



De 11 a 14 - NOVEMBRO DE 2024

**Inteligência Artificial
na Gestão de Operações:
Limitações e possibilidades**



ANÁLISE DOS ASPECTOS FACILITADORES E DAS BARREIRAS PARA A PRODUÇÃO DE AÇO VERDE: UMA REVISÃO DA LITERATURA

WILLON JOSÉ TRINDADE FILHO – willontrindade5@gmail.com

GRUPO DE PESQUISA CREATION/ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
DO NORTE – PEP – UFRN – NATAL-RN

MARIO ORESTES AGUIRRE GONZÁLEZ – mario.gonzalez@ufrn.br

GRUPO DE PESQUISA CREATION/ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
DO NORTE – PEP – UFRN – NATAL-RN

RAFAEL MONTEIRO DE VASCONCELOS – rafael.monteiro.050@ufrn.br

GRUPO DE PESQUISA CREATION/ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO
NORTE – PEP – UFRN – NATAL-RN

DAVID CASSIMIRO DE MELO – david.cassimiro.096@ufrn.edu.br

GRUPO DE PESQUISA CREATION – ENERGIAS RENOVÁVEIS DA UFRN

ANDRESSA MEDEIROS SANTISO – andressa.santiso.014@ufrn.edu.br

GRUPO DE PESQUISA CREATION – ENERGIAS RENOVÁVEIS DA UFRN

ÁREA: 9. ENGENHARIA DA SUSTENTABILIDADE

SUBÁREA: 9.5 PRODUÇÃO MAIS LIMPA E ECOEFICIÊNCIA

RESUMO: A INDÚSTRIA SIDERÚRGICA, DEVIDO AOS SEUS MÉTODOS INTENSIVOS DE PRODUÇÃO, FIGURA ENTRE OS PRINCIPAIS POLUIDORES GLOBAIS. COM ISSO, A ADOÇÃO DE MÉTODOS DE DESCARBONIZAÇÃO, COMO A PRODUÇÃO DE "AÇO VERDE", TEM SE TORNADO, CADA VEZ MAIS, NECESSÁRIO. O ESTUDO TEM COMO OBJETIVO IDENTIFICAR OS FACILITADORES E AS BARREIRAS PARA A PRODUÇÃO DE AÇO VERDE, ATRAVÉS DE UMA REVISÃO DA LITERATURA. FORAM ANALISADOS 42 ARTIGOS RETIRADOS DA SCOPUS E WEB OF SCIENCE, CUJOS RESULTADOS INDICAM QUE OS PRINCIPAIS FACILITADORES DA PRODUÇÃO DE AÇO VERDE INCLUEM O AUMENTO DE INCENTIVOS GOVERNAMENTAIS, DESENVOLVIMENTO DE REGULAMENTAÇÕES SUSTENTÁVEIS, USO DE MAPEAMENTOS DE MERCADO, PARCERIAS COM FORNECEDORES VERDES, ACORDOS DE ENERGIA RENOVÁVEL E INCENTIVOS AMBIENTAIS. ENTRE AS BARREIRAS ESTÃO OS ALTOS CUSTOS DE PRODUÇÃO, RESISTÊNCIA À MUDANÇA, FALTA DE INVESTIMENTOS EM PESQUISA, INOVAÇÃO E QUESTÕES DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES. CONCLUI-SE QUE HÁ FORTES INDÍCIOS DO AUMENTO DE PROJETOS DE AÇO VERDE NO MUNDO, PRINCIPALMENTE EM REGIÕES QUE POSSUEM COMPETITIVIDADE EM CUSTO DE ENERGIA ELÉTRICA RENOVAVEL E POSSUI RESERVAS DE MINERIO DE FERRO.

FUTURAS PESQUISAS PODEM EXPLORAR TECNOLOGIAS VIABILIZADORAS À PRODUÇÃO DE AÇO VERDE E REALIZAR MAPEAMENTOS CONCEITUAIS PARA IDENTIFICAR QUAIS SIDERÚRGICAS ESTÃO MAIS PROPENSAS A ADOTAR PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS EM SEUS PROCESSOS.

PALAVRAS-CHAVES: *FACILITADORES; BARREIRAS; DESCARBONIZAÇÃO; INDÚSTRIA SIDERÚRGICA; AÇO VERDE.*

1. INTRODUÇÃO

Desde o advento das revoluções industriais até os dias atuais, o crescimento acelerado da indústria trouxe consigo um aumento significativo na ocorrência de impactos ambientais negativos. Assim como outros setores, a indústria manufatureira, incluindo a Indústria de Ferro e do Aço (IFA), tem buscado cada vez mais, tornar seus processos mais ecologicamente amigáveis, comumente chamados de "processos verdes", em um esforço que visa reduzir o impacto negativo da manufatura sobre o meio ambiente (ISLAM, 2024).

De acordo com Pardo e Moya (2013), no contexto global do segmento manufatureiro, a indústria de ferro e aço é uma das maiores contribuintes para as emissões diretas de dióxido de carbono (CO₂). Pois, em média, 1,8 toneladas de CO₂ são emitidas para cada tonelada de aço produzida, o que faz com que a indústria de ferro e aço seja responsável, sozinha, por aproximadamente 7% das emissões totais de gases poluentes em todo o mundo (WORLDSTEEL, 2015).

Contudo, o nível de preocupação torna-se ainda mais crítico quando se observa o cenário atual, uma vez que, a indústria siderúrgica, passou, na atualidade, a ser responsável por cerca de 9% das emissões de CO₂ no mundo, devido ao uso extensivo de carvão (LEDARI *et al.*, 2023).

Nesta perspectiva, uma alternativa relevante e que tem sido discutida e destacada por vários estudos da atualidade, como uma forma de reduzir as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera e mitigar outros impactos ambientais associados aos processos produtivos da indústria siderúrgica, é implementar métodos de descarbonização na produção primária de aço que levam-no a tornar-se "verde".

"Aço verde" é um termo globalmente utilizado para descrever os processos de produção de aço a partir de minérios de ferro utilizando "Hidrogênio verde" derivado de fontes renováveis, que visam alcançar zero emissões de carbono (TANG; HUANG, 2022; ISLAM, 2024;).

Ao caracterizar a definição do aço verde, Singh e Rout (2018) destacam que ele é um importante contribuinte para a existência de processos produtivos sustentáveis, uma vez que os subprodutos gerados durante a sua produção podem substituir recursos em outras indústrias, ajudando a reduzir as emissões de CO₂, além de aprimorar a qualidade do aço produzido nas siderúrgicas, cujo processo inclui a eletrólise de óxido fundido e o uso estratégico de ligas de ferro-cromo.

Assim sendo, à luz da contextualização recém evidenciada, este trabalho tem como objetivo, identificar os aspectos facilitadores à produção de aço verde e as barreiras que

impedem sua efetivação, por meio do estado da arte do tema. Ao cumprir com o objetivo proposto, este estudo busca responder a seguinte questão de pesquisa: Quais têm sido os *drivers* e as barreiras que tendem a ser vistos como motivadores ou desestimuladores da existência de uma produção de aço descarbonizado dentro de uma perspectiva global?

Para tal, as principais contribuições deste artigo para a literatura sobre processos produtivos no ramo da siderurgia sustentável são resumidas da seguinte forma: (1) O artigo identifica os principais desafios enfrentados pela indústria siderúrgica na transição para a produção de aço verde e (2) Destaca diferentes iniciativas e projetos em andamento que têm sido considerados ao redor do mundo para alcançar a efetivação da produção de aço verde.

Logo, se comparado com estudos anteriores, como o de Kushnir *et al.* (2020), que buscaram entender a complexidade que há na transição para uma produção de aço verde, destacando a necessidade de mudanças sistêmicas para superar as barreiras e alcançar práticas sustentáveis de fabricação de aço, (3) este trabalho apresenta uma análise de entendimento com múltiplos resultados, destacando não só as barreiras, mas também os aspectos que facilitam a efetivação de uma produção de aço verde. Além disso, também diferente do estudo de Bleischwitz, Höller e Kriegl (2023), que buscaram avaliar o potencial da reciclagem de navios como uma futura fonte de aço secundário para iniciativas verdes, (4) o presente estudo vai além da abordagem adotada pelos referidos autores, ao explorar aspectos múltiplos e descentralizados que tendem a fornecer indicativos e *background* teórico não só para a área acadêmica, mas também para o segmento empresarial.

De tal forma, o restante deste artigo é organizado como segue. A seção 2 apresenta a descrição do método de pesquisa que foi utilizado para construir o trabalho. Em seguida, está a Seção 3, que contempla o detalhamento da revisão da literatura realizada, evidenciando os resultados da análise bibliométrica e de conteúdo após revisão dos principais documentos selecionados para compor o trabalho. Por fim, a Seção 4 é dedicada às considerações finais bem como a apresentação de perspectivas de trabalhos futuros.

2. MÉTODO DE PESQUISA

Para a construção deste trabalho, foi adotado o método da revisão de literatura. A área temática da revisão foi definida como “Produção de aço verde”, cujo desenvolvimento iniciou com a discussão a respeito da ideia de se conhecer os fatores que têm impedido a indústria siderúrgica de tornar mais sustentável a produção de aço, considerando o elevado nível de emissão de gases poluentes que tal segmento possui. O procedimento utilizado para construir a revisão foi baseado nos trabalhos de Tranfield *et al.* (2003), González e Toledo (2012) e Bezerra

e Torkomian (2023). Para esses autores, as fases necessárias para construir uma revisão de literatura consistem em: (1) definir as questões de pesquisa e áreas temáticas; (2) escolher as bases de dados onde serão obtidos os artigos para análise; (3) escolher as palavras-chave; (4) ler os títulos e resumos; (5) ler as introduções e conclusões de cada trabalho; (6) ler o artigo na íntegra; (7) analisar e sistematizar o conteúdo identificado; e (8) desenvolver a estrutura de conhecimento a partir da análise de conteúdo.

2.1 Seleção dos artigos nas bases de dados

A primeira fase desta etapa consistiu na seleção das bases de dados que seriam definidas e usadas para a seleção e obtenção dos artigos que estariam compondo a revisão. Nesta etapa, foram realizadas buscas nas bases de dados da *Scopus* e da *Web of Science*. Os critérios para a seleção dessas bases foram fundamentados no seu amplo alcance e reconhecimento pela comunidade científica, bem como na alta confiabilidade associada às políticas editoriais dos *journals* retornados e encontrados nas buscas. A segunda fase, por sua vez, foi caracterizada pela seleção do conjunto de palavras-chave que pudessem retornar uma maior quantidade de artigos relacionados com o tema de pesquisa. Esse conjunto de palavras foi definido levando em consideração o tema primário que se pretendia alcançar com o desenvolvimento do artigo, ou seja, a produção de aço verde. Com isso, o Quadro 1 apresenta as palavras-chave selecionadas dentro da área temática definida, totalizando 11 combinações distintas para a busca.

Quadro 1 - *Strings* de buscas utilizadas

Área temática	<i>Strings</i> de buscas em bases de dados
Produção de aço verde	TITLE-ABS-KEY ("Green steel" OR "Green still: a systematic review" OR "Sustainable steel production" OR "Steel decarbonization" OR "Renewable energy in steel production" OR "Green metallurgy" OR "Low-carbon steel" OR "Sustainable steel industry" OR "Green steel industry" OR "Renewable steel processes" OR "Green steelmaking")

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

O horizonte de tempo da busca compreendeu o ano de 1999 a junho de 2024, uma vez que após a inserção das palavras-chave nas bases de dados, pôde-se constatar que as primeiras publicações voltadas a assuntos que englobam e que estão vinculados a produção de aço verde iniciaram em 1999, estagnaram por um tempo e tiveram uma ascensão a partir de 2021.

Para buscas e seleções de artigos foram considerados somente aqueles em língua inglesa e portuguesa que contemplaram o conjunto de palavras-chave definidas. Assim, como resultado

dessas fases, foi definido o primeiro quantitativo de artigos: 203 e 109 artigos nas bases da *Scopus* e da *Web of Science*, respectivamente.

O passo subsequente compreendeu a etapa de exclusão de artigos provenientes de conferência e capítulos de livro. Nesta fase, procedeu-se à exclusão de artigos publicados em conferências, notas editoriais, artigos de opinião, *short surveys*, capítulos de livros e trabalhos fora do idioma inglês e português Brasil. A condução deste processo foi realizada manualmente pelos pesquisadores, sem a utilização de *softwares* específicos, de acordo com as bases de dados selecionadas. Como resultado dessa etapa, foram excluídos no total, 140 artigos.

Após a conclusão da etapa anterior, procedeu-se à identificação e exclusão dos artigos duplicados. Para tal, utilizou-se o *software Mendeley*, que dispõe de uma funcionalidade específica para detectar e remover duplicatas com base no número DOI (*Digital Object Identifier*), um identificador universal que atua como a identidade de um artigo. Com tal realização, foram excluídos 71 artigos nesta fase.

O próximo passo envolveu a leitura e análise dos títulos e resumos dos artigos selecionados, com o objetivo de aplicar critérios de inclusão e exclusão baseados no problema de pesquisa. Foram revisados os títulos e resumos de 101 artigos. Deste total, 44 artigos não atendiam ao problema de pesquisa e foram excluídos, restando 57 artigos para a próxima etapa.

Após a leitura dos títulos e resumos, a etapa seguinte foi destinada a leitura da introdução e conclusão dos artigos. Foram retirados 4 artigos, pois não faziam menção em seu conteúdo a qualquer aspecto ou fator que poderia ser visto como um facilitador ou barreira à produção de ação verde. Como resultado, 53 artigos seguiram para a etapa de leitura completa.

A partir dos 53 artigos resultantes da etapa anterior, a próxima etapa consistiu na leitura na íntegra de cada um dos artigos, cuja análise permitiu que uma nova verificação pudesse ser realizada, de modo que, 11 arquivos foram excluídos, visto que 4 deles estavam no idioma japonês, fugindo assim do protocolo pré-definido e 7 artigos não estavam publicados em periódicos de *open access*, não sendo possível conseguir acesso para *download*. Isso resultou em 42 artigos, que foram selecionados para leitura completa e análise de conteúdo. A Tabela 1 apresenta o detalhamento do número de artigos excluídos até a etapa final de leitura.

TABELA 1 – Seleção de artigos da RBS

Etapas		Base de Dados	
		Scopus	Web of Science
1	Busca inicial	203	109
2	1ª Exclusão de artigos (conferências, capítulos de livros, <i>short survey</i> , editoriais)	(-) 107	(-) 33
3	Número parcial de artigos na WoS e Scopus	96	76
3	2ª Exclusão de artigos (artigos duplicados)	(-) 71	
4	Número de artigos após 2ª exclusão de artigos (artigos duplicados)	101	
5	Número de artigos excluídos após leitura de título e resumo	(-) 39	(-) 9
6	Número parcial de artigos (WoS+Scopus)	53	
7	3ª Exclusão de artigos após leitura do trabalho na íntegra	(-) 11	
8	Número final de artigos utilizados para análise de resultados	42	

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

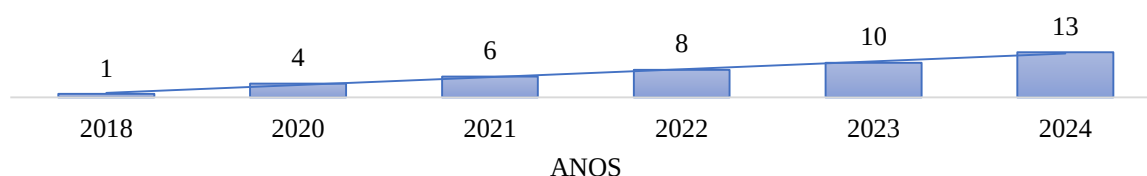
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise bibliométrica

Neste estudo, foram destacados os seguintes indicadores bibliométricos: (1) quantidade de artigos publicados anualmente; (2) quantidade de artigos publicados por periódico; (3) análise da distribuição dos artigos por país; e (4) análise dos métodos de pesquisa utilizados.

Com relação aos resultados gerados para o indicador “quantidade de artigos publicados anualmente”, a Figura 1 ilustra a distribuição dos artigos selecionados para a revisão final ao longo do período de 7 anos, abrangendo os anos de 2018 até junho de 2024. É possível observar que o número anual de publicações está aumentando. A produção mais baixa aparece no ano de 2018, com apenas uma publicação, enquanto atinge o pico em 2024 com 13 publicações. Este resultado pode ser consequência do maior interesse da comunidade acadêmica em pesquisas e métodos que levem a descarbonização da indústria siderúrgica, e, consequentemente, que levem a produção de aço “verde”.

FIGURA 1 - Distribuição do número de artigos por ano

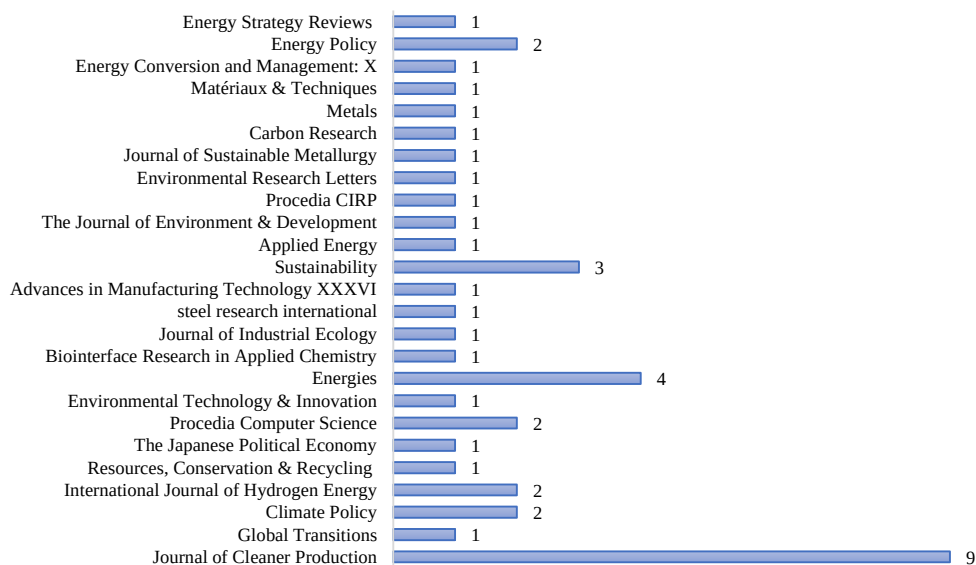


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Dos 42 artigos finais selecionados, todos foram resultantes de publicações em periódicos. Os principais periódicos foram *Sustainability* (3 artigos), *Energies* (4 artigos) e *Journal of Cleaner Production* (9 artigos), sendo este último o que mais abordou o assunto em

questão. Nos demais periódicos, o número de publicações variou entre 1 e 2 artigos. Logo, tais resultados indicam que o tema de pesquisa é mais amplamente disseminado em periódicos, cujo escopo tendem a abordar a sustentabilidade, métodos de produção mais limpa na indústria e energias. A Figura 2 abrange os principais periódicos e suas respectivas quantidades de artigos publicados.

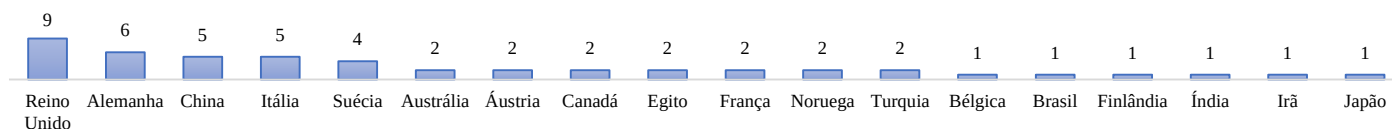
FIGURA 2 – Número de artigos por periódicos



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Analisando os países de publicação dos artigos e as afiliações dos autores, observou-se que o Reino Unido se destacou como o país com maior produção de pesquisa entre os selecionados, conforme indicado na Figura 3. Este padrão pode ser atribuído ao fato de que o Reino Unido possui um dos maiores setores industriais de ferro e aço, cujos produtos são utilizados na construção civil e no desenvolvimento de projetos de infraestrutura, fazendo com que este setor se torne o maior consumidor de energia industrial e o principal responsável pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE) no país, representando cerca de 26% das emissões totais da indústria britânica (GRIFFIN; HAMMOND, 2021; BARLOW, 2022).

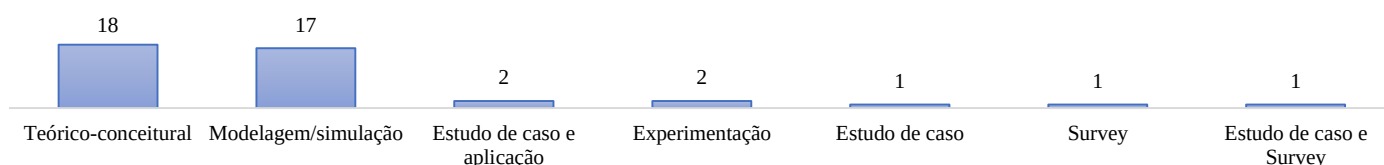
FIGURA 3 – Origem da filiação dos autores



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Para analisar os métodos de pesquisa adotados nos artigos, foi considerada a divisão proposta por Turrioni e Mello (2012), que classificam os métodos em pesquisa experimental, modelagem/simulação, *survey*, estudo de caso, pesquisa-ação e *Soft Systems Methodology*. Nisso, observou-se que os métodos mais utilizados nos artigos foram o Teórico-conceitual e Modelagem/simulação, seguidos pela realização de estudos de caso com aplicações práticas e métodos de experimentação, como demonstrado na Figura 4.

FIGURA 4 – Método de pesquisa utilizado pelas publicações



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os métodos mais utilizados são justificados pela necessidade de embasamento teórico ao buscar formas de descarbonizar a indústria siderúrgica. Os métodos de modelagem, por sua vez, surgem para estimar a redução das emissões, prever diferentes cenários e avaliar os impactos que as inovações e tecnologias adotadas poderão surtir diante da mudança para uma siderurgia de processos verdes. No entanto, o baixo número de trabalhos que utilizaram o método do estudo de caso, reforça a novidade do assunto e evidencia a ausência de empreendimentos, que na atualidade, tem produzido aço verde, em que estudos pudessem ser desenvolvidos.

3.2 Análise do contexto dos artigos

Analisando o conteúdo e o contexto em que os artigos foram escritos, foi possível identificar treze aspectos que são vistos como facilitadores da produção de aço verde em um contexto global. O primeiro aspecto destacado pela literatura refere-se ao discreto aumento de apoios governamentais para que a produção de aço verde se torne uma realidade tangível (WABG *et al.*, 2023). As políticas de incentivos governamentais têm atuado como um motivador para a criação de um ambiente propício à produção de aço verde, pois o transformam em um produto estratégico que contribui para a existência de um segmento industrial mais sustentável (VENKATARAMAN *et al.*, 2022; MALLETT; PAL, 2022).

Outro aspecto facilitador destacado consiste no desenvolvimento e implementação de mapeamentos estratégicos para a descarbonização do processo produtivo e para o

reconhecimento de nichos de consumo de aço verde e redes de colaboração. A adoção de técnicas de mapeamento de processos para melhoria do fluxo de produção auxiliam na identificação de maiores fontes de poluição, identificação de oportunidades de inovação, otimização do uso de recursos e tecnologias que possam mitigar esses impactos (KIESSLING; DARABKHANI; SOLIMAN, 2024). Os mapeamento para identificação de nichos, por sua vez, proporcionam maiores oportunidades para melhorias tecnológicas adicionais e podem levar a reduções de custos através de maior experiência e adoção de técnicas incrementais que fortalecem a competitividade da indústria siderúrgica descarbonizada.

Estimular o aumento da adoção de práticas de participação conjunta em programas de pesquisa e desenvolvimento também é um dos facilitadores evidenciados pela literatura. Tais práticas permitem a criação de capacidades de produção que desenvolvem processos e produtos em sinergia com os recursos naturais locais, onde o aço será produzido, com o objetivo de minimizar os danos ao meio ambiente (MALLET; PAL, 2022).

Um outro facilitador identificado, refere-se a prática de estudar formas para substituir gradualmente os métodos convencionais de produção de aço. Novos investimentos na capacidade de produção de aço verde só resultarão em reduções globais absolutas de CO² se eliminarem ou substituírem as capacidades convencionais de produção de aço com elevadas emissões (ALGERS; AHMAN, 2024).

A implementação de contratos como acordos de compra de energia ou cooperações energéticas que impliquem na adoção de energia renovável no processo produtivo, também tem sido vista como um facilitador relevante. Pois, uma abordagem colaborativa e integrada entre os setores da energia, seja da produção de aço ou hidrogênio, é essencial para uma transformação do sistema rentável e eficiente para emissões líquidas zero (ANNIKA *et al.*, 2024).

Em adição, a disponibilidade de mercado também deve ser considerada, pois a indústria siderúrgica ainda está em transformação e nem todos os tipos estão disponíveis em todas as especificações nos produtores de aço (VOGT *et al.*, 2024).

A literatura também sugere que adotar a política de investimento aberto para acesso a tecnologias de ponta também será importante na corrida para estabelecer este novo modelo de indústria siderúrgica, que prioriza a fabricação de produtos verdes (VENKATARAMAN *et al.*, 2022); assim como desenvolver um quadro de regulamentação e modelos de negócio sustentáveis que integrem o uso de energia limpa na siderurgia, que incluam a elaboração de leis, normas e políticas que incentivem as indústrias siderúrgicas a adotar tecnologias e

processos que reduzam o impacto ambiental, ao mesmo tempo em que se mantenham economicamente viáveis (MUSLEMANI *et al.*, 2021).

Aspectos vinculados à legislação também puderam ser evidenciado na literatura. Alguns estudos chamam atenção para a implementação prática da Regulamentação Ambiental de Incentivos de Mercado (RAIM) que é uma estratégia que visa melhorar a qualidade ambiental, modificando a situação econômica, promove a redução de emissões entre empresas siderúrgica com custos mais baixos, incentivando-as a melhorar a inovação tecnológica com custos reduzidos; e a Regulamentação Ambiental Voluntária (RAV), que é caracterizada por um compromisso voluntário das empresas em implementar práticas ambientais que vão além dos requisitos regulamentares mínimos (ISLAM, 2024).

Outro facilitador para a produção de aço verde refere-se ao firmamento de parcerias com fornecedores verdes e a implementação de materiais de teste no processo de produção, a fim de se obter uma visão geral de diferentes abordagens sustentáveis, acessar a tecnologias e matérias-primas mais ecológicas e experimentar e a avaliação novos métodos que possam ser integrados ao processo produtivo (KIESSLING; DARABKHANI; SOLIMAN, 2024; VOGT *et al.*, 2024).

Por fim, a literatura destaca como mais um facilitador à produção de aço verde, a entrega de prêmios verdes para produtores que se destaquem com menor índice de emissão de poluentes ao ano, o que poderia impulsionar a siderurgia, dado que a produção de aço verde exige investimentos substanciais em infraestruturas de energias renováveis e é atualmente mais cara do que a produção de aço tradicional, e um prêmio proporcionaria o apoio financeiro necessário (WABG *et al.*, 2023). O Quadro 2 resume os principais aspectos facilitadores identificados após a leitura dos artigos da revisão, seguido de seus anos e dos autores que os mencionaram.

QUADRO 2 – Aspectos facilitadores para a produção de aço verde

Aspecto facilitador	Referencias
Quadro de regulamentação e modelos de negócio sustentáveis que integrem o uso de energia limpa na siderurgia	Muslemani <i>et al.</i> , 2021
Mapeamento estratégico para o reconhecimento de nichos de consumo e redes de colaboração	Vogl; Åhman; Nilsson, 2020 Kiessling; Darabkhani; Soliman, 2024
Apoio e incentivo governamental	Wabg <i>et al.</i> , 2023
	Quian <i>et al.</i> , 2024
	Venkataraman <i>et al.</i> , 2022
	Mallett; Pal, 2023
Prêmio verde para produtores com menor índice anual de emissão de poluentes	Wabg <i>et al.</i> , 2023
Parcerias com fornecedores verdes	Vogt <i>et al.</i> , 2024
	Kiessling; Darabkhani; Soliman, 2024
Acordos de compra de energia ou cooperações energéticas que impliquem na adoção de energia renovável no processo produtivo.	Annika <i>et al.</i> , 2024
Regulamentação Ambiental de Incentivos de Mercado (RAIM) e Regulamentação Ambiental Voluntária (RAV)	Islam, 2024
Pesquisas para compreender a disponibilidade do mercado tanto para oferta, quanto para a procura de aço verde	Vogt <i>et al.</i> , 2024
Substituição gradual dos métodos convencionais de produção de aço por métodos verdes	Algers; Ahman, 2024.
Adoção da política de investimento aberto para acesso a tecnologias	Venkataraman <i>et al.</i> , 2022
Práticas de participação conjunta em programas de pesquisa e desenvolvimento	Mallett; Pal, 2022

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Ao analisar no contexto dos artigos lidos, observou-se que um dos principais fatores limitantes para a produção de aço verde é a necessidade de investimentos, que acarretam em custos de produção (WABG *et al.* 2023; KAWABATA, 2023; SCHÉELE, 2023; KUSHNIR *et al.*, 2024; ALGERS; AHMAN, 2024). O aço verde será, pelo menos inicialmente, mais caro do que o aço produzido convencionalmente, devido aos custos mais elevados das tecnologias de produção alternativas (MUSLEMANI *et al.*, 2021). Pois, dependendo do caminho tecnológico escolhido, estratégias deverão incluir o acesso e os custos da electricidade renovável, do hidrogénio verde, do acesso ao carvão metalúrgico de boa qualidade e biocombustíveis e o preço do carbono (VOGL; ÅHMAN; NILSSON, 2020).

A segunda barreira mais destacada na literatura é a resistência à mudança na siderurgia (KIESSLING; DARABKHANI; SOLIMAN, 2024). Grandes siderúrgicas estabelecidas, que operam sob alta demanda produtiva, frequentemente resistem às inovações verdes que

perturbam as tecnologias de produção existentes devido aos investimentos significativos em capital fixo e ativos intangíveis ligados à tecnologia atual (KAWABATA, 2023).

Associada à cadeia de suprimentos, uma terceira barreira refere-se ao consumo limitado a nichos específicos, uma vez que o mercado de produtos siderúrgicos verdes tende a ser limitado a consumidores ambientalmente conscientes, e que estarão dispostos a pagar um valor justo pelo aço mais sustentável (MUSLEMANI *et al.*, 2021).

Outra barreira evidenciada é a adaptação à localidade de instalação, que requer locais que possam ser usados por várias décadas e que disponham de infraestruturas como portos e ferrovias para o transporte de minério de ferro, carvão, gás e mão-de-obra qualificada que deverá ser desenvolvida ao longo do tempo (BLEISCHWITZ; HÖLLER; KRIEGL, 2023). A ausência de infraestruturas adequadas, bem como de instituições especializadas no sistema atual e de instituições financeiras avessas ao risco, constitui mais uma barreira (VOGL; ÅHMAN; NILSSON., 2020). Além disso, a falta de investimentos em pesquisa e desenvolvimento torna-se também um desafio, dado que as empresas geralmente trabalham isoladamente, tornando fragmentadas e lentas quaisquer abordagens para tornar a produção de aço mais ecológica (MALLET; PAL, 2022).

A literatura destaca, em seguida, a ausência de incentivos políticos, como mais uma barreira à produção do aço verde tais como a futura política climática e as expectativas relativas ao seu nível de ambição e continuidade, bem como sociais, tais como as reações públicas à distribuição desigual dos custos de transição (VOGL; ÅHMAN; NILSSON, 2020). Pela ausência de incentivos políticos, nasce também a ausência de estudos sobre a viabilidade e a aceitação do aço de baixo carbono, afim de identificar a importância do acesso aos recursos e a compatibilidade das políticas futuras dos países para ter acesso ao aço de baixo carbono (LEDARI *et al.* 2023).

Outra barreira refere-se a concorrência com outras alternativas de baixo carbono. Pois, quando um produto de aço verde começa a competir com base na diferenciação em relação ao aço convencional, passará a enfrentar também a concorrência de outras opções de materiais com baixa pegada de carbono no mercado mais amplo, como o cimento (na construção), alumínio (em automóveis), plástico (em embalagens) e cerâmica (em motores de veículos) (MUSLEMANI *et al.*, 2021).

Por fim, a literatura destaca a ausência de uma distribuição equitativa como mais uma barreira significativa. Pois, a maioria dos projetos de aço verde ocorre em países ricos, enquanto a demanda crescerá nos países mais pobres, sendo necessário delinear formas de superar esses

desafios para garantir a descarbonização global do setor siderúrgico (ALGERS; AHMAN, 2024). O Quadro 3 sintetiza as principais barreiras da produção de aço verde

QUADRO 3 – Barreiras para a produção de aço verde

Barreiras	Referências
Custos de produção	Muslemani <i>et al.</i> , 2021; Vogl; Åhman; Nilsson, 2020; Wabg <i>et al.</i> 2023; Kawabata, 2023; Kushnir <i>et al.</i> , 2024; Algers; Ahman, 2024; Schéele, 2023
Resistência à mudança	Kawabata, 2023; Kiessling; Darabkhani; Soliman, 2024
Consumo limitado a nichos específicos	Muslemani <i>et al.</i> , 2021
Ausência de investimentos em pesquisa e desenvolvimento	Mallett; Pal, 2022
Distribuição equitativa	Algers; Ahman, 2024
Adaptação à localidade de instalação	Bleischwitz; Höller; Kriegl; 2023
Ausência de estudos sobre a viabilidade e a aceitação do aço de baixo carbono	Ledari <i>et al.</i> , 2023
Concorrência com outras alternativas de baixo carbono	Muslemani <i>et al.</i> , 2021
Ausência de infraestruturas adequadas	Vogl; Åhman; Nilsson, 2020
Ausência de incentivos políticos	

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o objetivo deste artigo, que foi identificar os aspectos facilitadores para a produção de aço verde e as barreiras que impedem sua efetivação, utilizando a técnica de revisão de literatura, foi possível perceber que este é um tema que vem crescendo exponencialmente. Embora o primeiro artigo relacionado à redução de emissões pelo setor siderúrgico tenha sido publicado em 1999, as publicações começaram a aumentar significativamente a partir de 2018, com o maior pico em 2024, dando foco à produção de aço verde.

Em paralelo a esta análise, o estudo evidenciou que os principais resultados foram publicados em periódicos cujo escopo de pesquisa se concentra em sustentabilidade na indústria, práticas de produção mais limpas e métodos de redução do consumo de energia. No que se refere à origem de filiação dos autores, o estudo destacou que o Reino Unido tem a maior concentração de pesquisas desenvolvidas, uma vez que é considerado um dos maiores produtores de ferro e aço do mundo. Além disso, também foi possível identificar os principais métodos de pesquisa utilizados, sendo eles as técnicas de estudos teóricos-conceituais, modelagem e experimentação.

Com isso, os achados nesse artigo permitem inferir que a produção de aço verde é um processo que tem sido cada vez mais considerado, mas que ainda caminha a passos lentos.

Embora muitos aspectos potencializadores possam contribuir para sua efetivação, algumas barreiras ainda precisam ser vencidas. Nisso, este estudo pôde evidenciar que a produção de aço verde em diversas localidades do mundo tem sido favorecida por alguns aspectos principais como o aumento de incentivos governamental, desenvolvimento de regulamentações sustentáveis, utilização de mapeamentos estratégicos de mercado, parcerias com fornecedores verdes, acordos de energia renovável, incentivos ambientais, pesquisa de mercado para oferta e demanda, transição gradual para métodos de produção verde, política de investimento aberto para acesso a tecnologias e colaboração em programas de P&D.

No que se refere aos fatores que são vistos como barreiras à produção de aço verde, o estudo pôde destacar que os custos de produção tem sido um dos principais impecilhos, seguido da resistência à mudança. Outras barreiras referem-se ao consumo limitado a nichos específicos, a ausência constante de investimentos em pesquisa e desenvolvimento, a distribuição equitativa, a adaptação à localidade de instalação, a ausência de estudos sobre a viabilidade e a aceitação do aço verde, a concorrência com outras alternativas de baixo carbono, a ausência de infraestruturas adequadas e, por fim a ausência constante de incentivos políticos.

Portanto, é possível ressaltar que, embora os resultados apresentados sejam abordagens viáveis, ainda há necessidade de desenvolver e aprofundar estudos estratégicos, pois a eficácia das soluções depende do local onde a produção ocorrerá. Fatores como a cultura local, incentivos políticos e custos trabalhistas deverão influenciar esse processo. Independentemente do local de produção, será necessário investir em novas infraestruturas de energias renováveis, o que pode representar um desafio para as cadeias globais de fornecimento de matérias-primas.

Sendo assim, este estudo abre oportunidades para que trabalhos futuros explorem quais tem sido as tecnologias utilizadas para viabilizar a produção de aço verde, assim como realizar um mapeamento teórico conceitual para identificar quais empreendimentos siderúrgicos estão mais propensos a renovar seus processos e adotar práticas sustentáveis.

Agradecimento:

Nossos agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), chamada 406746/2022-2, processo 406746/2022-2, ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) – TED No. 11355260 da Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação – SETEC, e ao governo do estado do Rio Grande do Norte, por meio da SIN e SEDEC, Convênio N° 002/2023 pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALGERS, J.; ÅHMAN, M. Phase-in and phase-out policies in the global steel transition. **Climate Policy**, p. 1-14, 2024.
- BARLOW, C. R. *et al.* Policy and pricing barriers to steel industry decarbonisation: A UK case study. **Energy Policy**, v. 168, p. 113100, 2022.
- BLEISCHWITZ, R.; HÖLLER, J.; KRIEGL, M. Ship recycling—estimating future stocks and readiness for green steel transformation. **Environmental Research Letters**, v. 18, n. 12, p. 124034, 2023.
- FALANI BEZERRA, S. Y. A.; TORKOMIAN, A. L. V. Technology Transfer Offices: a Systematic Review of the Literature and Future Perspective. **Journal of the Knowledge Economy**, p. 1-34, 2023.
- GONZÁLEZ, M. O. A.; TOLEDO, J. C.; A integração do cliente no processo de desenvolvimento de produto: revisão bibliográfica sistemática e temas para pesquisa. *Produção* (São Paulo. Impresso), v. 22, p. 14-26, 2012.
- GRIFFIN, P. W.; HAMMOND, G. P. The prospects for ‘green steel’ making in a net-zero economy: A UK perspective. **Global Transitions**, v. 3, p. 72-86, 2021.
- ISLAM, M. Z. Analysis of China’s Environmental Regulations and Corresponding Differences for Green Steel Industry Development. **The Journal of Environment & Development**, v. 33, n. 2, p. 243-267, 2024.
- KAWABATA, N. Evaluating the technology path of Japanese steelmakers in green steel competition. **The Japanese Political Economy**, v. 49, n. 2-3, p. 231-252, 2023.
- KIESSLING, S.; DARABKHANI, H. G.; SOLIMAN, A. H. The bio steel cycle: 7 steps to net-zero CO2 emissions steel production. **Energies**, v. 15, n. 23, p. 8880, 2022.
- KIESSLING, S.; GOHARI DARABKHANI, H.; SOLIMAN, A. H. Greater Energy Independence with Sustainable Steel Production. **Sustainability**, v. 16, n. 3, p. 1174, 2024.
- KUSHNIR, D.; HANSEN, T.; VOGL, V.; ÅHMAN, M. Adopting hydrogen direct reduction for the Swedish steel industry: A technological innovation system (TIS) study. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, p. 118185, 2020.
- LEDARI, M. B. *et al.* Greening steel industry by hydrogen: Lessons learned for the developing world. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2023.
- MALLET, A.; PAL, P. Green transformation in the iron and steel industry in India: Rethinking patterns of innovation. **Energy Strategy Reviews**, v. 44, p. 100968, 2022.
- MUSLEMANI, H. *et al.* Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for ‘green steel’ products. **Journal of Cleaner Production**, v. 315, p. 128127, 2021.

- PARDO, N.; MOYA, J. A. Prospective scenarios on energy efficiency and CO2 emissions in the European Iron & Steel industry. **Energy**, v. 54, p. 113-128, 2013.
- QUIAN, Y.; LI, Y.; HAO, Y.; YU, T.; HU, H. Greenhouse gas control in steel manufacturing: inventory, assurance, and strategic reduction review. **Carbon Research**, v. 3, n. 1, p. 27, 2024.
- SCHÉELE, J. V. Pathways towards full use of hydrogen as reductant and fuel. **Matériaux & Techniques**, v. 111, n. 4, p. 405, 2023.
- SINGH, J. K.; ROUT, A. K. Advances in green steel making technology-a review. **American Journal of Materials Engineering and Technology**, v. 6, n. 1, p. 8-13, 2018.
- TANG, Q.; HUANG, K. Determining the kinetic rate constants of Fe3O4-to-Fe and FeO-to-Fe reduction by H2. **Chemical Engineering Journal**, v. 434, p. 134771, 2022.
- TRANFIELD, D., DENYER, D., SMART, P. Towards a methodology for developing evidenceinformed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222, 2003.
- TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção**: Estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas. Universidade federal de Itajubá - UNIFEI. 2012.
- VENKATARAMAN, M. *et al.* Zero-carbon steel production: the opportunities and role for Australia. **Energy Policy**, v. 163, p. 112811, 2022.
- VOGL, V.; ÅHMAN, M.; NILSSON, L. J. The making of green steel in the EU: a policy evaluation for the early commercialization phase. **Climate Policy**, v. 21, n. 1, p. 78-92, 2021.
- VOGL, V.; ÅHMAN, M.; NILSSON, L. J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. **Journal of cleaner production**, v. 203, p. 736-745, 2018.
- VOGT, E. G.; GEBEL, L.; MEYER, C.; MENNENGA, M.; HERRMANN, C. Methodology for qualifying the use of green steel in body components: A contribution to the life cycle engineering of steel. **Procedia CIRP**, v. 122, p. 473-478, 2024.
- WABG, C. *et al.* 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, 2023.
- WORLD STEEL ASSOCIATION *et al.* Steel's contribution to a low carbon future and climate resilient societies. **World Steel Association**, 2015. Disponível em: <https://www.apeal.org/wp-content/uploads/2015/03/Steel_s-contribution-to-a-low-carbon-future.pdf.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2024.