

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

RODOLFO DOS SANTOS LOPES NÓBREGA

**USO DE BIOMASSAS COMO POSSÍVEIS FONTES RENOVÁVEIS PARA
APLICAÇÃO DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

LONDRINA

2022

RODOLFO DOS SANTOS LOPES NÓBREGA

**USO DE BIOMASSAS COMO POSSÍVEIS FONTES RENOVÁVEIS PARA
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

**Use of Biomass as possible renewable sources for application in the steel
industry**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa.

Coorientador: Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes

LONDRINA

2022



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

RODOLFO DOS SANTOS LOPES NÓBREGA

**USO DE BIOMASSAS COMO POSSÍVEIS FONTES RENOVÁVEIS PARA
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 27 de Junho de 2022

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
UTFPR-Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais

Prof. Dr. Luiz Eduardo de Carvalho
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
UTFPR-Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais
UTFPR-Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais

LONDRINA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus por ter guiado e iluminado os meus caminhos até aqui.

Aos meus pais e minha irmã, pelo suporte e incentivo em meus estudos. À minha noiva, Laynne, por toda a paciência e apoio ao longo da graduação. Vocês foram e são essenciais em minha vida.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Silvia Midori Higa e coorientador Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes pela paciência, orientação e auxílio no decorrer desse trabalho.

Aos amigos e colegas que fiz durante a graduação, pelas discussões, sugestões e auxílios.

RESUMO

Devido à crescente demanda por fontes energéticas renováveis, o carvão vegetal juntamente com as biomassas vem se destacando no cenário mundial como alternativas aos combustíveis fósseis. O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal e seu principal mercado consumidor é a indústria siderúrgica. O presente trabalho foi realizado a partir de revisões bibliográficas sobre as biomassas capim-elefante, coco-babaçu, coco-baía e cana-de-açúcar e foi dividido em três etapas. Inicialmente pesquisou-se a capacidade produtiva nacional das biomassas e constatou-se que a capacidade produtiva do coco-babaçu e o coco-baía não são suficientes para atender a demanda nacional, ao contrário do capim-elefante e cana-de-açúcar, que possuem a capacidade e tecnologia necessárias. Na segunda etapa levantou-se e discutiu-se os parâmetros de teor de carbono fixo, cinzas, materiais voláteis e poder calorífico. Nessa etapa evidenciou-se que as biomassas possuem excelentes propriedades e podem ser empregadas como fontes alternativas ao coque. Por fim, investigou-se os principais desafios na implementação do carvão vegetal e concluiu-se que os elevados custos logísticos, de implementação e reestruturação da cadeia produtiva do carvão vegetal, ainda são impedimentos para a implementação e popularização do carvão vegetal.

Palavras-chave: carvão vegetal; siderurgia; biomassa; fontes renováveis.

ABSTRACT

Due to the growing demand for renewable energy sources, charcoal together with biomass has been standing out on the world stage as alternatives to fossil fuels. Brazil is the world's largest producer of charcoal and its main consumer market is the steel industry. The present work was carried out from bibliographic reviews on the biomasses of elephant grass, babassu coconut, coconut-bay and sugarcane and was divided into three stages. Initially, the national productive capacity of biomass was surveyed, and it was found that the productive capacity of babassu coconut and coco-baía are not sufficient to meet national demand, unlike elephant grass and sugarcane, which have the capacity and technology needed. In the second stage, the parameters of fixed carbon content, ash, volatile materials and calorific value were raised and discussed. At this stage, it was evidenced that the biomasses have excellent properties and can be used as alternative sources to coke. Finally, the main challenges in the implementation of charcoal were investigated and it was concluded that the high costs of logistics, implementation and restructuring of the charcoal production chain are still impediments to the implementation and popularization of charcoal.

Keywords: charcoal; steel industry; biomass; renewable sources.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - As regiões internas do alto-forno.....	14
Figura 2 - Etapas da produção do aço.....	19
Figura 3 - Principais componentes da biomassa lignocelulósica.....	24
Figura 4 - Balanço Energético Nacional e as participações dos diversos tipos de fontes de energia.....	25
Figura 5 – Fluxograma da metodologia adotada para elaboração do trabalho....	28
Figura 6 - Palmeira e coco-babaçu.....	29
Figura 7 - Produção de coco-babaçu no Brasil.....	30
Figura 8 - Coco-baía.....	31
Figura 9 - Produção regional de coco-baía em 2020.....	32
Figura 10 - Produção nacional de coco-baía.....	33
Figura 11 - Colheita e transporte do coco-baía.....	33
Figura 12 - Plantação de capim-elefante.....	34
Figura 13 - Plantação de cana-de-açúcar.....	36
Figura 14 - Maiores produtores de açúcar.....	36
Figura 15 - Produtividade da cana-de-açúcar nos estados brasileiros.....	37
Figura 16 - Produção nacional de cana-de-açúcar.....	38
Figura 17 - Investimentos ligados à cana-de-açúcar.....	39
Figura 18 - Média dos parâmetros de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis.	47
Figura 19 - Poder calorífico médio das biomassas.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teores de materiais voláteis de biomassas segundo a literatura.....	40
Tabela 2 - Teor de carbono fixo das biomassas segundo a literatura.....	42
Tabela 3 - Teor de cinzas das biomassas segundo a literatura.....	43
Tabela 4 - Poder calorífico das biomassas segundo a literatura.....	45
Tabela 5 - Poder calorífico, cinzas, carbono fixo e materiais voláteis médio.....	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo Geral.....	12
2.2	Objetivos específicos.....	12
3	JUSTIFICATIVA.....	13
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
4.1	Alto-forno.....	14
4.1.1	Regiões do alto-forno.....	14
4.1.2	Processo de produção do aço.....	18
4.1.3	Etapas da produção do aço.....	19
4.1.4	A injeção de combustível auxiliares no alto-forno.....	20
4.1.5	Principais características de carvões pulverizados.....	21
4.1.6	Qualidade desejada de carvões pulverizados.....	22
4.2	A indústria siderúrgica e o meio ambiente.....	23
4.3	Biomassa.....	23
4.3.1	Possíveis aplicações de biomassas em altos-fornos.....	26
4.3.2	Aspectos gerais das biomassas.....	26
5	METODOLOGIA.....	28
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
6.1	Potencial produtivo das biomassas.....	29
6.1.1	Coco-babaçu.....	29
6.1.2	Coco-baía.....	31
6.1.3	Capim-elefante.....	34
6.1.4	Cana-de-açúcar.....	36
6.2	Análise dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas.....	39
6.2.1	Teor de materiais voláteis.....	39
6.2.2	Teor de carbono fixo.....	41
6.2.3	Teor de cinzas.....	43
6.3	Poder calorífico.....	44
6.4	Desafios e perspectivas do carvão vegetal.....	48
6.4.1	Aspectos econômicos.....	50
7	CONCLUSÃO.....	52

1 INTRODUÇÃO

Em razão do aumento mundial da emissão de gases do efeito estufa e pela busca por energias renováveis, as biomassas destacam-se como fontes alternativas aos combustíveis fósseis. O carvão vegetal pode ser empregado em diversos setores, como o industrial químico, agrícola, indústrias de cimento, cerâmicas e em especial na indústria siderúrgica.

Entre os setores que mais emitem gases de dióxido de carbono (CO₂), a siderurgia se destaca negativamente como uma das que mais emitem gases do efeito estufa devido ao alto consumo de coque de carvão metalúrgico. A etapa de redução é uma das que possuem os maiores consumos energéticos dentro do processo produtivo do aço. Dessa forma, uma das medidas para a conservação de energia nessa etapa é pela injeção de combustível auxiliar.

Atualmente a siderurgia nacional é a única a utilizar o carvão vegetal em larga escala industrial para a produção do aço, ferro-gusa e ferro liga. Ainda de acordo com pesquisa levantada pela PS Market Research (2020), a produção brasileira de carvão vegetal gerará aproximadamente 2,0 bilhões de dólares a partir de 2024 provenientes receitas a partir do carvão vegetal.

As biomassas são compostos orgânicos derivados de plantas, animais e microrganismos. Devido a sua grande capacidade de produção em *commodities* agrícolas em território nacional, as biomassas estão ganhando valor comercial devido ao seu potencial para fins energéticos. O carvão vegetal é o principal produto obtido a partir das biomassas através do processo térmico pirólise.

A partir desse contexto, o presente trabalho propõe um estudo teórico por meio de pesquisa e discussão a fim de avaliar o uso das biomassas cana-de-açúcar, capim-elefante, coco-baía e coco-babaçu como fontes alternativas aos combustíveis fósseis empregados na indústria siderúrgica, relacionando o potencial energético com a capacidade produtiva das biomassas no cenário nacional.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal investigar e avaliar as biomassas cana-de-açúcar, capim-elefante, coco-baía e coco-babaçu como fontes alternativas ao coque na indústria siderúrgica.

2.2 Objetivos específicos

- Investigar e avaliar os parâmetros dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e teor de cinzas das biomassas;
- Levantar dados quanto à produção nacional das biomassas a fim de analisar a disponibilidade dessas matérias-primas para utilização em alto-forno;
- Investigar e avaliar o poder calorífico das biomassas, comparando com os carvões utilizados na técnica de injeção de carvão pulverizado típicos de PCI (Injeção de Carvão Pulverizado - *Pulverized Coal Injection*);
- Discutir sobre os principais desafios e as perspectivas da produção do carvão vegetal no Brasil para o futuro.

3 JUSTIFICATIVA

No último século a emissão de CO₂ na atmosfera terrestre aumentou em mais de 25%, sendo a indústria siderúrgica responsável por uma parcela significativa de emissão de CO₂. Em 2009 foram emitidas 36.778 toneladas de CO₂, em 2011 totalizou 46.926 toneladas, já em 2017 essa quantidade saltou para 65.397 toneladas de CO₂ emitidos pela indústria siderúrgica (IABr, 2010; IABr 2018).

Além da siderurgia, a agricultura brasileira também contribui negativamente com a emissão de CO₂, entretanto a forma mais simples para reduzir a emissão de gases do efeito estufa é através do sequestro de carbono através da fotossíntese. A empregabilidade das biomassas cultivadas na agricultura brasileira pode ser uma alternativa para redução de gases do efeito estufa na indústria siderúrgica, uma vez que o balanço geral de CO₂ torna-se positivo devido ao processo fotossintético existente no ciclo natural das biomassas.

As biomassas cana-de-açúcar, capim-elefante, coco-babaçu e coco-baía integram a produção agrícola nacional e se destacam por conta das suas propriedades químicas, além disso, se aliam ao eucalipto como mais uma fonte energética para transformação em carvão vegetal.

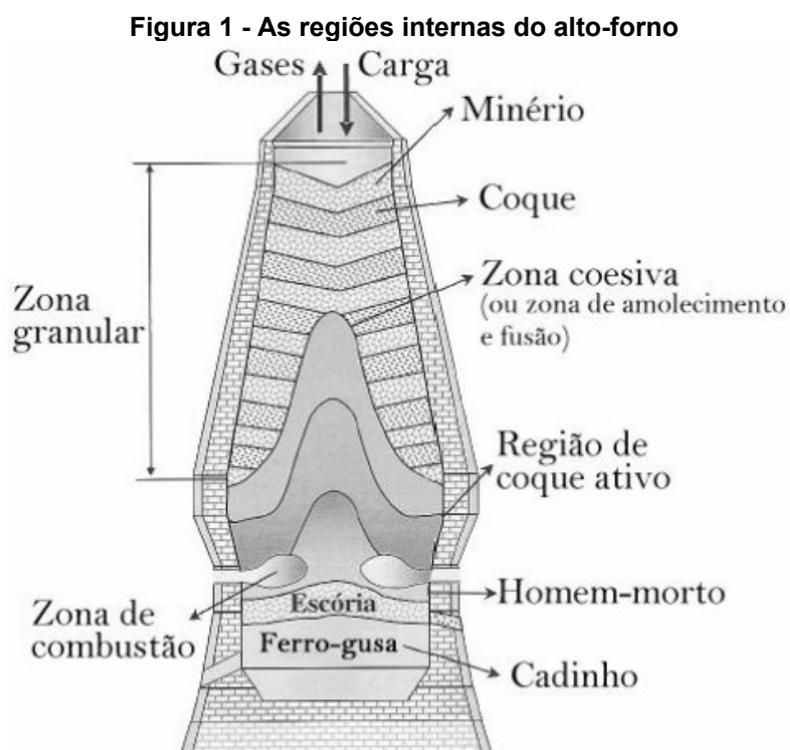
Neste contexto, o presente trabalho tem como justificativa estudar possíveis fontes renováveis que possam ser utilizadas na indústria siderúrgica para contribuir com a redução de CO₂ e a preservação do meio ambiente.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Alto-forno

O principal equipamento utilizado para a produção do ferro-gusa é o alto-forno, sendo esse responsável pela produção de cerca de 70% do aço produzido no mundo. As principais matérias-primas utilizadas no alto-forno são: carga metálica (minério de ferro, pelota e sinter), combustível (coque ou carvão vegetal) e fundentes (calcário, dolomita e quartzo). A redução do óxido de ferro ocorre conforme as matérias-primas descem em direção oposta ao fluxo de CO proveniente da oxidação do carbono com o oxigênio do ar aquecido, que é soprado pelas ventaneiras (ASSIS, 2014). Na Figura 1 é ilustrado o corpo principal do alto-forno.

4.1.1 Regiões do alto-forno



Fonte: Adaptado de Rizzo (2009)

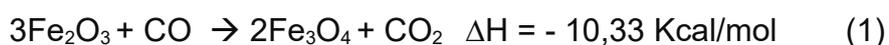
De acordo com Mourão et al (2007) e Yallico (2011), na década de 70 foram realizados estudos das regiões internas do alto-forno, as quais são descritas a seguir:

a) Zona Granular

Zona de carregamento do minério e coque através da goela, região cilíndrica do alto-forno. Na goela também ficam posicionados os equipamentos de distribuição de carga e sensores de medições.

Nesta zona o minério e o coque são carregados em camadas alternadas. Aqui a hematita (Fe_2O_3) é reduzido a magnetita (Fe_3O_4) pela ação do gás redutor óxido de carbono (CO) que ocorre após o carregamento no topo. Ainda nessa etapa ocorre a formação do óxido de wustita (FeO) através da reação da magnetita com o CO do gás redutor. Nesta região as reações de redução são feitas sem o consumo de carbono, uma vez que nesta região é utilizada a carga térmica e o potencial redutor dos gases provenientes das regiões inferiores do alto-forno. A temperatura varia de 200 a 1000 °C. Próximo dos 1000 °C a wustita reduz a ferro metálico. Na zona granular, o coque age como fonte de calor e agente redutor favorecendo a permeabilidade para a passagem dos gases e líquidos dentro do alto-forno.

Para as temperaturas de 200 a 950 °C ocorre o pré-aquecimento da carga e redução indireta dos minérios:



Em temperaturas próximos à 900 °C tem-se a calcinação do calcário e as seguintes reações ocorrem:



Em temperaturas de 950 a 1000 °C a seguinte reação está em equilíbrio termodinâmico:



b) Zona Coesiva

Também chamada de zona de amolecimento, é constituída por camadas de coque e camadas coesivas alternadas. Os minérios amolecem e se fundem, a camada de coque permanece no estado sólido e permite o escoamento do fluxo gasoso para as partes superiores do alto-forno (cuba). Nesta região as temperaturas partem de 1000 a 1450 °C. Na zona coesiva ocorre a formação de ferro metálico e escória primária com baixo ponto de fusão (1300 °C) e alto teor de FeO.

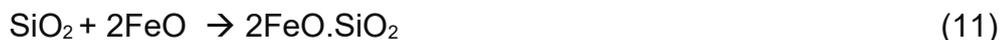
Nesta região ocorrem as seguintes reações:



A redução direta que ocorre nesta região se dá pela soma das seguintes reações:



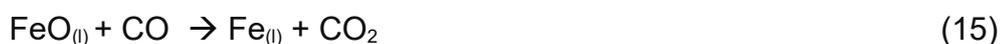
Já a formação da escória primária ocorre pelas reações:



c) Zona de gotejamento

Nesta região o coque é empilhado na forma sólida e em duas partes. Uma é responsável por alimentar a zona de combustão e a outra é inativa, também conhecida como “homem morto”. A zona do coque ativo compreende o coque que desce em direção as ventaneiras para ser queimado; já o “homem morto” é o coque que não desce em direção às ventaneiras e é consumido pela incorporação do carbono ao gusa. Nesta zona ocorre o gotejamento do gusa e da escória através do empilhamento do coque em contra corrente com o gás redutor. Nela ocorre a redução das impurezas do minério, parte do FeO contido na escória e a formação de escória secundária.

As reações que ocorrem na zona de gotejamento são:



d) Zona de combustão

Região situada em frente as ventaneiras onde o ar quente enriquecido ou não com oxigênio é soprado. Nessa região são gerados os gases redutores responsáveis pelo aquecimento, redução e fusão da carga metálica. Conforme esses gases sobem através da carga, o calor é transferido e ocorrem as reações de redução. A temperatura dos gases nessa região parte de 2200 °C na região das ventaneiras a 200 °C no topo do forno.

As reações que ocorrem nessa zona são:



O gás CO₂ resultante da combustão do coque com o ar reage com o carbono e forma o gás redutor CO:



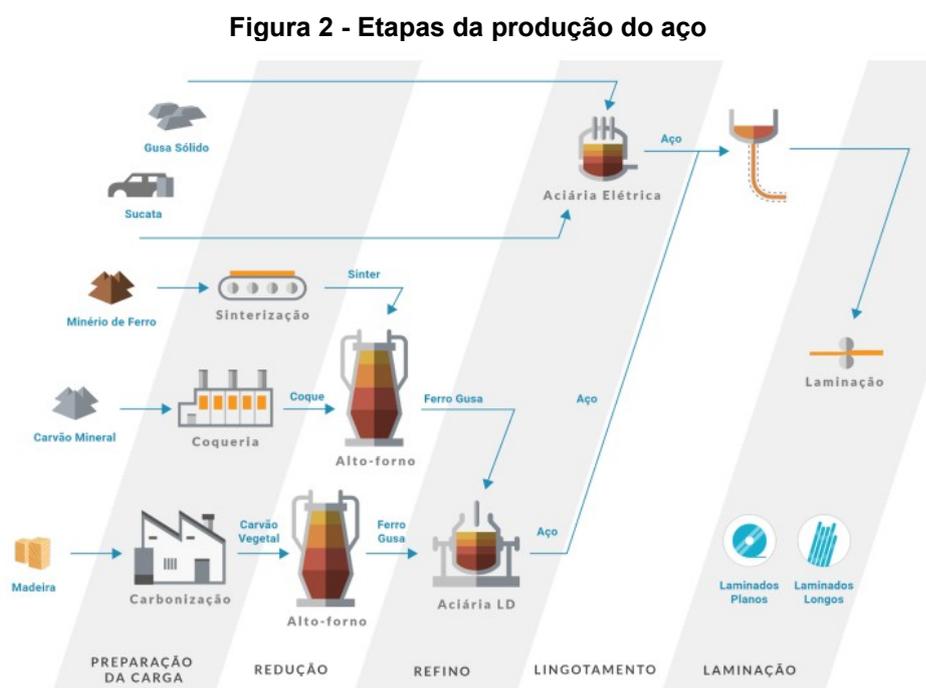
Nesta região, o CO em ascensão é o principal agente redutor do minério de ferro. Também ocorre a formação da escória final com a dissolução do calcário que não foi incorporado na rampa e absorção da cinza do coque (SiO₂). A rampa consiste na região de formato tronco-cônico, com maior diâmetro na parte superior. Esse formato auxilia na sustentação da carga e o gotejamento do gusa e escória para

e) Cadinho

Região que tem como finalidade armazenar por tempo controlado o gusa e a escória produzidos. Situa-se na parte inferior do alto-forno. Nessa região ocorrem perfurações periódicas denominadas de furos-de-gusa que têm como objetivo a drenagem do gusa e escória, sendo esses, separados por densidade por meio de calhas seletoras.

4.1.2 Processo de produção do aço

As rotas tecnológicas para a produção do aço são denominadas de rota integrada e rota semi-integrada. A rota integrada consiste em três etapas básicas de produção: redução, refino e laminação, enquanto a rota semi-integrada não tem a etapa de redução. As usinas integradas produzem o aço a partir do minério de ferro, onde o ferro-gusa é obtido através de um agente redutor, normalmente o coque como redutor ou o carvão vegetal. Conforme ilustrado na Figura 2, as principais etapas de produção do aço envolvem a preparação da carga, redução, refino, lingotamento e laminação (IAB, 2020).



Fonte: Instituto Aço Brasil (2020)

4.1.3 Etapas da produção do aço

As etapas para a produção do aço são descritas a seguir conforme apontado pelo Instituto Aço Brasil (2020):

a) Preparação da carga

Esta etapa consiste na preparação do minério e do carvão a fim de otimizar o rendimento. O minério normalmente é aglomerado por meio de sinterização ou pelletização. Para o carvão mineral, é necessário que sejam retirados os compostos voláteis por meio do aquecimento em fornos e da obtenção do coque.

b) Redução

Etapa em que ocorre a redução do óxido de ferro a ferro metálico no alto-forno. Os materiais carregados no alto-forno são transformados em ferro-gusa, escória e gás de alto-forno. Para a produção do aço somente o ferro-gusa é utilizado, já os outros coprodutos podem ser reaproveitados. A escória tem utilização em indústrias de cimento e o gás de alto-forno é empregado na geração de energia.

c) Refino

O ferro-gusa proveniente dos altos-fornos é encaminhado para fornos a oxigênio com o objetivo de reduzir o teor de carbono e remoção de impurezas a fim de obter as especificações necessárias para utilização do aço. Essa é uma etapa muito importante para o processo, uma vez que ela define a qualidade do aço.

d) Lingotamento

O lingotamento pode ocorrer de duas formas: contínuo ou convencional. No lingotamento convencional o aço líquido é vazado em moldes individuais denominados de lingoteiras. Os lingotes podem ter tamanhos e formas diferentes, variando conforme o produto desejado. Já no lingotamento contínuo o aço líquido é vazado de forma contínua em moldes de cobre, solidificando em produtos semiacabados.

e) Laminação

A laminação é a última etapa do processo siderúrgico e consiste no processamento dos produtos semiacabados. Nessa etapa, esses produtos são processados mecanicamente para serem transformados em produtos siderúrgicos como barras, chapas, bobinas, vergalhões e entre outros.

4.1.4 A injeção de combustível auxiliares no alto-forno

A injeção de combustível auxiliar durante a etapa de redução é uma das maneiras para reduzir o consumo específico do coque e o custo final do ferro-gusa, aumentando a produtividade. Diversos combustíveis auxiliares podem ser utilizados,

como gás natural, alcatrão, óleo, gás de coqueria e carvão pulverizado (CAVALIERO E JANUZZI, 1999).

Para que o carvão pulverizado possa ser utilizado, é necessário passar por um processo de moagem para atingir a granulometria ideal e secagem para redução de umidade. O carvão é então injetado no alto-forno através das ventaneiras onde irá sofrer desvolatilização e queima, gerando calor e gases. O calor gerado aquece a carga metálica e os gases (CO e H_2) e servirão para reduzir a carga metálica, diminuindo assim a quantidade de combustível pelo topo do alto-forno (ASSIS, 2014).

Segundo Assis (2014, apud ASSIS, 2009 e MOURÃO, 2007), as principais vantagens em utilizar carvão pulverizado nos altos-fornos são:

- Redução de custos pela substituição do coque por carvões não coqueificáveis;
- Aumento da produtividade pelo enriquecimento do ar soprado com oxigênio;
- Diminuição na degradação ambiental por conta da otimização do consumo energético;
- Maior estabilidade de qualidade do gusa e redução do teor de silício;
- Preservação nas reservas de carvão mineral coqueificável.

4.1.5 Principais características de carvões pulverizados

As principais características e propriedades desejadas para os carvões utilizados através do sistema de injeção de carvão pulverizado - PCI são: matéria volátil, teor de carbono e hidrogênio, poder calorífico, umidade, cinzas e enxofre. Essas propriedades serão abordadas a seguir de acordo com as descrições de Hunty et al (1996) e Carpenter (2006).

Matéria volátil: consiste na liberação de gases (H_2 , CH_4 e CO), hidrocarbonetos pesados e gases não-combustíveis (CO_2 e vapor d'água). Embora do ponto de vista do processo de combustão é desejado o uso de carvão alto-volátil, visando extrair a máxima injeção, taxa de substituição e o mínimo de resfriamento, é desejado um carvão baixo volátil devido ao seu maior teor de carbono fixo. Também é desejado um menor teor de voláteis em função do volume de gases gerados.

Carvões com alto teor de voláteis contribuem com mais hidrogênio para a redução do minério, entretanto, o maior volume de gases pode levar a problemas de pressão nas ventaneiras do alto-forno.

Hidrogênio: atua como agente redutor dos óxidos de ferro. O maior benefício do hidrogênio se dá pelo fato que a redução de minério por hidrogênio é menos endotérmica que reação C-FeO, diminuindo as necessidades energéticas na zona de redução. Outro ponto a ser considerado é que as reações com hidrogênio são consideravelmente mais rápidas, o que favorece com que essas reações ocorram em temperaturas menores. Em geral, o teor de hidrogênio do carvão aumenta com a diminuição do grau de carbonificação.

Poder calorífico: pode ser entendido como a quantidade de calor por unidade de massa que é liberada durante a combustão. Em geral quanto maior o poder calorífico melhor será o carvão vegetal, uma vez que maior será a taxa de substituição ao coque.

Umidade: essa propriedade afeta diretamente o consumo de energia dos pulverizados pelo aumento do volume e temperatura do ar que são necessários para uma secagem adequada do carvão. A alta umidade tende a baixar a temperatura de chama e o reator necessitará de mais energia para sua evaporação. No geral é desejado um teor de umidade inferior a 10%.

Cinzas: as cinzas têm um papel fundamental na injeção devido ao seu teor no carvão, composição e temperatura de fusão. Normalmente é recomendado um teor máximo de 10% de cinzas. O aumento no teor de cinzas do carvão aumenta o consumo de carbono no alto-forno, o que aumenta a necessidade de fluxantes e conseqüentemente, diminui a capacidade produtiva.

Enxofre: a importância do enxofre se dá em razão do seu efeito no ferro-gusa. A escória do alto-forno apresenta boas propriedades dessulfurantes, entretanto, a injeção de carvão pode levar ao aumento na quantidade de enxofre no alto-forno, o que aumenta os custos operacionais em razão da necessidade de modificação de basicidade e do aumento do volume de escória. O limite do teor de enxofre é em geral abaixo de 1%.

4.1.6 Qualidade desejada de carvões pulverizados

De acordo com Lopes (2010), alguns parâmetros são importantes para delimitar a qualidade de carvões voltados para o sistema de injeção de pulverizados, alguns desses parâmetros são descritos a seguir:

O teor de cinzas é de extrema importância para a qualidade do gusa e operação dos fornos, uma vez que ele resulta em importante redução da resistência do coque à abrasão. A preferência é de carvões com teores de cinzas em até 10%. Além do teor de cinzas, baixos teores de enxofre e fósforo são indesejáveis, uma vez que afetam diretamente na qualidade do aço, já que o enxofre causa fragilidade a quente, enquanto o fósforo possibilita a fragilização a frio.

Em relação aos teores de álcalis, é desejado baixos teores a fim de minimizar o ataque aos refratários e problemas devidos à volatização dos álcalis. No que se refere ao teor de umidade, normalmente é limitado até 10%. Teores de umidade muito elevados podem levar ao entupimento dos filtros, selos e dos sistemas de transporte.

4.2 A indústria siderúrgica e o meio ambiente

É notório que as indústrias siderúrgicas são grandes geradoras de resíduos sólidos, emissões gasosas e efluentes que contribuem para a poluição do meio ambiente. Por sua vez, a indústria brasileira é pioneira na utilização do carvão vegetal como agente redutor do minério de ferro no alto-forno, contribuindo positivamente para o meio-ambiente. Atualmente, 11% da produção nacional de aço são obtidos a partir do carvão vegetal em substituição ao carvão mineral (IAB, 2020).

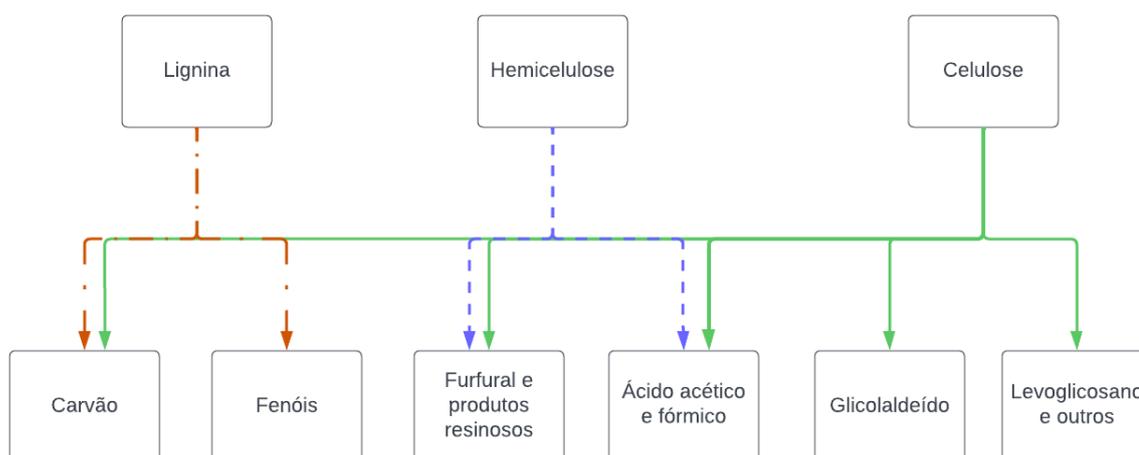
Conforme apontado por Silva (2022), com a utilização de carvão vegetal, o balanço de CO₂ no alto-forno é positivo, uma vez que a quantidade de CO₂ liberado pelo alto-forno é menor que a quantidade de CO₂ absorvido pelas florestas. De acordo com Assis (2014, apud ASSUNÇÃO 2009), o setor de redução é responsável pela maior emissão de CO₂ (85%) na cadeia integrada da produção do aço. Em relação à siderurgia integrada, 80% dos resíduos sólidos são gerados na etapa de redução e refino e, por outro lado, na siderurgia semi-integrada os resíduos produzidos pelos setores de matérias-primas e aciaria são praticamente a totalidade

da geração. Em geral, as siderurgias semi-integradas emitem cerca de 30% de CO₂ das integradas.

4.3 Biomassa

Biomassa pode ser entendida como toda matéria orgânica de origem animal, vegetal ou microrganismos com potencial de transformação em energia. Em geral, os principais constituintes da biomassa lignocelulósica, ou seja, de origem vegetal, são hemicelulose, celulose e a lignina (VIEIRA et al, 2014). Na Figura 3 são ilustrados os principais componentes da biomassa lignocelulósica e suas possíveis transformações a partir do tratamento térmico.

Figura 3 - Principais componentes da biomassa lignocelulósica



Fonte: Adaptado de Vieira, et al (2014)

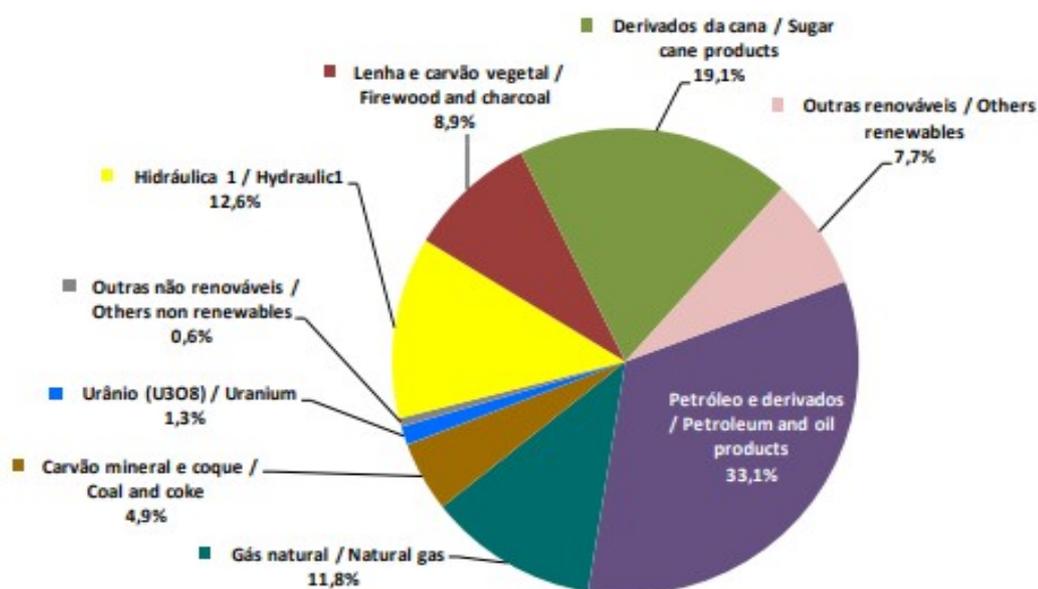
Considerada como uma das principais fontes de energias renováveis do mundo, as biomassas são responsáveis por 13,5% de toda energia gerada no mundo. Com o aumento da demanda global por energia elétrica, segundo o World Energy Balance, até 2035 o consumo mundial por energia aumentará em pelo

menos um terço. Sendo assim, a biomassa aparece como principal fonte de diversificação da matriz energética (IEA, 2019).

As fontes renováveis surgem como alternativas sustentáveis para reduzir o uso de produtos derivados do petróleo e a dependência energética dos países produtores e exportadores de petróleo e seus produtos. O uso da biomassa como fonte de energia tem gerado grande interesse da comunidade científica, em especial no Brasil, devido a sua abundância e ao baixo custo.

No Brasil a produção de energia a partir de fontes renováveis já é uma realidade. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2021, divulgado pelo Ministério de Minas e Energia, a participação dos recursos renováveis na oferta interna de energia foi de 48,4%. Conforme ilustrado na Figura 4, a participação da cana-de-açúcar foi de 19,1% e o carvão vegetal 8,9% na oferta de energias renováveis.

Figura 4 - Balanço Energético Nacional e as participações dos diversos tipos de fontes de energia



Fonte: Balanço Energético Nacional (2021)

Para que as biomassas sejam ambientalmente e economicamente viáveis é preciso realizar modificações para melhorar a concentração de energia, homogeneidade e propriedades (ALMEIDA; BRITO; PERRE, 2010).

Avaliar propriedades como a composição química imediata e molecular são importantes para determinar o potencial calorífico das biomassas. Como já citado

anteriormente, a composição química molecular da biomassa vegetal apresenta três tipos de moléculas: celulose, hemicelulose e a lignina; enquanto a composição química imediata denota o teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo (GOMES; OLIVEIRA, 1980).

Os componentes que são despreendidos no início da combustão, como hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono, são chamados de materiais voláteis. Já o teor de cinzas são os óxidos remanescentes da combustão total da madeira.

Para fins energéticos, as biomassas podem sofrer tratamento térmico ou não. Além da combustão, os processos de carbonização e torrefação são os mais utilizados para fins siderúrgicos (POHLMANN, 2014).

O Brasil destaca-se no cenário mundial como líder na produção da silvicultura, sendo as principais espécies cultivadas no país o eucalipto e o pinus. Em geral, os produtos obtidos são destinados para indústrias de celulose, construção civil, movelaria e entre outros. As empresas ligadas ao setor de celulose são responsáveis por 34% de toda a produção das florestas plantadas no país e a indústria siderúrgica 14% do que é produzido. Em território nacional o eucalipto é a principal fonte de biomassa empregada para a produção de carvão vegetal, em razão da grande disponibilidade e desejáveis propriedades para a produção de carvão vegetal como, teor de lignina, teor de cinzas, voláteis e carbono fixo (JUIZO *et al* 2017; BARROS, 2019).

4.3.1 Possíveis aplicações de biomassas em altos-fornos

Devido ao grande potencial econômico e ambiental, as biomassas são extremamente importantes para o cenário nacional, sendo as principais aplicações na indústria siderúrgica (LOPES; PINATTI, 2001):

- Combustível injetado nas ventaneiras dos altos-fornos;
- Fonte de carbono e aglomerante nos processos de pelletização, briquetagem e sinterização;
- Utilização em mistura de carvões para coqueificação.

Vale ressaltar que as biomassas empregadas no alto-forno também emitem CO₂, assim como o coque, entretanto, devido ao processo de remoção de CO₂ por

meio de fotossíntese o saldo de emissão de CO₂ se torna positivo. Com o propósito de difundir a utilização de biomassas, Sampaio (1999), demonstra que em comparação com o alto-forno a carvão mineral, o carvão vegetal possui um ganho em créditos de carbono de 5300 kg de C por tonelada de gusa produzido, devido ao balanço positivo que ocorre entre o reflorestamento e as emissões gasosas. Além de diminuir a utilização de combustíveis fósseis e aumentar a absorção de CO₂, as biomassas podem endossar a propagação e comercialização dos “Aços Verdes”.

4.3.2 Aspectos gerais das biomassas

Apesar do potencial ambiental e econômico, as características físicas e químicas das biomassas diferem bastante das propriedades dos carvões. Em geral as biomassas apresentam teores de umidade e voláteis maiores que os carvões e teores de cinzas e carbono fixo menores. Outro aspecto negativo é o elevado teor de higroscopicidade. O teor de cinzas de biomassas proveniente das madeiras varia de 0,5 a 2% na maioria das espécies. Já o teor de enxofre é mais baixo e os teores de hidrogênio e oxigênio são mais altos quando comparados ao dos carvões (POHLMANN, 2014).

O alto teor de oxigênio diminui o conteúdo energético da biomassa, enquanto o baixo teor de enxofre é altamente favorável para seu uso na redução do minério de ferro em alto-forno. Outro ponto importante é em relação à densidade, e nesse aspecto elas são menos densas e resistentes que os carvões. Em relação ao poder calorífico, as biomassas possuem menor capacidade energética que os combustíveis fósseis. O poder calorífico das biomassas lignocelulósicas é dado em função do seu teor de lignina. Para fins comparativo, o eucalipto, principal biomassa empregada atualmente possui poder calorífico de 4586,27 kcal kg⁻¹, enquanto o coque 8600 kcal kg⁻¹ (POMPEU, 2019; SILVA, 2017).

Pohlmann (2014) destaca as principais características de combustão dos carvões e das biomassas como:

- a) As biomassas contribuem com cerca de 70% de calor através de voláteis na queima, enquanto os carvões com 36%;
- b) O carvão de biomassa apresenta maior teor de oxigênio quando comparado com o carvão mineral o que acaba impactando no conteúdo energético;

c) As cinzas das biomassas são mais alcalinas do que as cinzas dos carvões, o que pode impactar na performance do alto-forno com problemas como o de corrosão.

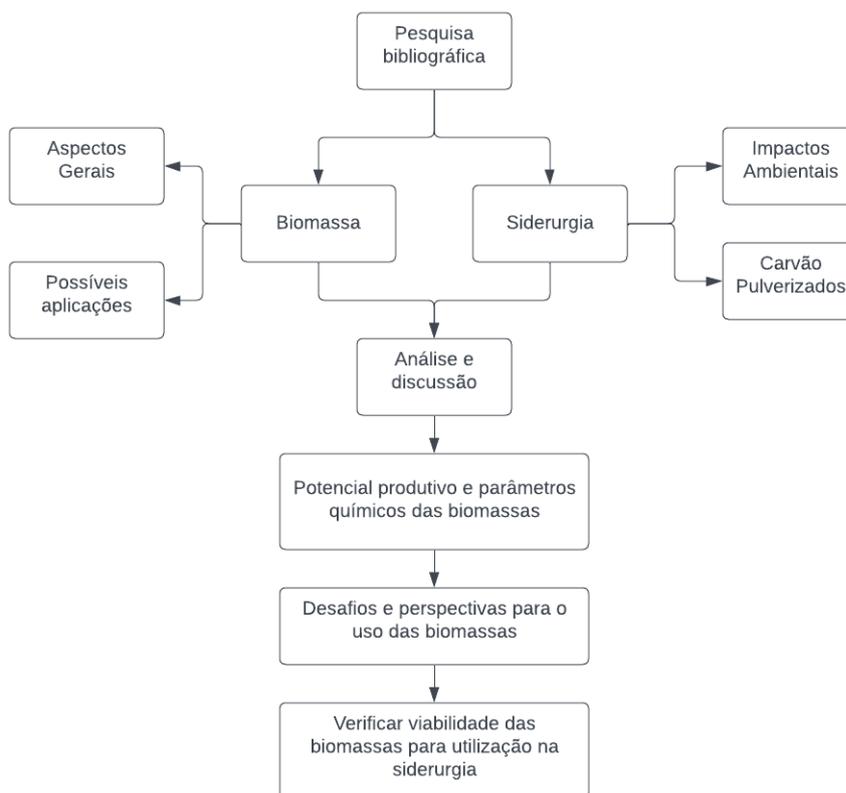
5 METODOLOGIA

A metodologia adotada no presente trabalho foi a revisão bibliográfica a respeito do alto-forno e das biomassas capim-elefante, coco-babaçu, coco-baía e da cana-de-açúcar.

Essa revisão foi realizada por meio de livros, de plataformas de acesso como *Science Direct* e *Web of Science* que possuem artigos relacionados ao objeto de estudo e sua importância para a sociedade e meio ambiente, além de pesquisas em sites de empresas e relatórios governamentais.

O fluxograma da metodologia adotada para o desenvolvimento do presente trabalho é apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma da metodologia adotada para elaboração do trabalho



Fonte: Autoria própria (2022)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Potencial produtivo das biomassas

6.1.1 Coco-babaçu

Segundo dados do IBGE (2020) estima-se que no estado do Maranhão, principal produtor, exista cerca de 18 milhões de hectares de florestas nativas de palmeiras de coco-babaçu.

Até o início dos anos 2010, o coco-babaçu, mostrado na Figura 6, era o principal produto florestal não madeireiro. A partir de 2012 outros produtos como a erva-mate, castanha-do-pará e carnaúba passam a superar a produção do coco-babaçu (PORRO,2019). Essa retração da produção do coco-babaçu é confirmada

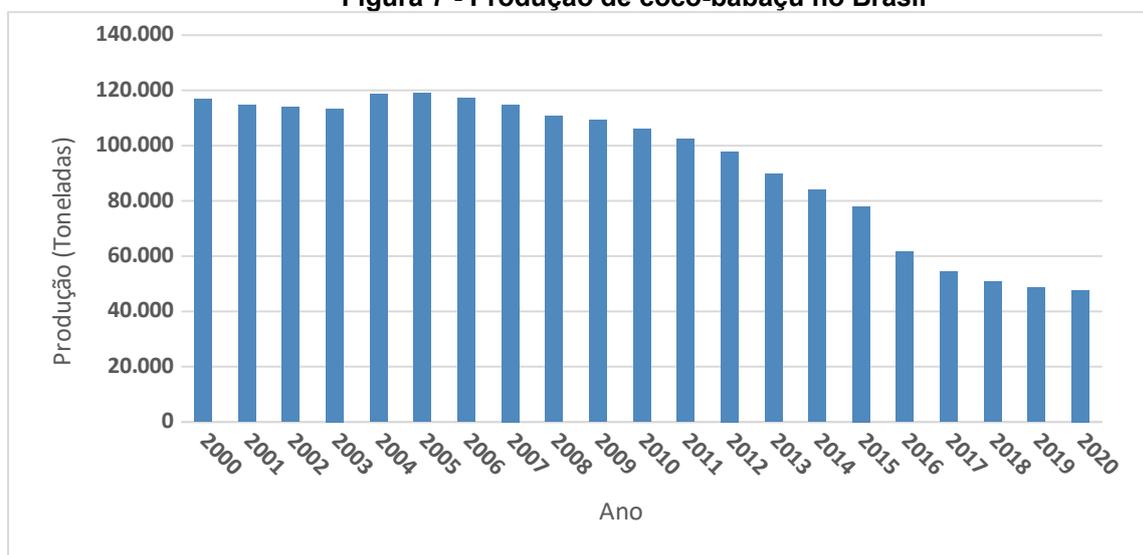
segundo série histórica do IBGE (2020), ilustrado na Figura 7, onde se nota a queda acentuada na produção do coco-babaçu. De acordo com os dados, em 2005 a quantidade produzida foi de 119 mil toneladas e já em 2020 resumiu-se em 47 mil toneladas.

Figura 6 - Palmeira e coco-babaçu



Fonte: Souza (2020)

Figura 7 - Produção de coco-babaçu no Brasil



Fonte: Adaptado de IBGE (2020)

Apesar do potencial energético do fruto, ainda existem diversos aspectos sociais e políticos que precisam ser discutidos antes que o coco-babaçu seja introduzido como fonte energética. Alguns desses aspectos conforme abordado por Putti *et al* (2012) são:

- Não incentivo do governo brasileiro no uso do coco-babaçu como fonte energética;
- A extração do fruto ainda é muito artesanal devido ao seu caráter extrativista;
- Baixo valor de produção quando comparado à outras culturas como a soja, mamona e entre outros.

Apesar de empregar um número significativo de mão de obra em sua cadeia produtiva, não existem cooperativas e indústrias de grande porte. As poucas que existem ainda são pouco exploradas pelo mercado nacional. Em relação à comercialização e o beneficiamento do fruto, pouco evoluíram nos últimos anos, uma vez que o coco-babaçu ainda é tratado como cultura de subsistência (PUTTI *et al*, 2012).

Mesmo com o grande número de mão de obra, a produtividade do coco-babaçu é muito baixa. Isso se deve ao fato de ser um processo muito manual e com técnicas bastante rudimentares. Outro fator que dificulta o cultivo do coco-babaçu, é que durante períodos de safra o coco-babaçu é facilmente substituído por grãos de outras culturas, normalmente muito mais vantajosos (PUTTI *et al*, 2012).

Diante do que foi levantado em relação à disponibilidade do coco-babaçu, é possível afirmar que o seu uso como fonte energética está diretamente associada à capacidade produtiva. Conforme citado anteriormente, o Brasil possui extensa área de babaçuais, entretanto o processo produtivo é altamente rudimentar e manual, e para atender a demanda nacional é preciso aumentar a colheita e o investimento em tecnologias que gerem a mecanização e aumentem a produtividade da cultura do coco-babaçu.

6.1.2 Coco-baía

Apesar de ser o quinto maior produtor mundial, o Brasil participa com apenas 3,7% de todo o montante produzido. A área total de cultivo do coqueiro no Brasil é de 187,5 mil hectares que produzem 1,6 bilhão de frutos, a Figura 8 ilustra

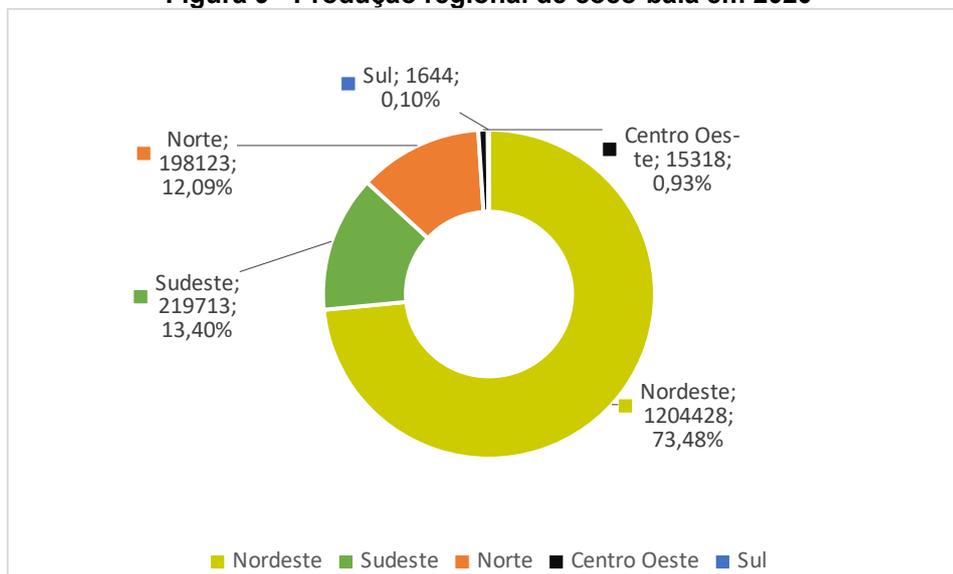
o coco-baía. Em território nacional o destaque fica com região nordeste, que é responsável por 73,5% de toda a produção conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 8 - Coco-baía



Fonte: Martins (2014)

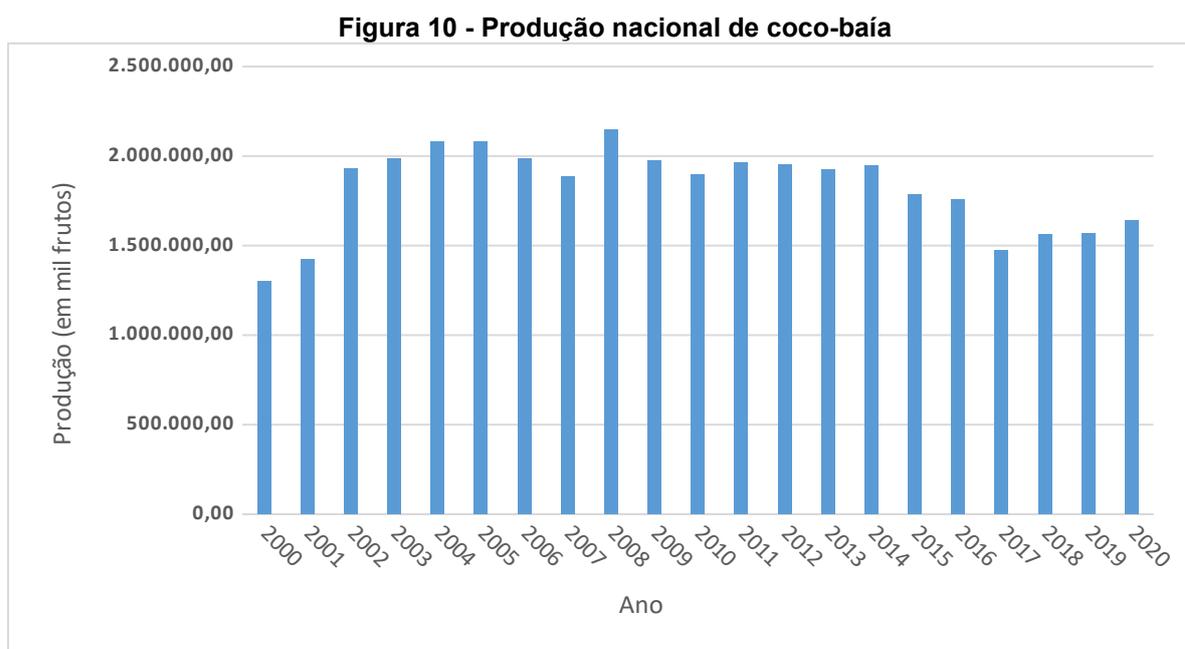
Figura 9 - Produção regional de coco-baía em 2020



Fonte: Adaptado de IBGE (2021)

Nos últimos anos o cultivo do coco-baía vem ganhando a atenção e interesse de outras regiões, principalmente no sudeste, centro oeste e norte do país (MARTINS; JUNIOR, 2014).

No começo dos anos 1990 houve o salto de produtividade da cultura do coco-baía, entretanto a partir dos anos 2010 nota-se um declínio na produção do coco, conforme dados do IBGE (2021) ilustrados na Figura 10. Martins e Junior (2014) ressaltam que apesar do estímulo, as maiores plantações continuam concentradas na faixa litorânea do Nordeste e Norte do Brasil. Martins e Junior (2014) ainda reforçam que mesmo as regiões Norte e Nordeste possuem as maiores participações na produção do coco, o rendimento da cultura em razão da produtividade é menor do que a de outras regiões, tal qual o coco-babaçu, isso se dá em razão do baixo nível tecnológico empregado, além de predominar um sistema de cultivo semi-extrativista. Na Figura 11 tem-se uma ilustração da colheita e transporte do coco-baía.



Fonte: Adaptado de IBGE (2021)

Figura 11 - Colheita e transporte do coco-baía



Fonte: Martins (2014)

Embora a expansão da cultura do coco no Brasil venha se destacando e surpreendendo com plantios em regiões não tradicionais, os coqueirais brasileiros em sua maioria encontram abandonados. Além disso, os produtores não se sentem estimulados em prosseguir com a cultura do coco devido a fatores como os baixos preços de venda do coco-baía no mercado e a falta de políticas governamentais de incentivo ao cultivo (MARTINS; JUNIOR, 2014 *apud* FONTES, 2010).

Conforme exposto anteriormente, é notório o crescimento da produção do coco-baía não somente em termos de cultivos, mas também em regiões que não são tradicionais de plantio. Contudo, para atender a demanda nacional e em especial do setor siderúrgico, é preciso o apoio de medidas governamentais que possibilitem o investimento tecnológico na área para melhorar a competitividade e produtividade do setor, em especial dos pequenos e médios produtores.

6.1.3 Capim-elefante

Entre as biomassas estudadas nesse trabalho, o capim-elefante, ilustrado na Figura 12, talvez seja o que mais se destaca no que se refere a alta produtividade, qualidade de biomassa e pequena demanda de insumos para a sua produção.

Figura 12 - Plantação de capim-elefante



Fonte: Morais (2008)

Dentre as gramíneas forrageiras, o capim-elefante é reconhecido mundialmente pelo seu potencial produtivo, sendo que no Brasil pode ser encontrado em todo território nacional. Isso muito se deve em razão da sua alta adaptabilidade frente às inúmeras condições de climas desfavoráveis, como a seca e o frio (SILVA; ROCHA, 2010 *apud* FREITAS *et al*, 2000; QUEIROZ, NASCIMENTO 2000; SANTOS *et al*, 2001; SILVA *et al* 2002). Silva e Rocha (2010), citando Shimoya (2002), reforçam que além do clima, o capim-elefante se adapta a praticamente todo o solo brasileiro, uma vez que ele se desenvolve muito bem em diferentes níveis de altitude, podendo ser encontrado em altitudes de até 2.200 metros. Ainda sobre o solo, Paniano *et al* (2011) destaca outra característica vantajosa sobre o capim-elefante, que ele pode ser plantado inclusive em solos degradados, o que evita a competição da gramínea com a produção de alimentos.

O capim-elefante possui grande produtividade por menor extensão de área, sendo uma das características que mais se destaca e uma das mais desejáveis em uma possível cultura de plantio. Essa gramínea possui um crescimento acelerado

quando comparado com outras fontes vegetais conforme apontado por Silva e Rocha (2010). Ainda de acordo com Silva e Rocha (2010, *apud* CARVALHO, 1985), a produção do capim-elefante pode atingir até 300 toneladas por hectares ao ano de matéria verde, enquanto para matéria seca, de acordo com Silva e Rocha (2010 *apud* Silva *et al*, 1995) a produtividade pode chegar a 80 toneladas por hectare ao ano.

Para fins comparativo, pode ser feito um paralelo da produção do capim-elefante com o eucalipto, fonte de biomassa que possui características de plantio, solo e clima semelhantes ao do capim-elefante.

Enquanto o capim-elefante apresenta produtividade média de 80 toneladas de massa seca por hectare, o eucalipto gera apenas de 7,5 a 15 toneladas de massa seca por hectare (SILVA; ROCHA, 2010 *apud* NOVA, 2009). Ainda em confronto com o eucalipto, o capim-elefante apresenta vantagens em relação ao tempo de corte, já que o eucalipto necessita de seis a sete anos para a primeira colheita e o capim-elefante oferece de duas a quatro colheitas anuais.

6.1.4 Cana-de-açúcar

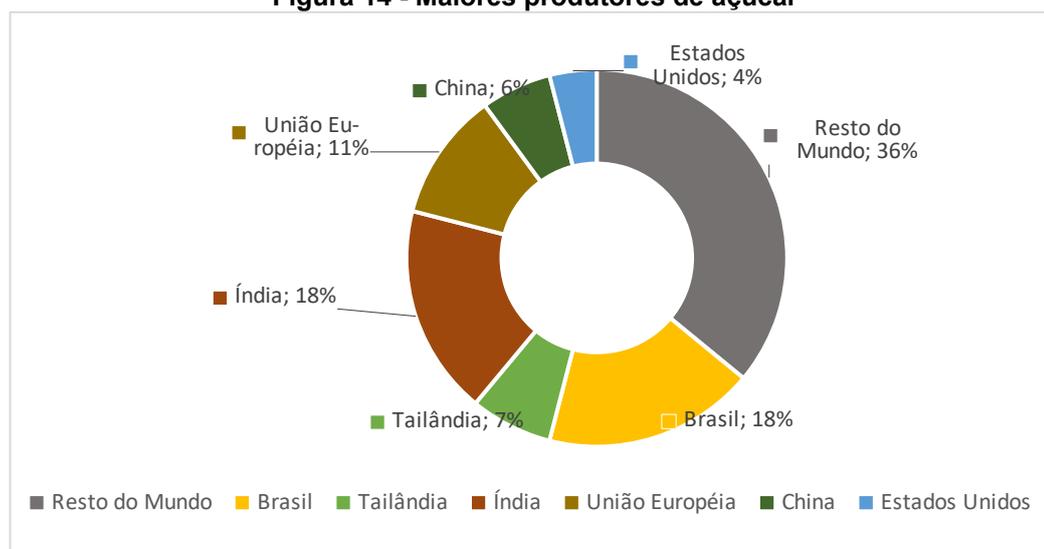
Destaque mundial no cultivo da cana-de-açúcar, ilustrada na Figura 13, em 2018 a produção brasileira de açúcar representou 18% de toda a produção mundial conforme mostrado na Figura 14.

Figura 13 - Plantação de cana-de-açúcar



Fonte: Agrosmart (2020)

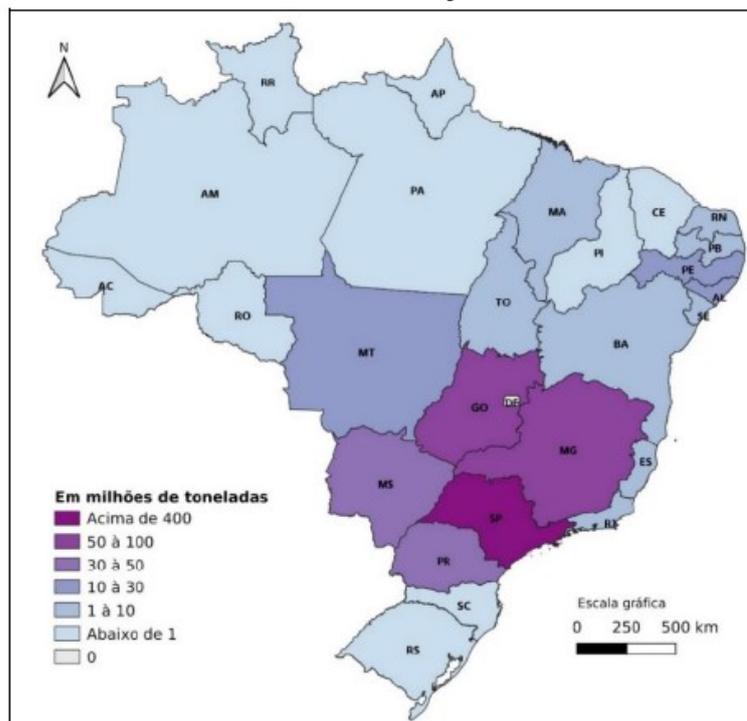
Figura 14 - Maiores produtores de açúcar



Fonte: Adaptado de USDA (2018)

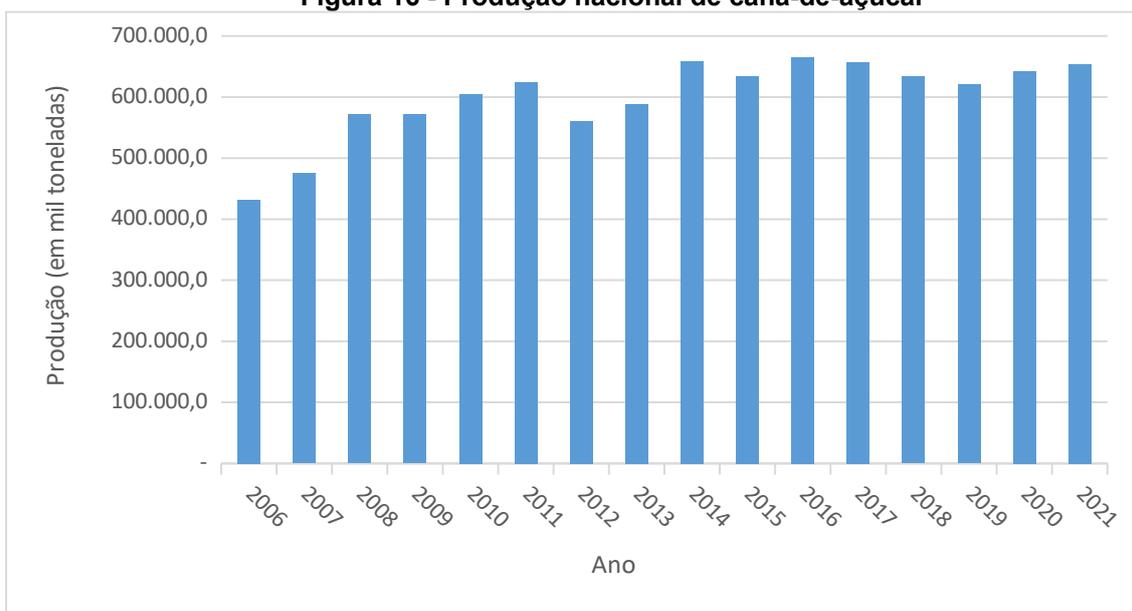
Conforme dados do IBGE (2021), a cana-de-açúcar é cultivada em 3.276 municípios brasileiros. A atividade canvieira se concentra nos estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso, conforme ilustrado na Figura 15. O maior produtor brasileiro de cana-de-açúcar é o estado de São Paulo, responsável por quase 60% de toda a produção nacional.

Figura 15 - Produtividade da cana-de-açúcar nos estados brasileiros



Fonte: Dias (2021 apud ÚNICA 2018)

A produção da cana-de-açúcar tem apresentado movimentos de altas a mais de 10 anos, conforme observado na Figura 16, muito em razão da alta demanda pela produção de etanol, coincidindo também com o lançamento dos veículos do tipo *flex fuel* (DIAS, 2021). A produção nacional ainda pode continuar a crescer e dobrar até 2030, conforme FAEP (2018). Essa impulsão se deve em razão da ampliação de investimentos no setor, pela alta por etanol e por programas governamentais como o *RenovaBio*, programa que tem como objetivo descarbonizar o mercado nacional de combustíveis.

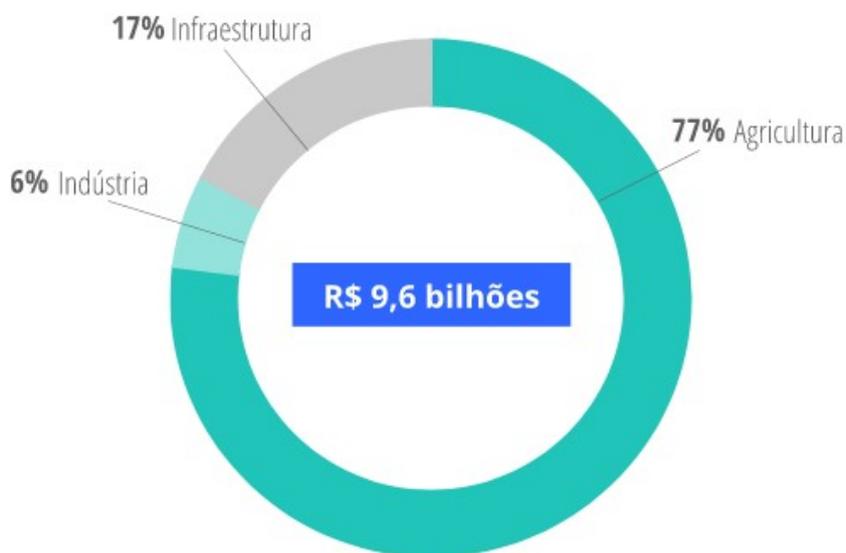
Figura 16 - Produção nacional de cana-de-açúcar

Fonte: Adaptado de IBGE (2021)

Ao contrário das outras culturas de plantio que foram debatidas até o momento, no Brasil a cultura da cana-de-açúcar é uma das mais modernas e tecnológicas. Em razão do volume exportado e dos produtos obtidos da cana-de-açúcar, o implemento das tecnologias está presente desde a melhoria do solo quanto à fertilidade, qualidade e até aumento da produtividade. A presença de grandes conglomerados industriais como Raízen, Bungee e Bioserv contribuem para o investimento, desenvolvimento e aumento da produtividade da cana-de-açúcar (DIAS, 2021).

Outro elemento a se considerar quando se refere às expectativas futuras do plantio da cana-de-açúcar são as políticas públicas e investimentos a respeito da cultura canavieira. Visando impulsionar a atividade canavieira através do incentivo à produção de etanol e outros biocombustíveis, o Governo Federal tem investido fortemente nessa cultura. Em 2019 foram destinados R\$ 9,6 bilhões para o plantio da cana, conforme visto na Figura 17. Desse montante, 77% foram destinados para expansão e renovação dos canaviais, 6% para modernização das indústrias e 17% ligadas à infraestrutura, como melhorias no transporte (SEADE, 2021).

Figura 17 - Investimentos ligados à cana-de-açúcar



Fonte: SEADE (2021)

6.2 Análise dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas

6.2.1 Teor de materiais voláteis

O teor de material volátil pode ser entendido como a fração da biomassa que é volatilizada durante o aquecimento, ou seja, a parte que se evapora por aquecimento. Protássio (2014, apud YANG *et al*, 2007; AMUTIO *et al*, 2012) define teor de materiais voláteis como uma complexa mistura de gases e líquidos provenientes da decomposição térmica e que promovem uma fácil e rápida combustão da biomassa. De acordo com Tavares e Santos (2013), quanto maior o teor de material volátil, maior será o poder calorífico da biomassa.

Favare (2019) analisou o capim-elefante no primeiro ano de cultivo e encontrou teores de materiais voláteis de 93,04%. De acordo com Mohammed *et al* (2015), em seus estudos encontraram teores médios de 85,17% para o capim-elefante. Ainda de acordo com Favare (2019), a idade de corte do capim-elefante influencia diretamente no teor de volátil. Salles (2014) analisando as propriedades do capim-elefante com idades de cortes de 60 e 120 dias encontrou teores de materiais voláteis de 64,8% e 68,3%, respectivamente.

Em relação ao coco-babaçu, Rocha (2018) encontrou 81,97% de teor de material volátil, já Teixeira e Milanez (2003) obteve 83,40%. Reis *et al* (2015 apud

CARMO, 1988) reforçam que apesar do teor de material volátil estar diretamente associado ao poder calorífico da biomassa, valores muito elevados de voláteis podem levar a uma exagerada expansão gasosa no carvão, resultando em trincas e porosidade, comprometendo com a qualidade e rendimento do carvão. Para comparação, segundo Carpenter (2006), é aceitável nível de teor de voláteis ideal para carvão pulverizados entre 20 e 40%.

Ferreira *et al* (2016), em seu estudo sobre o potencial da fibra da casca do coco-baía como fonte energética, encontrou teor de voláteis de 62,48% para coco-baía. Figueiredo (2011) analisando a pirólise da fibra do coco-baía obteve 77,83% de teor de voláteis. Cortez *et al* (2009) apresentou teor de voláteis de 73,30%. Segundo Figueiredo (2010, *apud* MARTINS 2007), quanto maior os teores de voláteis, mais rápido será a queima do carvão, o que não é desejável para processos de obtenção de energia em processos siderúrgicos, já que diminui o rendimento e contribui com o aumento do volume de gases, o que pode levar a problemas de pressão nas ventaneiras, em concordância com o que foi dito por Reis *et al* (2015).

O bagaço da cana-de-açúcar é o resíduo agroindustrial obtido em maior quantidade no Brasil. Santos (2011), em seu estudo sobre a caracterização do bagaço da cana-de-açúcar encontrou valores de teores de voláteis de 73,6%. Ponte *et al* (2019) encontraram 69,00% para teores voláteis. A Tabela 1 consolida os teores de materiais voláteis relatados anteriormente.

Tabela 1 - Teores de materiais voláteis de biomassas segundo a literatura

Biomassa	TMV (%)	Referências
Capim-elefante	93,04	Favare (2019)
Capim-elefante	85,17	Mohammed <i>et al</i> (2015)
Capim-elefante	68,30	Salles (2014) * <i>Com corte de 120 dias</i>
Coco-babaçu	81,87	Rocha (2018)
Coco-babaçu	83,40	Teixeira e Milanez (2003)
Coco-babaçu	78,71	Protássio (2014)
Coco-baía	62,48	Ferreira <i>et al</i> 2016)
Coco-baía	77,83	Figueiredo (2011)
Coco-baía	73,30	Cortez <i>et al</i> (2009)
Cana-de-açúcar	73,60	Santos (2011)
Cana-de-açúcar	69,00	Ponte <i>et al</i> (2019)

Fonte: Aatoria Própria (2022)

Como visto anteriormente, o poder calorífico de uma biomassa está associado a diversos fatores, sendo um deles o teor de voláteis. Geralmente quanto maior o teor de voláteis, maior o potencial calorífico, contudo, sob a perspectiva da qualidade do carvão como combustível, é desejável baixos valores de voláteis. Altos valores de voláteis podem resultar em trincas, porosidade e menor rendimento, comprometendo a qualidade do carvão para fins energéticos. Analisando a Tabela 1 pode-se observar que o coco-baía, juntamente com a cana-de-açúcar, se destacam com os menores valores de voláteis quando comparado com as demais biomassas. Isso pode representar uma possível aplicação como carvão vegetal para fins siderúrgicos, já que sob a perspectiva de qualidade é desejado baixos teores de voláteis para carvão com finalidade energética. Por outro lado, o capim-elefante foi o que obteve maiores valores de voláteis. Conforme dados apresentados anteriormente, para o capim-elefante com corte de 120 dias, é observado a redução de voláteis, mas ao comparar com as demais biomassas o capim-elefante com corte de 120 dias obteve valores de voláteis semelhantes ao das demais biomassas.

6.2.2 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo pode ser definido como a fração de matéria orgânica não volátil. Quanto maior o teor de carbono fixo, mais lenta é a combustão das biomassas. Isso é algo desejável uma vez que proporciona uma queima mais lenta e, conseqüentemente, aumenta o rendimento do carvão.

Sales (2014) verificou teor de carbono fixo para o capim-elefante de 16,1% e 16,9% para cortes de 60 e 120 dias, respectivamente. Já Broetto *et al* (2012) encontrou valores de 7,95%. Mohammed *et al* (2015) encontrou valores de 8,49% e 16,74%. Já Assis (2014) obteve 17,00% de teor de carbono fixo em seus estudos sobre o capim-elefante. Segundo ele, os parâmetros químicos das biomassas são influenciados por diversos fatores como fertilizante usado, local de plantio, clima, solo, tempo de colheita e outros parâmetros de cultivo, o que pode ser explicado essas variações de teores mostradas anteriormente.

Assis (2014) também analisou a cana-de-açúcar e determinou seu teor de carbono fixo em 14,95%. Ponte *et al* (2019) em suas análises obteve 15,4% de teor de carbono e Santos (2011) encontrou valores de 19,4% em seus estudos com biomassa da cana-de-açúcar.

Em relação ao coco-baía, Cortez *et al* (2009) encontrou valores de 23,49%, já Ferreira *et al* (2016) determinou teor de carbono em 24,7%, valores semelhantes ao encontrados por Cortez *et al*. Por outro lado, Figueiredo (2010) em suas análises obteve 11,22% de carbono fixo. Vale ressaltar que o teor de carbono fixo possui relação direta com a quantidade de lignina disposta no vegetal, e sua estrutura pode variar devido a fatores como tempo de maturação, local de plantio, fertilizante e entre outros.

Em estudos do coco-babaçu, Teixeira e Milanez (2003) encontraram valores de teor de carbono fixo de 15,16%. Protássio (2014) por sua vez obteve 19,86% de teor em suas análises e Rocha (2018) 15,16%.

O carbono fixo é responsável por promover a estabilidade e resistência térmica do combustível. Além disso, está diretamente associado ao poder calorífico da biomassa. Isso se deve por conta de que a entalpia associada ao carbono é o que determina o valor calórico dos combustíveis submetidos à pirólise ou à carbonização (REIS, 2015).

Conforme dados da Tabela 2, é possível notar a semelhança de teores de carbono fixo entre as biomassas apresentadas, com destaque para o coco-baía com maior teor relatado. Santos (2011) fez um estudo comparativo da cana-de-açúcar com o eucalipto e encontrou 24,10% de teor fixo. Fazendo um paralelo com os dados da Tabela 2, é possível observar que dentre as biomassas relatadas o coco-baía obteve valores similares ao da biomassa mais empregada podendo ser bom indício para sua empregabilidade em alto-forno.

Tabela 2 - Teor de carbono fixo das biomassas segundo a literatura

Biomassa	CF (%)	Referências
Capim-elefante	16,10	Sales (2014)
Capim-elefante	17,00	Assis (2014)
Capim-elefante	16,74	Mohammed <i>et al</i> (2015)
Coco-Babaçu	15,16	Teixeira e Milanez (2003)
Coco-Babaçu	19,86	Protassio (2014)
Coco-Babaçu	15,16	Rocha (2018)
Coco-Baía	11,22	Figueiredo (2010)
Coco-Baía	24,70	Ferreira <i>et al</i> (2016)
Coco-Baía	23,49	Cortez <i>et al</i> (2009)
Cana-de-Açúcar	14,95	Assis (2014)
Cana-de-Açúcar	15,40	Ponte <i>et al</i> (2019)
Cana-de-Açúcar	19,40	Santos (2011)

Fonte: Autoria Própria (2022)

6.2.3 Teor de cinzas

O teor de cinzas é um dos parâmetros mais importantes quando se fala de potencial energético. Em geral, altas quantidades de cinzas são indesejadas, uma vez que as cinzas reduzem o poder calorífico e diminuem a transferência de calor e a inflamabilidade do combustível, além de aumentar a corrosão de equipamentos. De acordo com Santos (2011), o teor de cinzas afeta a manipulação e os custos de processamento da conversão da biomassa.

Em relação ao capim-elefante, Sales (2014) encontrou 6,90% de teor de cinzas, valor similar ao encontrado por Mohammed *et al* (2015) de 6,34%. Por outro lado, Assis (2014) encontrou 3,90 % de cinzas em seu estudo a respeito do capim-elefante. Para o coco-babaçu os valores encontrados pelos autores foram semelhantes. Teixeira e Milanez (2003) encontraram 1,71%, valor similar ao encontrado por Protássio (2014) 1,73%, já Rocha (2018) obteve 0,70% de teor de cinzas.

Para o coco-baía, Ferreira *et al* (2016) encontrou 4,70% de cinzas em seus estudos. Cortez *et al* (2009) evidenciou 3,21% em suas análises, enquanto Figueiredo (2010) 1,76%. Conforme observado na Tabela 3, a cana-de-açúcar possui o maior teor de cinzas quando comparado com as demais biomassas. De acordo com Ponte *et al* (2019), os teores de cinzas obtidos foram de 15,40%, já Santos (2011) e Assis (2014) encontraram 11,27% e 11,80%, respectivamente.

Tabela 3 - Teor de cinzas das biomassas segundo a literatura

Biomassa	TC (%)	Referências
Capim-elefante	6,90	Sales (2014)
Capim-elefante	3,90	Assis (2014)
Capim-elefante	6,34	Mohammed <i>et al</i> (2015)
Coco-babaçu	1,71	Teixeira e Milanez (2003)
Coco-babaçu	1,73	Protassio (2014)
Coco-babaçu	0,70	Rocha (2018)
Coco-baía	1,76	Figueiredo (2010)
Coco-baía	4,70	Ferreira <i>et al</i> (2016)
Coco-baía	3,21	Cortez <i>et al</i> (2009)
Cana-de-açúcar	11,27	Assis (2014)
Cana-de-açúcar	15,40	Ponte <i>et al</i> (2019)
Cana-de-açúcar	11,80	Santos (2011)

Fonte: A autoria Própria (2022)

De acordo com Assis (2014), as características de cinzas é um fator limitante no que tange a empregabilidade de biomassas em alto-forno, em especial para injeção em alto-forno. Nesse processo de injeção, a composição e temperatura de fusão são controlados uma vez que são de grande importância para o processo. O aumento de cinzas acarreta no aumento do volume de escória e do consumo de calor no alto-forno, além do aumento de consumo de carbono e redução da capacidade produtiva do mesmo. De acordo com Quintanilla (2012) as cinzas podem afetar a reatividade do carvão devido a interações entre a cinza e a matéria carbonosa. Pohlmann (2014) reforça que os álcalis e fósforo presentes na composição das cinzas podem contribuir para a degradação do coque e deterioração dos refratários do alto-forno.

Ainda segundo Assis (2014), nas indústrias é aceitável no máximo 18% de teores de cinzas. De acordo com a Tabela 3, todas as biomassas analisadas estão dentro dos parâmetros de aceitação. O autor ainda reforça que o teor de cinzas do carvão mineral praticado na indústria é de 9,42% e fazendo um paralelo com os dados da Tabela 3, com exceção da cana-de-açúcar, todas as biomassas possuem menor teor de cinzas que o carvão mineral. De acordo com Favare (2019, *apud* TAVARES; SANTOS, 2013), a biomassa possuirá maior poder calorífico quando apresentar maior teor de material volátil e menor teor de cinzas. Dessa forma, as biomassas capim-elefante e coco-babaçu se destacam já que foram as biomassas de maior teor de volátil e menor teor de cinzas.

6.3 Poder calorífico

O poder calorífico pode ser entendido como a quantidade de energia liberada na forma de calor. Esta característica está diretamente relacionada com os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas da matéria-prima. Além desses, o poder calorífico também está associado à quantidade de carbono que o carvão possui, quanto maior o teor de carbono, maior será a energia liberada.

Para o capim-elefante, Vilela (2019) constatou valores de 4.100 kcal kg⁻¹, e esses resultados são condizentes com os encontrados por Marafon *et al* (2016) de 4.209 kcal kg⁻¹ e Ohimain *et al* (2014) 4.077 kcal kg⁻¹. De acordo com Marafon *et al* (2016, *apud* QUIRINO *et al*, 2005) o poder calorífico de qualquer biomassa vegetal está associado aos seus teores de lignina e extrativos. O capim-elefante apresenta

altas concentrações de fibras e ligninas, o que lhe confere elevado poder calorífico e confere a essa biomassa aplicações para a produção de carvão vegetal.

Em relação ao coco-baía, de acordo com Nogueira *et al* (2000) esse fruto tem um poder calorífico de cerca de 5.447,38 kcal kg⁻¹, valor condizente com o que foi encontrado pelos autores Ferreira *et al* (2016) e Tsai; Lee; Chang (2006) de 5.221,17 kcal kg⁻¹ e 5.452,85 kcal kg⁻¹, respectivamente.

Para o coco-babaçu Teixeira (2003), determinou um poder calorífico da biomassa em 4.300 kcal kg⁻¹. Já os autores Souza *et al* (2019) e Gadelha (2019) em seus trabalhos experimentais encontraram valores semelhantes ao de Teixeira, onde foram encontrados valores de 4.404,32 kcal kg⁻¹ e 4.327,89 kcal kg⁻¹, respectivamente.

Cortez *et al* (2008) em seus estudos a respeito da cana-de-açúcar encontraram um poder calorífico de 4.394,76 kcal kg⁻¹. Já Santos (2011) obteve 4.444 kcal kg⁻¹, enquanto Silva (2017) encontrou 4.143,98 kcal kg⁻¹. Santos (2011) ainda levanta o poder calorífico do eucalipto e do coque, sendo esses respectivamente 4.961 kcal kg⁻¹ e 7.432,88 kcal kg⁻¹. Ainda de acordo com o autor, além da lignina e teor de extrativos, o poder calorífico é influenciado pela composição química da biomassa. Observando os dados da Tabela 4, ao comparar as biomassas com os combustíveis fósseis, nota-se que as biomassas apresentam um poder calorífico significativamente inferior, entretanto, ao comparar com o eucalipto as biomassas apresentam valores semelhantes.

Tabela 4 - Poder calorífico das biomassas segundo a literatura

Biomassa	Poder calorífico (kcal kg⁻¹)	Referências
Capim-elefante	4.100,00	Vilela (2019)
Capim-elefante	4.209,00	Marafon <i>et al</i> (2016)
Capim-elefante	4.077,00	Ohimain <i>et al</i> (2014)
Coco-babaçu	4.300,00	Teixeira (2003)
Coco-babaçu	4.403,32	Souza <i>et al</i> (2019)
Coco-babaçu	4.327,89	Gadelha (2019)
Coco-baía	5.447,38	Nogueira et al (2000)
Coco-baía	5.221,18	Ferreira et al (2016)
Coco-baía	5.452,85	Tsai et al (2006)
Cana-de-açúcar	4.394,76	Cortez <i>et al</i> (2008)
Cana-de-açúcar	4.444,00	Santos (2011)
Cana-de-açúcar	4.143,98	Silva (2017)
Eucalipto	4.961,00	Santos (2011)
Coque	7.432,88	Santos (2011)

Fonte: Aatoria Própria (2022)

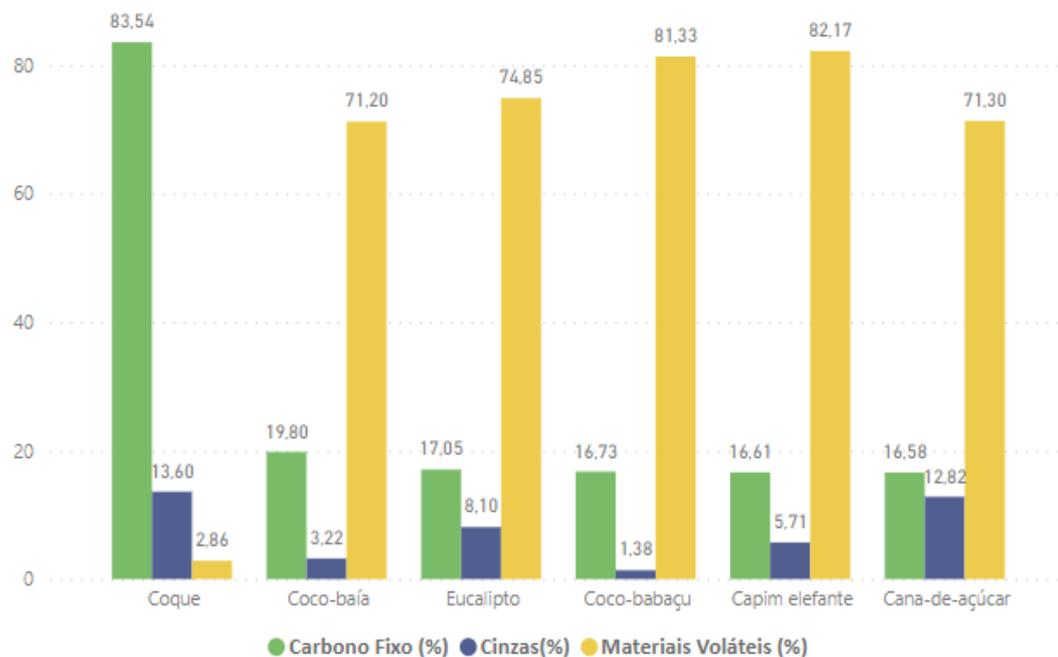
Para melhor visualização dos dados, foram traçadas as médias dos parâmetros apresentados anteriormente e apontadas na Tabela 5, e observadas nos gráficos Figuras 18 e 19.

Tabela 5 - Poder calorífico, cinzas, carbono fixo e materiais voláteis médio

Biomassas	Poder calorífico (kcal kg⁻¹)	Cinzas(%)	Carbono Fixo (%)	Materiais Voláteis (%)	Referências
Capim-elefante	4128,67	5,71	16,61	82,17	Adaptado de Viela (2011); Marafon <i>et al</i> (2016); Ohimain <i>et al</i> (2014)
Coco-babaçu	4343,74	1,38	16,73	81,33	Adaptado de Teixeira (2003); Souza <i>et al</i> (2019); Gadelha (2019)
Coco-baía	5373,80	3,22	19,80	71,20	Adaptado de Nogueira <i>et al</i> (2000); Tsai <i>et al</i> (2016); Ferreira <i>et al</i> (2016)
Cana-de-açúcar	4327,58	12,82	16,58	71,30	Adaptado de Cortez (2008); Santos (2011); Silva (2017)
Eucalipto	4961,00	8,10	17,05	74,85	Barros (2019)
Coque	7432,88	13,60	83,54	2,86	Quintanilla (2012) e Santos (2011)

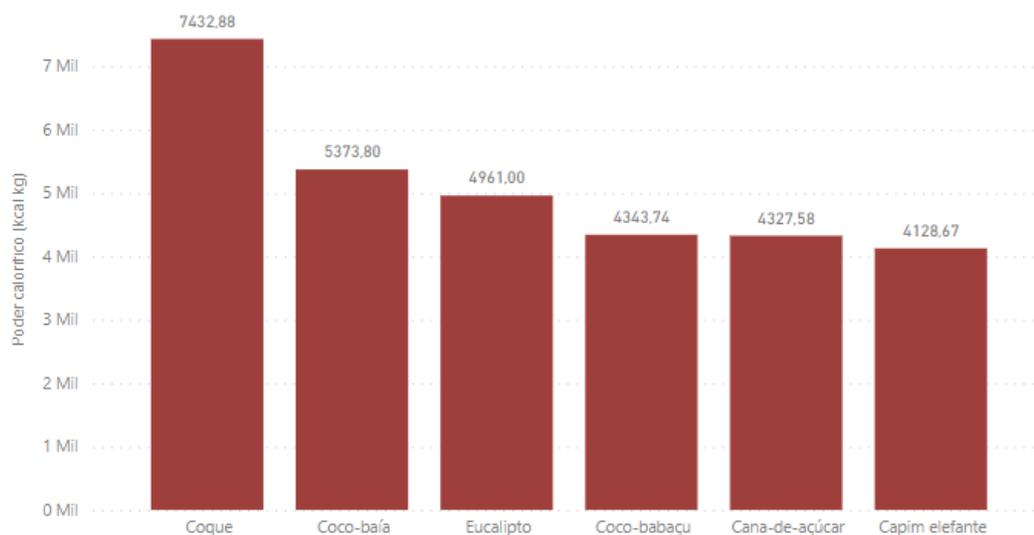
Fonte: Aatoria Própria (2022)

Figura 18 - Média dos parâmetros de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 19 - Poder calorífico médio das biomassas



Fonte: Autoria própria (2022)

De posse dos dados da Tabela 5 e Figura 19, destaca-se o coco-baía com o maior poder calorífico e teor de carbono fixo entre as biomassas. Como já citado, o poder calorífico está diretamente relacionado ao teor de carbono fixo. De acordo Santos (2011, *apud* Jara 1989), devido à constituição química, lignina e extrativos, as palmeiras e árvores Coníferas (eucalipto) podem apresentar maior poder calorífico quando comparadas com espécies folhosas, e esse fator pode explicar a diferença de poder calorífico entre as palmeiras, eucalipto e as biomassas folhosas capim-elefante e cana-de-açúcar.

Apesar da diferença de teor de cinzas da cana-de-açúcar com as demais biomassas, elas estão dentro do limite aceitável e praticado nas indústrias. As biomassas de menor teor de cinzas se destacam já que, segundo Lopes (2010), níveis baixos de cinzas possibilitam uma menor adição de fundentes no forno e consequentemente gera menor volume de escória no processo.

De acordo com Barros (2019; *apud* Brito e Barrichello, 1981), o carvão para uso metalúrgico deve possuir baixos teores de matérias voláteis e de cinzas e um alto teor de carbono fixo. Diante do que foi levantado, o coco-baía se destaca nos critérios levantados por Barros (2019).

6.4 Desafios e perspectivas do carvão vegetal

Embora seja referência mundial no que tange a fontes renováveis, os desafios brasileiros para a difusão do carvão vegetal como alternativa ao coque são muitos, mesmo com a utilização de fontes energéticas já consolidadas como o eucalipto. A crescente demanda mundial por matérias-primas sustentáveis trazem consigo grandes oportunidades para o mercado nacional, mas também levanta alguns pontos de atenção. Essas perspectivas e desafios são descritos a seguir.

O Brasil possui 9,6 milhões de hectares em áreas de florestas plantadas, sendo 79,8% de participação da silvicultura, que é uma ciência responsável por conciliar as necessidades do mercado com o aproveitamento e uso racional das florestas. De acordo com dados de 2020 do IBGE, a produção da silvicultura totalizou R\$ 18,8 bilhões e com destaque para a participação do carvão vegetal que foi responsável por R\$ 5,4 bilhões do que foi produzido, esse aumento da produção da silvicultura é reflexo da demanda mundial do aço. No Brasil existem aproximadamente 120 indústrias que utilizam o carvão vegetal para a produção do ferro-gusa. Em 2018, 20% do ferro-gusa produzido em território nacional foi obtido

através da utilização do carvão vegetal, já em 2021 esse valor saltou para 25%, sinalizando um aumento da demanda e utilização de fontes renováveis (SINDIFER, 2021).

Embora os países ao redor do globo ainda estejam se recuperando dos efeitos gerados pela pandemia da Covid-19, combinado com a alta da inflação, a demanda mundial por aço deve crescer 2,2% ainda em 2022, isso se deve em razão da forte atividade manufatureira, impulsionada pela demanda reprimida e por ações governamentais para estimular a economia. Depois de registrar sucessivos crescimentos na demanda por aço no Brasil, em 2022 a perspectiva é de estabilização devido à alta taxa de juros juntamente com as tensões políticas que ocorrem no país. Apesar da acomodação da demanda interna, o Brasil ainda se destaca na exportação, tendo alta de 75% nas exportações em comparação com 2020 (ABM, 2021 e RIBEIRO, 2022).

No que tange os aspectos financeiros, os investimentos financeiros no Brasil têm se tornado cada vez mais atrativos. O retorno econômico do investimento florestal em comparação com os ativos Ouro, Dólar e Bitcoin é menor; entretanto, no quesito de risco é o que apresenta menor percentual, ou seja, menor possibilidades de perdas para o investidor. O índice de Sharpe expressa a relação entre risco e retorno, ou seja, o retorno obtido para cada percentual de risco aplicado. O índice de Sharpe para o investimento florestal é de 0,88, para cada risco assumido o retorno é de 0,88. Para ativos de Dólar e Bitcoin, os índices de Sharpe são 0,46 e 0,19, respectivamente (FUNCHAL, 2019).

Apesar da crescente empregabilidade do carvão vegetal, nota-se algumas adversidades em relação ao seu uso conforme apontado por Jesus (2020, apud OLIVEIRA, 2012), onde aproximadamente 63% do carvão vegetal fornecido para as siderurgias é proveniente de pequenos e médios produtores. O alto custo de aquisição, manutenção e mão de obra especializada de grandes e robustos fornos, acaba levando a esses produtores a optarem por fornos de menor volume, custo e material de construção mais acessível.

Sob outra perspectiva, Vaz (2010) ainda reforça sobre a pulverização dos produtores de carvão vegetal, enquanto os guseiros e os produtores de aço são organizados, em menor número e com processos bem definidos, os produtores de carvão vegetal são altamente pulverizados e com práticas de gestão ineficientes, o

que dificulta e desestimula as relações comerciais entre os produtores de carvão vegetal e os produtores de aço.

Outro ponto de destaque consiste nos elevados custos logísticos que ocorrem com a utilização do carvão vegetal. Não é incomum entre a operação de produção do carvão até o fornecimento para a siderurgias que a distância total seja superior a 2.500 km, conforme apontado por Vaz (2010), fazendo com que esses custos logísticos possam chegar a 60% do custo total.

A empregabilidade das biomassas como substituição ao coque está diretamente relacionada com os parâmetros descritos nos capítulos anteriores. A cana-de-açúcar foi a que mais se destacou entre as biomassas, tanto em função dos parâmetros químicos quanto da sua capacidade produtivas. Já as biomassas cocobabaçu e coco-baía mostraram-se inviáveis como substitutas ao coque devido a sua baixa e defasada capacidade produtiva. Outro grande desafio encontrado é o fato do Brasil, por ser um país predominantemente agrário, possuir os principais estudos sobre as biomassas voltados para o setor agroindustrial. Além disso, a utilização dessas biomassas geralmente ocorre em atividades exclusivas do agronegócio ou em atividades que pouco exploram o seu potencial, como por exemplo o capim-elefante, que apesar de suas grandes propriedades energéticas, é empregado em sua maioria como forragem para alimentação animal.

6.4.1 Aspectos econômicos

Além de ganhos ambientais a utilização das biomassas pode proporcionar ganhos econômicos. Devido à enorme reserva de recursos naturais e por ser um dos maiores produtores agrícolas do mundo, esse ganho pode ser ainda mais representativo para o Brasil. De outro modo, por não possuir grandes reservas de carvão mineral, o Brasil importa grande parte do carvão mineral a preços elevados de países como Austrália, Estados Unidos e Colômbia (CAMPOS; ASSIS, 2022).

Segundo Suopajarvi (2017), o preço médio da tonelada de carvão mineral situa-se entre 200 a 250 dólares, já a biomassa pronta para uso siderúrgico está entre 120 a 160 dólares a tonelada. De acordo com Campos e Assis (2022), a utilização de carvão vegetal na indústria siderúrgica pode representar uma economia de 30 dólares por tonelada de aço bruto ao considerar como produção média anual de uma siderurgia em 1 milhão de toneladas de aço, a economia pode chegar a 30 milhões de dólares. Os autores ainda reforçam a utilização do carvão vegetal no

processo produtivo a economia pode ficar em cerca de 20%. Vital e Pinto (2009) reforçam ainda que para que empregabilidade do carvão vegetal na siderurgia seja economicamente viável, por questões logísticas e econômicas, as carvoarias e as guseiras devem manter-se próximas as florestas em um raio abaixo de 50 km.

De acordo com Areias (2020), a utilização de carvão vegetal como fonte de energia pode ser vista como um fator chave para a promoção do desenvolvimento econômico do setor, já que políticas públicas normalmente incentivam projetos tecnológicos vinculados às energias renováveis, além de atuarem também como incentivos fiscais, como redução de impostos. Uma dessas políticas públicas foi Plano Paulista de Energia – PPE 2020, que tinha entre um de seus objetivos a utilização da biomassa cana-de-açúcar para reforçar a segurança energética nas regiões metropolitanas de São Paulo.

7 CONCLUSÃO

Diante do que foi levantado e em relação aos objetivos propostos, pode-se concluir que:

- A cana-de-açúcar se apresenta como a biomassa mais viável para substituição ao coque, uma vez que possui as propriedades químicas desejadas, cadeia produtiva moderna e tecnológica e alta capacidade de produção para atender a demanda das siderurgias.
- O capim-elefante se apresenta como uma biomassa promissora e viável para fins siderúrgicos, entretanto ainda é necessário mais estudo a seu respeito. Existem muito estudos sobre essa biomassa, mas a grande maioria para fins agrários.
- Apesar de se destacarem nos parâmetros químicos, a empregabilidade do coco-babaçu e o coco-baía na siderurgia é inviável, uma vez que a capacidade produtiva brasileira desses frutos não é o suficiente para atender a demanda nacional. Em ambas as culturas, o processo produtivo é rudimentar e semiautomático, e em alguns casos manual. Para que essas biomassas possam ser empregadas na siderurgia, é necessário o investimento em tecnologias e apoio governamentais.
- Apesar da crescente demanda por energias renováveis, a utilização do carvão vegetal na siderurgia ainda esbarra em fatores que dificultam a implementação e popularização do carvão vegetal. Os elevados custos de transportes, aliados com os altos custos em aquisição, manutenção e mão de obra especializada, desestimulam os pequenos e médios produtores a ampliarem suas capacidades produtivas a fim de atender a demanda.
- A utilização de carvão vegetal na siderurgia acarreta ganhos financeiros para a indústria siderúrgica, entretanto, para que esses ganhos sejam vantajosos, é preciso que as indústrias guseiras e carvoeiras e o local de produção das biomassas estejam dentro de um raio de 50 km.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G.; BRITO, J.O.; PERRE, P. Changes in wood-water relationship due to heat treatment assessed using micro-samples of Eucalyptus. **Holzforschung**, Nancy, v.63, n.1, p.80-88, 2009.

Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração – ABM. Demanda por aço no mundo deve crescer 2,2%. Disponível em: <<https://www.abmbrasil.com.br/por/noticia/demanda-por-aco-no-mundo-deve-crescer-2-2-em-2022-avalia-world-steel-association>>. Acesso em: 19 de maio de 2022.

Agrosmart. Safra de cana-de-açúcar 2020/2021: perspectivas e mercado. Disponível em: < <https://agrosmart.com.br/blog/safra-de-cana-de-acucar-2020-21-perspectivas-e-mercado/>> Acesso em: 08 de junho de 2022.

AREIAS, A.A. **Análise da viabilidade econômica do uso de diversas fontes de biomassa para queima**. Programa de Pós-Graduação em Planejamento e uso de recursos renováveis, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2020.

ASSIS, C.F.C. **Caracterização de Biomassas para a sua Injeção em Altos-fornos**. Dissertação (Tese de Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, REDEMAT, Ouro Preto, 2014.

BARROS, J.L.; **Biocoque de eucalipto como fonte de energia renovável para uso siderúrgico**. Dissertação (Tese de Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – UNESP, Sorocaba, 2019.

BAILIS, R.; *et al.* Innovation in charcoal production: A comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. **Energy for Sustainable Development**, United States, v.17, n.2, p.189-200. Apr.2013.

CARPENTER, A.M. **Use of PCI in blast furnaces**. Ikea Clean Coal Centre, p.66 London, 2006.

CAMPOS, A.M.A.; ASSIS.P.S. Biomassa: alternativa a curto prazo para a produção de aço com baixa emissão de CO₂. **Revista Concilium**. v.22, 2022.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional 2021**. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em < <https://www.gov.br/mme>> Acesso em 13 de Abril de 2022.

BROETTO, C.C.; *et al* Caracterização e cinética da pirólise do capim-elefante. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Joinville, 2012.

CAVALIERO, C.K.N.C.; JANUZZI, G.M. A injeção de combustível auxiliar em alto forno como medida de redução das emissões de CO₂ do segmento siderúrgico nacional: estudo de casos da acesita e cosipa. **Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**, XXI Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades. Vitória, 1999.

CORTEZ, L.A.B *et al.* Processamento de casca e fibra de coco verde por carbonização para agregação de valor. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**. v.3, p. 21-30. jan. 2009.

CORTEZ, L.A.B.; *et al.* **Biomassa para energia**. UNICAMP, Campinas, 2008.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Boletim da Safra de Cana-de-açúcar. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>> Acesso em 20 de maio de 2022

DIAS, F.F. Alguns elementos sobre a cadeia produtiva da cana-de-açúcar no Brasil. **Geosul**, v.36, n.79, p. 116-142. Florianópolis, Agosto. 2021.

FAVARE, H.G. **Genéticos de Capim-Elefante para produção de energia na forma de Combustão**. Dissertação (Tese de Doutorado) – Programa de Pós-Graduação Agricultura Tropical, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2019.

FERREIRA, A.F.B *et al.* Caracterização energética da fibra da casca do coco com posterior produção de briquete. **XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Fortaleza, 2016.

FUNCHAL, M. Performance de Investimentos Florestais no Brasil – Parte II. **O Papel**, p.84-85. Novembro, 2019.

FIGUEIREIDO, L.A. **Pirólise termoquímica de pós da fibra de coco seco em um reator de cilindro rotativo para produção de bio-óleo**. Dissertação (Tese de Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

GOMES, P.A.; OLIVEIRA, J.B. Teoria da carbonização da madeira. In PENEDO, W.R. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC. 1980. p.27-41.

Instituto Aço Brasil – IABr. **Relatório de Sustentabilidade 2012**. Disponível em:< https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2019/07/relatorio_sustentabilidade_2012.pdf> Acesso em: 27 de Maio de 2022.

Instituto Aço Brasil – IABr. **Relatório de Sustentabilidade 2018**. Disponível em:< <https://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade2018/assets/pdfs/Aco-Brasil-Completo.pdf>> Acesso em: 27 de Maio de 2022.

Instituto Aço Brasil, IAB; **Relatório de Sustentabilidade 2020**. Instituto Aço Brasil, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: < <https://acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/assets/pdf/PDF-2020-Relatorio-Aco-Brasil-COMPLETO.pdf> > Acesso em 15 de Abril de 2022.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html?=&t=publicacoes>> Acesso em 16 de Maio de 2022.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2020**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em <

https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2020_v35_informativo.pdf Acesso em 18 de Maio de 2022.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2020**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em < <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/289> > Acesso em 19 de Maio de 2022.

International Energy Agency, IEA. Renewables informations: In: Overview of renewables and waste in the world. 12p. 2019. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/2665?fileName=Renewables_Information_2019_O> Acesso em 12 de Abril de 2022.

HUTNY, W.P; GIROUX, L.; MACPHEE, J.A.; PRICE, J.T. **Quality of Coal for Blast Funace Injection**. v.1, p.284. United States, 1996.

JESUS, M.S. **Decomposição térmica da madeira como subsídio para curvas de carbonização e queima de gases**. Dissertação (Tese de Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2020.

JUIZO, C.G.F.; *et al.* Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.12, p.386-390, Recife , 2017.

LOPES, C.R. **Caracterização Física, Química e Energética de Biomassas e seus Carvões para Injeção em Altos-Fornos**. Dissertação (Tese de Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2010.

MARAFON, A.C *et al.* **Poder calorífico do capim-elefante para geração de energia térmica**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, Aracaju , 2016.

MARTINS, C.R. JUNIOR, L.A.J; **Produção e Comercialização de Coco no Brasil Frente ao Comércio Internacional: Panorama 2014**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, Sergipe, 2014.

MOURÃO, B.M.; *et al.* **Introdução à Siderurgia**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2007.

MORAIS, R.F. Dia de Campo na TV – Capim-elefante: nova fonte alternativa de energia. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2169177/dia-de-campo-na-tv---capim-elefante-nova-fonte-alternativa-de-energia>> Acesso em: 08 de Junho de 2022.

MOHAMMED, I.Y *et al.* Comprehensive characterization of Napier grass as a feedstock for thermochemical conversion. **Energies**, v.8, 3403-3417. 2015

NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S.; TROSSERO, M.A.; FRISK, T. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Brasília, DF: ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000. 144p.

OHIMAIN, E.I.; KENDABIE, P.; NWACHUKWU, R.E.S. Bioenergy Potentials of elephant grass, *Pennisetum purpureum Schumach.* **Annual Research & Review in Biology**, Hooghly, v.4, n.13, p.2215-2227, 2014.

PANIANO, R.; *et al.* Caracterização da Cadeia Produtiva do Capim-Elefanta para Geração de Energia. **Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica**. Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Fortaleza, 2011.

PATERLINI, E.M.; *et al.* Evaluation of elephant grass for energy use. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**. v.4, n.2, p.119-125. May,2013.

PINATTI, D.G.; *et al* Celugnina: um novo Combustível Para Geração de Energia Elétrica e Redução de Metal. **Congresso Internacional de Uso de Biomassa Plantada Para Produção de Metais e Geração de Eletricidade**, Belo Horizonte, 2001.

POHLMANN, J.G. **Avaliação da combustibilidade e reatividade de biomassas termicamente tratadas e carvões com vistas à injeção em altos-fornos**. Dissertação (Tese de Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

POMPEU, G.C.S. **Estudo do conteúdo calorífico de ligninas extraídas de diferentes fontes de biomassa vegetal**. Dissertação (Tese de Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

PORRO, R. **A economia invisível do babaçu e sua importância para meios de vida em comunidades agroextrativistas**. Boletim Paraense Emílio Goeldi. v.14, n.1, p. 169-188. Belém, 2019

PS Market Research. Market Research Reports, Consulting Services: Prescient. Charcoal Market Research Report. 2020. Disponível em <
<https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/charcoal-market> >
Acesso em 12 de abril de 2022.

PROTASSIO, T.P. **Biomassa Residual do Coco Babaçu**: Potencial de uso energético nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Dissertação (Tese de Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

QUINTANILLA, J.E.A. **Reatividade ao CO₂ de carvões minerais de biomassas e coques**. Dissertação (Tese de Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e Processos Químicos e Metalúrgicos, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

REIS, R.S.R; *et al.* Comparação entre carvão de coco babaçu e carvão de resíduos madeireiros comercializados em Altamira-PA. **Ciência da Madeira**, v2. p. 100-106, Ago. 2015.

RIZZO, M.S.E. **Processo de Fabricação de Ferro-Gusa em Alto-Forno**. São Paulo, 2009.

RIBEIRO, I. Consumo de aço no Brasil sobre 23% em 2021, mas vendas desaceleram em dezembro. **Valor Investe**. São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://valorinveste.globo.com/mercados/brasil-e-politica/noticia/2022/01/24/consumo-de-aco-no-brasil-sobe-23percent-em-2021-mas-vendas-desaceleram-em-dezembro.ghtml>>

RODRIGUES, G.F.; *et al.* Redução das emissões de gases de efeito estufa através do uso de hidrogênio na siderurgia. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n.21, p. 48-53, set.2011.

ROCHA, P.H.Q. **Caracterização e análise dos endocarpos de buriti e babaçu para fins energéticos**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

SALLES, F.A. **Biomassa de capim-elefante e de leucina para produção de energia**. Dissertação (Tese de Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Bioenergia. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

SAMPAIO, R.S; *et al.* Integrating Cultivated Biomass with Charcoal and Steel Making for CO₂ fixation and O₂ Regeneration. **Fourth Biomass Conference of the Americas**. Oakland, Sept, 1999.

SANTOS, J.R.S. **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço-de-açúcar para fins energéticos**. Dissertação (Tese de Mestrado) – Programa em Recursos Florestais. Tecnologia de Produtos Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2011.

SILVA, E.R. **Uso do coque de petróleo como combustível nos fornos de calcinação**. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Universitário de Formiga, Formiga, 2017.

SILVA, J.C.G.; **Estudo dos parâmetros cinéticos da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação (Tese de Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

SUOPAJÄRVI *et al.* Extensive review of the opportunities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes. **Journal of Cleaner Production**, v.148, p709-734, 2017.

TAVARES, S.R.L.; SANTOS, T.E. Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para produção de biocombustíveis sólidos. **HOLOS**, v.5, p.1-9, 2013.

TEIXEIRA, M.A.; MILANEZ, L.F. **Caracterização Energética do Babaçu e Análise do Potencial de Cogeração**. Dissertação (Tese de Doutorado) – Departamento de Energia, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2003.

FAEP, Federação da Agricultura do Estado do Paraná. Oferta de etanol no Brasil pode dobrar até 2030 com investimento e RenovaBio. **Sistema FAEP**. Disponível em: <<https://www.sistefafaep.org.br/oferta-de-etanol-no-brasil-pode-dobrar-ate-2030-com-investimento-e-renovabio-diz-epe/>> Acesso em: 22 de Maio de 2022.

SEADE, Sistema Estadual de Análise de Dados. Pesquisa de Investimentos Anunciados no Estado de São Paulo. Disponível em: <

https://informa.seade.gov.br/analise_pdf/crescem-investimentos-atividade-canavieira/> Acesso em: 22 de Maio de 2022.

Sindicado Da Indústria Do Ferro No Estado De Minas Gerais, SINDIFER. **Anuário Estatístico**. Ano base 2020. 52 p. 2021.

SILVA, E.; ROCHA, C.R. Eucalipto e Capim-elefante: Características e Potencial Produtivo de Biomassa. **Revista Agrogeoambiental**, p.143-153, abr.2010.

SILVA, C.G.A. **O aproveitamento energético do carvão vegetal no contexto das mudanças climáticas: Uma abordagem do setor siderúrgico do Estado de Minas Gerais**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) - Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

SILVEIRA, A.J.M. **Viabilidade Técnica de Pirólise da Biomassa do Coco: Produção de Bioóleo, biocarvão e biogás**. Dissertação (Tese de Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em energia da Biomassa, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2018.

TSAI, W.T.; LEE, M.K.; CHANG, Y.M. Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in na induction-heatin reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. n.76 , p. 230-237, 2006.

USDA. **Sugar and Sweeteners Yearbook Tables**. Disponível em<<<https://www.ers.usda.gov/data-products/sugar-and-sweeteners-yearbook-tables/sugar-and-sweeteners-yearbook-tables/#World>>> Acesso em: 21 de Maio de 2022.

VIEIRA, G.E.G.; et al. Biomassa: uma visão dos processos de pirólise. **Revista Liberato**. V.15, n.24, p.105-212. Jul.2014.

VAZ, S.L. **A siderurgia brasileira a carvão vegetal: um estudo de arranjos verticais**. Dissertação (Tese de Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

VITAL, M.H.F. PINTO, M.A.C. **Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.30, p.237-397, 2009.