

Simulação do funcionamento de uma usina de hidrogênio verde

Igor Chardelli Peçanha de Oliveira¹; 0000-0002-0852-3901

Victor Hugo do Vale Rodrigues 1; 0000-0002-5789-1970

Shimeni Baptista Ribeiro; 0000-0002-5671-3742

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.

igorchardelli@bol.com.br (contato principal)

Resumo: A produção de aço utilizando hidrogênio verde é uma alternativa promissora para reduzir as emissões de carbono no setor siderúrgico. Este estudo aborda a aplicação do hidrogênio como agente redutor no processo de obtenção de ferro metálico a partir do minério de ferro, destacando as etapas envolvidas na redução direta e os desafios energéticos do processo. Utilizando o software Fusion 360, foi modelada uma usina completa de produção de aço verde, integrando tecnologias de eletrólise, briquetagem e fornos de arco elétrico. A simulação permitiu verificar a viabilidade estrutural e otimizar os componentes da usina, promovendo uma análise preliminar do desempenho dos materiais. Os resultados indicam que o uso de hidrogênio apresenta benefícios consideráveis para a sustentabilidade do processo, além de permitir ajustes operacionais eficientes através da modelagem paramétrica.

Palavras-chave: Aço verde, hidrogênio verde, redução direta de ferro, usina siderúrgica, Fusion 360.

INTRODUÇÃO

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. Este 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].

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].

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, proporcionando 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].

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 neste 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].

MÉTODOS

Para o presente estudo foi realizado a simulação 3D de uma Usina de Hidrogênio Verde, utilizando Softwares da AutoDesk (Fusion 360).

Para garantir que as fontes fossem pertinentes ao foco do estudo, foram estabelecidos critérios de exclusão, que consistiam na seleção de pesquisas, sites, softwares de simulação e fotos que abordassem tópicos específicos de interesse: introdução ao processo de redução a hidrogênio, descrição detalhada do processo de redução a hidrogênio, termodinâmica da redução do óxido de ferro pelo hidrogênio, e viabilidade ambiental e econômica do aço verde, para auxílio da simulação da Usina.

A partir desta metodologia, foram selecionados 20 artigos científicos e 2 sites, de 1979 a 2024, os quais atenderam aos critérios estabelecidos, proporcionando uma base sólida e abrangente para a análise e desenvolvimento da pesquisa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Fusion 360 oferece um conjunto abrangente de ferramentas de modelagem paramétrica e superfícies de forma livre, tornando-o ideal para projetos de engenharia complexos. Neste trabalho, utilizamos seus recursos para modelar detalhadamente os componentes e sistemas envolvidos no processo de redução de minério utilizando hidrogênio como agente redutor.

A modelagem da usina foi realizada em diferentes etapas, garantindo que cada componente estivesse representado de forma realista e fiel às especificações técnicas. Primeiramente, foram definidos os parâmetros de projeto com base nas características geométricas e funcionais de uma usina típica. Esses parâmetros incluíram dimensões físicas, pontos de conexão de sistemas de entrada e saída de materiais, bem como estruturas de suporte.

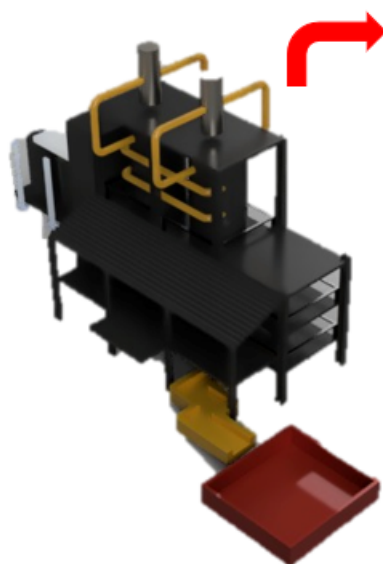
Com isso, estabelecemos a divisão da geoárea da usina, começando pela briquetagem, galpão de matérias primas, forno de redução a eixo, forno elétrico a arco, tanque de eletrólise, laminação a quente e laminação a frio, galpões de almoxarifado, prédios administrativo, e estacionamentos para veículos.

A utilização de parâmetros condicionais no software foi fundamental para a otimização da modelagem, facilitando ajustes nas dimensões e nos materiais dos componentes conforme necessário.

A capacidade de simulação integrada do Fusion 360 também permitiu a verificação preliminar da resistência dos materiais utilizados, garantindo a segurança e a viabilidade estrutural do projeto.

Através das (Figuras 1,2,3 e 4), representadas abaixo, conseguimos visualizar as áreas dos principais processos de redução, separação, segregação e formação do Aço Verde para a sua destinação final.

Figura 1 – Forno de Redução a Eixo



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.

Fonte: Próprio Autor

Figura 2 – Tanque de Eletrólise



A eletrólise é um processo que converte água em hidrogênio e oxigênio usando uma diferença de potencial. Nesse contexto, hidrogênio verde é obtido através da eletrólise da água utilizando energias renováveis como eólica, solar, hídrica e biomassa. Por fim, o hidrogênio produzido pode ser aplicado como agente redutor no processo de redução do minério de ferro para produção de aço, substituindo os combustíveis fósseis de forma sustentável

Fonte: Próprio Autor

Figura 3 – Forno Elétrico a Arco

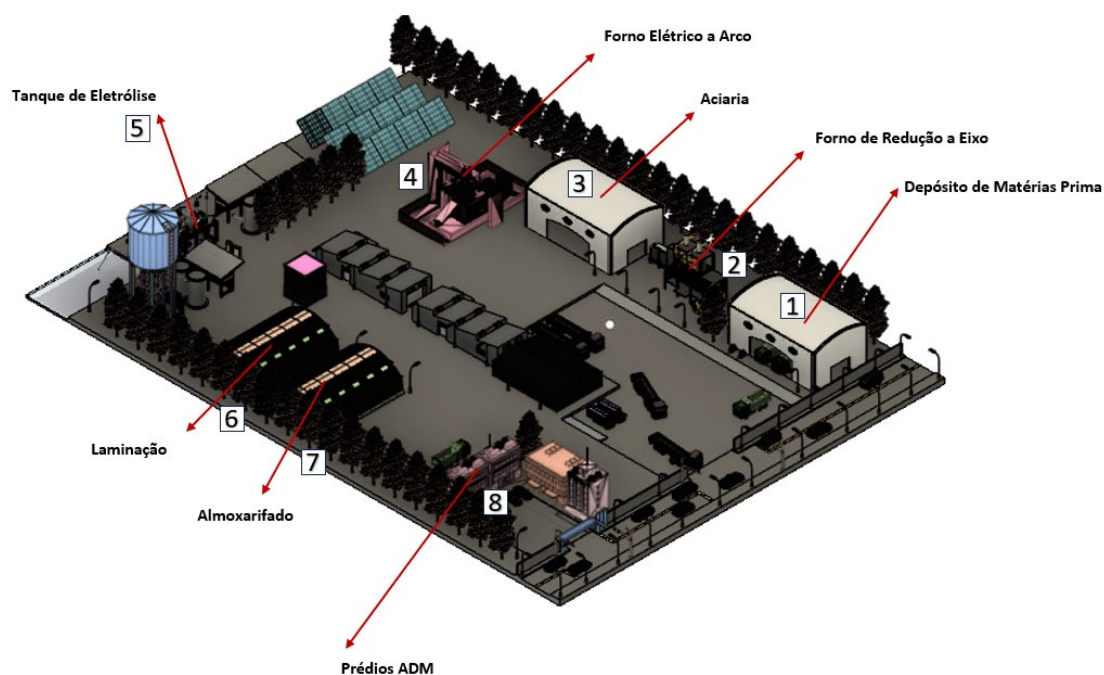


O forno elétrico a arco, permite a formação de cementita, proporcionando vantagens como redução do ponto de fusão do ferro metálico, espumação da escória, prevenção de aderência e reoxidação, resultando na redução da demanda de eletricidade e, conseqüentemente, na melhoria na vida útil dos refratários e eletrodos do forno.

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

Fonte: Próprio Autor

Figura 4 – Usina de Hidrogênio Verde



Fonte: Próprio Autor

CONCLUSÕES

A modelagem da usina de hidrogênio verde realizada neste trabalho forneceu uma visão clara das etapas envolvidas e dos fenômenos termodinâmicos essenciais para o sucesso do processo. As simulações realizadas com o uso do Fusion 360 comprovaram a robustez dos componentes projetados e a eficácia da integração entre eles.

Conclui-se que, embora a viabilidade técnica do processo seja clara, a implantação em larga escala ainda enfrenta desafios relacionados à infraestrutura energética e à redução de custos da eletrólise. Entretanto, a sequência de operações descrita neste estudo demonstra um caminho promissor para a descarbonização da indústria siderúrgica, com benefícios ambientais e econômicos substanciais. A continuidade de pesquisas focadas em otimização tecnológica e integração energética é fundamental para tornar a produção de aço verde uma realidade global.

REFERÊNCIAS

BARROSO, A. M. R.; ROCHA, B. V. S.; ALVES, L. F. L.; FILHO, M. R. G. M.; Obtenção do Hidrogênio verde a partir de energias renováveis. Programa de PósGraduação em Engenharia Elétrica – PPGEE. Universidade Federal do Piauí – UFPI, 2021.

SPRINGER, H. a,b,*; SOUZA FILHO, I. R. a; CHOISEZ, L. a,c; ZARL, M. A. d; QUICK, C. d; HORN, A. e; SCHENK, J. d,f. 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, e00785.

TRINCA, A. a,*; PATRIZI, D. a; VERDONE, N. a; BASSANO, C. b; VILARDI, G. a. 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, p. 139081.

VINCENT, IMMANUEL; BESSARABOV, DMITRI. Low-cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 81, p. 1690-1704, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.258>

WANG, C. a,b,*; WALSH, S. D. C. a; WENG, Z. c; HAYNES, M. W. c; SUMMERFIELD, D. c; FEITZ, A. c. 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.

ZUGLIANO, A.; PRIMAVERA, A.; PIGNATTONE, D.; MARTINIS, A.*. Online modelling of ENERGIRON direct reduction shaft furnaces. 16th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, San Diego, California, USA, Aug 25-28, 2013.