

AÇO VERDE E A SUSTENTABILIDADE NA PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA

GREEN STEEL AND SUSTAINABILITY IN PIG IRON PRODUCTION

ACERO VERDE Y SOSTENIBILIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE HIERRO-GUSA

Mariana Oliveira Barbosa ¹
Priscilla Chantal Duarte Silva ²
Ricardo Luiz Perez Teixeira ³

Resumo: O objetivo deste estudo sistemático é avaliar as tecnologias associadas à produção de aço verde e a sustentabilidade na siderurgia, com a finalidade de elucidar e entender melhor a definição de aço verde. Para isso, utilizou-se uma pesquisa do tipo estado da arte, sob o protocolo PRISMA. Foram selecionados 19 estudos nas bases de pesquisas *Science Direct*, *IEEE* e *Web of Science*. Destacam-se as seguintes mudanças trazidas pela implementação do aço verde no processo produtivo nas siderúrgicas menores emissão de gases de carbono, melhoria de produção no processo produtivo sustentável, baixo nível de enxofre resultante; e menor desgaste no Alto-forno.

Palavras-chave: Aço verde. Crédito de carbono. Coque de carvão vegetal. Ferro-gusa. Sustentabilidade.

Abstract: The objective of this systematic study is to evaluate the technologies associated with the green steel and sustainability in the steelmaking process. For this, we used a methodology of a state-of-the-art research, under the PRISMA protocol. Nineteen studies were selected from the research bases Science Direct, IEEE and Web of Science. The following changes brought about by the implementation of green steel in the production process in the steel mills are highlighted: lower carbon gas emissions, improved production in the sustainable production process, low level of sulfur resulting; and less wear in the blast furnace.

Keywords: Carbon Credit Cart Certificate. Charcoal coke. Green steel. Pig iron. Sustainability.

Resumen: El objetivo de este estudio sistemático es evaluar las tecnologías asociadas a la producción de acero verde y la sostenibilidad en la siderurgia. Para ello, se utilizó una pesquisa del estado del arte, bajo el protocolo PRISMA. Se seleccionaron 19 estudios en las bases de investigación Science Direct, IEEE y Web of Science. Se destacan los siguientes cambios traídos por la implementación del acero verde en el proceso productivo en las siderúrgicas menores emisiones de gases de carbono, mejora de producción en el proceso productivo sostenible, bajo nivel de azufre resultante; y menor desgaste en el Alto-horno.

Palabras-clave: Acero verde. Crédito de carbono. Coque de carbón vegetal. Hierro-gusa. Sostenibilidad.

Submetido 22/08/2022

Accito 13/10/2022

Publicado 17/10/2022

¹ Graduanda em engenharia de materiais. Instituto de Engenharia Integradas da Universidade Federal de Itajubá, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3104-3754>. E-mail: mahbarbosa6@unifei.edu.br

² Doutora em linguística e língua Portuguesa. Instituto de Ciências Puras e Aplicadas da Universidade Federal de Itajubá, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5148-2423>. E-mail: priscillachantal@unifei.edu.br

³ Doutor em engenharia metalúrgica e de materiais. Instituto de Engenharias Integradas da Universidade Federal de Itajubá, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2641-4036>. E-mail: ricardo.luiz@unifei.edu.br

Introdução

A contribuição das usinas siderúrgicas é significativamente importante para a economia mundial, mas é altamente intensiva na emissão de gás de CO₂ e no consumo de energia, uma vez que a rota de carvão mineral é dominante na produção de ferro, tornando-se uma indústria contribuinte para mudanças climáticas. Além da utilização eficiente dos gases da siderurgia para fornecimento de energia e calor, a implantação de captura de carbono e a utilização de energia renovável são uma necessidade urgente para a transição da indústria siderúrgica carbono neutro, para a neutralidade de carbono produzido no processo siderúrgico (XI *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2021).

As usinas siderúrgicas são classificadas segundo seus diversos processos produtivos. As etapas da produção de aço envolvem a redução do minério, refino do aço, lingotamento e a laminação (TEIXEIRA *et al.*, 2019). A integração destas etapas pode ser classificada como (MOURÃO, 2007): usinas integradas; usinas semi-integradas; usinas não integradas; e usinas siderúrgicas carbono neutro, que operam com fontes de energia renováveis, como o coque de carvão vegetal, e produz o denominado “aço verde” ou “aço carbono neutro”. Segundo Fan e Friedmann (2021), os biocombustíveis sólidos podem substituir prontamente os sistemas convencionais de alimentação, exibindo propriedades físicas essenciais (ou seja, resistência mecânica) necessárias durante a produção de produtos de ferro e de aço.

Segundo Mandova *et al.* (2019, apud Erbach, 2015), o papel principal das tecnologias das usinas de carbono neutro é a busca de redução na geração nas emissões dos gases estufa. Com efeito, ao mesmo tempo em que haveria a redução nos lançamentos de gases estufa para a atmosfera, como o CO₂, poderia se obter créditos internacionais, que são negociáveis com outras empresas, como a certificação de créditos de carbono neutro (ANDRÉ *et al.*, 2021; PINTO, 2008).

Os créditos de carbono são definidos por Conejero (2006 apud Lecocq e Capoor, 2005) como uma forma de troca da quantidade de emissões de carbono produzidas na indústria por um pagamento, em forma de créditos certificados de carbono neutro. De acordo com Ribeiro (2005), a ideia dos créditos de carbono é a de que os países desenvolvidos ajudem os países em desenvolvimento financiando projetos para redução de gases do efeito estufa. Dessa forma, os países que estão em desenvolvimento tenham recursos para buscar soluções sustentáveis, enquanto os desenvolvidos possam compensar as emissões que produzem constantemente.

Nesse sentido, uma economia voltada para o baixo carbono segue um modelo sustentável de desenvolvimento econômico embasado em baixa poluição, baixas emissões de CO₂ e de otimização no consumo de energia (CONCEIÇÃO *et al.*, 2022; NWACHUKWU; WANG; WETTERLUND, 2021; ZHAO *et al.*, 2019). Sendo assim, o objetivo deste estudo sistemático é avaliar as tecnologias associadas à produção de aço verde e a sustentabilidade na siderurgia, com a finalidade de elucidar e entender melhor a definição de aço verde.

O aço verde

Na academia não há ainda uma definição absoluta sobre o termo aço verde, segundo Muslemani *et al.* (2021) “Há uma falta de pesquisa, ou mesmo consenso, sobre o conceito de aço verde, mas o termo "aço verde" tem sido muito raramente utilizado na literatura acadêmica e, quando adotada, sua definição tem sido ampla” (SILVA; ALMEIDA, 2020).

O termo aço verde tem sido usado para se referir ao aço fabricado com tecnologia inovadora, reutilizado, produzido a partir de sucata e aço convencional com compensação de emissões por meio da retirada de unidades de carbono (KIM *et al.*, 2022; SUTHERLAND, 2020). Zhang *et al.* (2021) afirmam que a produção verde e a economia de energia são as tarefas mais importantes que as siderúrgicas enfrentam atualmente, e que essas têm como objetivo trabalhar a sustentabilidade na produção pela redução das emissões de gases de CO₂.

Segundo Rodrigues e Junior (2019), o uso de carvão vegetal em processos metalúrgicos resulta em um balanço negativo de CO₂, pois as árvores usadas nos processos de carbonização, por exemplo, absorvem mais carbono durante o seu crescimento do que é liberado na produção de ferro. As limitações técnicas para o uso pleno do carvão vegetal no AF abrangem fatores como o preço, o controle das propriedades físicas e a quantidade da cadeia de suprimentos, tendo em vista que alguns países apresentam maior controle legal para florestas nativas e restrições ambientais de área de plantio para a produção de carvão vegetal em larga escala (FAN; FRIEDMANN, 2021).

De acordo com Griffin e Hammond (2021, p. 75), a produção do aço verde resulta em menores emissões de gases poluentes do ar (por exemplo de gás: de CO, de CO₂ e SO_x), de contaminantes de águas residuais, de resíduos perigosos (incluindo arsênico, chumbo e zinco) e de outros resíduos sólidos.

Um dos principais desafios é que o aço verde será, pelo menos inicialmente, mais caro do que o aço produzido convencionalmente, devido aos custos mais altos de tecnologias alternativas de produção (MUSLEMANI; LIANG; KAESEHAGE; ASCUI; WILSON, 2021).

Já para Griffin e Hammond (2021, p. 72-73), o aço verde “é um processo siderúrgico projetado para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), além de potencialmente reduzir custos e melhorar a qualidade do aço, em comparação aos métodos convencionais”.

De acordo com Fan e Friedmann (2021), no Brasil, pequenos Altos-fornos substituíram completamente o coque de carvão mineral pelo biocarvão. Os autores sugerem o uso da biomassa lenhosa prensada para preparar coque metalúrgico, após mistura com carvão mineral, obtendo descarbonização parcial da indústria.

No Brasil, existem empresas produtoras de aço verde, tal como a Aço Verde do Brasil (AVB, 2021), uma empresa do grupo faroeste, com a filosofia de sustentabilidade e com foco em operações livres de combustíveis fósseis. A empresa investe no setor florestal e na modernização da usina de aços longos. Os principais produtos comercializados são: o fio máquina, vergalhão, tarugo, ferro-gusa, gases do ar e energia.

A Aperam South America (APERAM, 2021), criada em 2011, após o desmembramento do setor de aços inoxidáveis da ArcelorMittal, surgiu como um *player* global em aços inoxidáveis, especiais elétricos e ligas de níquel. A indústria tem plantas industriais no Brasil, na Bélgica e na França. Mas, sobretudo no Brasil, a indústria tem a capacidade de produzir aços verdes inoxidáveis e especiais, usando biomassa (coque de carvão vegetal). A Aperam BioEnergia utiliza o coque de carvão vegetal originário das florestas plantadas de eucalipto. A empresa atua desde o melhoramento genético até a carbonização, que é realizada mecanicamente em queimador de gases, reduzindo a emissão de fumaça durante a produção, com avançados equipamentos do segmento florestal.

O aço verde produzido na China pela siderúrgica Shougang Jingtang, tem três objetivos que buscam a sustentabilidade nos processos produtivos, são eles: atentar-se para a qualidade e alta eficiência da fabricação de produtos siderúrgicos, ao mesmo tempo em que se concentra na conversão de energia limpa e altamente eficiente, e no descarte da grande quantidade de resíduos (ZHANG; XIE, 2017).

Segundo Pinto *et al.* (2018), para as instalações industriais à base de carvão vegetal, as emissões de CO₂ produzidos no processo industrial são compensados pelo processo de fotossíntese que ocorre nas florestas plantadas, permitindo a redução das emissões totais do processo siderúrgico. Outros produtos de base biológica (por exemplo, pelotas de madeira, bio-óleo e combustíveis torreficados) também podem ser usados como combustível, auxiliando no sistema de injeção do Alto-forno (AF). No entanto, o coque de carvão vegetal é o biocombustível de melhor desempenho até o momento (OLOFSSON, 2018).

Coque de carvão vegetal

A avaliação da densidade do carvão vegetal, como fonte de energia sustentável, é crucial para o destino do uso como biorredutor na indústria siderúrgica. De acordo com Protásio *et al.* (2021), quanto maior a densidade, melhor é a resistência à compressão e menor o volume ocupado no AF, elevando, assim, a produção de ferro. Segundo Rizzo (2009), existem algumas vantagens, no que diz respeito ao uso do coque de carvão vegetal em relação ao coque como combustível/redutor no reator:

- Menor temperatura de sopro, devido a maior reatividade do coque de carvão vegetal, tornando assim mais simples o sistema de aquecimento do ar de combustão.
- Operação do AF com níveis térmicos de 100°C a 150°C inferiores à operação com coque de carvão mineral, o que resulta em menor perda térmica por tonelada de ferro-gusa e, conseqüentemente menor desgaste do refratário.
- Na maior parte dos casos, elimina-se a necessidade de dessulfuração do ferro-gusa, em função do baixo nível de enxofre resultante.
- Geração de um gás de AF com maior poder calorífico, com baixíssima contaminação de SO₂.
- Inexistência de contaminantes danosos ao aço.
- Menor desgaste do AF e de produção de escória.

Uma das desvantagens do uso do coque de carvão vegetal é a impossibilidade da sua utilização no AF de grandes dimensões, em razão, sobretudo, da sua baixa resistência mecânica. Segundo Souza e Pacca (2021), conforme citado por Norgate e Langberg (2009), embora a

friabilidade do coque de carvão vegetal possa ser um problema em grandes Altos-fornos, esse tipo de carvão pode ser injetado como pó em vez de grumos, superando essa limitação de propriedade mecânica. Outro ponto positivo é que o uso de insumos para o coque, oriundos de madeira com melhor qualidade de queima, reduz a pressão sobre florestas nativas e melhora o fornecimento de biorredutores com propriedades adequadas para siderúrgica (PROTÁSIO *et al.*, 2021). Pode-se dizer que isso se deve à qualidade e das propriedades do carvão de redução em Altos-fornos, que dependem da madeira e a carbonização. Dentre as vantagens da utilização do coque de carvão vegetal na indústria siderúrgica, tem o seu baixo teor de cinzas, o que não prejudica em sua aplicação no AF para a produção de ferro-gusa (PROTÁSIO *et al.*, 2021).

Metodologia

No presente trabalho, utilizou-se uma pesquisa de cunho bibliográfico e do tipo estado da arte, que visa compreender e ter um panorama da temática sobre “ aço verde e a sustentabilidade na produção de ferro-gusa” no período de 2016 a 2021.

Embora recentes, os estudos de “estado da arte” que objetivam a sistematização da produção numa determinada área do conhecimento já se tornaram imprescindíveis para apreender a amplitude do que vem sendo produzido. Os estudos realizados a partir de uma sistematização de dados, denominada “estado da arte”, recebem esta denominação quando abrangem toda uma área do conhecimento, nos diferentes aspectos que geraram produções. (PAULIN ROMANOWSKI; TEODORA ENS, 2006, p. 39)

A denominação para esse tipo de estudo é estudo do tipo “estado da arte” ou “estado do conhecimento” aço verde e a sustentabilidade na produção de ferro-gusa”. Quanto a abordagem ela tem caráter bibliográfico e visam mapear e discutir a produção acadêmica em diferentes campos do conhecimento em determinado no período do ano de 2016 ao ano de 2021. Com o intuito de alcançar o objetivo desse trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica de natureza exploratória a partir de uma abordagem quantitativa, conforme Carvalho e Shigunov Neto (2018, p. 107). Além disso, é necessário explicar de forma objetiva e clara como serão as etapas da pesquisa. Estas têm nos estudos primários sua principal fonte de dados. Para o presente trabalho utilizou-se o método de revisão sistemática da literatura e recomendação *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) como *checklist* dos itens que norteiam a redação de uma revisão sistemática (depois de pronta). O

PRISMA foi desenvolvido inicialmente para área médica, mas aos poucos vem sendo utilizada pelas demais áreas do conhecimento. Ele trata-se de uma síntese científica em que toda a busca da literatura se centra numa questão norteadora (SILVA *et al.*, 2022; PRISMA GROUP, 2015).

Para o desenvolvimento do trabalho, seguiram-se as seguintes etapas, com base na revisão sistemática da literatura: (i) escolha do tema e elaboração da questão de pesquisa; (ii) escolha de palavras-chave e booleanos lógicos a serem utilizados nas bases; (iii) bases de pesquisa; (iv) estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão de estudos; (v) categorização dos estudos selecionados; (vi) quantificação, análise e interpretação dos resultados; (vii) apresentação da revisão e síntese do conhecimento. A questão norteadora foi elaborada a partir da estratégia PI(E)CO, para enquadramento da pesquisa, cujas letras indicam: Problema ou População; Intervenção, Indicação de interesse ou Exposição; Comparação/Procedimento padrão e Desfechos/resultados esperados (ZORZELA *et al.*, 2022; FRAGELLI, 2020).

Ao pesquisar um tema é possível deparar-se com resultados contraditórios. Partindo desse princípio, surgiu um novo delineamento de pesquisa: a revisão sistemática da literatura. Trata-se de um tipo de investigação focada em questões bem definidas, que visa identificar, selecionar, avaliar e sintetizar as evidências relevantes disponíveis (GALVÃO; PEREIRA, 2014). Como em toda pesquisa, o valor da revisão sistemática depende do que foi feito, do que foi descoberto, e da clareza do relato. Assim como em outras publicações, a qualificação dos relatos das revisões sistemáticas varia, limitando a habilidade dos leitores de avaliar os pontos fortes e fracos dessas revisões (MOHER *et al.*, 2015).

Os métodos para elaboração de revisões sistemáticas preveem a elaboração da pergunta de pesquisa, busca na literatura, seleção dos artigos, extração dos dados, avaliação da qualidade metodológica, síntese dos dados, avaliação da qualidade das evidências e redação e publicação dos resultados (GALVÃO; PEREIRA, 2014).

A questão norteadora foi elaborada a partir da estratégia PI(E)CO, para enquadramento da pesquisa. Dessa forma, orientou-se o estudo por: Problema → a identificação das mudanças trazidas pela implantação do aço verde para o processo produtivo na indústria siderúrgica, tendo em vista o tipo de ferro-gusa produzido, a emissão de CO e CO₂ para atmosfera, os refratários e o certificado carbono neutro. Intervenção → verificar de que forma essas implantações modificariam os processos da indústria, considerando o uso de biomassa e o carvão vegetal no processo produtivo. Comparação/Procedimento padrão → estabelecer um comparativo entre os

artigos e analisar as mudanças no processo siderúrgico com a blendagem do carvão vegetal com carvão mineral. Desfecho/ resultados esperados → esclarecer as mudanças trazidas pela produção do aço verde para o processo produtivo siderúrgico, bem como de que forma é vantajosa essa produção, no que concerne à emissão de CO e CO₂, o uso do carvão vegetal e a certificação de carbono neutro. Sendo assim, a estratégia consiste em uma busca nas bases de busca de pesquisa, direcionando a questão para a obtenção de descritores que apontem respostas à questão norteadora deste estudo: Quais as mudanças trazidas pela implantação do aço verde para o processo produtivo na indústria siderúrgica?

Para atingir o objetivo proposto, realizaram-se buscas em três bases de dados internacionais representativas na quantidade de periódicos com o conceito mais alto (A) na plataforma Sucupira Qualis Capes para temática principal que aborda a área de administração de empresas, engenharia de produção e engenharia metalúrgica e de materiais (PLATAFORMA SUCUPIRA, 2022): *Web of Science*, *Science Direct* e *IEEE*.

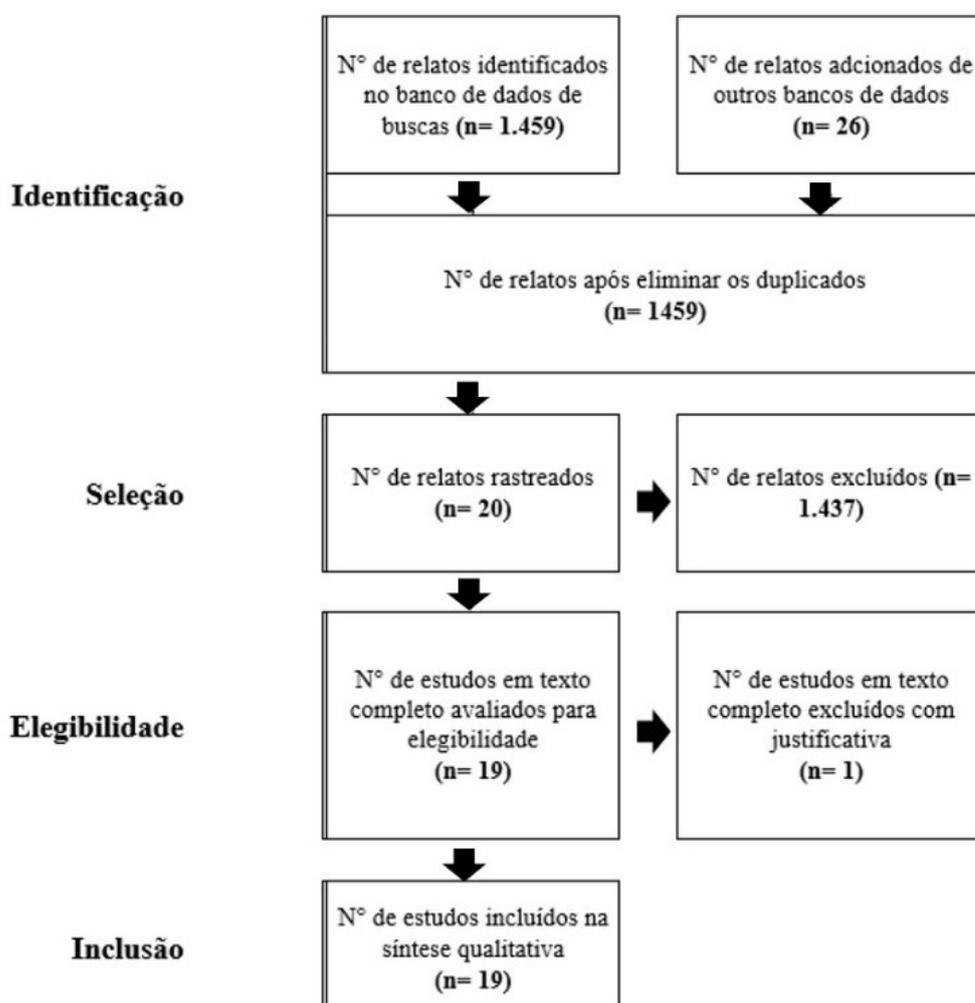
Após a seleção nas três bases de dados principais da temática proposta, além de outros materiais identificados como relevantes, realizou-se a seleção e o refinamento dos artigos por meio de combinações booleanas, que utilizam os operadores *AND*, *OR* e *NOT* na combinação de palavras-chave para adição, alternância ou negação entre os termos. Selecionaram-se os artigos publicados do ano de 2016 ao ano de 2021.

Na sequência à etapa de refino dos dados obtidos, realizou-se o download dos títulos e o resumo dos artigos encontrados pelas pesquisas realizadas. A primeira análise foi do título dos trabalhos, em busca de verificar aqueles que pudessem contribuir diretamente para o objetivo desta pesquisa, orientando a temática investigada. Os critérios de inclusão foram: (i) artigos com data de publicação entre 2016 e 2021, com a finalidade de selecionar os estudos mais recentes; (ii) artigos que continham no título, resumo ou palavras-chave os termos de busca de acordo com os booleanos lógicos adotados; (iii) artigos que discutissem sobre a siderurgia e sustentabilidade; (iv) artigos que discutissem sobre aço verde; (v) artigos que discutissem sobre carvão e siderurgia. Já os critérios de exclusão foram: (i) artigos que não abordavam o conteúdo de siderurgia; (ii) artigos que não abordavam o conteúdo aço verde; (iii) artigos duplicados; (iv) artigos com idioma diferente do inglês.

Resultados

A partir das buscas que ocorreram nas plataformas de pesquisas de literatura, foram identificados no total 1.459 estudos que elencaram, ou continham nas chaves de busca das bases de dados. Mas, no final, apenas 19 estudos relevantes sobre o tema, que serviram como base para a criação da estrutura do referencial.

Figura 1. Fluxo da informação com as diferentes fases da revisão sistemática

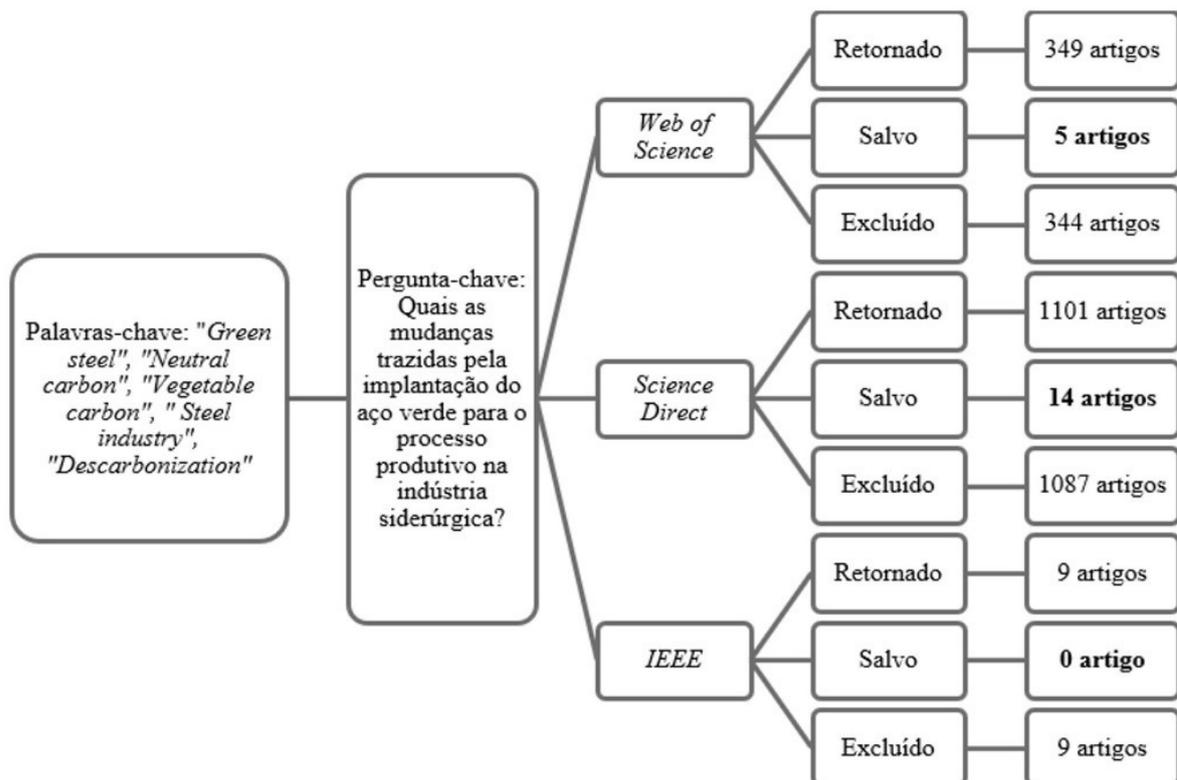


Fonte: dados dos autores (2022)

Para atender aos critérios de seleção dos estudos potenciais foi necessário seguir com a remoção dos estudos duplicados. Nesta etapa, foram encontrados apenas dois (2) estudos que atendessem ao critério de exclusão, como apresentado na Figura 1.

A Figura 2 apresenta uma representação visual do fluxo da informação com as bases de dados de pesquisa selecionadas. Pela figura, tem-se que a base de dados utilizada na revisão sistemática da literatura com maior retorno de artigos foi o *Science Direct*, com 1101 artigos, seguido do *Web of Science* com 349 artigos e o *IEEE* com 9 artigos. No total 19 artigos foram selecionados pelos critérios de inclusão, sendo 5 artigos do *Web of Science* e 14 artigos do *Science Direct*, não foram encontrados artigos que correspondessem ao critério de seleção no banco de dados *IEEE*.

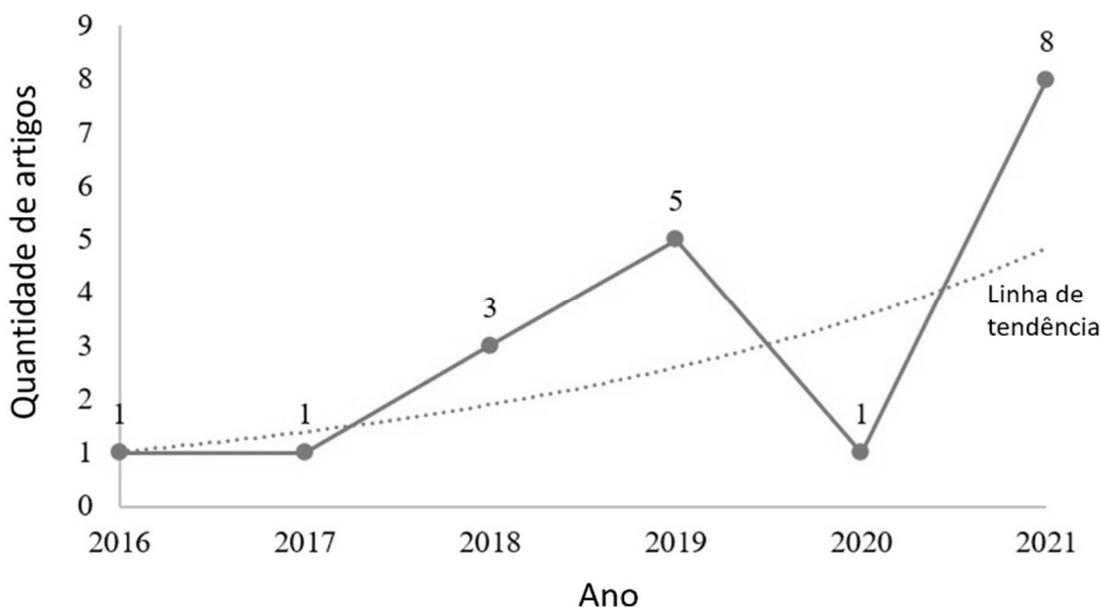
Figura 2. Fluxo da informação com as bases de dados de pesquisa



Fonte: dados dos autores (2022)

A Figura 3 mostra a variação dos artigos no período entre os anos de 2016 e 2021, conforme critérios de seleção. É possível observar nessa figura uma tendência de crescimento do interesse de pesquisa na temática abordada, conforme a resposta encontrada nos artigos à pergunta-chave proposta, nesse estudo, com destaque no ano de 2021 com um total de 8 trabalhos publicados (42,1% do total de artigos que responde aos critérios de seleção), seguido de 2019 com 5 artigos (26,3%) e 2018 com 3 artigos (15,8% do total de artigos).

Figura 3. Linha do tempo dos artigos que responderam à pergunta-chave



Fonte: dados dos autores (2022)

A coleta dos artigos foi realizada e organizada de acordo com o ano de publicação dos estudos selecionados, Tabela 1. O objetivo foi identificar, selecionar e avaliar as pesquisas apontadas na tabela, baseados na relevância apresentada, tentando estabelecer um vínculo com a questão norteadora, relacionada a quais as mudanças trazidas pela implantação do aço verde para o processo produtivo na indústria siderúrgica.

Pela Tabela 1 é possível compreender a temática principal dos discursos dos autores em cada artigo pelo seu título. Isso é importante, pois as revisões sistemáticas devem ser realizadas com o rigor metodológico e, para que a verdadeira evidência científica seja apresentada, a estratégia para identificar estudos relevantes deve estar claramente delineada.

A validade de um estudo está diretamente relacionada a duas dimensões, validade interna e externa. A primeira diz respeito se o estudo responde a uma questão de pesquisa de forma apropriada, ou seja, livre de vieses (CARVALHO; SILVA; GRANDE, 2013, p.38).

Tabela 1. Artigos selecionados pelos critérios de inclusão

Título do Artigo	Autor	Ano
<i>Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities</i>	Elsayed Mousa, Chuan Wang, Johan Riesbeck e Mikael Larsson	2016
<i>Green Manufacturing Process of Shougang Jingtang Steel Plant</i>	Fuming Zhang e Jianxin Xie	2017
<i>CO₂ emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector—From structural to intensity effects.</i>	Raphael Guimarães D. Pinto, Alexandre S. Szklo e Regis Rathmann	2018
<i>Regional effects of a green steel industry – fuel substitution and feedstock competition</i>	Elias Olofsson	2018
<i>Possibilities for CO₂ emission reduction using biomass in European integrated steel plants</i>	H. Mandova, S. Leduc, C. Wang, E. Wetterlund, P. Patrizio, W. Gale e F. Kraxner	2018
<i>Review of green and low-carbon ironmaking technology</i>	Jun Zhao, Haibin Zuo, Yajie Wang, Jingsong Wang e Qingguo Xue	2019
<i>Exploring Driving Forces of Green Growth: Empirical Analysis on China's Iron and Steel Industry</i>	Xi Qin, Xiaoling Wang, Yusen Xu e Yawen Wei	2019
<i>Carbon capture and utilization in the steel industry: challenges and opportunities for chemical engineering</i>	Kevin De Ras Ruben Van de Vijver Vladimir V Galvita Guy B Marin Kevin M Van Geem	2019
<i>Achieving carbon-neutral iron and steelmaking in Europe through the deployment of bioenergy with carbon capture and storage</i>	Hana Mandova, Piera Patrizio, Sylvain Leduc, Jan Kjärstad, Chuan Wang, Elisabeth Wetterlund, Florian Kraxner e William Gale	2019
<i>Charcoal: A discussion on carbonization kilns</i>	Thaisa Rodrigues e Aldo Braghini Junior	2019
<i>Uncertainties in macroeconomic assessments of low-carbon transition pathways - The case of the European iron and steel industry</i>	G. Bachner, J. Mayer, K. W. Steininger, A. Anger-Kraavi, A. Smith e T. S. Barker	2020
<i>Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for 'green steel' products</i>	Hasan Muslemani, Xi Liang, Katharina Kaesehage, Francisco Ascui e Jeffrey Wilson	2021
<i>Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of Eucalyptus clones from Brazilian energy forests</i>	T. P. Protasio, M. D. R. Lima, M. V. Scatolino, A. B. Silva, I. C. R. Figueiredo, P. R. G. Hein e P. F. Trugilho	2021
<i>A review on low carbon emissions projects of steel industry in the World</i>	Xinyu Zhang, Kexin Jiao, Jianliang Zhang e Ziyu Guoa	2021
<i>Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy,</i>	Zhiyuan Fan e Julio Friedmann	2021
<i>Exploring the role of forest biomass in abating fossil CO₂ emissions in the iron and steel industry – The case of Sweden</i>	Chinedu Maureen Nwachukwu, Chuan Wang e Elisabeth Wetterlunda	2021
<i>Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry</i>	Jhonathan Fernandes Torres de Souza e Sérgio A. Pacca	2021
<i>Artificial intelligent based energy scheduling of steel mill gas utilization system towards carbon neutrality</i>	Han Xi, Xiao Wu, Xianhao Chen e Peng Sha	2021
<i>The prospects for 'green steel' making in a net-zero economy: A UK perspective</i>	Paul W. Griffin e Geoffrey P. Hammond	2021

Fonte: dados dos autores (2022)

Com a finalidade de minimizar o risco de viés ou de erro na coleta de dados, várias chaves foram testadas e os estudos verificados na íntegra durante a seleção dos artigos, com o propósito de garantir que nenhuma informação pertinente fosse perdida. Os vieses que foram considerados são os de:

- Seleção e coleta, no que diz respeito à escolha de estudos, o número e as bases de dados;
- Linguagem, tendo em vista a exclusão de estudos publicados em outro idioma a não ser o inglês;
- Publicação ou não publicação dos resultados da pesquisa, dependendo da natureza e direção dos resultados;
- Múltipla publicação, pois um estudo estava em duas bases de dados diferentes.

Após a seleção dos artigos, foi realizado a listagem das palavras-chave utilizadas pelos autores dos 19 artigos, sendo possível identificar quais termos foram mais citados. Foram identificadas 82 palavras-chave diferentes.

As palavras que mais apareceram durante a seleção dos artigos foram: *Green Steel*, *Charcoal* e *Iron and Steel*. Como o tema é de abrangência mundial, foram encontrados um grande número de palavras-chave diferentes nos artigos.

Em termos da quantidade de vezes que as palavras-chave são citadas nos artigos, tem-se como destaques: *Green Steel* com 4 registros, ou cerca de 4,9% do total de registros; *Charcoal* com 3 registros, ou cerca de 3,7% do total de registros; *Iron and Steel* com 3 registros, ou cerca de 3,7% do total de registros.

Era esperado que as palavras *descarbonization* e *carbon neutral* também fossem destaque, tendo em vista a busca na chave da lógica booleana, mas, cada uma delas só foram utilizadas em apenas 1 (um) dos estudos.

Uma narrativa foi finalmente construída a partir da leitura na íntegra dos artigos selecionados e dos dados processados. Em maioria, os 19 trabalhos analisados falam sobre o

aço verde e os métodos de obtenção. Nessa linha, RAS *et. al* (2019) afirmam que para manter a indústria siderúrgica viável e cumprir os objetivos de emissões de gases de efeito estufa a longo prazo, faz-se necessárias soluções tecnológicas drásticas que lidem com as grandes quantidades de gases de CO₂ emitidas durante a produção de produtos de ferro e de aço.

De acordo com Mousa (2016), ao lado dos benefícios ambientais, a injeção de carvão resultará em menor quantidade de escória e maior taxa de produção devido ao baixo teor de enxofre e cinzas e maior teor de CaO em comparação com a injeção de carvão pulverizado (PCI). A modelagem matemática mostrou resultados interessantes na mitigação das emissões de CO₂ fóssil por injeção de biomassa torrificada/ pirolisada no AF. No entanto, ainda há uma falta de conhecimento sobre os grandes Altos-fornos modernos (MOUSA, 2016).

Souza e Pacca (2021) afirmam que o uso do carvão vegetal é uma estratégia complementar para melhorar a emissão de gases nocivos, a um custo relativamente baixo, pois as barreiras de custo podem ser superadas por impostos ou por meio de créditos de carbono. Mas a produtividade do carvão vegetal precisa ser aperfeiçoada, com fornos de carbonização mais eficientes e o manejo adequado das madeiras, com propósito de garantir a sustentabilidade e redução de custos.

De acordo com Mandova *et al.* (2018), a indústria siderúrgica europeia, por exemplo, estuda a viabilidade do uso de biomassa, tanto do ponto de vista técnico, quanto da disponibilidade, tendo em vista a limitação desses recursos no continente.

No projeto de reciclagem, fabricação verde de ferro e aço, bem como economia de energia e controle de emissões, o equipamento tecnológico avançado em larga escala é aplicado para melhorar a eficiência da produção e da utilização de energia visando a redução do consumo de energia (ZHANG; XIE, 2017).

O artigo de Qin *et al.* (2019), apresenta um modelo de avaliação para estimativa de crescimento verde combinando um índice global de Malmquist-Luenberger, que é um padrão de crescimento econômico sem prejudicar a capacidade natural da qual a sociedade e os sistemas econômicos dependem. Em outras palavras, é minimizar o uso de recursos, bem como os impactos ambientais negativos, assim, maximizando os benefícios econômicos, tornando esse crescimento mensurável. Já o trabalho de Zhao *et al.* (2019) ressalta as tecnologias e os processos inovadores atuais na produção de ferro de baixo carbono da indústria siderúrgica, como a carga de aglomerados de ferro-carbono, o oxigênio de reciclagem de gás superior do

AF e a redução enriquecida com hidrogênio em AF. Com o resultado das melhorias nos equipamentos e na tecnologia de processo, as emissões de CO₂ foram reduzidas em aproximadamente 50%, quando comparado com a década de 70.

De forma resumida podem-se destacar as seguintes mudanças trazidas pela implementação do aço verde no processo produtivo nas siderúrgicas: (i) Menor emissão de CO₂ e CO; (ii) Melhoria no processo produtivo; (iii) Certificação carbono neutro; (iv) Redução de custos; (v) Menor temperatura de sopro; (vi) Baixo nível de enxofre resultante, eliminando a necessidade de dessulfuração do ferro; (vii) Menor desgaste do AF; (viii) Menor teor de cinzas, não prejudicando sua aplicação no AF.

Resultados

O método de pesquisa bibliográfica permitiu a notoriedade da relevância do tema aço verde, em função da tendência no aumento de publicações sobre o tema. A presença de vieses pode mascarar os resultados do estudo da verdade, comprometendo sua validade. Daí, a necessidade de avaliar a qualidade metodológica ou o risco de viés dos estudos incluídos na revisão sistemática é essencial.

Os principais trabalhos selecionados pela revisão sistemática da literatura para o tema proposto nesse artigo, de uma forma geral, abordaram as mudanças trazidas pela implementação do aço verde no processo produtivo nas siderúrgicas. A abordagem trazida abrange estudos sobre uma menor emissão de carbono, melhoria nos processos produtivos e menções à certificação carbono neutro. Em termos de abordagem trazida para siderurgia, tem-se temas de redução de custos, menor temperatura de sopro, baixo nível de enxofre resultante, menor desgaste do AF, menor teor de cinzas, sem prejudicar sua aplicação no AF. Das palavras-chaves mais empregadas, destacam-se: *Green Steel* (aço verde), *Charcoal* (carvão, nesse caso se refere ao carvão coque), *Iron* (materiais ferrosos) e *Steel* (aços). Conforme supracitado, a quantidade de artigos na temática dessa monografia é crescente em editoras e bases de pesquisas relevantes (como as bases de pesquisa *Web of Science* e *Science Direct*), porém a quantidade é pequena no total. Tem-se, portanto, dentro dos critérios de inclusão propostos, somente 19 artigos. Diante do exposto percebe-se a importância em promover e incentivar a siderurgia a carvão vegetal e biomassa. O tema de pesquisa, apesar de pouco discutido, apresenta uma alta nos últimos anos e instiga uma exploração sobre o papel das siderúrgicas brasileiras nas ações de

mitigação de emissões de gás. Destaca-se, para os trabalhos analisados, algumas possibilidades de ações já são empregadas na produção de ferro-gusa, como: a substituição total ou parcial do carvão mineral por carvão vegetal e biomassa; o uso da escória como subproduto na construção civil e outros citados ao longo do texto.

A certificação carbono neutro é um diferencial competitivo diante das siderúrgicas convencionais tendo em vista o acordo mundial na redução da emissão de gases nocivos ao meio ambiente. Além disso, o ferro-gusa obtido no emprego de carvão vegetal como agente redutor, permite a obtenção de produtos com baixo nível de elementos químicos contaminantes, principalmente enxofre e fósforo, sendo fundamental para a produção de aços de elevada qualidade e com menor número de processos na produção. Portanto, a descarbonização das indústrias deve ser avaliada cautelosamente a partir de uma perspectiva de pegada de carbono, evitando resultados contraproducentes.

Para trabalhos posteriores, espera-se o aprofundamento por estudo com a temática do impacto econômico do uso de coque de carvão vegetal na usina de carbono neutro. Este tema é muito importante, pois a utilização de coque de carvão vegetal altera toda a dinâmica do AF, tais como: insumos, rendimento de produção de ferro-gusa; condições termodinâmicas de redução do minério de ferro; manutenção do AF; tipo de refratário, dentre outros.

Referências

ANDRÉ, A. L.; CONCEIÇÃO, I. C.; De FREITAS, M. R.; TEIXEIRA, R. L. P. Green concrete production using partial replacement of crushed stone for PET. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, v. 8, p. e021005-e021005, 2021. Disponível em: <<https://periodicos.itp.ifsp.edu.br/index.php/IC/article/view/1763>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

APERAM. **5 razões que explicam porque só a Aperam tem o Aço Verde**. 2021. Disponível em: <<https://aperambioenergia.com.br/wp-content/uploads/2018/07/A%C3%A7o-Verde-5-raz%C3%B5es.pdf>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

AVB. Aço Verde Brasil. **Sustentabilidade**. 2021. Disponível em <<https://avb.com.br/sustentabilidade/>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

BACHNER, G.; MAYER, J.; STEININGER, K.W.; ANGER-KRAAVI, A.; SMITH, A.; BARKER, T. S. Uncertainties in macroeconomic assessments of low-carbon transition pathways - The case of the European iron and steel industry. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 172, p. 106631, jun. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106631>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

CARVALHO, A.P.V.; SILVA, V.; GRANDE, A.J. Avaliação do risco de viés de ensaios clínicos randomizados pela ferramenta da colaboração Cochrane. **Diagn Tratamento**, v. 18, n.1, 2012, p.38-44. Disponível em: <<http://files.bvs.br/upload/S/1413-9979/2013/v18n1/a3444.pdf>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

CARVALHO, Raquel Aparecida e SHIGUNOV NETO, Alexandre. Uma visão da pesquisa sobre formação de professores no Brasil presente em periódicos da área de educação: análise da produção acadêmica entre os anos de 2000 e 2017. **Revista Brasileira de Educação. Itapetininga**, v. 5, n. 3, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.itp.ifsp.edu.br/index.php/IC/article/view/1254/0>>. Acesso em 11 de out. 2022.

CONCEIÇÃO, I. C.; BARBOSA, M. O.; TEIXEIRA, R. L. P.; SILVA, P. C. D. Os discursos sobre a indústria 4.0 no setor de estampagem da indústria automobilística: uma revisão sistemática da literatura. **Revista de Casos e Consultoria**, v. 13, n. 1, 2022. Disponível em: <<https://periodicos.ufrn.br/casoseconsultoria/article/view/27861>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

CONEJERO, Marco Antônio. **Marketing de créditos de carbono: um estudo exploratório**. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto, 2006. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/96/96132/tde-05072006-122457/pt-br.php>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

FAN, Zhiyuan; FRIEDMANN, S. Julio. Low-carbon production of iron and steel: technology options, economic assessment, and policy. **Joule**, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 829-862, abr. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

FRAGELLI, Thaís Branquinho Oliveira. Honório HM, Santiago JF. **Fundamentos das Revisões Sistemáticas em Odontologia**. São Paulo: Quintessence Editora; 2018. 2020. Disponível em: <<https://www.scielosp.org/article/csc/2020.v25n3/1167-1168/pt/>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

GALVÃO, Taís Freire; PEREIRA, Mauricio Gomes. **Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração**. Epidemiologia e Serviços de Saúde, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 183- 184, mar. 2014. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5123/s1679-49742014000100018>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

GRIFFIN, Paul W.; HAMMOND, Geoffrey P. The prospects for ‘green steel’ making in a net-zero economy: a UK perspective. **Global Transitions**, [S.L.], v. 3, p. 72-86, 2021. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.glt.2021.03.001>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

KIM, J.; SOVACOO, B. K.; BAZILIAN, M.; GRIFFITHS, S.; LEE, J.; YANG, M.; LEE, J. Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. **Energy Research & Social Science**, v. 89, p. 102565, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102565>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

MANDOVA, H.; LEDUC, S.; WANG, C.; WETTERLUND, E.; PATRIZIO, P.; GALE, W.; KRAXNER, P. Possibilities for CO₂ emission reduction using biomass in European integrated steel plants. **Biomass and Bioenergy**, v. 115, 2018, p. 231-243. ISSN 0961-9534. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.021>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

MANDOVA, Hana; PATRIZIO, Piera; LEDUC, Sylvain; KJÄRSTAD, Jan; WANG, Chuan; WETTERLUND, Elisabeth; KRAXNER, Florian; GALE, William. **Achieving carbon-neutral iron and steelmaking in Europe through the deployment of bioenergy with carbon capture and storage.** *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 218, p. 118-129, maio 2019. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.247>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

MOHER, D. LIBERATI, A. TETZLAFF, J. ALTMANN, D. Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: Uma recomendação PRISMA. **Epidemiol. Serv. Saúde, Brasília**, v. 24, n. 2, pág. 335-342, junho. 2015 Disponível em <http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-49742015000200017&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 28 jul. 2022.

MOURÃO, Marcelo Breda. **Introdução a siderurgia.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.428p. Disponível em <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5635026/mod_resource/content/0/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20a%20Siderurgia%20-%20Mour%C3%A3o%2C%20MB.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2022.

MOUSA, Elsayed; WANG, Chuan; RIESBECK, Johan; LARSSON, Mikael. Biomass applications in iron and steel industry: an overview of challenges and opportunities. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 65, p. 1247-1266, nov. 2016. Elsevier BV. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.061>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

MUSLEMANI, Hasan; LIANG, XI; KAESEHAGE, Katharina; ASCUI, Francisco; WILSON, Jeffrey. Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for ‘green steel’ products. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 315, p. 128127, set. 2021. Elsevier BV. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128127>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

NWACHUKWU, Chinedu Maureen; WANG, Chuan; WETTERLUND, Elisabeth. Exploring the role of forest biomass in abating fossil CO₂ emissions in the iron and steel industry – The case of Sweden. **Applied Energy**, [S.L.], v. 288, p. 116558, abr. 2021. Elsevier BV. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116558>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

OLOFSSON, Elias. Regional effects of a green steel industry – fuel substitution and feedstock competition, **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 34, n. 1, 2018, P. 39-52. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2018.1543445>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

PAULIN ROMANOWSKI, J.; TEODORA ENS, R. AS PESQUISAS DENOMINADAS DO TIPO “ESTADO DA ARTE” EM EDUCAÇÃO. **Revista Diálogo Educacional**, [S. l.], v. 6, n. 19, p. p. 37–50, 2006. Disponível em:< <https://periodicos.pucpr.br/dialogoeducacional/article/view/24176>>. Acesso em: 11 out. 2022.

PINTO, Raphael Guimarães D.; SZKLO, Alexandre S.; RATHMANN, Regis. CO₂ emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector–From structural to intensity effects. **Energy Policy**, [S.L.], v. 114, p. 380-393, mar. 2018. Elsevier BV. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.040>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

PINTO, Marco Aurélio Cabral et al. Modelagem econômica para análise de perspectivas no mercado de créditos de carbono. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v.14, n.29, p. [115]-156, jun. 2008. Disponível em <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/7382>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

PLATAFORMA SUCUPIRA. Nota Qualis-periódicos. Brasília: CAPES, 2022. Disponível em <<https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/veiculoPublicacaoQualis/listaConsultaGeralPeriodicos.jsf>>. Acesso em: 11 out. 2022.

PRISMA GROUP. Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA. **Epidemiol. Serv. Saúde, Brasília**, v. 24, n. 2, p. 335-342, jun. 2015. Disponível em <http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-49742015000200017&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 28 jul. 2022.

PROTÁSIO, Thiago de Paula; LIMA, Michael Douglas Roque; SCATOLINO, Mário Vanoli; SILVA, Alanna Barishinikov; FIGUEIREDO, Izabel Cristina Rodrigues de; HEIN, Paulo Ricardo Gherardi; TRUGILHO, Paulo Fernando. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of Eucalyptus clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 164, p. 34-45, fev. 2021. Elsevier BV. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

QIN, XI; WANG, Xiaoling; XU, Yusen; WEI, Yawen. Exploring Driving Forces of Green Growth: empirical analysis on China's iron and steel industry. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 1122, 20 fev. 2019. MDPI AG. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.3390/su11041122>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

RAS, Kevin de; VIJVER, Ruben van de; GALVITA, Vladimir V; MARIN, Guy B; VAN GEEM, Kevin M. Carbon capture and utilization in the steel industry: challenges and opportunities for chemical engineering. **Current Opinion in Chemical Engineering**, [S.L.], v. 26, p. 81-87, dez. 2019. Elsevier BV. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.coche.2019.09.001>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Processo de Fabricação de Ferro-Gusa em Alto-forno**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração – ABM/Blucher, 2009. Disponível em <https://www.blucher.com.br/processo-de-fabricacao-de-ferro-gusa-em-alto-forno_9788577370030>. Acesso em: 28 jul. 2022.

RODRIGUES, Thaisa; BRAGHINI JUNIOR, Aldo. Charcoal: a discussion on carbonization kilns. **Journal Of Analytical and Applied Pyrolysis**, [S.L.], v. 143, p. 104670, out. 2019. Elsevier BV. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104670>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

SILVA, P. C. D.; de OLIVEIRA, L. L. V.; TEIXEIRA, R. L. P.; BRITO, M. L. D. A.; FILIPPE, A. R. T. M. Executive Functions in Alzheimer's Disease: A Systematic Review. **Journal of Alzheimer's Disease Reports**, n. Preprint, p. 1-19, 2022. Disponível em <<https://content.iospress.com/articles/journal-of-alzheimers-disease-reports/adr210059>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

SILVA, P.C. D.; ALMEIDA, M. C. Green Energy in the Light of Metaphors and Metonymia in Environmental Sustainability Discourses. **International Journal of Language and Linguistics**, v. 7, n. 4, December 2020. Disponível em <http://ijllnet.com/journals/Vol_7_No_4_December_2020/6.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2022.

SOUZA, Jhonathan Fernandes Torres de; PACCA, Sérgio A. Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.L.], v. 169, p. 105517, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105517>. Acesso em: 28 jul. 2022.

SUTHERLAND, Brandon R. Accelerating Green Steel in the EU. **Joule**, v. 4, n. 9, p. 1860-1861, 2020. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.08.018>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

TEIXEIRA, R. L. P.; TEIXEIRA, C. H. S. B.; de ARAUJO BRITO, M. L.; SILVA, P. C. D. Os discursos acerca dos desafios da siderurgia na indústria 4.0 no Brasil. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 12, p. 28290-28309, 2019. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n12-016>. Acesso em: 28 jul. 2022.

XI, Han; WU, Xiao; CHEN, Xianhao; SHA, Peng. Artificial intelligent based energy scheduling of steel mill gas utilization system towards carbon neutrality. **Applied Energy**, [S.L.], v. 295, p. 117069, ago. 2021. Elsevier BV. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117069>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

ZHANG, Xinyu; JIAO, Kexin; ZHANG, Jianliang; GUO, Ziyu. A review on low carbon emissions projects of steel industry in the World. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 306, p. 127259, jul. 2021. Elsevier BV. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127259>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

ZHANG, Fuming; XIE, Jianxin. **Green Manufacturing Process of Shougang Jingtang Steel Plant**. The Minerals, Metals & Materials Series, [S.L.], p. 17-29, 2017. Springer International Publishing. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-52333-0_2>. Acesso em: 28 jul. 2022.

ZHAO, Jun; ZUO, Haibin; WANG, Yajie; WANG, Jingsong; XUE, Qingguo. Review of green and low-carbon ironmaking technology. **Ironmaking & Steelmaking**, [S.L.], v. 47, n. 3, p. 296-306, 25 jul. 2019. Informa UK Limited. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1080/03019233.2019.1639029>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

ZORZELA, Liliane; LOKE, Yoon K; IOANNIDIS, John P; GOLDBER, Su; SANTAGUIDA, Pasqualina; ALTMAN, Douglas G; MOHER, David; VOHRA, Sunita. **PRISMA harms checklist: improving harms reporting in systematic reviews**. *Bmj*, [S.L.], p. 157, 1 fev. 2016. BMJ. <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.i157>. Disponível em: <<https://www.bmj.com/content/352/bmj.i157>>. Acesso em: 20 jul. 2022.