo coque (MAYER *et al.*, 2018). No entanto, o mercado estima que os custos possam ser equiparados ou até menores em comparação ao aço cinza em um período de médio prazo, uma vez que os custos do H₂V e da eletricidade verde venham a diminuir.

No entanto, o mercado identifica diversos desafios para o desenvolvimento do setor, tais como: (i) garantir o suprimento de energia renovável, em grande quantidade; (ii) estabelecer regulamentações, incentivos e normas adequadas; (iii) assegurar a disponibilidade de minério de ferro de alta qualidade; (iv) contar com mão de obra qualificada e bens necessários; (v) obter financiamento adequado; e (vi) atender à demanda do mercado de *offtakers* (SHELL, 2022).

Além disso, para o setor avançar de maneira sólida, é essencial ter acesso à energia elétrica verde de baixo custo e em grande quantidade, seja por meio de H₂V para alimentar usinas DRI ou para suprir os sistemas elétricos. Nesse contexto, é importante ressaltar que, no caso do aço verde produzido por DRI-H₂, o custo da energia renovável representa entre 50% e 70% dos custos totais de produção (SHELL, 2022).

A produção DRI-H2 ainda está em um estágio inicial de desenvolvimento. O portfólio de projetos indica que até 2030, se todos os projetos planejados alcançarem suas metas anunciadas dentro do prazo, cerca de 1,8 Mt de capacidade de hidrogênio de baixa emissão para o processo DRI estará disponível (IEA, 2022a).

4. ESTUDO DE CASO: TESS VALLEY

O projeto *Tees Green Hydrogen* utilizará a eletricidade verde do parque eólico *offshore* Teesside, juntamente com um novo parque solar, como suprimento de eletricidade para a produção de hidrogênio eletrolítico. O projeto fornecerá hidrogênio para a descarbonização da indústria local, região de Tesside nordeste do Reino Unido, incluindo o setor siderúrgico. Em sua fase inicial, o eletrolisador terá de 30 a 50 MW e em fases posteriores estima-se que a capacidade de produção seja superior a 500 MW (BRITISH STEEL, 2022).

Ademais, a *British Steel* está conduzindo um estudo sobre o uso de hidrogênio verde no processo de produção do aço verde em colaboração com a EDF UK, UCL (*University College London*) e o MPI

(BRITISH STEEL, 2022). O projeto conta com um orçamento bruto total de £ 7,21 milhões e a data de comissionamento está prevista para abril de 2024 (BRITISH STEEL, 2022). O H2DRI, nome dado a fase 1 do projeto, consistiu no estudo de viabilidade, o qual foi finalizada em 2022. A fase 2 irá consistir na construção de uma planta piloto de produção de aço verde com mais de 1 tonelada por dia de capacidade e tem como título provisório 'HEIDI' (Hydrogen-Electric Iron & Steelmaking Demonstration and Innovation) (MPI, 2023).

A fase 1, revisou a maturidade técnica e a viabilidade econômica do uso de hidrogênio alcalino (ALK), membrana de troca de prótons (PEM) e célula de eletrolisador de óxido sólido (SOEC) para a produção do hidrogênio. Sob esse aspecto, a possibilidade de utilizar o calor 'residual' do forno de reaquecimento foi considerada, pois isso aumenta a eficiência da produção de hidrogênio SOEC no local em cerca de 20%. Ademais, o trabalho de modelagem identificou que a troca de combustíveis fósseis por hidrogênio pode aumentar a eficiência geral do forno de 50% para 61%. Além disso, ao mesmo tempo em que o rendimento é aumentado, existe uma redução significativa na formação de incrustações (BRITISH STEEL, 2022). De modo global, o estudo desse projeto encontra-se no TRL 5 com perspectivas de TRL 7 até o fim dos estudos (BRITISH STEEL, 2022). Ademais, a partir do estudo de viabilidade, foi constatado que a DRI-H2 não só é possível, como apresenta um tempo de processo menor e requer menos energia que a redução do ferro convencional, além de produzir um aço de alta pureza (MPI, 2023).

Do ponto de vista socioeconômico do projeto, criar e manter as cadeias de suprimentos industriais dentro do *Tees Valley* também terá um impacto positivo no número de empregos. Estima-se que, devido à disponibilidade e ao uso de hidrogênio, a região tem o potencial de gerar até 2.400 empregos na indústria e na sua cadeia de valor (TEES VALLEY E ARUP, 2022).

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir da análise realizada, é possível inferir que a descarbonização do setor siderúrgico tem se tornado uma tendência crescente nos últimos anos. Impulsionado pelo aumento de capacidade instalada das energias de fontes renováveis, dentre elas a eólica *offshore*, e com o objetivo de cumprir as metas de descarbonização propostas no acordo de Paris, o número de projetos dedicados a produção de aço via DRI-H2 tem aumentado. O alto investimento financeiro, tanto por parte dos governos quanto das empresas, tem impulsionado o desenvolvimento tecnológico e do mercado.

Como um requisito para que o mercado se desenvolva, é crucial que exista hidrogênio verde abundante e de baixo custo e eletricidade renovável barata, os quais serão viabilizados com a presença da eólica *offshore*, uma vez que essa fonte tem o maior potencial para a produção de H₂V e será a mais competitiva em um horizonte de curto e médio prazo.

Em relação à capacidade de produção dos projetos, destaca-se a produção em grande escala e a expectativa de comissionamento em curto e médio prazo. Além disso, os projetos, mesmo em escala piloto, que utilizam a tecnologia DRI-H2, têm demonstrado viabilidade técnica e apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais. Sob esse aspecto, é pertinente mencionar o aumento da eficiência geral do forno, o menor tempo de processo, o menor aporte energético, o aumento da pureza e a redução das incrustações.

Quanto ao hidrogênio verde, que é um insumo para o processo de DRI, prevê-se a instalação de plantas de produção com alta capacidade em um período de médio prazo. Ademais, é importante destacar a menção da tecnologia de produção de SOEC, a qual tem apresentado significativos resultados, uma vez que reaproveita o calor residual do processo para melhorar a eficiência do sistema.

Além dos benefícios ambientais, como a mitigação das emissões de CO₂, a produção de aço verde também traz impactos socioeconômicos positivos, como a criação de milhares de empregos verdes nas regiões onde são implantados, e o impulsionamento do desenvolvimento da cadeia de suprimentos, tanto a nível local quanto internacional, promovendo a economia e a sustentabilidade da indústria.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os setores econômicos estão direcionando seus esforços para a descarbonização de suas atividades, com o objetivo de atingir as metas previstas pelo Acordo de Paris. Nesse contexto, o hidrogênio apresenta-se como o pilar central para o processo de transição energética.

Este estudo limitou-se a analisar o setor siderúrgico, responsável por 7% das emissões totais de CO₂ do sistema energético. Dessa forma, o objetivo desta pesquisa é analisar o cenário internacional de tecnologias e projetos de hidrogênio verde, produzido a partir da energia eólica *offshore*, voltados para a produção de aço verde por meio da redução direta do ferro.

No que se refere a produção de energia elétrica para produção de hidrogênio verde, pode-se concluir que a fonte eólica *offshore* é considerada a opção mais promissora, devido a que os projetos de parques eólicos *offshore* possuem grande escala de produção de energia elétrica (projetos com mais de 1 GW de capacidade instalada). No total, mais de 100 projetos na cadeia de valor do hidrogênio utilizam essa fonte como insumo de energia elétrica.

Quanto a rota de produção de hidrogênio verde, a eletrólise é considerada a mais promissora. No mundo já é possível observar projetos que produzirão H₂V em larga escala em um período de médio prazo. Na produção de aço verde sugere-se o destaque a tecnologia SOEC, uma vez que é possível reaproveitar o calor residual do processo de produção do aço, aumentando a eficiência da produção de H₂V.

Apesar dos projetos de produção de aço verde a partir da redução direta do ferro por hidrogênio (DRI-H₂) ainda estarem nos estágios iniciais (projeto piloto), algumas vantagens são observadas quando comparada a produção do aço cinza. São elas: aumento na eficiência global do forno; redução na formação de incrustações; menor tempo de processo; redução no consumo de energia; e produção de um aço de altíssima pureza.

Quanto aos custos do aço verde, mesmo apresentando um custo estimado cerca de 18% maior quando comparado ao aço cinza, estima-se que em um período de curto a médio prazo, com a redução nos custos do H₂V e da eletricidade de fonte renovável, o aço verde terá valor equiparado ou inferior ao aço produzido pela rota tradicional.

Ademais, o mercado de aço verde tem testemunhado um desenvolvimento significativo, refletido em altos investimentos, aumento do número de projetos em andamento e avanços tecnológicos para a tecnologia DRI-H₂, já que tem demonstrado diversas vantagens em relação ao método convencional e viabilidade técnica.

Assim, é observada uma tendência no desenvolvimento da cadeia de suprimentos local e global para o mercado de aço verde, com forte impulsionamento dos *offtakers*. Sobre os benefícios socioambientais, pode ser destacada a redução das emissões de CO₂ do setor, além da criação de milhares de empregos verdes nas regiões onde são implantados, contribuindo para o desenvolvimento econômico e social.

Por fim, a análise dos projetos identificou lacunas que requerem estudos futuros para impulsionar o setor. São elas: (i) Detalhamento das variáveis técnicas operacionais; (ii) Planejamento de operação e manutenção de projetos; (iii) Análise econômica de projetos de produção de aço verde; (iv) Modelos de certificação para aço verde; (v) diretrizes para o desenvolvimento do mercado de aço verde.

Portanto, é possível inferir que o mercado do aço verde está em fase de planejamento e se prepara para uma expansão significativa nos próximos anos. Nesse sentido, a compreensão e o acompanhamento dos projetos piloto desempenharão um papel fundamental no desenvolvimento e aprimoramento desse mercado em ascensão.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking.** Paris: IEA, 2020. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf. Acesso em: 07 jul. 2023

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Global Hydrogen Review 2022**. França: IEA, 2022a. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2022

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (IRENA). **Accelerating hydrogen deployment in the G7: Recommendations for the Hydrogen Action Pact**. Abu Dhabi: IRENA, 2022g. Disponível em: https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdnendpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Nov/IRENA_Hydrogen_deployment_G7_2022.pdf?rev=ef39150b82754588b2f31bd5afc74c01. Acesso em: 15 mar. 2023

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (IRENA). **Green hydrogen for industry: A guide to policy making**. Abu Dhabi: IRENA, 2022e. Disponível em: irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_Green_Hydrogen_Industry_2022.pdf. Acesso em: 07 jul. 2023.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (IRENA). **Offshore Renewables: An Action Agenda for Deployment**. Abu Dhabi: IRENA, 2021. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jul/IRENA_G20_Offshore_renewables_2021.pdf?rev=9e3ad6549dd44dc9aaaaedae16b747bb. Acesso em 05 de jul. 2023.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (IRENA). **WORLD ENERGY TRANSITIONS OUTLOOK 2022: 1.5°C Pathway**. Abu Dhabi: IRENA, 2022b. Disponível em: irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022.pdf. Acesso em: 07 jul. 2023

ALLAMEHZADEH, Hamid. Wind energy history, technology and control. In: **2016 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)**. IEEE, 2016. p. 119-126.

BRITISH STEEL. **Desktop Feasibility Study: Green Hydrogen in Steel Manufacture**. Reino Unido: British Steel, 2022. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1165564/British_Steel_-_Green_Hydrogen_in_Steel_Manufacture_-_IFS_Feasibility_Report_.pdf. Acesso em: 07 jul. 2023

DAWOOD, Furat; ANDA, Martin; SHAFIULLAH, G. M. Hydrogen production for energy: An overview. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 7, p. 3847-3869, 2020.

DONG, Zhao Yang et al. A green hydrogen credit framework for international green hydrogen trading towards a carbon neutral future. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 2, p. 728-734, 2022.

ESILY, R. R. et al. Hydrogen strategy in decarbonization era: Egypt as a case study. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 43, p. 18629-18647, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.012>.

GALITSKAYA, Elena; ZHDANEEV, Oleg. Development of electrolysis technologies for hydrogen production: A case study of green steel manufacturing in the Russian Federation. **Environmental Technology & Innovation**, v. 27, p. 102517, 2022.

GONDAL, Irfan Ahmad. Offshore renewable energy resources and their potential in a green hydrogen supply chain through power-to-gas. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 3, n. 6, p. 1468-1489, 2019.

GONZÁLEZ, M. O. A.; DE TOLEDO, J. C. Customer integration in the product development process: A systematic bibliographic review and themes for research. **Producao**, v. 22, n. 1, p. 14-26, 2012.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). **Global Offshore Wind Report 2021**. Global Wind Energy Council. Bruxelas: GWEC, 2021. Disponível em: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/09/GWEC-Global-Offshore-Wind-Report-2021.pdf>. Acesso em 17 jun. 2021.

HREN, Robert et al. Hydrogen production, storage and transport for renewable energy and chemicals: An environmental footprint assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 173, p. 113113, 2023

HU, Guoping et al. A review of technical advances, barriers, and solutions in the power to hydrogen (P2H) roadmap. **Engineering**, 2020.

HYDROGEN COUNCIL. **Global Hydrogen Flows**: Hydrogen trade as a key enabler for efficient decarbonization. Brussels: Hydrogen Council, McKinsey & Company, 2022a. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/10/GlobalHydrogen-Flows.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2023.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Insights 2022**: An updated perspective on hydrogen market development and actions required to unlock hydrogen at scale. Brussels: Hydrogen Council, McKinsey & Company, 2022b. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/09/Hydrogen-Insights-2022-2.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2023.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Scaling Up**: A sustainable pathway for the global energy transition. Brussels: Hydrogen Council, McKinsey & Company, 2017. Disponível em: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-Scalingup_Hydrogen-Council_2017.compressed.pdf. Acesso em 01 jun. 2021.

KUMAR, Sumit et al. Synergy of green hydrogen sector with offshore industries: Opportunities and challenges for a safe and sustainable hydrogen economy. **Journal of Cleaner Production**, p. 135545, 2022.

LEDARI, Masoumeh Bararzadeh et al. Greening steel industry by hydrogen: Lessons learned for the developing world. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2023.

LOISEL, Rodica et al. Green hydrogen multi-market optimisation: real complementarities or temporary transaction costs?. In: **2019 Offshore Energy and Storage Summit (OSES)**. IEEE, 2019. p. 1-10.

MATERIALS PROCESSING INSTITUTE (MPI). **H2DRI Pilot Project Public Report**. Middlesbrough: MPI, 2023. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1165639/Materials_Processing_Institute_-_Hydrogen_Direct_Reduction_of_Iron_pilot_furnace_and_steelmaking_H2DRI_pilot_-_IFS_Feasibility_Report.pdf. Acesso em: 07 jul. 2023.

MAYER, Jakob; BACHNER, Gabriel; STEININGER, Karl W. Macroeconomic implications of switching to process-emission-free iron and steel production in Europe. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1517-1533, 2019.

MIDREX TECHNOLOGIES, INC. **Arcelor Mittal Hamburg**: leading another ironmaker renaissance. Disponível em: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex-DFM-1stQtr2021-Final.pdf>. Acesso em 01 de jul. 2023.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LAB (NREL). **2019: Cost of Wind Energy Review**. Estados Unidos: NREL, 2020. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78471.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2023.

NIKOLAIDIS, P.; POULLIKKAS, A. A comparative overview of hydrogen production processes. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 67, p. 597-611, 2017.

NUNES, João Paulo Costa et al. **Energia eólica offshore: um estudo de caso para análise da viabilidade técnico-econômica de uma usina próxima à costa do Rio Grande do Norte**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

OLABI, A. G. et al. Recent progress in Green Ammonia: Production, applications, assessment; barriers, and its role in achieving the sustainable development goals. **Energy Conversion and Management**, v. 277, p. 116594, 2023.

SHELL. **Decarbonising Steel**: FORGING NEW PATHS TOGETHER. Londres: Shell, 2022. Disponível em: https://www.shell.com/shellenergy/marketingandtrading/jcr_content/root/main/section/simple/promo_213_0259397/links/item0.stream/1669392117011/5b1f673472d02633f82125fef387d13c266a454d/shell-decarbonising-steel-digital.pdf. Acesso em: 07 jul. 2023.

TCE, **Offshore Wind Report 2022**. Disponível em: <https://www.thecrownestate.co.uk/media/4378/final-published_11720_owoperationalreport_2022_tp_250423.pdf>. Acesso em: 29 de jun. de 2023.

TEES VALLEY. **A vision for hydrogen in the Tees Valley**. Reino Unido: Tess Valley, 2022. Disponível em: <https://www.arup.com/-/media/arup/files/publications/t/tees-valley-vision-for-hydrogen.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2023

VOGL, Valentin; ÅHMAN, Max; NILSSON, Lars J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. **Journal of cleaner production**, v. 203, p. 736-745, 2018.

VOGL, Valentin; OLSSON, Olle; NYKVIST, Björn. Phasing out the blast furnace to meet global climate targets. **Joule**, v. 5, n. 10, p. 2646-2662, 2021.

WANG, R. R. et al. Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 329, p. 129797, 2021.

WILLIAMS, C. **Research methods**. **Journal of Business & Economic Research**, v. 5, n. 3, p. 65–72, 2007.

WORLD BANK. **Sufficiency, sustainability, and circularity of critical materials for clean hydrogen**.

Washington: World Bank, 2022. Disponível em:

<https://documents1.worldbank.org/curated/en/099340012132232793/pdf/P1740030a03d520a60a5570f776c34e1701.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2023