

Processo e termodinâmica da redução a hidrogênio do minério de ferro

Process and thermodynamics of hydrogen reduction of iron ore

- 1 Felipe Lima Fernandes da Silva  
- 2 Henrique Eduardo Soares da Silva  
- 3 Breno Silverio Pereira  
- 4 Shimeni Baptista Ribeiro  
- 5 Wictor Hugo do Vale Rodrigues  

- 1 Centro Universitário de Volta Redona (UniFOA)
- 2 Centro Universitário de Volta Redona (UniFOA)
- 3 Centro Universitário de Volta Redona (UniFOA)
- 4 Centro Universitário de Volta Redona (UniFOA)
- 5 Centro Universitário de Volta Redona (UniFOA)

RESUMO

A indústria do aço tem buscado métodos de produção mais sustentáveis, com destaque para a redução direta, utilizando hidrogênio, já que a descarbonização ganhou relevância com o Protocolo de Kyoto e acordos ministeriais, em 2021. Entre as tecnologias emergentes, a redução direta com hidrogênio destaca-se pela alta eficiência na mitigação de emissões. O presente estudo objetiva apresentar a tecnologia de redução a hidrogênio do minério de ferro, abordando o processo, fenômenos e termodinâmica envolvidos. A metodologia qualitativa utilizou plataformas como *Science Direct* e *Google Scholar* para coletar dados relevantes, selecionando 20 artigos e 2 sites. A pesquisa descreve o processo de redução a hidrogênio, que envolve a transformação do minério de ferro em ferro metálico, utilizando hidrogênio como agente redutor. Discute-se a termodinâmica das reações, as tecnologias experimentais em desenvolvimento, como a redução por plasma de hidrogênio, e a importância da combinação de atmosferas carbonatantes para melhorar a eficiência. Por fim, temos que a produção de aço verde é viável ambiental e economicamente, desde que superados os desafios tecnológicos e econômicos na produção sustentável de hidrogênio.

Palavras-chave:

Aço verde, hidrogênio, redução direta, termodinâmica, descarbonização.

ABSTRACT

The steel industry has been seeking more sustainable production methods, with a focus on direct reduction using hydrogen. Decarbonization gained relevance with the Kyoto Protocol and ministerial agreements in 2021. Among the emerging technologies, hydrogen direct reduction stands out for its high efficiency in mitigating emissions. The present study aims to present the technology of hydrogen reduction of iron ore, addressing the process, phenomena, and thermodynamics involved. The qualitative methodology used platforms such as *Science Direct* and *Google Scholar* to collect relevant data, selecting 20 articles and 2 websites. The research describes the hydrogen reduction process, which involves transforming iron ore into metallic iron using hydrogen as the reducing agent. It discusses the thermodynamics of the reactions, experimental technologies in development, such as hydrogen plasma reduction, and the importance of combining carbonating atmospheres to improve efficiency. Finally, we conclude that green steel production is environmentally and economically viable, provided that technological and economic challenges in sustainable hydrogen production are overcome.

Keywords:

Green steel, hydrogen, direct reduction, thermodynamics, decarbonization.

1 INTRODUÇÃO

A busca pela descarbonização entrou em evidência em 1997 com a assinatura do protocolo de Kyoto, que entrou em vigor em 2005. Esse protocolo foi um acordo internacional que tinha como objetivo a estagnação e redução das emissões de gases do efeito estufa, especialmente CO₂, que atuam diretamente no aquecimento global (Kyoto, 1997).

Em 2021, foi firmado um acordo ministerial entre os principais países da economia global de Energia Limpa para buscar, conjuntamente, a descarbonização do aço e do cimento (Unido, 2021).

A tecnologia de redução direta a hidrogênio H-DRI, baseada em hidrogênio verde figura entre as tecnologias de maior custo, porém apresentam, em contrapartida, um dos potenciais de mitigação mais elevado (Cirineu, 2023).

A primeira peça de aço livre de fósseis foi fabricada em 2017, em um laboratório em Estocolmo. Em julho de 2020, na Suécia, utilizando ferro-esponja, produziu o primeiro aço totalmente reduzido a hidrogênio e sem o uso de carvão ou coque (De La Garza, 2022; SSAB, 2021).

O presente trabalho se propõe a apresentar a tecnologia de redução a hidrogênio do minério de ferro, com enfoque no processo, fenômenos e termodinâmica observados.

2 METODOLOGIA

Na primeira etapa, foi formulado o problema inicial, com o objetivo de explorar formas de tornar o processo de redução de minério de ferro mais sustentável, buscando alternativas ao método tradicional, que utiliza carbono. Assim, investigamos soluções na forma de outros agentes redutores. A partir dessa análise, encontramos opções, como biocombustíveis renováveis, como uma das alternativas potenciais para a produção de aço com reduzidas emissões de carbono.

Na segunda etapa, foram definidos os critérios de exclusão, que consistiam na seleção de pesquisas que abordassem os seguintes tópicos: aço verde, processo de redução do minério de ferro e sustentabilidade.

Na terceira etapa, o método de redução mais promissor encontrado foi por meio do hidrogênio, cujas características atendem bem aos critérios de sustentabilidade. Esse achado nos levou a reformular a busca, utilizando as plataformas Science Direct e Google Scholar, aplicando-se palavras-chave específicas para a coleta de dados relevantes ao estudo da redução a hidrogênio do minério de ferro e à produção de aço verde. As palavras-chave utilizadas incluíram: *"hydrogen reduction," "thermodynamic in hydrogen reduction," "green steel," "reduction shaft furnace," "compression of briquettes,"* e *"DRI"*. Ao todo, foram obtidos 95 documentos, nessa análise preliminar da pesquisa.

Na quarta etapa, os critérios de inclusão foram refinados para exigir que os documentos abordassem termodinâmica, processos e orientações para a redução do ferro com hidrogênio. Foram selecionados 18 artigos científicos e 3 sites, de 1979 a 2024, os quais atenderam aos critérios estabelecidos, proporcionando uma base sólida e abrangente para a análise e desenvolvimento da pesquisa.

Na quinta etapa, foi identificado o estado da arte sobre a redução a hidrogênio, identificando respostas e lacunas sobre as opções técnicas e os desafios dessa tecnologia.

Por fim, na sexta etapa, elaboramos um documento detalhado, com uma lista de artigos, para descrever os principais resultados (tabela 1), garantindo uma apresentação clara e transparente das contribuições da pesquisa.

Tabela 1 - Lista de artigos

Greening steel industry by hydrogen: Lessons learned for the developing world	Discute como a indústria do aço pode se tornar mais sustentável por meio do uso de hidrogênio, oferecendo lições importantes para países em desenvolvimento.
Aço verde: estado da arte, desafios e perspectivas para a siderurgia sustentável no Brasil	Analisa o estado atual do “aço verde” no Brasil, destacando desafios e perspectivas para a siderurgia sustentável no país.
A self-reduced intermediate product from iron and steel plants waste materials using a briquetting process	Apresenta um processo de briquetagem que transforma resíduos de plantas de ferro e aço em um produto intermediário autocomprimido.
Green approach to ironmaking: Briquetting and hydrogen reduction of mill scale using novel binders	Explora uma abordagem ecológica para a fabricação de ferro, utilizando briquetes e redução a hidrogênio de escamas de moinho com ligantes inovadores.
Sinterização em fornos rotativos no processo SL/RN: estudo em laboratório	Investiga a sinterização em fornos rotativos no contexto do processo SL/RN, em um estudo laboratorial focado.
Strategies for life cycle impact reduction of green hydrogen production – Influence of electrolyser value chain design	Aborda estratégias para reduzir o impacto ambiental da produção de hidrogênio verde, analisando o design da cadeia de valor dos eletrólitos.
Kyoto Protocol	Discute as diretrizes do Protocolo de Kyoto para a redução de emissões de gases de efeito estufa.
A perspective on three sustainable hydrogen production technologies with a focus on technology readiness level, cost of production and life cycle environmental impacts	Oferece uma perspectiva sobre três tecnologias sustentáveis de produção de hidrogênio, considerando prontidão tecnológica, custos e impactos ambientais.
Evaluation of the environmental impact of HCNG light-duty vehicles in the 2020–2050 transition towards the hydrogen economy	Avalia o impacto ambiental de veículos leves HCNG na transição para uma economia de hidrogênio, entre 2020 e 2050.
Bifunctional green nanoferrites as catalysts for simultaneous organic pollutants reduction and hydrogen generation: Upcycling strategy	Investiga nanoferritas verdes bifuncionais como catalisadores para a redução de poluentes orgânicos e geração de hidrogênio.
Reforma catalítica de metano para redução direta de ferro	Aborda a reforma catalítica de metano para a redução direta de ferro em tese de doutorado.
Thermodynamics of liquid iron ore reduction by hydrogen thermal plasma	Analisa a termodinâmica da redução de minério de ferro com plasma térmico de hidrogênio.
Simulação computacional da redução direta de minério de ferro em fornos MIDREX	Realiza simulação computacional da redução direta de minério de ferro em fornos MIDREX.
Iron ore wires as consumable electrodes for the hydrogen plasma smelting reduction in future green steel production	Discute o uso de fios de minério de ferro como eletrodos consumíveis na redução por plasma de hidrogênio para produção de aço verde.
Toward green steel: Modeling and environmental economic analysis of iron direct reduction with different reducing gases	Modela e analisa economicamente a redução direta de ferro com diferentes gases redutores, em direção à produção de aço verde.
Green steel: Synergies between the Australian iron ore industry and the production of green hydrogen	Explora as sinergias entre a indústria de minério de ferro australiana e a produção de hidrogênio verde.
Green steel: The future path towards sustainable automotive manufacturing	Discute o futuro do aço verde na fabricação automotiva sustentável, apresentando caminhos e inovações.
Online modelling of ENERGIRON direct reduction shaft furnaces	Aborda a modelagem <i>on-line</i> de fornos de redução direta ENERGIRON, apresentando inovações no processo.

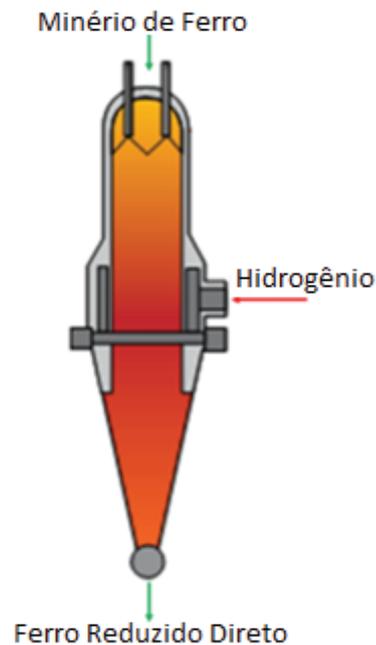
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PROCESSO DE REDUÇÃO A HIDROGÊNIO

O processo de redução a hidrogênio é central na produção do chamado aço verde, ou aço livre de fósseis, envolvendo várias etapas e insumos específicos.

Inicialmente, o minério de ferro é pré-aquecido e, então, alimentado em um *forno de eixo de redução* (RSF, *Reduction Shaft Furnace*) (figura 1), em temperaturas acima de 570°C, onde é transformado em *ferro reduzido direto* (DRI, *Direct Reduced Iron*). O hidrogênio é produzido por uma unidade de eletrólise e, em seguida, pré-aquecido em um condensador, antes de ser fornecido ao forno de eixo como agente redutor. Esse processo exige uma quantidade significativa de hidrogênio como agente redutor, sendo, aproximadamente, 2,55 MWh necessário por tonelada de DRI produzido (Trinca *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023; Springer *et al.*, 2024).

Figura 1 - Representação simplificada de um forno de eixo de redução direta ENERGIRON.



Fonte: Zugliano *et al.*, 2013.

O minério de ferro é introduzido no topo do forno enquanto o hidrogênio é injetado na base. À medida que o hidrogênio acende, se verifica a reação com o minério de ferro, removendo o oxigênio e reduzindo-o a ferro metálico (DRI), que se acumula na parte inferior do forno. Também se verifica a geração de vapor de água como subproduto da reação. O hidrogênio não utilizado nas reações pode ser reciclado e reutilizado no processo, aumentando a eficiência e reduzindo os custos (Wang *et al.*, 2023).

A reação de redução do ferro com hidrogênio é endotérmica. A energia necessária é obtida através de elementos aquecidos ou queimadores integrados no forno de redução ou pela combustão (oxidação) de parte do hidrogênio, resultando na formação de ferro metálico e vapor de água (Wang *et al.*, 2023; Springer *et al.*, 2024).

O DRI é comprimido em briquetes de ferro quente (HBI, *Hot Briquetted Iron*), por meio de uma prensa industrial, para facilitar o manuseio e transporte. A intensidade da compressão afeta diretamente a densidade e a resistência dos briquetes (Springer *et al.*, 2024; El-Hussiny, Shalabi, 2011).

Após a compressão, os briquetes ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0.2\text{C} + 0.1(\text{Fe-C})$), podem ser curados em um processo a 105°C, resultando em maior resistência mecânica (Springer *et al.*, 2024; Elsadek, Mousa, Ahmed, 2024).

Segue-se a fusão em um forno elétrico a arco (EAF, *Electric arc furnace*). A carburização, realizada com metano e CO, já no estágio de forno elétrico a arco, permite a formação de cementita, proporcio-

nando vantagens, como redução do ponto de fusão do ferro metálico, espumação da escória, prevenção de aderência e reoxidação, resultando na redução da demanda de eletricidade e, conseqüentemente, na melhoria na vida útil dos refratários e eletrodos do forno (Trinca *et al.*, 2023; Springer *et al.*, 2024).

A presença de metano, CO e água no forno em altas temperaturas também leva à ocorrência das reações de reforma do metano a vapor (SMR, *Steam Methane Reforming*), reação do metano com vapor de água em alta temperatura para produzir hidrogênio e monóxido de carbono, e de *deslocamento do vapor de água* (WGS, *Water- Gas Shift*), reação do monóxido de carbono com vapor d'água para formar dióxido de carbono e hidrogênio (Trinca *et al.*, 2023; Springer *et al.*, 2024).

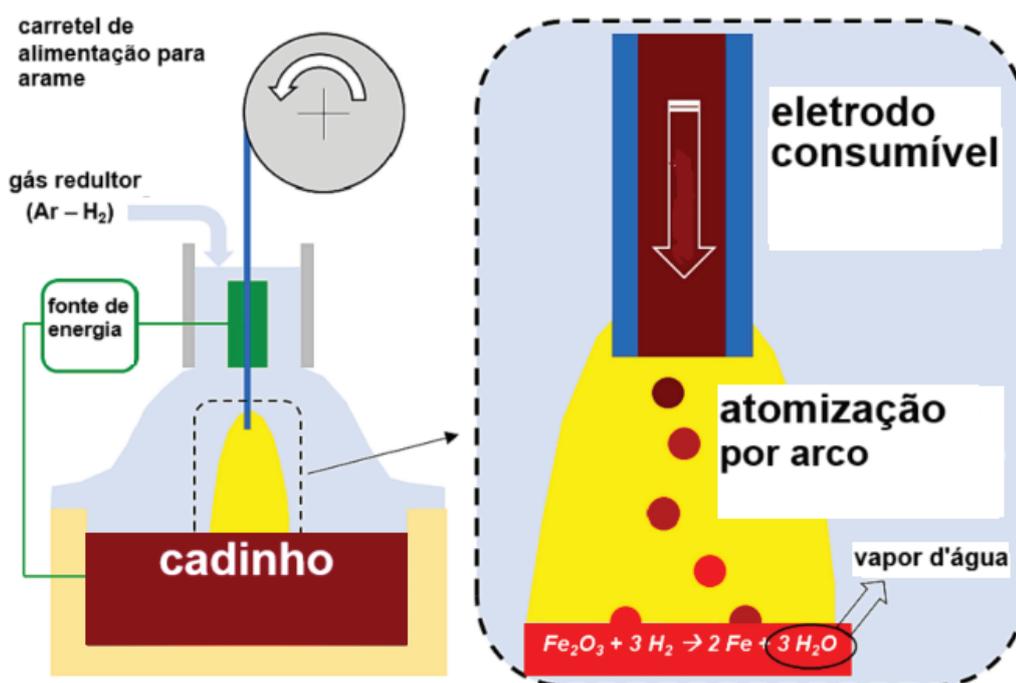
Seguido pela formação de um arco elétrico entre eletrodos de grafite, esse arco aquece e funde o ferro, permitindo a adição de ligas para ajustar a composição do aço. Além disso, outros insumos incluem pelotas de minério de ferro, ligas metálicas, eletrodos de grafite e cal. Após o ajuste composicional, procede-se ao vazamento (Trinca *et al.*, 2023; Springer *et al.*, 2024).

3.2 Tecnologias experimentais para a redução a hidrogênio.

Dentre as tecnologias em desenvolvimento, utilizando o hidrogênio como agente redutor livre de carbono, verifica-se o processo de *redução por plasma de hidrogênio* (HPSR, *Hydrogen Plasma Smelting Reduction*). Este último é especialmente interessante devido à sua simplicidade e à possibilidade de produzir aço em uma única etapa (Springer *et al.*, 2024).

Para o desenvolvimento da tecnologia, se discute a influência do design do eletrodo catódico, um componente-chave para alimentar minério e gás redutor em um arco de plasma. Destaca-se, nesse caso, a utilização de eletrodos consumíveis preenchidos com minério de ferro (figura 2). Essa abordagem visa reduzir custos e otimizar parâmetros operacionais (Springer *et al.*, 2024).

Figura 2 - eletrodo consumível de minério de ferro

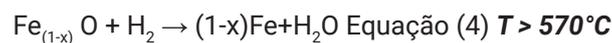
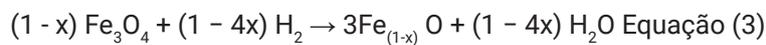
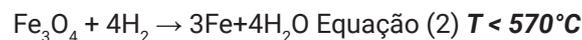
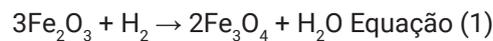


Fonte: Springer *et al.*, 2024

4 TERMODINÂMICA DA REDUÇÃO DO ÓXIDO DE FERRO PELO HIDROGÊNIO

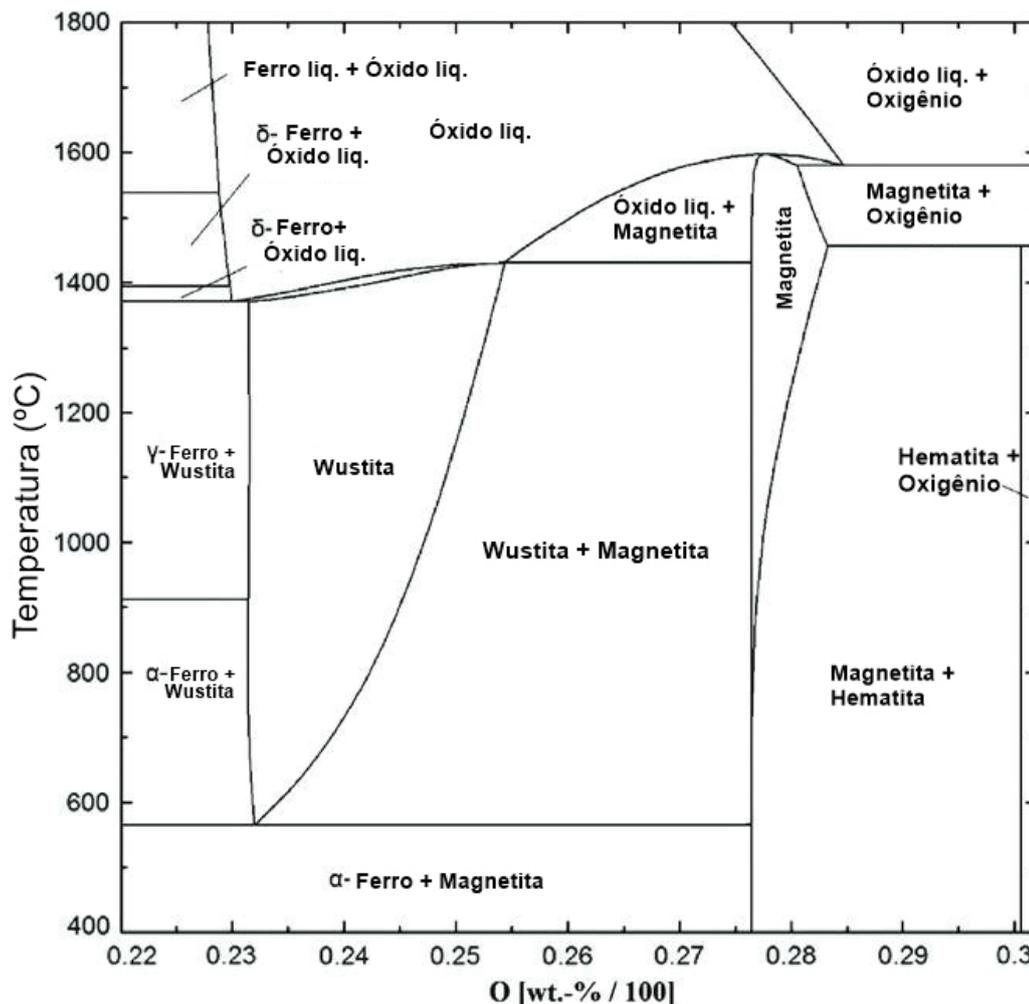
4.1 Parte superior do formulário

Em geral, a redução da hematita (Fe_2O_3) não ocorre diretamente para o ferro metálico. Se a temperatura de redução for inferior a 570°C , a redução ocorre gradativamente, de Fe_2O_3 para Fe_3O_4 , conforme apresentado pelas equações 1-4, chamada magnetita, e continua até o ferro metálico. O óxido chamado wüstita ($\text{Fe}(1-x)\text{O}$) não é estável em temperaturas inferiores a 570°C . Porém, nas temperaturas de redução superiores a 570°C , a wüstita também deve ser considerada no processo. Nesse caso, a redução ocorre de Fe_2O_3 via Fe_3O_4 para $\text{Fe}(1-x)\text{O}$ e continua depois para Fe. Para diferentes temperaturas, temos as equações de redução a hidrogênio:



A figura 3 apresenta uma seção do sistema binário Fe – O. A hematita é o óxido com maior teor de oxigênio, seguida pela magnetita e pela wüstita. Com o aumento da temperatura, a área de estabilidade da wüstita se expande, visto que nem todos os lugares disponíveis na estrutura cristalina serão necessariamente ocupados por íons de ferro. Portanto, a fórmula para a wüstita é escrita como $\text{Fe}(1-x)\text{O}$ em vez de FeO , onde $(1-x)$ representa sítios vagos na estrutura cristalina (Bararzadeh Ledari *et al.*, 2023).

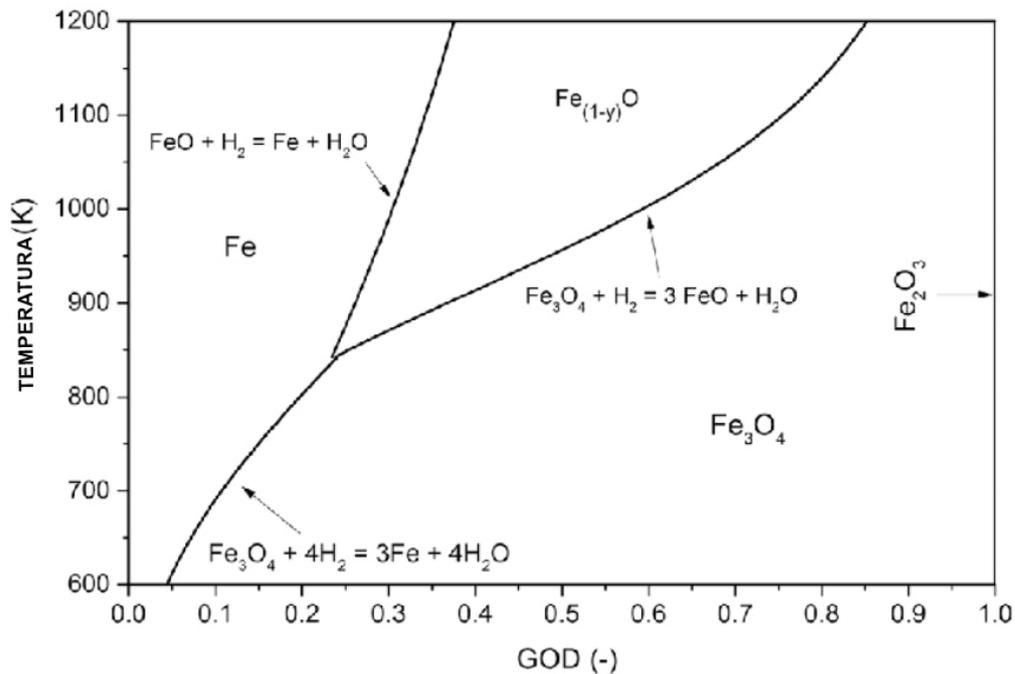
Figura 3 - O diagrama de fase do ferro e a relação entre a temperatura, a pressão e a composição das fases estáveis do sistema Fe-O.



Fonte: Bararzadeh Ledari et al., 2023

O diagrama de Baur-Glassner (figura 4) apresenta as condições termodinâmicas de redução de óxidos de ferro com gases redutores, como o hidrogênio (H_2). O eixo horizontal do diagrama representa a temperatura em graus Kelvin (K). O eixo vertical representa o grau de oxidação do gás, *gas oxidation degree* (GOD), que é definido como a proporção de átomos de oxigênio no óxido para cada átomo do elemento redutor no gás. As linhas representam as curvas de equilíbrio para as reações de redução da Fe_2O_3 , Fe_3O_4 e FeO a ferro metálico (Seftejani; Schenk, 2018).

Figura 4 - Diagrama Baur-Glässner do sistema Fe-O-H₂.

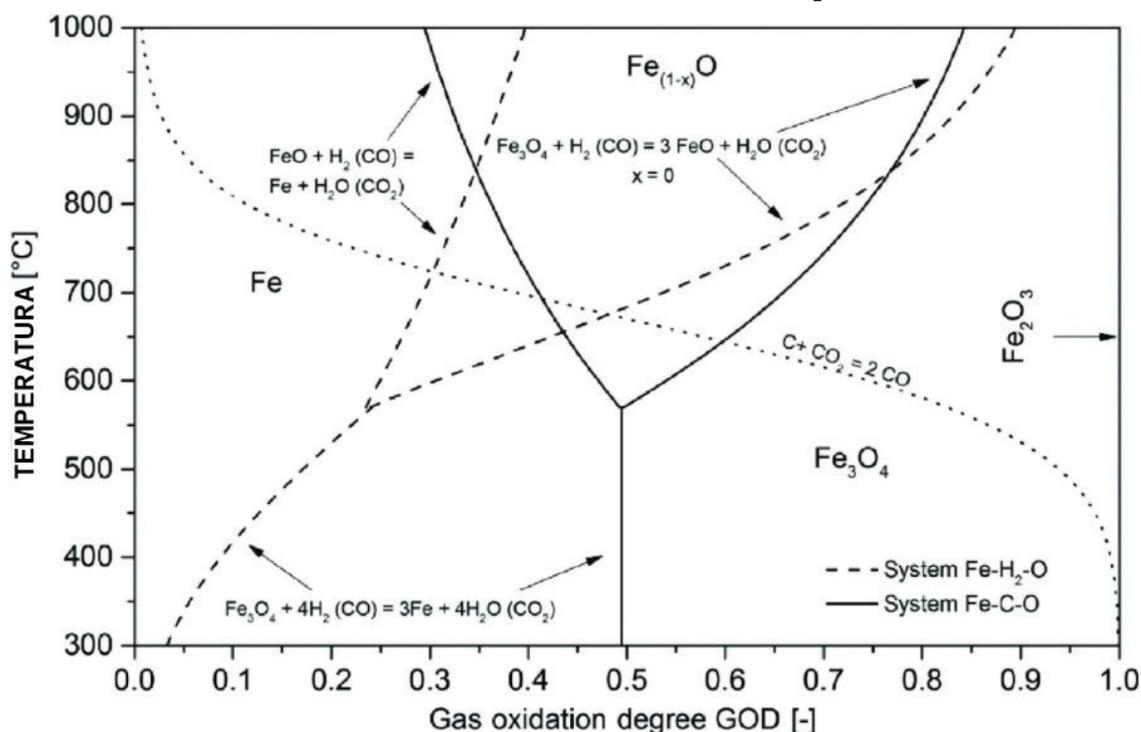


Fonte: Seftejani; Schenk, 2018

O diagrama Baur-Glässner para o sistema Fe-O-H₂ é uma ferramenta valiosa para compreender e prever o comportamento das reações de redução do minério de ferro. Nele, verifica-se o aumento da região de redução do minério de ferro com o aumento da temperatura e a diminuição do grau de oxidação do gás. Isso ocorre porque as condições de equilíbrio para as reações de redução do minério de ferro são mais favoráveis em temperaturas mais altas e em graus mais baixos de oxidação dos gases (Seftejani; Schenk, 2018).

O efeito da inserção de atmosfera carbonetante em conjunto ao hidrogênio redutor nas reações de redução pode ser observado no diagrama de Baur-Glässner da figura 5.

Figura 5 - Diagrama Baur-Glössner dos sistema Fe-H₂-O e Fe-C-O.



Fonte: Seftejani; Schenk, 2018

Observa-se que a área de estabilidade do ferro se expande a temperaturas menores. Dessa forma, uma temperatura de redução mais baixa é preferível em comparação à temperatura empregada na redução não carbonetante, ocasionando um melhor aproveitamento do gás. Devido a limitações cinéticas, a redução com atmosfera carbonetante deve, ainda assim, respeitar intervalos adequados de temperatura (Seftejani; Schenk, 2018).

Em outro critério de viabilidade da redução, verifica-se, pela linha de equilíbrio da reação de Boudouard no diagrama, uma pressão de 1 bar e atividade unitária para o carbono, conforme a equação 5:



Essa linha separa o diagrama Baur-Glössner em duas áreas. Se uma mistura gasosa contendo CO/CO₂ estiver em uma temperatura e composição abaixo da linha de equilíbrio, ocorrerá a precipitação de carbono. Isso pode impedir a redução, entretanto, uma temperatura e uma composição de gás acima da linha favorece a redução pela presença do monóxido de carbono (Yao *et al.*, 2024).

A redução a hidrogênio é endotérmica; a redução com monóxido de carbono é exotérmica. Isso significa que, para a redução com hidrogênio, é necessário adicionar energia ao sistema para garantir uma temperatura de redução constante. Isso pode ser feito pré-aquecendo o material de entrada. Em comparação com reações exotérmicas, nas quais o calor é liberado durante a reação, a redução endotérmica com hidrogênio oferece uma abordagem mais segura, minimizando a probabilidade de acidentes, como vazamentos ou explosões causadas por aumento excessivo de temperatura, além da flexibilidade no design do processo. Como a energia precisa ser fornecida externamente, diferentes fontes de energia podem ser utilizadas e sistemas de controle de temperatura podem ser implementados, de acordo com as necessidades específicas do processo. Isso permite uma adaptação mais fácil às condições operacionais variáveis e uma otimização mais eficaz do processo como um todo (Wang *et al.*, 2023).

5 VIABILIDADE AMBIENTAL E ECONÔMICA DO AÇO VERDE

A implantação de um sistema ideal de produção de hidrogênio sustentável é dependente da obtenção de soluções perante os desafios da conversão energética, sejam estes de natureza tecnológica ou pertinentes ao custo econômico de redução. A tecnologia de eletrólise, ou seja, decomposição, mediante aplicação de diferença de potencial, da água com membrana polimérica, apresenta um potencial significativo para aplicação em larga escala em curto prazo. Espera-se que o custo de hidrogênio, em 2030, considerando as novas tecnologias, apresente redução de 50%, em comparação com 2020 (Khan *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2024).

O hidrogênio verde, ou seja, aquele obtido através de eletrólise com fornecimento de energia elétrica renovável, pode agir como vetor na redução das emissões de gases do efeito estufa no setor siderúrgico, desde que seja produzido com um baixo impacto nos ecossistemas em nível mundial. Embora tenham sido introduzidos esquemas de certificação, estes se concentram principalmente nas emissões pertinentes ao fornecimento de energia durante a operação do eletrolisador, e não consideram ainda toda a cadeia de produção (Oliveira; Costa; Romão, 2024).

À medida que o mundo intensifica os seus esforços para reduzir os efeitos adversos do aquecimento global, a transição do setor siderúrgico para modelos de maior sustentabilidade envolve a mistura estratégica da redução a hidrogênio, tais como as tecnologias apresentadas no presente trabalho, com combustíveis fósseis convencionais (Molina *et al.*, 2024).

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho se propôs a apresentar a tecnologia de redução a hidrogênio do minério de ferro, com enfoque no processo, fenômenos e termodinâmica observados. A análise evidencia o papel crucial da tecnologia na transição para um aço verde, com menor impacto ambiental e maior eficiência energética, em comparação aos métodos tradicionais.

O processo ocorre em um forno de eixo de redução (RSF), onde o hidrogênio de ferro, previamente aquecido, é alimentado pelo topo, enquanto o hidrogênio, aquecido em um condensador, é injetado pela base. Em temperaturas acima de 570°C, o hidrogênio reage com o minério, removendo o oxigênio e convertendo-o em ferro metálico, gerando ferro-esponja (DRI), que se acumula na parte inferior do forno; e vapor de água, subproduto da reação do hidrogênio com o óxido férrico.

As tecnologias experimentais, como a redução por plasma de hidrogênio, também foram abordadas, apontando para novas frentes de desenvolvimento tecnológico no setor siderúrgico.

A redução do óxido de ferro pelo hidrogênio segue uma sequência termodinâmica que depende da temperatura. Abaixo de 570°C, a ocorrência ocorre em etapas graduais, com o nutriente sendo limitado inicialmente à magnetita e, depois, ao ferro metálico. Acima dessa temperatura, forma-se wüstita, uma fase passada antes da conversão completa para ferro. A termodinâmica desse processo mostra que a eficiência de redução é influenciada pela temperatura e pela estabilidade dos óxidos intermediários.

A transição para uma produção de aço mais sustentável é viável e requer avanços contínuos em pesquisa e desenvolvimento tecnológico, para garantir a preservação ambiental e o crescimento econômico sustentável.

REFERÊNCIAS

- BARARZADEH LEDARI, Masoumeh; KHAJEHPOUR, Hossein; AKBARNAVASI, Hossein; EDALATI, Saeed. Greening steel industry by hydrogen: Lessons learned for the developing world. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 94, p. 36623-36649, 5 Dec. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923022930>. Acesso em: 13/04/2024
- CIRINEU, Grace Regina. "**AÇO VERDE**": estado da arte, desafios e perspectivas para a siderurgia sustentável no Brasil. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/18562>. Acesso em: 16/04/2024
- DE LA GARZA, Alejandro. TIME (USA). **The world's steel comes at a steep climate cost**. A Swedish company is trying to change that. 28 Apr. 2022. Disponível em: <https://time.com/6171369/ssab-sweden-green-steel/>. Acesso em: 5 maio. 2024.
- EL-HUSSINY, Naglaa; SHALABI, Mohamed E. H. A self-reduced intermediate product from iron and steel plants waste materials using a briquetting process. **Powder Technology**, v. 205, n. 1-3, p. 217-223, 10 Jan. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591010005036>. Acesso em: 13/04/2024
- ELSADEK, Mohamed; MOUSA, Elsayed; AHMED, Hesham. Green approach to ironmaking: Briquetting and hydrogen reduction of mill scale using novel binders. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 62, p. 732-738, 10 Apr. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924009844>. Acesso em: 09/05/2024
- GERBASE, Annelise Engel. **Sinterização em fornos rotativos no processo SL/RN: estudo em laboratório**. Trabalho realizado na Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEM, Porto Alegre. p. 91. 1979. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/189692>. Acesso em: 16/04/2024
- KHAN, Muhammad Haider Ali; SITARAMAN, Tarun; HAQUE, Nawshad; LESLIE, Greg; SAYDAM, Serkan; DAIYAN, Rahman; AMAL, Rose; KARA, Sami. Strategies for life cycle impact reduction of green hydrogen production – Influence of electrolyser value chain design. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 62, p. 769-782, 10 Apr. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924000922>. Acesso em: 13/04/2024
- KYOTO, Protocol. **Kyoto Protocol**. United Nations Framework Convention on Climate Change (CMNUCC), p. 22, 1997. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Acesso em: 16/04/2024
- LI, Yunfei; LIN, Richen; O'SHEA, Richard; THAORE, Vaishali; WALL, David; MURPHY, Jerry D. A perspective on three sustainable hydrogen production technologies with a focus on technology readiness level, cost of production and life cycle environmental impacts. **Heliyon**, v. 10, n. 5, 15 Mar. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024026689> Acesso em: 13/04/2024
- MOLINA, Santiago; GOMEZ-SORIANO, Josep; LOPEZ-JUAREZ, Marcos; OLCINA-GIRONA, Miguel. Evaluation of the environmental impact of HCNG light-duty vehicles in the 2020–2050 transition towards the hydrogen economy. **Energy Conversion and Management**, v. 301, 1 Feb. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423013146>. Acesso em: 09/05/2024

OLIVEIRA, Rhayza Victoria Matos; COSTA, José Arnaldo Santana; ROMÃO, Luciane Pimenta Cruz. Bifunctional green nanoferrites as catalysts for simultaneous organic pollutants reduction and hydrogen generation: Upcycling strategy. **Journal of Environmental Management**, v. 351, Feb. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479723027822>. Acesso em: 13/04/2024

RIBEIRO, Tiago Ramos. **Reforma catalítica de metano para redução direta de ferro**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. doi:10.11606/T.3.2019.tde-17122020-120229. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-17122020-120229/pt-br.php>. Acesso em: 09/05/2024

SEFTEJANI, Masab Naseri*; SCHENK, Johannes. Thermodynamics of liquid iron ore reduction by hydrogen thermal plasma. **Metals**. This article belongs to the special edition Ironmaking and Steelmaking, vol. 8, no. 12, 1051,p. 1-17, 11 Dec. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met8121051>. Acesso em: 16/04/2024

SILVA, André Carlos. **Simulação computacional da redução direta de minério de ferro em fornos MIDREX**. 2010. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em : <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2433>. Acesso em: 13/04/2024

SPRINGER, Hauke; SOUZA FILHO, Isnaldi R.; CHOISEZ, Laurine; ZARL, Michael Andreas; QUICK, Christian; HORN, Alexander; SCHENK, Johannes. Iron ore wires as consumable electrodes for the hydrogen plasma smelting reduction in future green steel production. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 39, Apr. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993723002208>. Acesso em: 09/05/2024

SSAB (Suécia). **SSAB entrega primeiro aço livre de combustíveis fósseis do mundo**. 31 ago. 2021. Disponível em: <https://www.ssab.com/pt-br/noticias/2021/08/ssab-entrega-primeiro-aco-livre-de-combust%C3%ADveis-fosseis-do-mundo>. Acessado em: 6 abr. 2024.

TRINCA, Antonio; PATRIZI, Daniele; VERDONE, Nicola; BASSANO, Claudia ; VILARDI, Giorgio. Toward green steel: Modeling and environmental economic analysis of iron direct reduction with different reducing gases. **Journal of Cleaner Production**, v. 427, 15 Nov. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623032390#:~:text=2.1.%20Reaction%20kineticsReduction%20reactions>. Acessado em: 13/04/2024

UNIDO, UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION; Viena. **Major global economies announce collaboration to drive the global decarbonization of steel and cement**. 01 Jun. 2021. Disponível em: <https://www.unido.org/news/major-global-economies-announce-collaboration-drive-global-decarbonization-steel-and-cement>. Acesso em: 5 maio. 2024.

WANG, Changlong; WALSH, Stuart D. C.; WENG, Zhehan; HAYNES, Marcus W.; SUMMERFIELD, Daisy; FEITZ, Andrew. Green steel: Synergies between the Australian iron ore industry and the production of green hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 83, p. 32277-32293, 1 Oct. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923022930>. Acessado em: 13/04/2024

YAO, Shang Heng; ZHU, Haojun; ZHANG, Si; CHANG, Huimin; WANG, Heming. Green steel: The future path towards sustainable automotive manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 200, Jan. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344923004536>. Acessado em: 13/04/2024

ZUGLIANO, Alberto; PRIMAVERA, Alessandra; PIGNATTONI, Dino; MARTINIS, Alessandro*. Online modelling of ENERGIRON direct reduction shaft furnaces. **16th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing**, San Diego, California, USA, p. 346-351, 25-28 Aug. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016313349> Acesso em: 16/04/2024