

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

INJEÇÃO DE BIOMASSA EM ALTOS-FORNOS:
UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Jamile Guarda

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Eduardo Osório

Porto Alegre
2023

CIP - Catalogação na Publicação

Guarda, Jamile
INJEÇÃO DE BIOMASSA EM ALTOS-FORNOS: UMA REVISÃO
SISTEMÁTICA DA LITERATURA / Jamile Guarda. -- 2023.
54 f.
Orientador: Eduardo Osório.

Coorientador: Hector Alejandro Picarte Fragoso.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Injeção de biomassa em altos-fornos. 2. Revisão
sistemática da literatura . I. Osório, Eduardo,
orient. II. Picarte Fragoso, Hector Alejandro,
coorient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, as instituições Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela oportunidade de aprendizagem no âmbito científico.

Ao professor Eduardo Osório pela orientação e contribuição para a realização deste trabalho.

Ao professor Antônio Cezar Faria Vilela pelo aporte durante a minha formação acadêmica e pela oportunidade de integrar a equipe de pesquisas do Laboratório de Siderurgia (LaSid) da UFRGS.

Ao doutorando Hector Alejandro Picarte Fragoso pelo tempo dedicado no meu ensinamento ao longo da realização desse trabalho.

Ao grupo do LaSid da UFRGS pela troca de conhecimento ao longo dos anos.

A minha família, amigos e colegas de curso que me apoiaram durante a minha graduação.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram na minha jornada de formação.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABELAS.....	VI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	VII
RESUMO.....	VIII
ABSTRACT.....	X
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivos Gerais	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3 VISÃO GERAL DA SIDERURGIA.....	5
3.1 Rotas de Produção de Aço.....	5
3.2 Processo do Alto-forno.....	6
3.3 Sistema de Injeção de Carvão Pulverizado.....	9
4 METODOLOGIA.....	13
5 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA BIOMASSA E SUA OTIMIZAÇÃO PARA O PROCESSO SIDERÚRGICO	17
5.1 Características Gerais	17
5.2 Secagem.....	22
5.3 Tratamentos Termoquímicos.....	24
5.3.1 <i>Efeito das Variáveis dos Tratamentos</i>	26
5.3.2 <i>Tratamento Adequado para a Biomassa</i>	27
6 APLICAÇÃO DA BIOMASSA NOS PROCESSOS SIDERÚRGICOS	28
6.1 Impacto da Inserção da Biomassa no Alto-forno	28
6.2 Influência dos Parâmetros de Combustão no Comportamento da Biomassa.....	30
6.3 Faixa de Propriedades das Biomassas	31
6.4 Uso de Misturas de Combustíveis: O Que a Literatura Diz Sobre	32
6.5 Países, Centros e Tipos de Pesquisa na Área de Biomassa	32
7 USO DE BIOMASSA PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂	36
8 CONCLUSÕES.....	38

9	TRABALHOS FUTUROS	40
10	REFERÊNCIAS.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Rotas de produção de ferro e aço.....	5
Figura 3.2 Emissões de CO ₂ em uma usina siderúrgica integrada.....	6
Figura 3.3 Visão geral do processo de alto-forno.....	7
Figura 3.4 Processo de injeção nos altos-fornos.....	10
Figura 4.1 Diagrama de fluxo relativo à metodologia de revisão sistemática.....	14
Figura 5.1 Curva de combustão do carvão de bambu e de outros dois carvões fósseis.....	26
Figura 6.1 Taxas de agentes redutores auxiliares em diferentes casos de injeção.....	29
Figura 6.2 Morfologia do carvão de bambu (a) e carvão antracito (b).....	31
Figura 6.3 Países e porcentagem de estudos conduzidos na área de injeção de biomassa em altos-fornos.....	33
Figura 6.4 Classe de estudos no contexto da biomassa para injeção em altos-fornos, em %.....	35
Figura 7.1 Impacto nas emissões de CO ₂ pela aplicação de biocarvão por injeção, via coque ou parte de biobriquete ou uma combinação dos anteriores.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Propriedades típicas de agentes redutores de alto-forno.....	8
Tabela 3.2 Calor de combustão parcial de carbono em vários agentes redutores auxiliares comparado com carbono em coque.....	11
Tabela 3.3 Taxa de substituição de coque real para diferentes agentes redutores auxiliares em temperatura ambiente.....	11
Tabela 4.1 <i>Strings</i> de busca utilizadas.....	13
Tabela 5.1 Composição química de carvões e biomassas (% em massa, base seca).....	17
Tabela 5.2 Tecnologias de secagem de biomassa.....	22
Tabela 5.2 Comparação de tecnologias de conversão termoquímica.....	24

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

RSL – Revisão Sistemática da Literatura

GEE – Gás de Efeito Estufa

AF – Alto-forno

BF – *Blast Furnace*

FEA – Forno Elétrico a Arco

EAF – *Electric Arc Furnace*

RD – Redução Direta

RF – Redução-fusão

BOF – *Blast Oxygen Furnace*

DRI – *Direct Reduction Iron*

HP – Alta Pressão

LP – Baixa Pressão

HTC – Carbonização Hidrotérmica

PCI – Injeção de Carvão Pulverizado

HM – *Hot Metal*

MV – Matéria Volátil

C_{fix} – Carbono Fixo

ST – Serragem Torrefada

CV – Carvão Vegetal

Bc – Biocoque

Bb – Biobriquete

RESUMO

Atualmente, a indústria siderúrgica representa de 7-9% na geração global de emissões de dióxido de carbono (CO₂) em função da aplicação primordial do carvão mineral como gerador de calor e agente redutor. Na busca por matérias-primas sustentáveis para a possível substituição do carvão de base fóssil, a aplicação de biomassa na injeção em altos-fornos tem tomado espaço na discussão.

A literatura atual apresenta uma grande quantidade de estudos na temática de transição de combustíveis fósseis para renováveis a base de biomassa. Sendo assim, foi realizado uma síntese de um conjunto de trabalhos publicados no período de 2015 a 2021 com base na metodologia de revisão sistemática da literatura (RSL).

Nesta revisão detalhada, duas bases de dados foram utilizadas para a busca de estudos. Palavras-chave foram definidas seguindo o escopo da pesquisa e utilizadas para compor as *strings* de busca, que foram aplicadas nas bases de dados e resultaram em um número total de 1297 pesquisas. Modificações foram realizadas e no fim se chegou a um valor de 63 trabalhos. O conjunto de trabalhos foram analisados para servir como argumento para uma série de questões elaboradas alusivas a injeção de biomassa em altos-fornos, que levam para discussão os tipos de biomassa, tratamentos de biomassa testados, impacto desses tratamentos sobre as suas propriedades e qual é o mais adequado, o que já foi testado na prática de injeção, impacto da inserção de biomassa em altos-fornos, como os parâmetros de combustão do processo de injeção afetam o comportamento da biomassa, faixa de propriedades, o que a literatura diz sobre o uso de misturas de biomassa com carvões minerais e outros aditivos, países, centros de pesquisa, e quais tipos de pesquisa vem sendo conduzidas no âmbito da aplicação de biomassa para injeção e qual o potencial de redução das emissões de CO₂ com o seu uso.

ABSTRACT

Currently, the steel industry represents 7-9% of the global generation of carbon dioxide (CO₂) emissions due to the primary application of mineral coal as a heat generator and reducing agent. In the search for sustainable raw materials for the possible replacement of fossil-based coal, the application of biomass in injection into blast furnaces has taken up space in the discussion.

The current literature presents a large number of studies on the theme of transition from fossil fuels to biomass-based renewables. Therefore, a synthesis of a set of studies published in the period from 2015 to 2021 was carried out based on the systematic literature review (SLR) methodology.

In this detailed review, two databases were used to search for studies. Keywords were defined following the scope of the research and used to compose the search *strings*, which were applied to the databases and resulted in a total number of 1297 searches. Modifications were made and in the end a value of 63 articles was reached. The set of articles were analyzed to serve as an argument for a series of elaborate questions alluding to the injection of biomass in blast furnaces, which lead to discussion the types of biomass, tested biomass treatments, impact of these treatments on their properties and what is the most appropriate, what has already been tested in injection practice, impact of inserting biomass in blast furnaces, how the combustion parameters of the injection process affect the behavior of biomass, range of properties, what the literature says about the use of mixtures of biomass with mineral coal and other additives, countries, research centers, and what types of research have been conducted within the scope of applying biomass for injection and what is the potential for reducing CO₂ emissions with its use.

1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, o tópico emissões de CO₂ se apresenta em alta, uma vez que esse gás pertence ao conjunto de gases de efeito estufa (GEE) e é apontado como sendo o principal causador do aquecimento global. O Acordo de Paris – tratado internacional juridicamente vinculativo sobre as alterações climáticas – apresenta como objetivo geral o mantimento do aumento da temperatura média global abaixo de 2 °C acima dos níveis pré-industriais e a busca de esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. Mas, a necessidade de limitar o aquecimento global a 1,5 °C até o final deste século se faz presente. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU, cruzar o limite de 1,5 °C pode levar ao desencadeamento de impactos mais severos nas mudanças climáticas. Para limitar o aquecimento global a 1,5 °C, as emissões de GEE devem sofrer uma redução de 43% até 2030 (“The Paris Agreement | UNFCCC”, 2015).

Na intenção de atender as expectativas estabelecidas no Acordo de Paris, países buscam por possíveis meios para a redução das emissões de CO₂, com uma atenção especial no setor siderúrgico. A produção de aço é indicada como sendo um dos processos na indústria com maior parcela das emissões de CO₂. Segundo o relatório da Agência de Energia Internacional (IEA), a indústria de aço contabilizou cerca de 7% das emissões de CO₂ global em 2020 (“Iron and Steel Technology Roadmap – Analysis”, 2020). A causa para o correspondente valor está atrelada a rota primordial na produção de ferro e aço chamada de rota integrada (YOKOJI *et al.*, 2007). Cerca de 70,8% do volume total da produção de aço é proveniente da mesma (“World Steel in Figures 2021”, 2021). O carro chefe desta rota é o alto-forno, o qual utiliza o carvão fóssil como principal matéria-prima para a produção de energia e gases redutores do minério de ferro na produção de ferro-gusa.

O carvão fóssil é a fonte geradora do gás CO₂ durante as reações de combustão e a reação de produção do gás redutor, monóxido de carbono (CO), chamada de reação de Boudouard, ocorridas no interior dos altos-fornos. Na procura por possíveis matérias-primas sustentáveis a serem utilizadas como substitutas do carvão fóssil a fim contribuir com a diminuição das emissões de CO₂, a biomassa tem chamando grande atenção devido ao seu

potencial econômico e ambiental quando aplicada nos processos da indústria siderúrgica, maiormente na tecnologia de injeção em altos-fornos.

Uma ampla gama de estudos com alusão na transição de combustíveis fósseis para combustíveis renováveis a base de biomassa tem sido conduzida nos últimos anos. Portanto, foi realizado uma síntese de um conjunto de trabalhos publicados no período de 2015 a 2021 seguindo a metodologia de revisão sistemática da literatura. Essa revisão apresenta como objetivo responder um conjunto de perguntas respeitantes a aplicação da biomassa no setor siderúrgico, em especial na injeção em altos-fornos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a injeção de biomassa nos altos-fornos de artigos publicados no período de 2015 a 2021.

2.2 Objetivos Específicos

A fim de se alcançar o objetivo geral desta revisão detalhada, os objetivos específicos são:

- Determinar as biomassas estudadas na aplicação para injeção em altos-fornos;
- Definir os tratamentos de biomassas testados, seus impactos sobre as propriedades, rendimentos e comportamento reacional da biomassas e, por fim, qual tratamento é mais adequado;
- Apontar o que já foi testado na prática de injeção de altos-fornos a coque com biomassa;
- Indicar o impacto da inserção da biomassa na injeção em altos-fornos;
- Definir como os parâmetros de combustão do processo de injeção afetam o comportamento da biomassa;
- Estabelecer a faixa de propriedades das biomassas que viabilizam o seu uso na injeção, tanto operacional como economicamente;
- Apontar o que a literatura apresenta sobre o uso de misturas de biomassas com carvões minerais e outros aditivos;
- Determinar os países e centros de pesquisa que tem explorado mais o tema do uso da biomassa na injeção em altos-fornos;

- Indicar quais tipos de pesquisa vêm sendo realizado no âmbito da aplicação da biomassa para injeção;
- Definir qual o potencial de redução das emissões de CO₂ com o uso das biomassas no processo siderúrgico, em especial, na injeção em altos-fornos.

3 VISÃO GERAL DA SIDERURGIA

3.1 Rotas de Produção de Aço

A produção atual de ferro e aço em usinas siderúrgicas se sucede mediante a quatro diferentes rotas: altos-fornos (AF), fornos elétricos a arco (FEA), redução direta (RD) e redução-fusão (RF), ilustradas na Figura 3.1.

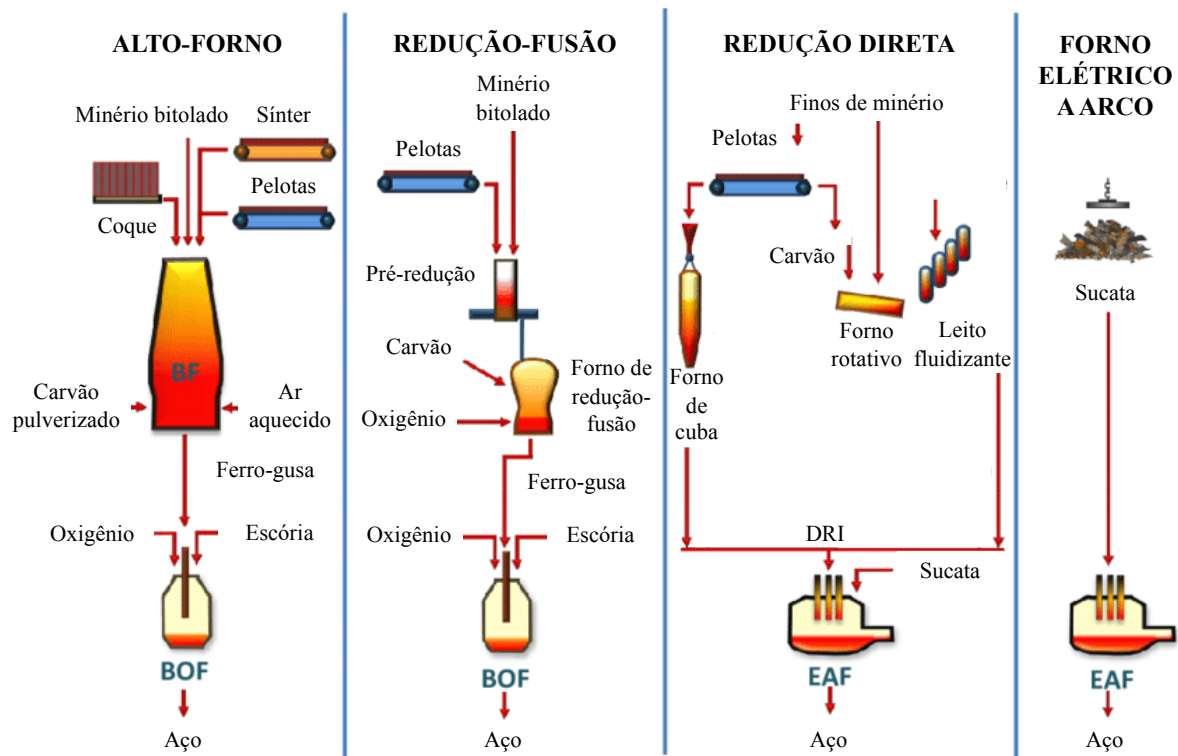


Figura 3.1 Rotas de produção de ferro e aço. Fonte: adaptado de (ZULHAN, 2013).

A principal rota de produção de aço é a do alto-forno. Cerca de 70% da produção mundial de aço provém dessa rota, onde o minério de ferro é reduzido através de agentes redutores como coque e carvão vegetal. Ocupando a segunda posição, fornos elétricos a arco produzem aço por meio da sucata de aço reciclada, sendo responsáveis por aproximadamente 25% da produção de aço no mundo. A rota redução direta produz aço a partir de ferro altamente metálico originado através de reações de redução de óxidos ferrosos, sem a presença da fase líquida e com a utilização de redutores no estado sólido e gasoso, sendo o ferro-esponja ou DRI

(*Direct Reduction Iron*), utilizado como substituto da sucata no FEA. A rota RD gera cerca de 5% do total de aço produzido mundialmente. Por fim, representando aproximadamente 0,4% da produção mundial de aço, a rota redução-fusão gera ferro primário líquido em processos que não utilizam coque (SUOPAJÄRVI *et al.*, 2018).

Hoje, os combustíveis fósseis são a matéria-prima central utilizada como fonte de calor e agente redutor na rota do alto-forno, seja na forma de carvão ou coque – produto carbonoso resultante do processo de coqueificação, representando, assim, uma significativa parcela nas emissões de CO₂ no setor siderúrgico. Do total das emissões de CO₂ geradas no mundo, 7% provém da indústria siderúrgica (HOLAPPA, 2020). Como demonstrado na Figura 3.2, cerca de 1,8 toneladas de emissão de CO₂ são geradas para a produção de 1 tonelada de bobina laminada a quente com a rota do alto-forno (SUOPAJÄRVI *et al.*, 2018).

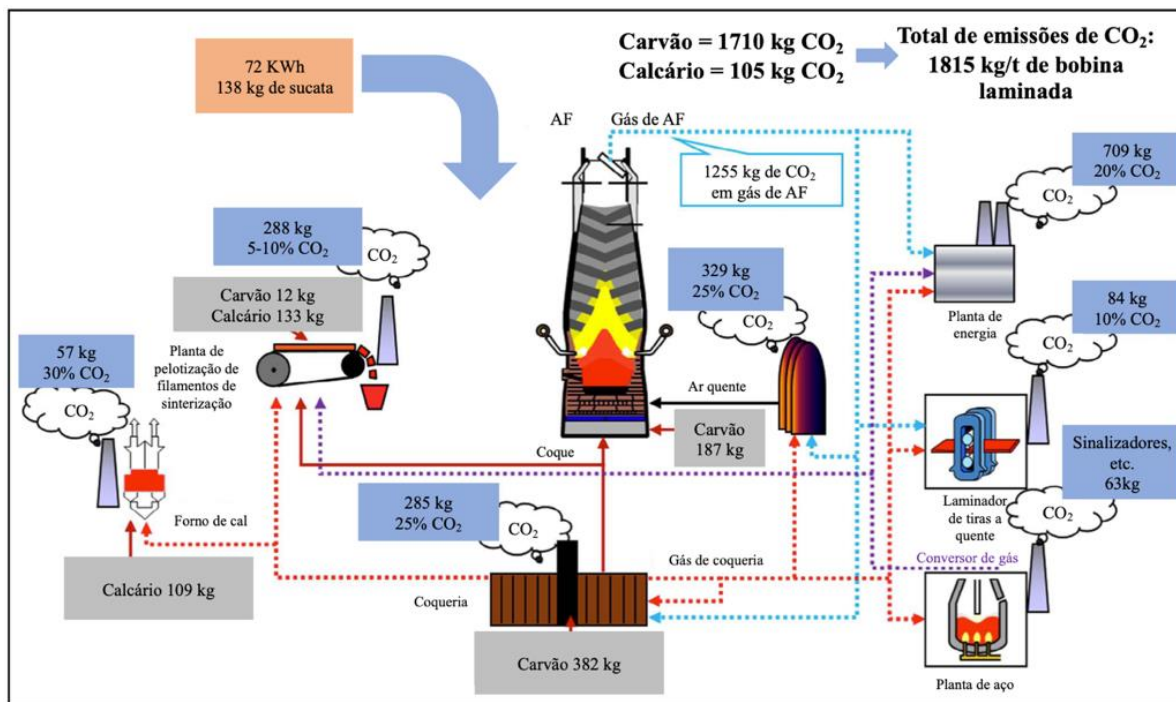


Figura 3.2 Emissões de CO₂ em uma usina siderúrgica integrada. Fonte: adaptado de (SUOPAJÄRVI *et al.*, 2018).

3.2 Processo do Alto-forno

O alto-forno, representado esquematicamente na Figura 3.3, é um reator que opera com base no princípio de fluxo contracorrente, ou seja, a carga sólida constituída por sínter de minério de ferro, coque e fundentes a ser reduzida carbotermicamente é adicionada na parte superior (topo) do alto-forno, enquanto os agentes redutores auxiliares como gases e carvão

pulverizado são inseridos através da tecnologia de injeção na parte inferior deste, com direção para a parte superior, mantendo um regime permanente. O resultado é a produção de um sistema líquido, composto essencialmente por ferro e carbono em solução, a uma temperatura de aproximadamente 1500 °C chamado de ferro-gusa. Subprodutos como escória – sistema líquido oxidado – e o gás de topo são gerados durante a produção de ferro nos altos-fornos.

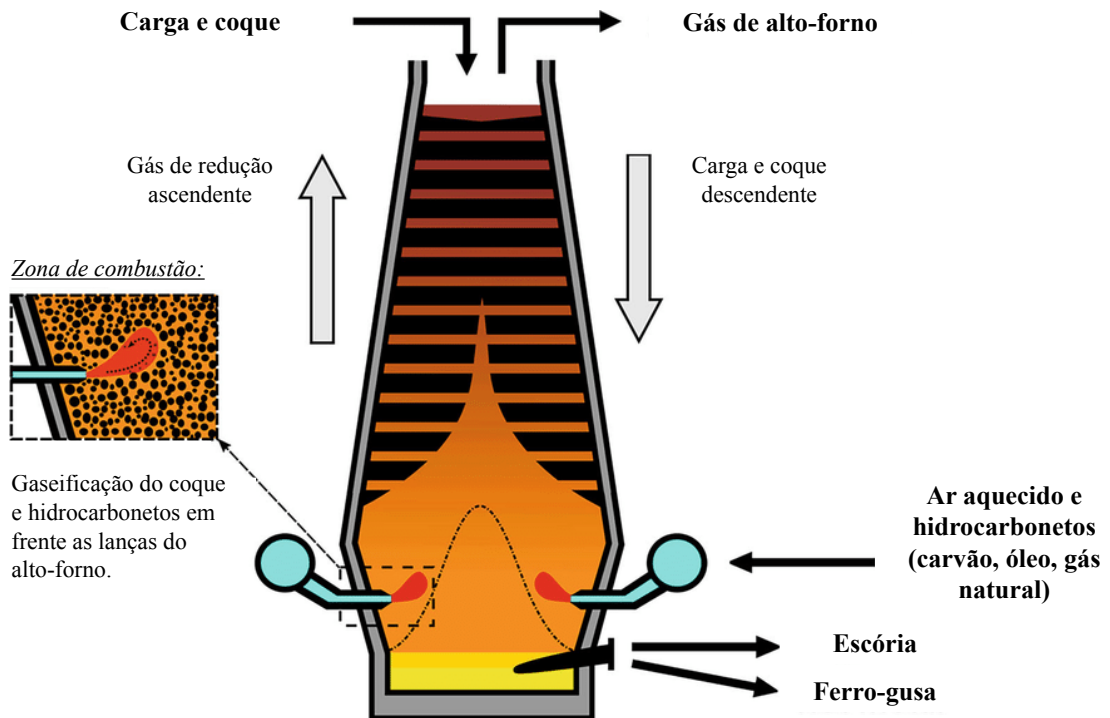


Figura 3.3 Visão geral do processo de alto-forno. Fonte: adaptado de (JAHANSHAHI *et al.*, 2015).

Na Tabela 3.1 é apresentada as composições típicas de agentes redutores sólidos e líquidos usados no alto-forno. Para assegurar uma operação eficiente do alto-forno, é essencial que o teor de carbono e o valor calorífico dos agentes redutores sejam altos. Dessa forma, o material que melhor atende a esses dois aspectos é o coque.

Tabela 3.1 Propriedades típicas de agentes redutores de alto-forno.

Componente	Coque	Carvão pulverizado	Resíduos plásticos	Óleo pesado
<i>Análise elementar</i>				
<i>(% em massa)</i>				
C	87-92	80-85	61-67,6	84-88
H	~0,4	3,5-5	14,0-18,2	10-10,5
O	~0,5	3-8	9,1-17,8	NA
N	~0,4	~1,5	0,5-1,5	NA
S	0,6-0,8	0,4	<0,01	0,3-2,0
<i>Análise imediata</i>				
<i>(% em massa)</i>				
Carbono fixo	87-92	57-76	6-7	NA
Matéria volátil	0,2-0,5	8-38	80-89	NA
Cinzas	8-11	5-11	6-12	0,02
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	~30	30-34	27-35	40,04

Fonte: adaptado de (SUOPAJÄRVI *et al.*, 2018).

A adição da carga metálica, do coque e também da injeção de carvão pulverizado (PCI) no alto-forno traz consigo elementos nocivos ao processo do alto-forno. Zinco e Chumbo contribuem para a deterioração dos equipamentos, desgastando o revestimento dos refratários do alto-forno. Assim como os elementos anteriormente mencionados, Potássio, Sódio, Fósforo e Enxofre impactam de forma negativa no processo e reações no alto-forno. Os álcalis Potássio e Sódio, por exemplo, reduzem a resistência do coque e pelotas, prejudicando a drenagem da distribuição de gases de produtos líquidos, e aumentam o consumo de redutores. Portanto, a escolha dos materiais de entrada no alto-forno é essencial para amenizar o efeito gerado pelos elementos nocivos.

3.3 Sistema de Injeção de Carvão Pulverizado

A tecnologia de injeção de agentes redutores na região inferior do alto-forno através das ventaneiras é um método amplamente utilizado no âmbito siderúrgico. Cerca de 65% dos altos-fornos em nível mundial operam usando esta tecnologia. Hoje, o carvão pulverizado é a matéria-prima mais utilizada na injeção, contabilizando um valor de aproximadamente 50% da sua aplicação na operação mundial de altos-fornos (BABICH, 2021). O gás natural é o segundo combustível mais utilizado. No Brasil, todos os altos-fornos a coque utilizam a injeção de carvão pulverizado nas ventaneiras.

As reações que ocorrem no processo de injeção de carvão pulverizado nos altos-fornos são representadas na Figura 3.4

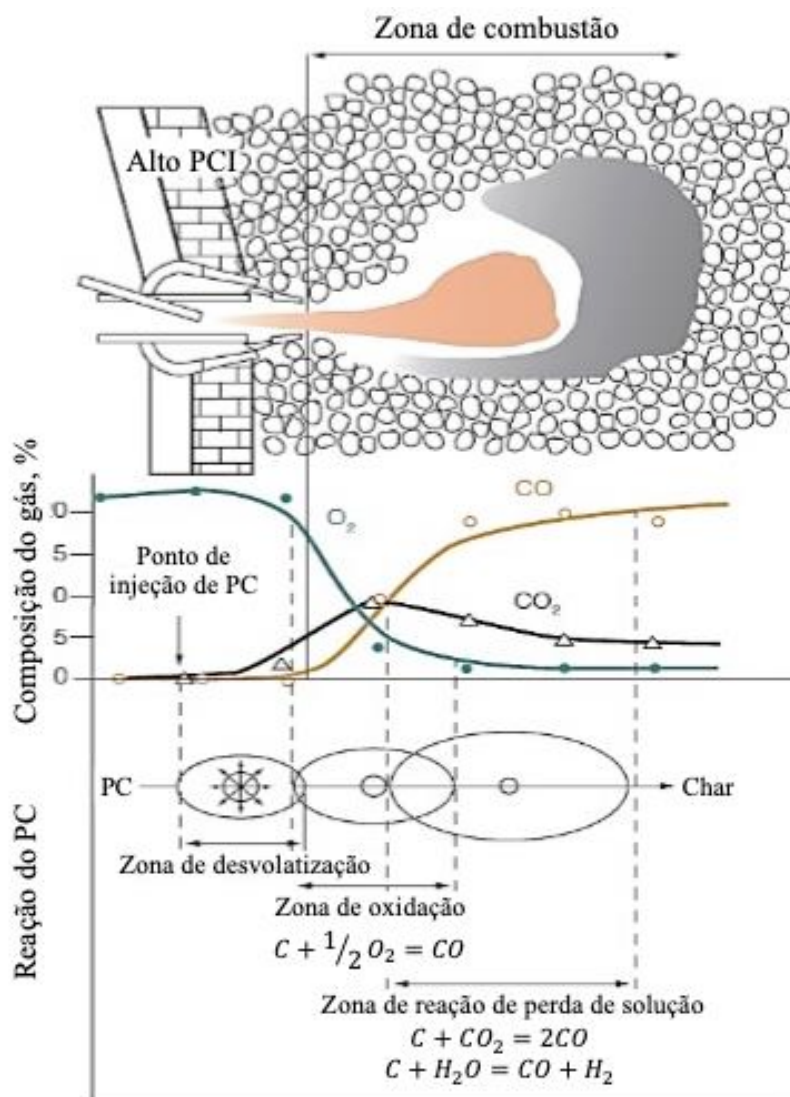


Figura 3.4 Processo de injeção nos altos-fornos. Fonte: adaptado de (MOUSA, 2019).

No método de injeção de carvão pulverizado, as partículas de carvão são injetadas na zona de combustão através de ventaneiras, combinadas com ar quente, podendo ser enriquecido com oxigênio. O carvão injetado sofre um sequência de reações como absorção de calor, gaseificação e início da sua combustão após deixar a lanca de injeção.

O principal objetivo da aplicação deste mecanismo na produção de aço é a redução do consumo de coque, matéria-prima de maior valor no processo e favorecedora das emissões de CO₂. Os agentes redutores auxiliares e fontes alternativas de energia conseguem, em geral, suprir os requisitos térmicos e químicos que o coque oferece. Para uma substituição eficiente, é necessário satisfazer condições como demanda de calor, que aumenta com a queda da relação C/H em agentes redutores auxiliares, demonstrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Calor de combustão parcial de carbono em vários agentes redutores auxiliares comparado com carbono em coque.

Combustível	Relação C/H	Calor (kJ/kg C)	Calor liberado (%)
Coque	200-500	9800	100
Antracito	33-50	9400	96
Carvão betuminoso alto-volátil	10-12	8400	85
Óleo combustível	7,7-9,0	7500	77
<i>Hidrocarbonetos:</i>			
Pentano C ₅ H ₁₂	5	6740	69
Etano C ₂ H ₆	4	5650	58
Metano CH ₄	3	2970	30

Fonte: adaptado de (BABICH, 2021).

A eficiência dos agentes redutores auxiliares na injeção em altos-fornos é indicada pela taxa de substituição de coque, que é a relação entre a quantidade de coque economizado e a quantidade de agente redutor injetado. A taxa de substituição de coque apresenta como definições clássicas: teórica (depende do teor de carbono e da energia), corrigida (calculada levando em conta outras mudanças na energia e balanço de massa. Considera a qualidade do carvão e parâmetros operacionais (T_{sopro} , % oxigênio, etc.)) e real (obtida na operação do alto-forno). A estimativa da taxa de substituição de coque real para diferentes agentes redutores auxiliares em temperatura ambiente é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Taxa de substituição de coque real para diferentes agentes redutores auxiliares em temperatura ambiente.

Agente redutor auxiliar	Taxa de substituição de coque
Gás natural	0,8-0,9 kg m ⁻³ ou 0,95-1,1 kg kg ⁻¹
Gás de coqueria	0,4-0,45 kg m ⁻³
Hidrogênio	1,9-2,0 kg kg ⁻¹
Óleo pesado	1,15-1,35 kg kg ⁻¹
Antracito	1,0-1,1 kg kg ⁻¹
Carvão betuminoso	0,75-0,9 kg kg ⁻¹
Carvão sub-betuminoso	0,65 kg kg ⁻¹
Linhito	0,5 kg kg ⁻¹

Carvão vegetal	0,9-1,1 kg kg ⁻¹
Biomassa torrefada	0,25-0,4 kg kg ⁻¹

Fonte: adaptado de (BABICH, 2021).

A taxa de substituição de coque por agentes redutores auxiliares é dependente de: tipo e propriedades químicas, físicas e mecânicas dos agentes redutores auxiliares, eficiência de conversão, taxa de injeção, qualidade da carga, distribuição do fluxo de gás e alterações concomitantes dos parâmetros operacionais do alto-forno. É importante não apenas ter um alto valor nominal de taxa de substituição de coque, mas também evitar sua queda notável pelo aumento das taxas de injeção (BABICH, 2021). Apesar do hidrogênio apresentar o maior valor de taxa de substituição de coque quando comparado aos demais agentes redutores presentes na Tabela 3.3, sua injeção em altos-fornos pode acarretar no aumento da demanda de calor na zona superior do alto-forno devido a redução do hidrogênio ser um processo endotérmico. Caso o fornecimento de calor seja insuficiente, uma diminuição na eficiência de redução do reator poderá ocorrer. É possível observar que o carvão vegetal apresenta um valor próximo ao do antracito – exceção entre os carvões fósseis –, o que favorece a sua utilização como agente substituto do carvão mineral na injeção em altos-fornos. Mais de 400 altos-fornos no mundo utilizam a tecnologia de injeção, sendo mais de 70% utilizando alguma matéria-prima sólida. O Brasil faz o uso de carvão vegetal em mini altos-fornos com uma taxa de injeção de 100-190kg/t. Outros países como Suécia tem testado a aplicação de carvão vegetal em mini altos-fornos (HUANG; NG; GIROUX, 2020).

4 METODOLOGIA

O presente estudo põe em foco a revisão sistemática da literatura no processo de injeção de biomassa no alto-forno. Devido a grande variedade de formatos de pesquisa sobre o tema, este trabalho fornece uma análise sistemática e estruturada do estado da arte, revisando as pesquisas conduzidas na área de interesse no período de 2015 a 2021 com propósito de identificar e reunir o que já é conhecido.

A revisão foi realizada utilizando duas bases de dados, Scopus e Web of Science. Palavras-chave foram definidas de acordo com o escopo do trabalho e, por conseguinte, utilizadas na composição das *strings* de busca. A *string* de busca é definida como sendo a união de termos relacionados as questões de pesquisa. Ademais, operadores lógicos (E, OU, e NÃO) são aplicados. Na Tabela 4.1 é apresentado as *strings* de busca utilizadas.

Tabela 4.1 *Strings* de busca utilizadas.

Base de dados	<i>String</i> de busca
Scopus	(“blast furnace” OR “blast furnaces” OR “iron making”) AND (tuyere* OR raceway OR pci OR pulveri* OR inject* OR dust) AND (flame OR metal* OR numeric* OR efficiency OR combust* OR conversion* OR gasification OR pyrolysis OR burn* OR unburnt OR reactivity OR fuel*) AND NOT (cement*)
Web of Science	(“blast furnace” OR “blast furnaces” OR “iron making”) AND (tuyere* OR raceway OR pci OR pulveri* OR inject* OR dust) AND (flame OR metal* OR numeric* OR efficiency OR combust* OR conversion* OR gasification OR pyrolysis OR burn* OR

unburnt OR reactivity OR fuel*) AND NOT
(cement*)

As *strings* foram aplicadas nas bases de dados mencionadas anteriormente. Como ilustrado na Figura 4.1, ao todo, 1297 trabalhos de pesquisa retornaram como resultado da busca, 736 Scopus e 561 Web of Science. O ano de publicação dos trabalhos de pesquisa variam de 2015 a 2020, incluindo uma nova busca para o ano de 2021. Realizou-se a remoção de duplicatas totalizadas no valor de 410.

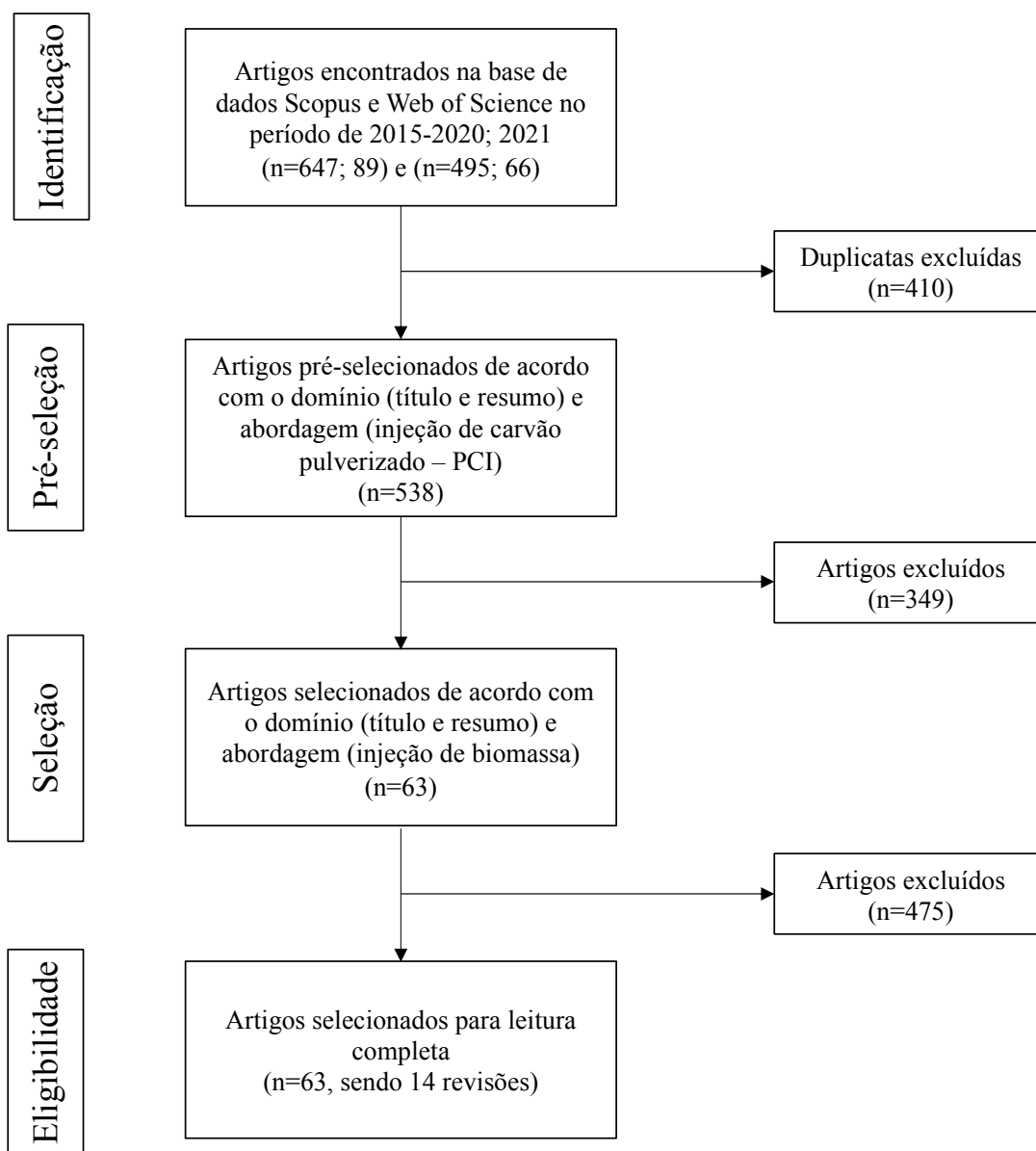


Figura 4.1

Diagrama de fluxo relativo à metodologia de revisão sistemática.

Dos 887 trabalhos restantes, uma pré-seleção foi realizada, aplicando como estratégia a leitura do domínio, isto é, título e resumo, considerando como critério de inclusão e exclusão a abordagem do trabalho, no caso trabalhos que tratam da injeção de carvão pulverizado no alto-forno. 349 trabalhos foram excluídos por não se enquadrarem na regra estabelecida.

Na etapa de seleção, os 538 trabalhos provenientes da fase anterior foram submetidos a uma nova avaliação onde novamente foi considerado como estratégia a leitura do domínio, contudo, conduzida de forma minuciosa, sendo o critério de inclusão nessa etapa trabalhos que abordam injeção de biomassa em altos-fornos. Foram excluídos 475 trabalhos.

Foram elegíveis 63 trabalhos de pesquisa para a leitura completa, sendo 14 revisões.

Os objetivos acurados desta revisão sistemática da literatura sobre injeção de biomassa em altos-fornos são apresentados na forma de questões de pesquisa, conforme listado abaixo:

1. Quais as biomassas estudadas na aplicação para injeção em altos-fornos?
2. Quais os tratamentos de biomassas testados?
3. Qual o impacto dos tratamentos da biomassa sobre as suas propriedades físico-químicas, rendimentos bem como o seu comportamento reacional?
4. Qual é o tratamento mais adequada para a utilização da biomassa para injeção?
5. O que já foi testado na prática de injeção de altos-fornos a coque com a biomassa?
6. Qual o impacto da inserção da biomassa na injeção de um alto-forno a coque?
7. Como os parâmetros de combustão do processo de injeção afetam o comportamento da biomassa?
8. Qual a faixa de propriedades das biomassas que viabilizam o seu uso na injeção tanto operacional como economicamente?
9. O que a literatura nos revela sobre o uso de misturas de biomassas com carvões minerais e outros aditivos?
10. Quais os países e centros de pesquisa tem explorado mais o tema do uso da biomassa na injeção em altos-fornos?
11. Quais os tipos de pesquisa vêm sendo realizado no âmbito da aplicação da biomassa para injeção?

12. Qual o potencial de redução das emissões de CO₂ com o uso das biomassas no processo siderúrgico, em especial, na injeção em altos-fornos?

Estas foram as questões de investigação que o estudo respondeu ao decorrer da revisão detalhada.

5 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA BIOMASSA E SUA OTIMIZAÇÃO PARA O PROCESSO SIDERÚRGICO

5.1 Características Gerais

A termo “biomassa” é usado para nomear qualquer matéria-prima proveniente de plantas e animais. A gama de biomassas disponíveis hoje é diversa, incluindo resíduos dos setores industriais e agrícolas, madeira e restos florestais, subprodutos orgânicos e resíduos orgânicos. O uso da biomassa na produção de combustíveis e químicos é apontado como sendo uma tecnologia altamente promissora na busca da redução do uso de matéria fóssil no setor siderúrgico, em específico na injeção de combustíveis nos altos-fornos.

Na Tabela 5.1 é apresentado os valores da análise química como matéria volátil (MV), carbono fixo (C_{fix}), cinzas e elementos das biomassas estudadas nos trabalhos em análise para a aplicação na injeção em altos-fornos. Carvões fósseis também são apresentados.

Tabela 5.1 Composição química de carvões e biomassas (% em massa, base seca).

Material	C	H	O	S	P	MV	C_{fix}	Cinzas	Referência
Antracito	90,22	2,85	5,03	0,96	NA	NA	NA	NA	(BABICH, 2021)
Betuminoso	78,35	5,75	11,89	2,43	NA	NA	NA	NA	
Sub-betuminoso	56,11	6,62	35,31	0,84	NA	NA	NA	NA	
Linhito	42,59	7,40	48,02	1,15	NA	NA	NA	NA	
Lascas de madeira	51,59	6,14	41,57	0,07	NA	NA	NA	NA	
Resíduos de madeira	49,62	6,34	42,89	0,07	NA	NA	NA	NA	
Resíduo bruto de serraria	49,19	5,97	44,33	0,00	NA	85,24	14,38	0,39	(NG; GIROUX; TODOSCHUK, 2018)

Finos de carvão	67,26	2,44	10,90	0,11	NA	34,59	48,80	10,62	(SILVA; ASSIS, 2019)
Coque verde de petróleo	89,51	3,63	1,89	0,61	NA	14,90	79,44	0,47	
Semi-coque (GZ)	74,27	2,05	3,43	0,44	NA	7,16	75,83	9,59	(XU <i>et al.</i> , 2015)
Semi-coque (LT)	70,60	2,15	5,20	0,54	NA	14	63,98	15,54	
Bagaço de cana de açúcar ^a	NA	NA	NA	NA	NA	78,89	11,11	10	(CAMPOS DE ASSIS <i>et al.</i> , 2020)
Casca de arroz ^a	NA	NA	NA	NA	NA	72,97	17,03	10	
Casca de café ^a	NA	NA	NA	NA	NA	80,1	9,90	10	
Biomassa herbácea	46,43	5,8	45,53	0	NA	87,64	10,28	2,08	(ABHI <i>et al.</i> , 2021)
Biomassa lenhosa – madeira de eucalipto	49,8	6,0	0,4	0,08	NA	82,55	16,6	0,08	(POHLMANN <i>et al.</i> , 2016)
Galhos de madeira	51,6	6,4	36,8	0,0644 ± 0,0005	1133 ± 9 (mg/kg)	75,4	NA	4,1	(HEDAYATI <i>et al.</i> , 2021)
Cascas de madeira	51,8	6,1	38,5	0,0315 ± 0,0009	487 ± 7 (mg/kg)	74,8	NA	3,3	
Resíduos alimentícios FR1	48,8	4,7	20,5	0,465	0,74	64,4	13,1	22,5	(AHMED; SIDERIS;

Resíduos alimentícios FR2	49,7	5,4	27,0	0,212	0,3644	68,7	15,0	16,3	BJORKMAN, 2020)
Poliuterano	63,2	6,0	9,5	0,051	0,0355	77,5	7,5	15,0	
Serragem torrefada	57,0	5,5	36,4	0,01	0,01	73,5	24,0	0,40	(SUNDQVIST ÖKVIST; LUNDGREN, 2021)
Biomassa de jardim pirolisada	65,07	3,34	18,23	0,32	NA	32,3	35,7	12,2	(DANG <i>et al.</i> , 2021)
Blocos de madeira pirolisadas	87,35	2,84	6,38	0,14	NA	14,5	76,8	3,0	
Palha de algodão pirolisada	68,58	2,43	15,21	0,34	NA	17,5	62,3	12,2	
Bambu pirolisado	69,03	1,58	3,87	0,11	NA	11,7	41,7	25,0	
Casca de arroz pirolisada	42,65	2,37	11,42	0,15	NA	19,8	32,3	42,9	
Casca de coco pirolisada	49,69	2,12	35,23	0,45	NA	20,1	65,2	11,9	
Serragem pirolisada	68,32	2,48	12,07	0,21	NA	20,7	46,9	15,8	
Agente de remediação do solo	70,62	2,45	14,95	0,17	NA	15,6	66,8	11,3	

Lascas de madeira pirolisadas	87,0	2,3	6,1	0,01	0,03	12,0	84,1	3,9	(SUNDQVIST ÖKVIST; LUNDGREN, 2021)
Biomassa lenhosa – madeira de pinho	57,7	7,2	34,8	Traços	NA	64,4	NA	1,2	(BABICH <i>et al.</i> , 2019)
Carvão vegetal – madeira de pinho pirolisada	88,26	2,71	8,42	0,03	NA	6,0	NA	0,6	
Carvão vegetal – madeira de eucalipto pirolisada	85,0	3,2	8,8	0,02	NA	16,5	81,0	2,4	(POHLMANN <i>et al.</i> , 2016)
Resíduos de fábrica de leite de nozes	50,26	5,97	42,61	0,31	NA	82,26	13,20	4,55	(LI <i>et al.</i> , 2021)
Hidrochar de resíduos de fábrica de leite de nozes	69,72	4,93	24,98	0,17	NA	51,11	47,68	1,21	
Palha de milho	45,30	5,85	42,40	0,21	NA	78,37	16,17	5,46	(WANG <i>et al.</i> , 2020)
Hidrochar de palha de milho	77,44	4,85	14,16	0,15	NA	39,08	59,07	1,85	

Hidrochar de lodo de esgoto	33,76	3,77	20,58	0,36	NA	52,25	7,18	38,76	(WANG <i>et al.</i> , 2019)
Hidrochar de bio-lodo de fábrica de celulose e papel	28,13	2,36	17,63	0,31	NA	42,64	6,72	46,58	
Hidrochar de rejeito de fibra de fábrica de celulose e papel	50,96	4,50	15,06	1,67	NA	46,72	28,48	23,28	
Hidrochar de bio- resíduo	50,94	4,95	23,75	0,38	NA	57,82	23,63	15,97	(HERNANDEZ <i>et al.</i> , 2018)
Hidrochar de fração orgânica	58,61	6,72	17,13	0,31	NA	68,76	16,25	12,88	
Hidrochar de casca de laranja	58,06	5,08	25,45	0,16	NA	59,66	30,65	6,18	

^a Valores são para total de cinzas normalizado para 10%.

Para a substituição parcial ou integral do carvão fóssil na injeção, é necessário que as características do substituinte sejam semelhantes com as do carvão mineral, afim de assegurar o funcionamento eficaz do alto-forno. A biomassa lenhosa posteriormente tratada como é o caso do carvão vegetal proveniente da madeira de eucalipto ou pinho pirolisada, é a matéria-prima mais viável para a substituição, apresentando, usualmente, um baixo teor de cinzas e enxofre, além de um nível aceitável de elementos nocivos como K e Na contidos nas cinzas. Resíduos florestais, cascas e biomassa da agricultura apresentam um maior teor de cinzas e quantidade de elementos indesejados como P e óxidos de metais alcalinos, em comparação com

a madeira do caule, carvão e coque usados. A biomassa de jardim pirolisada, por exemplo, possui uma maior quantia de cinzas e enxofre, além de níveis elevados de elementos nocivos se comparada com biomassa lenhosa, carvão fóssil e coque.

5.2 Secagem

O alto conteúdo de matéria volátil e baixo conteúdo de carbono fixo das biomassas *in natura* (Tabela 5.1), tornam a sua aplicação na injeção de altos-fornos inviável. Pré-tratamento e tratamentos térmicos são necessários para otimizar as características das biomassas a níveis admissíveis para a aplicação na injeção de altos-fornos (MOUSA *et al.*, 2016). A secagem é um pré-tratamento térmico utilizado para a remoção da umidade presente na biomassa. Comumente, a umidade deve ser reduzida no material antes de ocorrer a pirólise para evitar perda térmica e efeitos no rendimento do carvão. A secagem pode ser realizada tanto ao ar livre ou com a utilização de uma fonte de calor para auxiliar no aceleração do processo.

Na Tabela 5.2 é apresentado as tecnologias de secagem disponíveis para a secagem da biomassa.

Tabela 5.2 Tecnologias de secagem de biomassa.

Tecnologia de secagem	Secador de banda	Secador rotativo	Secador rotativo de banda	Secador de rotativo a vapor	Secador de vapor pneumático
Alimentação	Serragem, aparas de madeira, lascas de madeira	Serragem, de lascas de madeira, de casca	Serragem, de resíduos de processamento de madeira	Lascas de madeira	Serragem, casca, resíduos florestais
Fluxo de alimentação, t h ⁻¹ (seco)	8–9	6–7	5–6	9	25
Entrada de umidade, % em massa	50–60	50–60	50–60	50–60	50–60

Saída de umidade, em massa	de	10–15	10–15	10–15	10–15	10–15
Meio de secagem	de	Ar, gás combustível (90–120 °C)	Ar, gás combustível (250–400°C)	Vapor (pressão ambiente)	Vapor LP reciclado (0,3–0,4 MPa)	Vapor LP reciclado (0,3–0,4 MPa)
Meio de aquecimento	de	Ar quente	Gás combustível	Vapor HP (0,6–1 MPa)	Vapor HP (2,6 MPa)	Vapor HP (0,7–2,6 MPa)
Capacidade de evaporação, t h ⁻¹ H ₂		10	7–8	6–7	5–40	25
Demanda de energia de evaporação, MJ kg ⁻¹ H ₂ O	de	4–5	4–5	3–4 0,8–1 (recuperação de energia)	NA	2–3 0,5–0,7 (recuperação de energia)

Fonte: adaptado de (SUOPAJÄRVI *et al.*, 2018).

É necessário frisar as dificuldades encontradas quando a aplicação do processo de secagem é analisada em escala industrial. A capacidade de evaporação é alta para tecnologias de secador rotativo a vapor e secador de vapor pneumático por exemplo, porém, a granulometria do material aplicada para essas tecnologias é menor se comparada ao processo de secagem natural, isto é, ao ar livre, o que resulta em um aumento de custos com moagem. Contudo, a secagem da biomassa no meio ambiente pode vir levar de 25 a 30 dias ou até mesmo meses, o que pode acometer o processo contínuo de alimentação do alto-forno a coque. Cerca de 1500t de carvão fóssil são utilizadas para alimentar um alto-forno a coque. Para a substituição completa de carvão mineral por carvão vegetal, considerando um rendimento de 70% (perda de aproximadamente 30% de matéria atrelada a umidade), é necessária uma quantia de 2700t de madeira, valor que pode ser atualmente impraticável considerando as adversidades anteriormente já mencionadas.

5.3 Tratamentos Termoquímicos

Após a secagem, tratamentos termoquímicos são aplicados na biomassa. Na Tabela 5.3 é apresentado um resumo das tecnologias de conversão termoquímica hoje presentes e suas respectivas descrições.

Tabela 5.3 Comparação de tecnologias de conversão termoquímica.

Tecnologia de conversão	Descrição
Torrefação	<p>Condições de operação: 200–300 °C por 15–30 min sem a presença de ar.</p> <p>Produto principal: resíduo sólido levemente carbonizado, denominado biomassa torrefada.</p> <p>Estágio de desenvolvimento: várias plantas de demonstração em operação.</p>
Carbonização hidrotermal	<p>Condições de operação: misturado com vapor de água saturado a 150–250 °C de alguns minutos a algumas horas.</p> <p>Produto principal: resíduo sólido levemente carbonizado, chamado biomassa HTC.</p> <p>Estágio de desenvolvimento: várias plantas de demonstração em operação.</p> <p>Nota: Adequado para biomassa úmida; elementos inorgânicos solúveis em água são removidos com água</p>
Pirólise lenta	<p>Condições de operação: aquecimento lento a 300–600 °C e mantido por 15–30 min a várias horas sem a presença de ar.</p> <p>Produto principal: resíduos sólidos altamente carbonizados, denominados biocarvão ou carvão vegetal.</p> <p>Estágio de desenvolvimento: existente desde os primórdios da civilização humana.</p> <p>Nota: Calor de processo geralmente fornecido pela combustão parcial de biomassa ou produtos voláteis; partículas maiores que alguns cm.</p>
Pirólise rápida	<p>Condições de operação: alta taxa de aquecimento de 400–600 °C por alguns segundos sem a presença de ar.</p>

	<p>Produto principal: Mistura de água e compostos orgânicos incluindo compostos oxigenados e fenólicos, denominado bio-óleo.</p> <p>Estágio de desenvolvimento: algumas plantas comerciais em operação.</p> <p>Nota : Calor de processo por excesso de calor de uma central elétrica ou combustão parcial de carvão; as partículas precisam ser moídas menos do que alguns mm.</p>
Gaseificação	<p>Condições de operação: 600 °C a 1400 °C com agente oxidante (normalmente, 30–50% de oxigênio ou ar necessário para combustão estequiométrica com vapor ou CO₂).</p> <p>Produto principal: Syngas (mistura de H₂, CO e CO₂ com pequena quantidade de CH₄).</p> <p>Fase de desenvolvimento: várias plantas piloto e de demonstração em operação (usinas de gaseificação de carvão em operação comercial).</p>
Combustão	<p>Condições de operação: combustão completa com excesso de ar.</p> <p>Produto principal: calor de alta temperatura.</p> <p>Estágio de desenvolvimento: amplamente utilizado para geração de energia e calor para indústrias de processo em todo o mundo.</p>

Fonte: adaptado de (SUOPAJÄRVI *et al.*, 2018).

O tratamento de torrefação ocorre em temperaturas amenas, inferiores a 300 °C. O seu principal produto é um resíduo sólido levemente carbonizado chamado de biomassa torrefada.

Na carbonização hidrotérmica, o processo ocorre em uma faixa de 180 °C a 260 °C aproximadamente, com mistura de água e compostos orgânicos, gerando resíduo sólido ligeiramente carbonizado, chamado de biomassa HTC. Apresentando temperaturas superiores, com intervalo de 300 a 600 °C, a pirólise é subdividida em duas categorias: pirólise lenta e pirólise rápida. A pirólise lenta ocorre com aquecimento lento, empregando temperaturas de 300 °C a 600 °C. O principal produto resultante do processo é um resíduo sólido altamente carbonizado chamado de biochar ou carvão vegetal. Para a pirólise rápida, temperaturas de 400 °C a 600 °C são aplicadas nas biomassas, gerando um resíduo líquido chamado de bio-óleo. Para a gaseificação, temperaturas no intervalo de 600 °C a 1400 °C com agente oxidante são aplicadas na biomassa. Como produto principal apresenta o syngas que consiste em uma mistura de H₂, CO e CO₂ com pequena quantidade de CH₄. Por fim, a combustão é um processo amplamente utilizado no setor industrial para geração de energia e calor.

5.3.1 Efeito das Variáveis dos Tratamentos

O aumento do parâmetro temperatura nos tratamentos termoquímicos afeta significativamente as propriedades das biomassas. O aumento do conteúdo de carbono fixo e diminuição da quantidade de matéria volátil são detectados quando tratamentos termoquímicos são aplicados nas biomassas, sendo os valores intensificados quando temperaturas maiores são aplicadas. Na Tabela 5.1, o eucalipto pirolisado apresenta maior quantidade de carbono fixo, teor de cinzas e menor valor de matéria volátil quando comparado na sua forma *in natura*. Como resultado, ocorre um aumento da taxa de combustível.

Embora o aumento das temperaturas de carbonização possa otimizar as propriedades dos produtos das biomassas para posteriormente ser utilizado na indústria siderúrgica, a aplicação de temperaturas mais elevadas pode reduzir consideravelmente a combustibilidade. Conforme Song *et al.*, (2019), a curva de combustão do carvão de bambu (Figura 5.1, curva B para diferentes temperaturas) foi deslocada para uma zona de temperatura mais elevada quando ocorreu a elevação da temperatura, resultando em um aumento na temperatura de *Burnout* do biochar.

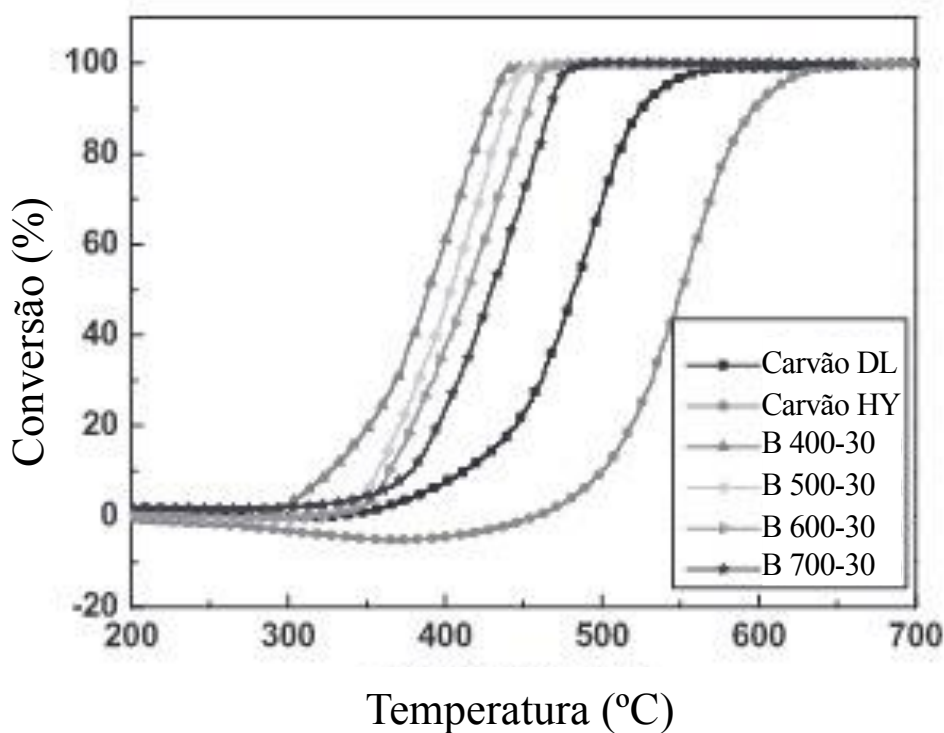


Figura 5.1 Curva de combustão do carvão de bambu e de outros dois carvões fósseis. Fonte: adaptado de (SONG *et al.*, 2019).

O aumento da temperatura dos tratamentos termoquímicos pode também resultar em uma redução significativa nos volumes/rendimentos de resíduo sólido de biomassa produzido. O processo de torrefação realizado na temperatura de aproximadamente 290 °C apresenta cerca de 61-84% de rendimento de biochar em matéria-prima seca. Para a pirólise lenta, realizada a uma temperatura por volta de 400 °C, o rendimento de biochar em matéria-prima seca é em torno de 30% (YE *et al.*, 2019).

5.3.2 Tratamento Adequado para a Biomassa

O tratamento mais adequado para a carbonização da biomassa é a pirólise lenta. A partir da análise dos trabalhos em estudo, o processo de pirólise lenta foi o mais aplicado, onde temperaturas suficientemente altas são aplicadas com baixas taxas de aquecimento, resultando como produto um carvão vegetal quimicamente similar ao coque metalúrgico. Sundqvist Ökvist (2021) demonstrou em seu estudo que o carvão vegetal apresenta menores taxas de H/C e O/C, e maior poder calorífico quando comparado a biomassa torrefada, o que o torna termicamente trocável por carvão pulverizado. Khanna *et al.*, (2019) também compararam o processo de torrefação e a pirólise lenta de biomassa, chegando à conclusão de que a torrefação na faixa de temperatura de 225 a 300°C produz carvão com teores de carbono na faixa de 47% a 66% (base seca) e valores de aquecimento de 19,5 a 26,4 MJ/kg, já a pirólise lenta pode aumentar o teor de carbono dos carvões para até 95%, com valores de aquecimento de 34–35 MJ/kg alcançados. Ademais, Wang *et al.*, (2019) concluíram que o alto teor de cinzas e baixo valor calorífico e de ponto de ignição, além de forte explosividade, faz da injeção direta da biomassa HTC sem a presença de um agente auxiliar nos altos-fornos um processo inviável, o que desfavorece a aplicação do tratamento de carbonização hidrotérmica nas biomassas para injeção.

6 APLICAÇÃO DA BIOMASSA NOS PROCESSOS SIDERÚRGICOS

6.1 Impacto da Inserção da Biomassa no Alto-forno

Impactos positivos e negativos ocorrem quando se faz uso de biomassa como matéria-prima para a injeção em altos-fornos. A inserção de carvão vegetal através das ventaneiras nos altos-fornos resulta em um decréscimo do volume de sopro e escória, da taxa de coque, e um aumento na produtividade do alto-forno. Isto se dá devido a presença de um baixo teor de cinzas e elevada basicidade, o que reduz a taxa de fluxantes usada para a remoção de impurezas e portanto um decréscimo na produção de escória ocorre. A Figura 6.1 apresenta a comparação do consumo de agente redutor em diferentes casos de injeção de biomassa realizados com modelos matemáticos AF.

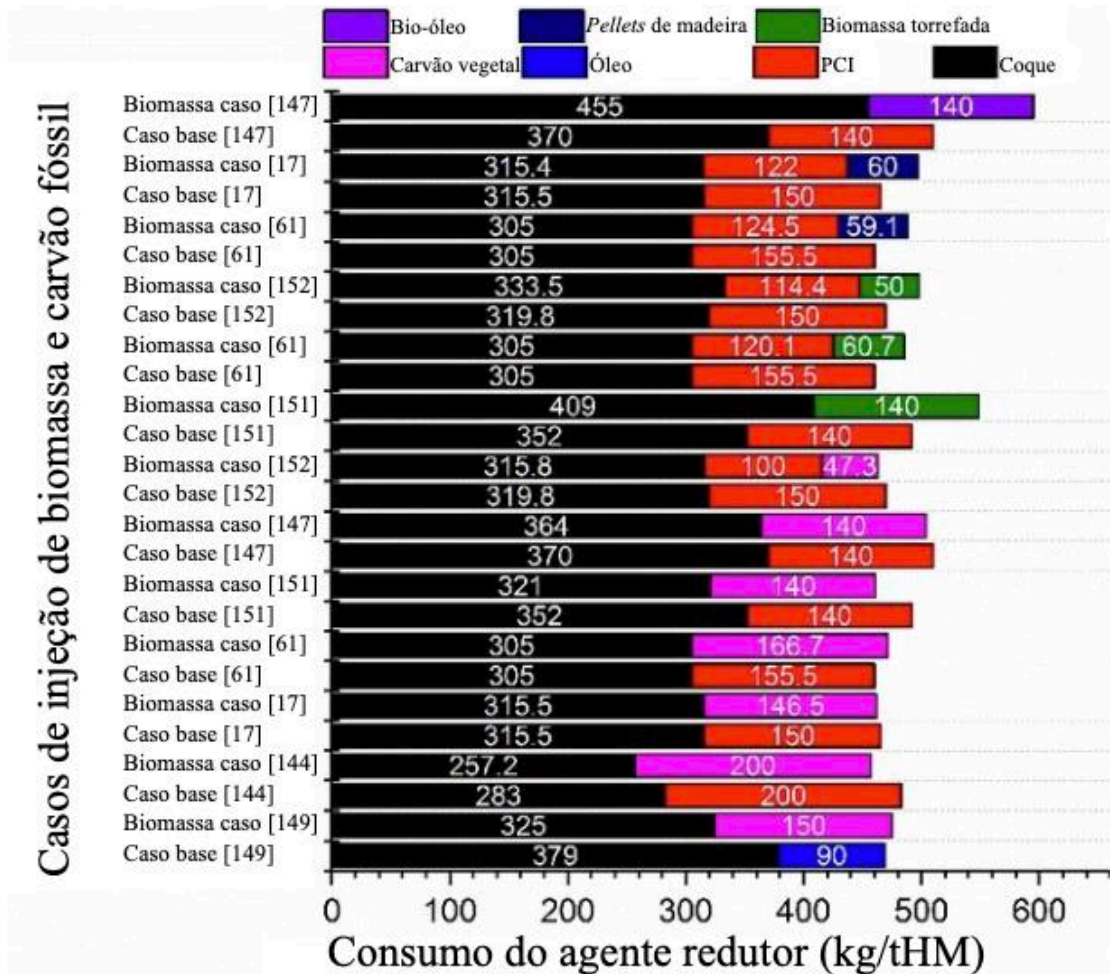


Figura 6.1 Taxas de agentes redutores auxiliares em diferentes casos de injeção. Fonte: adaptado de (SUOPAJÄRVI *et al.*, 2018).

Embora haja diferenças nas características dos diferentes estudos analisados (modelo AF, propriedades das matérias-primas, etc.), é identificável que a taxa de substituição do coque é diretamente dependente do tipo de biomassa. É possível também chegar à conclusão de que o carvão vegetal é superior em comparação com outros injetores à base de biomassa. Dependendo do teor de carbono, supera também o carvão pulverizado. Pellets de madeira, biomassa torrefada e bio-óleo podem ser usados na injeção de AF, mas a taxa de substituição do coque é baixa. (SUOPAJÄRVI *et al.*, 2018).

Ademias, a injeção de carvão vegetal intensifica a diminuição da taxa de coque por apresentar alta porosidade, onde contém conteúdo de oxigênio, resultando na não necessidade de enriquecimento do sopro com oxigênio, isto é, reduzindo o volume de sopro. Como

consequências da redução do volume de sopro, o volume do gás de topo e perdas de calor são reduzidas, favorecendo a redução da taxa de coque (SOLAR *et al.*, 2021).

Apesar da injeção de carvão vegetal nos altos-fornos gerar uma redução da taxa de coque e escória, e uma melhoria na qualidade do ferro gusa, possíveis problemas operacionais como corrosão e deposição de cinzas alcalinas na região interna dos altos-fornos podem ocorrer em função do conteúdo de cinzas presente no carvão vegetal (WEI *et al.*, 2017). Logo, a qualidade do material injetado é crucial. Ademais, reiterando a importância da qualidade do material utilizado na injeção, a aplicação de materiais com baixo teor de carbono fixo como é o caso da biomassa torrefada, gera uma diminuição da taxa de substituição. O teor de carbono fixo é diretamente relacionado com a taxa de combustibilidade. Portanto, a taxa de substituição não é diretamente associada com a taxa de injeção, o que revela que a quantidade do material injetado não é de tamanha importância como a qualidade do material (CAMPOS; NOVACK; ASSIS, 2019).

6.2 Influência dos Parâmetros de Combustão no Comportamento da Biomassa

Parâmetros de combustão são afetados pelo conteúdo de matéria volátil e morfologia apresentada na biomassa. Segundo Suopajarvi *et al.*, (2017), taxas de *Burnout* aparentemente diminuem linearmente quando a temperatura de tratamento é aumentada, sendo assim, a biomassa pirolisada possivelmente apresentará uma menor taxa de *Burnout* quando comparada com a biomassa torrefada, em razão do menor teor de matéria volátil presente em biomassas pirolisadas em altas temperaturas. Outro parâmetro que apresenta relação direta com a matéria volátil é a temperatura de ignição. Biomassas torrefadas e posteriormente pirolisadas apresentam uma temperatura de ignição maior, seguindo a mesma lógica mencionada anteriormente. Para assegurar a eficiência da combustibilidade, o ideal é a realização da pirólise em baixas temperaturas.

A área de superfície específica também afeta a taxa de *Burnout* e a temperatura de ignição da biomassa. Xu *et al.*, (2018) analisaram os parâmetros característicos da combustão de amostras de biomassa de bambu e chegaram à conclusão de que a amostra de carvão de bambu e antracito com um mesmo tamanho de partícula implicava que a combustão de carvão de bambu era melhor do que a do antracito. A estrutura porosa e microcristalina desordenada do carvão de bambu, Figura 6.2 a), contribuiu para a sua melhor reatividade de combustão. O carvão antracito, diferente do carvão de bambu, apresenta uma estrutura compacta, de baixa

porosidade, afirmada na Figura 6.2 b). Com o aumento do tamanho das partículas, a temperatura de ignição e a temperatura de combustão do carvão de bambu aumentaram.

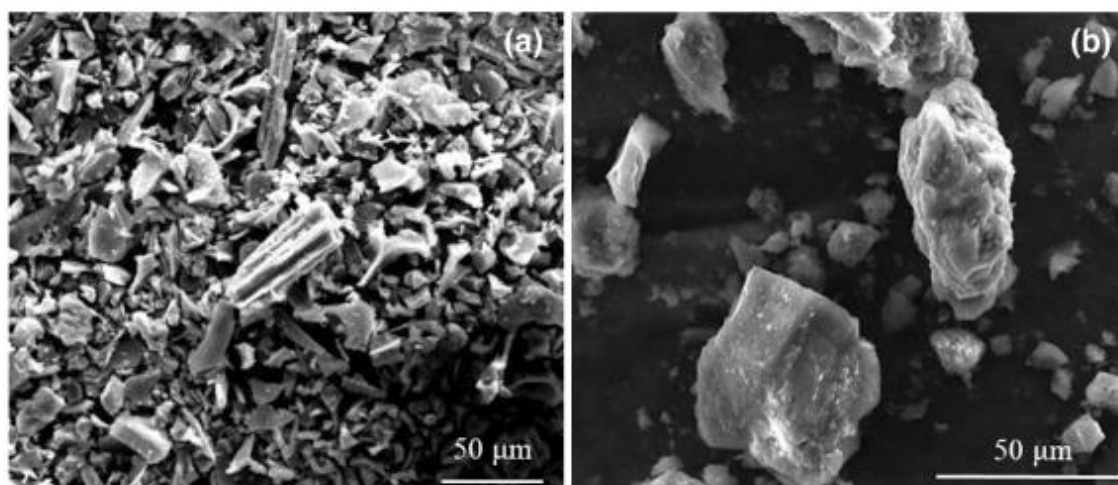


Figura 6.2 Morfologia do carvão de bambu (a) e carvão antracito (b). Fonte: (XU; WANG; DAI, 2018).

6.3 Faixa de Propriedades das Biomassas

Para a aplicação na injeção de altos-fornos, as biomassas devem dispor de um conjunto de propriedades que são viáveis para o seu uso, seja operacional, como economicamente. É necessário que a biomassa apresente uma boa performance de combustão, índice moagem deve estar em um intervalo de 60 a 90, baixa explosividade, ponto de ignição apropriado, baixo teor de cinzas (<12%), enxofre (<0,6%), fósforo e álcali, elevada temperatura de fusão das cinzas (>1200 °C), boas características de fluxo e de jato, baixo teor de umidade de matéria volátil, e alto conteúdo de carbono fixo e poder calorífico interno (HERNANDEZ *et al.*, 2018). A necessidade de remoção de enxofre e fósforo em processos posteriores aumenta os custos de produção. A alta quantidade de álcali resulta na sua acumulação e circulação no interior dos altos-fornos, deteriorando o revestimento refratário e gerando perdas de energia. O conteúdo de matéria volátil presente na biomassa deve ser controlado para evitar efeitos negativos no processo de gaseificação no zona de combustão, na taxa de substituição do coque e poder calorífico (AHMED, 2018).

6.4 Uso de Misturas de Combustíveis: O Que a Literatura Diz Sobre

A mistura de biomassa com carvões minerais e outros aditivos gera um aprimoramento na performance da combustão. Os chars das biomassas apresentam maior área superficial e uma microestrutura isotrópica desordenada quando comparados a baixa porosidade e uma estrutura anisotrópica contida nos chars de carvão mineral, o que significa que os chars das biomassas dispõem de um valor superior de reatividade (POHLMANN *et al.*, 2016). Sendo assim, a adição de chars de biomassas pode otimizar as propriedades de combustão dos chars de carvão fóssil sob a perspectiva microestrutural e de combustibilidade, favorecendo a sua incorporação em misturas para a injeção em altos-fornos. Li *et al.*, (2021) observaram que a adição de biomassa HTC em misturas com carvão antracito pode melhorar a porosidade do carvão misto e melhorar o desempenho de combustão do antracito em carvão misto, e com o aumento da proporção de biomassa HTC, o efeito de melhoria torna-se mais óbvio.

A parcela de contribuição da biomassa em misturas de combustíveis para a injeção nos altos-fornos pode chegar a 50%. Barbieri *et al.*, (2016) propôs que misturas binárias de carvão e carvão vegetal nas proporções 10, 20 e 50% de carvão vegetal seriam consideradas satisfatórias para a injeção em altos-fornos. Segundo Dang *et al.*, (2021), a relação mássica de 50% de biomassa carbonizada na mistura com carvão pulverizado resultou no maior valor de eficiência de combustão. Portanto, é possível concluir que a adição de biomassa carbonizada na mistura resulta em um efeito sinérgico no sistema.

6.5 Países, Centros e Tipos de Pesquisa na Área de Biomassa

O gráfico da Figura 6.3 é apresentado os países e a quantidade, em porcentagem, de estudos conduzidos na área de biomassa para injeção em altos-fornos analisados na presente revisão.



Figura 6.3 Países e porcentagem de estudos conduzidos na área de injeção de biomassa em altos-fornos.

Países como Suécia e China lideram na quantia de pesquisas conduzidas na área de injeção de biomassa em altos-fornos, representando 23% e 19%, respectivamente, do total dos trabalhos analisados. A Suécia é representada pela Universidade de Tecnologia de Luleå e a Universidade de Ciência e Tecnologia de Pequim é o centro de pesquisa que mais apresenta estudos na área de injeção de biomassa em altos-fornos na China. A Finlândia e o Brasil também apresentam uma considerável quantia de estudos na área de injeção de biomassa em altos-fornos, com 16% e 14%. O maior percentual de estudos nos países mencionados pode possivelmente ser explicado pelo histórico deles na geração de biomassa e seu uso como biocombustíveis, além da produção de aço. No continente europeu, a produção anual de madeira das florestas é estimada em 3,7 B m³ e em 2016, o fornecimento de biomassa lenhosa de florestas e outros terrenos arborizados contribuiu com cerca de 60% da biomassa total utilizada para fins energéticos. O consumo de energia na China é primariamente fóssil, primordialmente

carvão. Atualmente, a China tem 140 M ha de área terrestre sendo usada para produção agrícola. Estudos relevantes ilustraram que a cada ano cerca de 500-800 Mt de biomassa é produzida a partir de resíduos de culturas com possivelmente 200 Mt disponível para a produção de biocombustíveis. Já o Brasil, a biomassa total produzida a partir da produção agrícola é estimada em torno de 657,1 Mt ano (ANTAR *et al.*, 2021).

No contexto produção de aço, em dezembro de 2022, a produção de aço bruto por região foi de 104,9 Mt na Ásia e Oceania, 9,2 Mt na Europa e 3,3 Mt na América do Sul (World Steel Association AISBL, 2023).

Os trabalhos em análise apresentam as seguintes categorias: relato de experimento, pesquisa de validação e revisão da literatura. O relato de experimento (também conhecido como relatório de laboratório) é um relatório de pesquisa empírica realizado pelo autor(es). A pesquisa de validação condiz a estudos usados em pesquisas para comparar a precisão de uma medida com uma medida padrão para identificar e eliminar o viés. Por fim, a revisão da literatura é um resumo abrangente de pesquisas anteriores sobre um determinado tópico. A Figura 6.4 demonstra a incidência das categorias de pesquisas conduzidas no assunto de biomassas para injeção nos altos-fornos dos trabalhos em estudo.

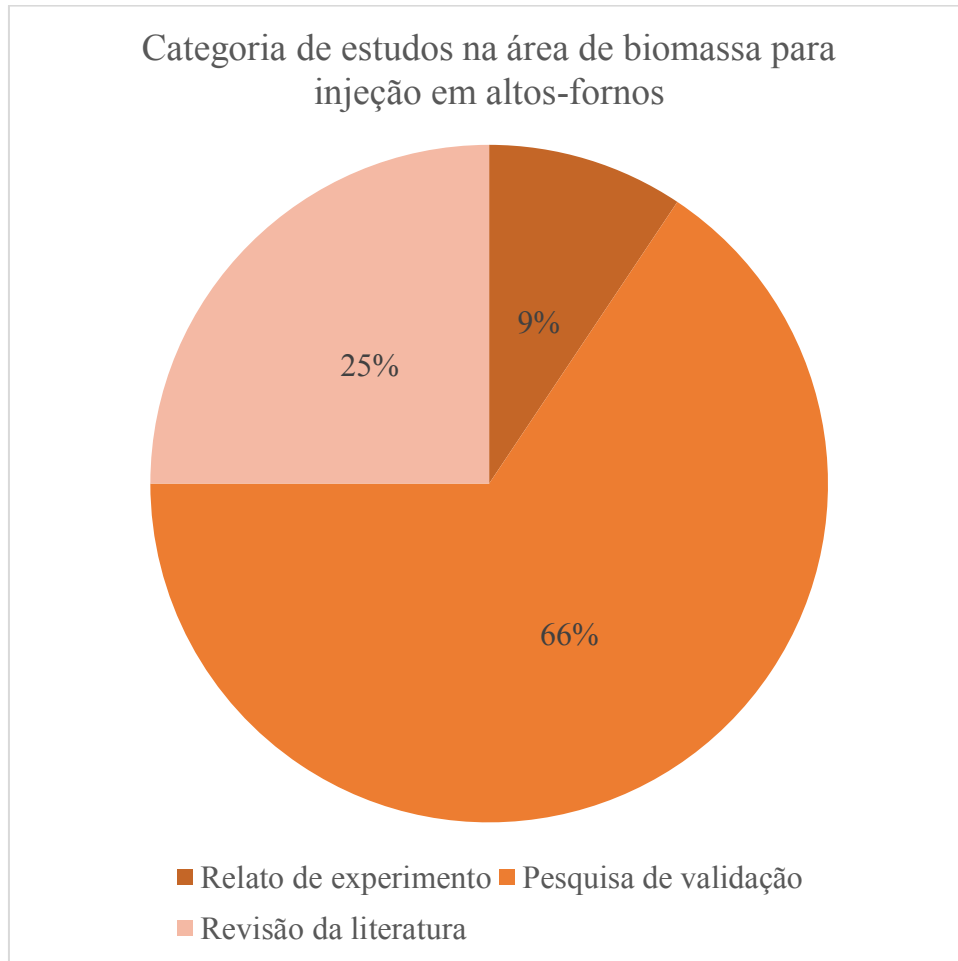


Figura 6.4 Classe de estudos no contexto da biomassa para injeção em altos-fornos, em %.

O gênero de estudo mais incidente no âmbito de injeção de biomassas em altos-fornos observado nesta análise foi a pesquisa de validação, representando 66% do total dos estudos considerados. 25% dos trabalhos se enquadram na classe de revisão da literatura e 9% são relatos de experimentos.

7 USO DE BIOMASSA PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂

A injeção de biomassa no alto-forno, especialmente carvão vegetal, é uma das tecnologias presentes para a redução das emissões de CO₂ de base fóssil. Na Figura 7.1 é apresentado o impacto nas emissões de CO₂ quando serragem torrefada (ST) ou carvão vegetal (CV) são introduzidos nos altos-fornos através da injeção, biocoque (Bc) ou como parte de biobriquetes (Bb) ou combinação de ambos analisados no estudo conduzido por Sundqvist Ökvist e Lundgren, (2021).

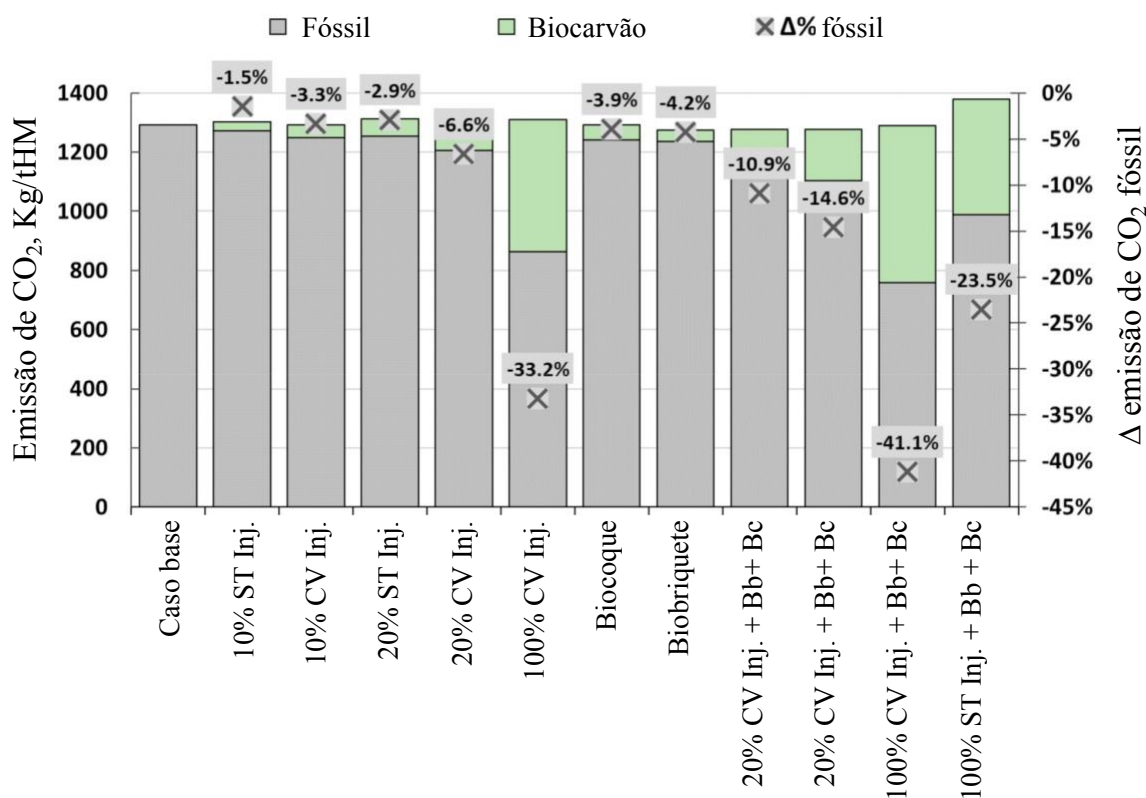


Figura 7.1 Impacto nas emissões de CO₂ pela aplicação de biocarvão por injeção, via coque ou parte de biobriquete ou uma combinação dos anteriores. Fonte: adaptado de (SUNDQVIST ÖKVIST; LUNDGREN, 2021).

Apresentando taxas de injeção semelhantes para serragem torrefada e carvão vegetal, o carvão vegetal reduz as emissões de CO₂ fóssil 2,3 vezes mais. Segundo Sundqvist Ökvist e Lundgren, (2021), as emissões de CO₂ de origem fóssil provenientes da produção de ferro em altos-fornos podem ser reduzidas cerca de 15% quando injetando biomassa torrefada. Se o

carvão pulverizado é totalmente substituído por biocarvão, é vantajoso utilizar o carvão vegetal, já que resultará em um menor impacto na temperatura do gás de topo e da temperatura adiabática da chama na zona de combustão. De acordo com o estudo, a melhor performance na redução de emissões de CO₂ é alcançada quando realizado uma combinação de biobriquetes e biocoque com 100% de injeção de carvão vegetal, o que resulta em emissões de CO₂ fóssil 41% menores. Quando é aplicado sozinho 100% de carvão vegetal, a redução de emissões de CO₂ é de 33%. Cerca de 4% das emissões de CO₂ são reduzidas quando aplicado biocoque ou biobriquete. Seguindo a mesma linha de pensamento, o estudo conduzido por Ahmed *et al.*, (2020) apresentou que quando é assumido a substituição completa do carvão pulverizado por carvão vegetal, injeção de 200-220 kg/tHM de carvão vegetal, é possível reduzir aproximadamente 40% do valor das emissões de CO₂. Para Babich (2021), a substituição de 200 kg tHM⁻¹ de carvão pulverizado pela injeção da mesma quantidade de carvão vegetal diminui a entrada de CO₂ em 37–45%, dependendo das características do carvão (como referência, a entrada de CO₂ foi de 1504 kg tHM⁻¹ enquanto a taxa de coque foi de 283 kg tHM⁻¹).

8 CONCLUSÕES

A biomassa lenhosa é a matéria-prima de origem orgânica mais viável para a substituição parcial do carvão fóssil na injeção em altos-fornos e integral em mini altos-fornos.

É necessário a aplicação de pré-tratamento (secagem) e tratamentos termoquímicos como: torreficação, pirólise (lenta e rápida) e carbonização hidrotérmica, para a utilização de biomassa em altos-fornos. Obstáculos na implementação do processo de secagem em escala industrial são presentes.

O aumento do parâmetro temperatura nos tratamentos termoquímicos favorece o aumento de carbono fixo e diminuição da matéria volátil da biomassa. Já a combustibilidade e os volumes/rendimentos de resíduo sólido de biomassa produzido são afetados de maneira negativa, apresentando um decréscimo em seus valores.

O tratamento mais adequado para a carbonização da biomassa é a pirólise lenta (aquecimento lento a 300–600 °C e mantido por 15–30 min a várias horas sem a presença de ar). O carvão vegetal obtido através desse processo é quimicamente similar ao coque metalúrgico.

A utilização da tecnologia de injeção em altos-fornos já se faz presente no cotidiano do setor siderúrgico. O Brasil é referência na injeção de biomassa em mini altos-fornos e estudos indicam que é possível realizar a substituição completa do carvão mineral por carvão vegetal.

A injeção de biomassa em altos-fornos pode gerar um decréscimo do volume de sopro e escória, da taxa de coque, e um aumento na produtividade do alto-forno, mas também pode ocasionar possíveis problemas operacionais como corrosão e deposição de cinzas alcalinas na região interna dos altos-fornos. Portanto, a qualidade da biomassa é essencial na injeção em altos-fornos.

Taxa de e temperatura de ignição descessem quando biomassas são tratadas em altas temperaturas. O ideal é a realização da pirólise em baixas temperaturas para garantir a eficiência da combustão. A área de superfície específica também impacta esses dois parâmetros da

combustão, onde a estrutura porosa microcristalina desordenada do carvão vegetal favorece a combustão.

A faixa de propriedades que a biomassa deve apresentar para ser apta na injeção em altos-fornos é: boa performance de combustão, índice moagem em um intervalo de 60 a 90, baixa explosividade, ponto de ignição apropriado, baixo teor de cinzas (<12%), enxofre (<0,6%), fósforo e álcali, elevada temperatura de fusão das cinzas (>1200 °C), boas características de fluxo e de jato, baixo teor de umidade de matéria volátil, e alto conteúdo de carbono fixo e poder calorífico interno.

Um aprimoramento na performance da combustão pode ser alcançado com a combinação de biomassa nas misturas com combustíveis para injeção nos altos-fornos quando representa uma parcela de 50% nas misturas.

Do conjunto de trabalhos analisados, países como Suécia e China lideraram na quantidade de pesquisas conduzidas na área de injeção de biomassa. O centro de pesquisa com maior produção de textos na Suécia é a Universidade de Tecnologia de Luleå. Na China, a Universidade de Ciência e Tecnologia de Pequim se destaca. Finlândia e Brasil, apresentam também quantias significativas de estudos nesse campo. A maior quantidade de estudos relacionados a injeção de biomassa em altos-fornos nesses países pode ser possivelmente explicada pelo histórico na geração de biomassa e seu uso como biocombustíveis, além da produção de aço. O gênero de estudo mais frequente nos trabalhos analisados é a pesquisa de validação (66%), seguida da revisão da literatura (25%) e por último os relatos de experimentos (9%).

Cerca de 40% do valor das emissões de CO₂ pode ser reduzido quando se assume a substituição completa do carvão pulverizado por carvão vegetal, atestando a capacidade da biomassa no processo de descarbonização da indústria siderúrgica.

9 TRABALHOS FUTUROS

Realização de uma nova revisão sistemática da literatura, aplicando as seguintes alterações:

- Inclusão dos anos 2022 e 2023;
- Formulação de novas questões de pesquisa;
- Aperfeiçoamento das palavras-chave;
- Geração de novas *strings* de busca;
- Reformulação dos critérios de seleção.

10 REFERÊNCIAS

ABHI, T. D. et al., Miscanthus to biocarbon for Canadian iron and steel industries: An innovative approach. **Energies**, v. 14, n. 15, 2021.

AHMED, H. New trends in the application of carbon-bearing materials in blast furnace iron-making. **Minerals**, v. 8, n. 12, 2018.

AHMED, H.; SIDERIS, D.; BJORKMAN, B. Injection of H₂-rich carbonaceous materials into the blast furnace: devolatilization, gasification and combustion characteristics and effect of increased H₂-H₂O on iron ore pellets reducibility. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 6, p. 16029–16037, 2020.

ANTAR, M. et al., Biomass for a sustainable bioeconomy: An overview of world biomass production and utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, p. 110691, abr. 2021.

BABICH, A. et al., Efficiency of biomass use for blast furnace injection. **ISIJ International**, v. 59, n. 12, p. 2212–2219, 2019.

BABICH, A. Blast furnace injection for minimizing the coke rate and CO₂ emissions. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 48, n. 6, p. 728–741, 2021.

CAMPOS, A. M. A.; NOVACK, K.; ASSIS, P. S. Selection of materials for blast furnace injection using quality indicators. **Revista Escola de Minas**, v. 72, n. 1, p. 119–123, 2019.

CAMPOS DE ASSIS, C. F. et al., Experimental analysis of injecting different blends of biomass materials and charcoal in a blast furnace. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 47, n. 3, p. 284–289, 2020.

DANG, H. et al., Comprehensive Study on the Feasibility of Pyrolysis Biomass Char Applied to Blast Furnace Injection and Tuyere Simulation Combustion. **ACS Omega**, 2021.

HEDAYATI, A. et al., Fate of phosphorus and potassium in single-pellet thermal conversion of forest residues with a focus on the char composition. **Biomass and Bioenergy**, v. 150, 2021.

HERNANDEZ, M. et al., **EVALUATION OF UTILISING INGELIA HYDROCHAR PRODUCED FROM ORGANIC RESIDUES FOR BLAST FURNACES INJECTION COMPARISON WITH ANTHRACITE AND BITUMINOUS COAL**. (Persson, M and Scarlat, N and Grassi, A and Helm, P, Ed.) **PAPERS OF THE 26TH EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE: SETTING THE COURSE FOR A BIOBASED ECONOMY VIA A GIACOMINI 28, FLORENCE, 50132, ITALY** YETA-FLORENCE RENEWABLE ENERGIES, , 2018.

HOLAPPA, L. **A General Vision for Reduction of Energy Consumption and CO2 Emissions from the Steel Industry**. **Metals** ST ALBAN-ANLAGE 66, CH-4052 BASEL, SWITZERLAND MDPI, , Setembro 2020.

HUANG, X.; NG, K. W.; GIROUX, L. Grindability of biocarbon and coal blends in rolling mill. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**, 2020.

Iron and Steel Technology Roadmap – Analysis. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>>. Acesso em: 4 jun. 2023.

JAHANSHAH, S. et al., Development of Low-Emission Integrated Steelmaking Process. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 1, n. 1, p. 94–114, 2015.

KHANNA, R. et al., Biochars in iron and steel industries. Em: JEGUIRIM, M.; LIMOUSY, L. (Eds.). **Char and Carbon Materials Derived from Biomass: Production, Characterization and Applications**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 429–446.

LI, J. et al., Study on the feasibility and co-combustion mechanism of mixed injection of biomass hydrochar and anthracite in blast furnace. **Fuel**, v. 304, 2021.

MOUSA, E. et al., Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 1247–1266, 2016.

MOUSA, E. A. Modern blast furnace ironmaking technology: Potentials to meet the demand of high hot metal production and lower energy consumption. **Metallurgical and Materials Engineering**, v. 25, n. 2, p. 69–104, 2019.

NG, K. W.; GIROUX, L.; TODOSCHUK, T. Value-in-use of biocarbon fuel for direct injection in blast furnace ironmaking. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 45, n. 5, p. 406–411, 2018.

POHLMANN, J. G. et al., Combustion of eucalyptus charcoals and coals of similar volatile yields aiming at blast furnace injection in a CO₂ mitigation environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 1–11, 2016.

SILVA, K. G.; ASSIS, P. S. Combustibility behavior of PCI coals, green petroleum coke and charcoal fines used as fuel for injection into blast furnace tuyeres. **Revista Escola de Minas**, v. 72, n. 1, p. 125–131, 2019.

SOLAR, J. et al., Conversion of Injected Forestry Waste Biomass Charcoal in a Blast Furnace: Influence of Pyrolysis Temperature. **Energy & fuels**, v. 35, n. 1, p. 529–538, 2021.

SONG, T. et al., Effect of carbonization conditions on the property and structure of bamboo char for injection in blast furnace. **ISIJ International**, v. 59, n. 3, p. 442–449, 2019.

SUNDQVIST ÖKVIST, L.; LUNDGREN, M. Experiences of bio-coal applications in the blast furnace process—opportunities and limitations. **Minerals**, v. 11, n. 8, 2021.

SUOPAJÄRVI, H. et al., Extensive review of the opportunities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 709–734, 2017.

SUOPAJÄRVI, H. et al., Use of biomass in integrated steelmaking – Status quo, future needs and comparison to other low-CO₂ steel production technologies. **Applied Energy**, v. 213, p. 384–407, 2018.

SUOPAJÄRVI, H. et al., **Life cycle CO₂ emission reduction in Nordic integrated steel plant by applying biomass-based reducing agents**. (Persson, M and Scarlat, N and Grassi, A and Helm, P, Ed.) **PAPERS OF THE 26TH EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE: SETTING THE COURSE FOR A BIOBASED ECONOMY** VIA A GIACOMINI 28, FLORENCE, 50132, ITALY YETA-FLORENCE RENEWABLE ENERGIES, , 2018.

Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325542021_Life_cycle_CO2_emission_reduction_in_Nordic_integrated_steel_plant_by_applying_biomass-based_reducing_agents

The Paris Agreement | UNFCCC. Disponível em: [https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-](https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement#:~:text=To%20limit%20global%20warming%20to%201.5%C2%B0C%2C%20greenhouse%20gas,and%20decline%2043%25%20by%202030)

[agreement#:~:text=To%20limit%20global%20warming%20to%201.5%C2%B0C%2C%20greenhouse%20gas,and%20decline%2043%25%20by%202030](https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement#:~:text=To%20limit%20global%20warming%20to%201.5%C2%B0C%2C%20greenhouse%20gas,and%20decline%2043%25%20by%202030)>. Acesso em: 21 maio. 2023.

WANG, C. et al., **Experimental investigation of hydrochar injection to the blast furnace.** AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings. **Anais...** Association for Iron and Steel Technology, AISTECH, 2019. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85071309637&doi=10.33313%2f377%2f056&partnerID=40&md5=66518036a1049fc7ddeab556201b69a3>>

WANG, G. et al., Hydrothermal carbonization of maize straw for hydrochar production and its injection for blast furnace. **Applied Energy**, v. 266, 2020.

WEI, R. et al., Current status and potential of biomass utilization in ferrous metallurgical industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 511–524, 2017.

World Steel in Figures 2021. worldsteel.org, 2021. Disponível em: <<https://worldsteel.org/world-steel-in-figures-2021/>>. Acesso em: 3 jun. 2023

XU, R. et al., **The Research on Process Characteristics of Different Fuels for Blast Furnace Injection.** 6th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. **Anais...**: The Minerals, Metals & Materials Series. JOHN WILEY & SONS INC, 2015.

XU, R.-S.; WANG, W.; DAI, B.-W. Influence of particle size on combustion behavior of bamboo char used for blast furnace injection. **Journal of Iron and Steel Research International**, v. 25, n. 12, p. 1213–1222, 2018.

YE, L. et al., **Use of Biochar for Sustainable Ferrous Metallurgy.** JOM233 SPRING ST, NEW YORK, NY 10013 USASPRINGER, , nov. 2019.

YOKOJI ET AL., **Introdução à siderurgia.** [s.l: s.n.].

ZULHAN, Z. **New Concept of Hot Metal Production using Rotary Kiln – Smelting Reduction Technology.** 2013.