



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO  
TOCANTINS  
CAMPUS PALMAS  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

**HIURE RODRIGUES QUIXABA**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUO  
PROVENIENTE DO CAULE DO MILHO ATRAVÉS DO PROCESSO DE  
PIRÓLISE VISANDO A PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO**

**PALMAS  
2023**

**HIURE RODRIGUES QUIXABA**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUO  
PROVENIENTE DO CAULE DO MILHO ATRAVÉS DO PROCESSO DE  
PIRÓLISE VISANDO A PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel no Curso  
Superior de Engenharia Civil do Instituto  
Federal do Tocantins, *Campus* Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes  
Pedroza

**PALMAS**

**2023**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins**

---

- Q6a Quixaba, Hiure Rodrigues  
Avaliação do potencial de aproveitamento de resíduo proveniente do caule do milho através do processo de pirólise visando a produção de carvão ativado / Hiure Rodrigues Quixaba. – Palmas, TO, 2023.  
50 p. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2023.
- Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza
1. Caule do milho. 2. Pirólise. 3. Carvão ativado. I. Pedroza, Marcelo Mendes. II. Título.

**CDD 624**

---

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

## FOLHA DE APROVAÇÃO

HIURE RODRIGUES QUIXABA

### AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUO PROVENIENTE DA COLHEITA DE MILHO ATRAVÉS DO PROCESSO DE PIRÓLISE VISANDO A PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação do curso de  
Engenharia Civil Instituto Federal do  
Tocantins - *Campus* Palmas, como exigência  
à obtenção do grau em Engenheiro Civil.

Aprovado em: 30/03/2023.

#### BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza  
Orientador  
(IFTO)



Dra. Elaine da Cunha Silva Paz  
(IFTO)



Me. Ranyere do Nascimento Lôbo

**“Tudo que um sonho precisa para ser realizado é  
alguém que acredite que ele possa ser realizado.”**

**Roberto Shinyashiki**

Dedico essa grande vitória aqueles que mais amo, minha mãe **Francileide**, meus irmãos **Higor, Bruno e Alefhe**, que sempre estiveram comigo desde o início da faculdade, assim como minha avó **Maria**, que sempre acreditou e investiu nos meus sonhos.

Amo todos vocês.

## AGRADECIMENTOS

Sou grato primeiramente a **Deus**, minha mãe, melhor amiga, companheira e defensora. Muito obrigado por sempre me apoiar nas minhas decisões, por ser minha base e minha força para buscar ser melhor a cada dia. Obrigado por estar comigo ao longo desses cinco anos e me ajudar a concretizar um dos meus maiores sonhos, me tornar engenheiro civil.

A minha mãe **Francileide**, que apesar de ter que assumir o papel de pai e mãe nunca mediu esforços para me ajudar, que mesmo passando por dificuldades sempre estava ali, buscando a melhor solução para que continuasse a carreira acadêmica. Obrigado por me proporcionar uma boa educação, por me ensinar a ser humilde, responsável e buscar agir de forma correta e justa, o que irei levar tanto para a vida pessoal como a profissional. Aos meus irmãos **Higor, Bruno, Alefhe e Gabriel** que estiveram comigo durante toda essa fase, e nos momentos que me vi angustiado, mantiveram-se ao meu lado me dando forças para continuar e superar as dificuldades.

À minha avó **Maria**, ser humano em que busco me espelhar, agradeço por confiar e acreditar em todos os meus sonhos. Obrigado por se fazer tão presente em minha vida, por ter investido tanto no meu aprendizado e por ser o meu pilar.

Ao meu orientador Professor Dr. **Marcelo**, que aceitou o pedido de me orientar e estando presente em todas as dificuldades que encontrei e buscando da melhor maneira possível contribuir para o meu aprendizado. Obrigado professor por me encorajar, pelos elogios, pelas risadas e por mesmo com as dificuldades não desacreditar do meu potencial.

Ao Professor Me. **Ranyere**, que aceitou as minhas solicitações em participar das duas defesas. Buscando extrair o melhor de meu trabalho acadêmico. Saiba que suas observações e questionamentos contribuíram grandemente para o meu desempenho neste trabalho.

À Dra. **Elaine**, que também aceitou participar das duas defesas, muitíssimo obrigado pela contribuição na padronização do mesmo, a fim de me ensinar melhorias que poderei levar tanto para a vida profissional como pessoal.

À toda a minha família, avó, tios, tias, primos e primas, que em todos os encontros me desejaram sorte e confiança para que eu pudesse continuar nesta caminhada.

Aos meus amigos da faculdade **Marcus, Denner, Hugo e Guizillin** que por também serem acadêmicos, passaram comigo muitas dificuldades de enfrentar as mazelas do curso de forma mais branda e tornarem o processo de formação leve e incrível. Obrigado pelos momentos de descontração e por toda parceria e descontração pós aula no *campus* II.

À minha namorada **Gabrielle**, que por muitas vezes me viu na dificuldade e se manteve ao meu lado e me incentivou a superá-las. Obrigado pela parceria e cumplicidade você foi um dos meus grandes pilares nessa reta final de formação.

À **Andecywalla**, que por muitas vezes disponibilizou do seu tempo livre para me auxiliar com correções textuais e desenvolvimento da escrita. Obrigado pela contribuição nessa reta final de formação.

Aos meus colegas de curso, que mesmo cada um enfrentando uma barreira diferente nunca deixou o outro para trás. Muito obrigado a todos que estiveram comigo até o presente momento, sempre me apoiando e me dando forças.

A todos os professores do curso, ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO), *Campus* Palmas, e todos os envolvidos na realização desse sonho.

A todos, fica o meu agradecimento!



## RESUMO

Com o advento da tecnologia e a globalização, obteve-se um aumento na produtividade do setor industrial e agrícola, e por consequência uma maior geração de resíduos. Dessa maneira, o presente trabalho teve como objetivo utilizar o caule do milho que foi coletado na fazenda Jaraguá, localizada a nove quilômetros de Guaraí – TO. Dessa forma, para a produção de carvão ativado através do processo de pirólise, foi utilizado um reator de leito fixo, com as temperaturas de 600°C e 700°C, respectivamente, a uma taxa de aquecimento de 30°C/ min e utilizando o vapor d'água como gás de arraste, aquecido a 130°C, salienta-se, que os ensaios foram realizados no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética do IFTO. No princípio buscou-se analisar a biomassa *in natura*, dessa forma, foram realizados ensaios de teor de umidade, de cinzas, de material volátil, carbono fixo e densidade. Ao se realizar a análise imediata da biomassa *in natura* obteve-se um teor de umidade de cerca de 10,79%, teor de material volátil com 73,14%, cinzas com 0,46%, teor de carbono fixo de 15,60% e uma densidade de 0,064 g/mL. Seguidamente, foram realizadas as pirólises, como descrito anteriormente. Os resultados da caracterização dos carvões obtidos foram, teores de umidade de 5,15% e 1,98%, materiais voláteis com 39,86% e 30,04%, cinzas com 12,60% e 15,86%, teores de carbono fixo de 42,38% e 52,11%, e a densidade de 0,14 g/ mL para o carvão gerado a 600°C. Destaca-se que os carvões obtidos tiveram um rendimento de 20,75% e 15,4%, respectivamente. Com tudo, tais resultados mostram que é possível a utilização do caule do milho para a produção de carvão ativado.

**Palavras-chave:** Biomassa, carvão ativado, caule do milho, pirólise.

## ABSTRACT

With the advent of technology and globalization, there was an increase in productivity in the industrial and agricultural sector, and consequently a greater generation of waste. In this way, the present work aimed to use the corn stalk that was collected at the Jaraguá farm, located nine kilometers from Guaraí - TO. Thus, for the production of activated carbon through the pyrolysis process, a fixed bed reactor was used, with temperatures of 600°C and 700°C, respectively, at a heating rate of 30°C/min and using steam d' water as a carrier gas, heated to 130°C, it should be noted that the tests were carried out at the IFTO's Laboratory of Innovation in Waste Use and Energy Sustainability. In the beginning, an attempt was made to analyze the in natura biomass, thus, tests were carried out on moisture content, ash, volatile material, fixed carbon and density. When carrying out the immediate analysis of the in natura biomass, a moisture content of about 10.79% was obtained, volatile material content of 73.14%, ash of 0.46%, fixed carbon content of 15.60 % and a density of 0.064 g/ml. Then, pyrolysis was carried out, as described above. The results of the characterization of the coals obtained were, moisture contents of 5.15% and 1.98%, volatile materials with 39.86% and 30.04%, ashes with 12.60% and 15.86%, contents of fixed carbon of 42.38% and 52.11%, and the density of 0.14 g/mL for the coal generated at 600°C. It is noteworthy that the charcoal obtained had a yield of 20.75% and 15.4%, respectively. However, these results show that it is possible to use corn stalks for the production of activated charcoal.

**Keywords:** Biomass, activated carbon, corn stalk, pyrolysis.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2 PROBLEMA DE PESQUISA</b> .....	<b>17</b>
<b>3 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>18</b>
<b>4 OBJETIVOS</b> .....	<b>19</b>
4.1 Objetivo Geral .....	19
4.2 Objetivos Específicos .....	19
<b>5 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>20</b>
5.1 Fisiologia do milho.....	20
5.2 Biomassa.....	22
5.3 Produção de milho no Tocantins Brasil e no mundo.....	23
5.4 Degradação termoquímica.....	26
5.5 Experimentos com pirólise do resíduo do milho.....	26
5.6 Biocarvão ativado.....	27
<b>6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>28</b>
6.1 Coleta da biomassa.....	28
6.2 Caracterização da biomassa .....	29
6.2.1 Material volátil.....	29
6.2.2 Cinzas.....	29
6.2.3 Umidade.....	30
6.2.4 Teor de carbono fixo.....	30
6.2.5 Densidade.....	31
6.3 Teste de pirólise .....	31
6.3.1 Caracterização do carvão.....	33
6.3.2 Balanço de massa.....	33
<b>7 RESULTADOS</b> .....	<b>35</b>
7.1 Caracterização da biomassa .....	35
7.1.1 Material Volátil.....	35
7.1.2 Cinzas.....	37
7.1.3 Umidade.....	37

7.1.4 Teor de Carbono Fixo.....	37
7.1.5 Densidade.....	37
7.2 Teste de Pirólise.....	38
7.2.1 Balanço de Massa.....	38
7.2.2 Caracterização do carvão.....	35
7.2.2.1 Densidade do carvão.....	40
7.2.2.2 Teor de cinzas do carvão.....	40
7.2.2.3 Umidade do carvão.....	41
7.2.2.4 Material Volátil.....	42
7.2.2.5 Teor de Carbono Fixo.....	43
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Detalhamento das partes da planta do milho.....	20
<b>Figura 2</b> - Fases do desenvolvimento do milho.....	21
<b>Figura 3</b> - Fluxograma esquemático das atividades que foram desenvolvidas na pesquisa.....	28
<b>Figura 4</b> - Reator utilizado no ensaio da Pirólise.....	32
<b>Figura 5</b> - Biomassa antes de ser pirolisada.....	32
<b>Figura 6</b> - Carvão ativado gerado.....	32

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Percentagem do constituinte total indicado nas estruturas físicas específicas do grão de milho.....	21
<b>Tabela 2</b> - Dados para o início da análise imediata do caule do milho. ....	36
<b>Tabela 3</b> - Dados para a Equação 1 e teor médio de material volátil.....	35
<b>Tabela 4</b> - Dados para a Equação 2 e teor médio de cinzas.. ....	36
<b>Tabela 5</b> - Dados para a Equação 3 e teor médio de umidade.....	37
<b>Tabela 6</b> - Dados para a Equação 4 e teor de médio de carbono fixo.....	37
<b>Tabela 7</b> - Dados para a Equação 5 e o valor da densidade.. ....	35
<b>Tabela 8</b> - Balanço de massa e rendimento do carvão pirolisado a temperatura de 600°C... ..	38
<b>Tabela 9</b> - Balanço de massa e rendimento do carvão pirolisado a temperatura de 700°C... ..	38
<b>Tabela 10</b> - Dados para início da análise imediata do carvão a 600° C.....	36
<b>Tabela 11</b> - Dados para início da análise imediata do carvão a 700° C.....	40
<b>Tabela 12</b> - Dados do valor da densidade. ....	40
<b>Tabela 13</b> - Dados para do teor de cinzas do carvão pirolisado em 600 °C .....	41
<b>Tabela 14</b> - Dados para do teor de cinzas do carvão pirolisado em 700 °C.. .....	41
<b>Tabela 15</b> - Dados para teor de umidade do carvão pirolisado a uma temperatura de 600°C.....	42
<b>Tabela 16</b> - Dados para teor de umidade do carvão pirolisado a uma temperatura de 700°C. ....	42
<b>Tabela 17</b> - Dados para a determinação do teor médio de material volátil do carvão pirolisado com temperatura de 600°C. ....	43
<b>Tabela 18</b> - Dados para a determinação do teor médio de material volátil do carvão pirolisado com temperatura de 700°C. ....	43
<b>Tabela 19</b> - Dados utilizados para determinação do teor de carbono fixo do carvão pirolisado a 600°C.. ..	44
<b>Tabela 20</b> - Dados utilizados para determinação do teor de carbono fixo do carvão pirolisado a 700°C.. ..	44

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Figura 1</b> - Ranking da produção do milho em toneladas dos municípios do Tocantins.....	23
<b>Figura 2</b> - Gráfico da produção mundial do milho.....	25

## 1 INTRODUÇÃO

As revoluções industriais causaram grandes mudanças nas mais diversas cadeias produtivas e no modo de vida das pessoas. O aumento da produtividade gerado pelo desenvolvimento da tecnologia fez com que a indústria pudesse atender a uma demanda muito maior (NAVES, 2022). Conseqüentemente gerando uma maior quantidade de resíduos provenientes dessa maior produção.

Contudo, a biomassa está se tornando um combustível cada vez mais atraente nos países industrializados, já que é uma fonte de energia renovável e é limpa em relação ao CO<sub>2</sub>. Devido ao baixo teor de enxofre e nitrogênio nos resíduos de biomassa, sua utilização induz a um ambiente mais limpo e seguro no sentido da redução de gases do efeito estufa e outros gases tóxicos, que são expelidos pelo uso de combustíveis fósseis (DEMIRAL *et al.*, 2011).

A pirólise é considerada uma importante tecnologia de todos os processos de utilização de biomassa. Particularmente, a pirólise rápida permite que a baixa densidade de energia e o baixo custo de transporte na utilização da biomassa sejam convertidos em produtos de alta densidade de energia volumétrica, como gás, líquidos de pirólise e carvão. O modo de pirólise concentrada regionalmente e transporte de longa distância após o aumento da densidade de energia é amplamente aceito (DAHMEN *et al.*, 2012).

Através do processo de pirólise, é possível converter a biomassa do caule do milho em carvão ativado. Em função disso, esse trabalho tem como principal objetivo avaliar a eficácia da utilização do caule do milho para a geração de carvão ativado por meio da degradação termoquímica.



## **2 PROBLEMA DE PESQUISA**

A produção do milho no Brasil tem tido um aumento significativo, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2020), e tem como consequência uma grande geração de resíduos, dessa forma, seria possível a utilização da biomassa residual do milho para produção de carvão ativado visando um consumo de uma matéria prima renovável com baixo custo e promover um destino adequado para esse resíduo?

### 3 JUSTIFICATIVA

Realizando uma análise histórica do desempenho da agricultura brasileira ao longo das últimas 4 décadas, observa-se que, de 1975 a 2019, a produção de grãos passou de 38,1 milhões de toneladas para 232,6 milhões de toneladas, o que equivale a um aumento de 510% (IBGE, 2020). Através dessas informações, pode-se ter uma visão como um todo da geração de resíduos que essa produção resulta. E a utilização desses resíduos na busca por fontes renováveis de energia está crescendo cada vez mais na tentativa de aproveitamento de matéria-prima sustentável.

O carvão ativado é um material que apresenta alta capacidade de adsorção, sendo eficiente e amplamente utilizado para o tratamento de água e efluentes. Entretanto, a fabricação desses adsorventes por vezes é de alto custo devido à origem e o valor da matéria-prima (BACCAR *et al.*, 2009). Dessa forma, o uso da biomassa residual proveniente da produção de milho, torna-se uma atrativa matéria-prima para produção de carvão ativado, que é o principal objetivo desse estudo.

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo Geral**

Este projeto de pesquisa tem como objetivo geral promover a avaliação do potencial de aproveitamento de resíduo proveniente do caule do milho através do processo de pirólise visando a produção de carvão ativado.

### **4.2 Objetivos Específicos**

Caracterizar o caule do milho;

Realizar a pirólise da biomassa em reator de leito fixo a 600°C e 700°C;

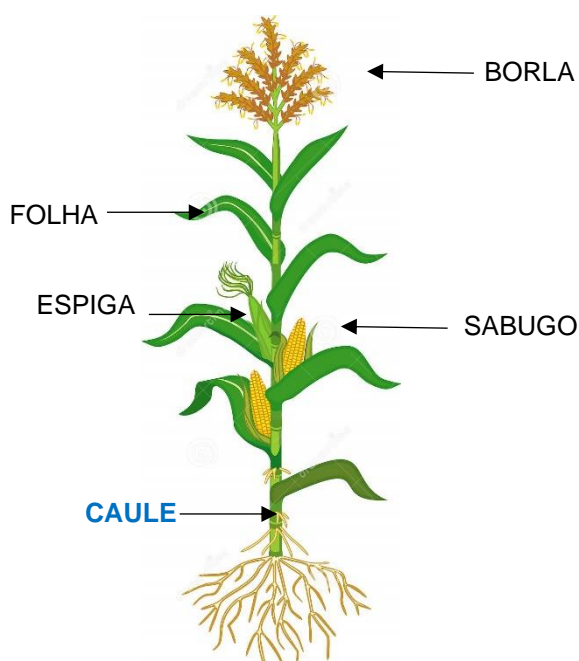
Caracterizar o carvão ativado obtido.

## 5 REVISÃO DE LITERATURA

### 5.1 Fisiologia do milho

O milho é uma gramínea pertencente à família *Poaceae*, e sua espécie é a *Zea mays* L. É uma das três maiores culturas de cereais do mundo e uma planta de enorme importância econômica moderna como alimento e fonte alternativa de energia (MAGALHÃES *et al.*, 2003). As partes constituintes da planta do milho são observadas na Figura 1 onde destaca-se o caule que é o foco deste estudo.

**Figura 1** – Detalhamento das partes da planta do milho.



Fonte: Adaptada de Istockphoto (2019).

Os grãos do milho são geralmente amarelos ou brancos, podendo apresentar colorações variando desde o preto até o vermelho. Considerado o maior grão entre os demais cereais, o peso individual do grão varia em média de 250 a 300mg e sua composição em base seca é de 61-78% de amido, 6-12 proteínas, 2-4% fibra (a maioria resíduo detergente neutro), 3-6% de óleo e 1-4% minerais, distribuídos de forma heterogênea nas quatro principais estruturas físicas que formam o grão: endosperma, gérmen, pericarpo (casca) e ponta (PAES, 2008). A Tabela 1 representa a porcentagem das partes que constituem o grão do milho.

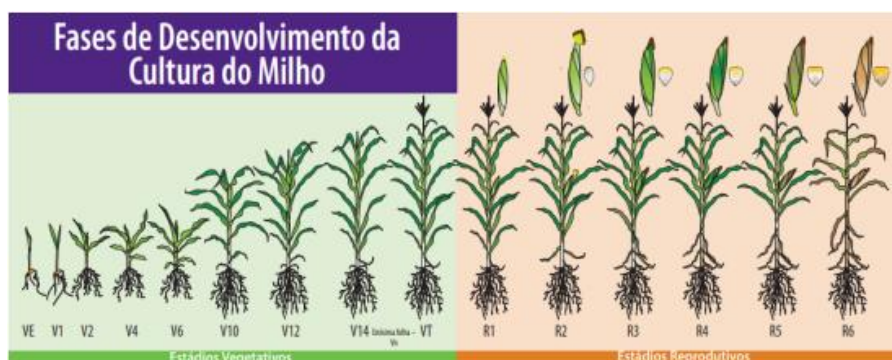
**Tabela 1-** Percentagem do constituinte total indicado nas estruturas físicas específicas do grão de milho.

Fração	% grão	Amido	Lipídeos	Proteínas	Minerais	Açúcares	Fibras ou conteúdo celular
% da parte (base seca)							
<b>Endosperma</b>	82	98	15,4	74	17,9	28,9	
<b>Gérmen</b>	11	1,3	82,6	26	78,4	69,3	12
<b>Pericarpo</b>	5	0,6	1,3	2,6	2,9	1,2	54
<b>Ponta</b>	2	0,1	0,8	0,9	1,0	0,8	7,0

Fonte: Paes (2008).

Os estágios de crescimento da planta de milho são divididos em estágios vegetativos e reprodutivos. Os estágios de crescimento vegetativo são VE (surgimento da planta), V1 (primeira folha totalmente expandida), V2 (segunda folha totalmente expandida), etc. até que muitas folhas apareçam. A última etapa é chamada de VT, referindo-se quando o tassel emerge totalmente. (MAGALHÃES, 2006; DURÃES, 2006).

**Figura 2 –** Fases do desenvolvimento do milho.



Fonte: IPNI (2020).

Os estágios reprodutivos são notados como R1 a R6. R1 refere-se às sedas de milho são visíveis pela primeira vez fora das cascas e ocorre a polinização. (Este processo será explicado mais completamente mais tarde no artigo.) Durante as outras etapas, os grãos estão se desenvolvendo. Na etapa final (R6), os grãos atingiram seu peso máximo seco. As mudas dependem das reservas de grãos até cerca do estágio

da folha V3, quando se tornam dependentes das raízes para captar nutrientes. (MAGALHÃES, 2006; DURÃES, 2006).

## 5.2 Biomassa

O conceito de biomassa tem sido amplamente discutido nos últimos anos. A biomassa refere-se à massa de organismos vivos, incluindo plantas, animais e microrganismos, ou, de uma perspectiva bioquímica, celulose, lignina, açúcares, gorduras e proteínas. De acordo com Vilela (2016), a biomassa inclui os tecidos acima e abaixo do solo das plantas, por exemplo, folhas, galhos, boles, bem como raízes de árvores e rizomas de gramíneas. A biomassa é frequentemente relatada como uma massa por unidade e geralmente como peso seco (água retirada pela secagem). A menos que especificado de outra forma, a biomassa geralmente inclui apenas material vivo. Por exemplo, nem a madeira morta nem a matéria orgânica dos solos são consideradas biomassa, embora os solos contenham biomassa na forma de bactérias, fungos e meio fauna. Geralmente, a biomassa dos solos (micróbios vivos e mortos) é <5% da matéria orgânica do solo.

Pedroza *et al.* (2017) destaca que a Biomassa pode ser definida como toda matéria orgânica, seja de origem animal, vegetal ou microrganismos, suscetível a ser transformada em energia ou bioenergia. O uso da mesma se apresenta como uma boa opção energética, pois é renovável e gera baixas quantidades de poluentes.

A biomassa tem sido usada como fonte de combustível desde que a humanidade aprendeu a fazer fogo e serviu como a principal fonte de energia antes que os combustíveis fósseis se tornassem comuns no século XX, a biomassa ainda é a fonte dominante de energia para um bilhão das pessoas mais pobres (DEMIRAL *et al.*, 2011). Os biocombustíveis são atraentes por uma série de razões - as plantas agem como "painéis solares", capturam carbono e armazenam energia. Sua adaptação em larga escala como fonte de energia para as sociedades industriais modernas depende da eficiência de utilização solar das plantas.

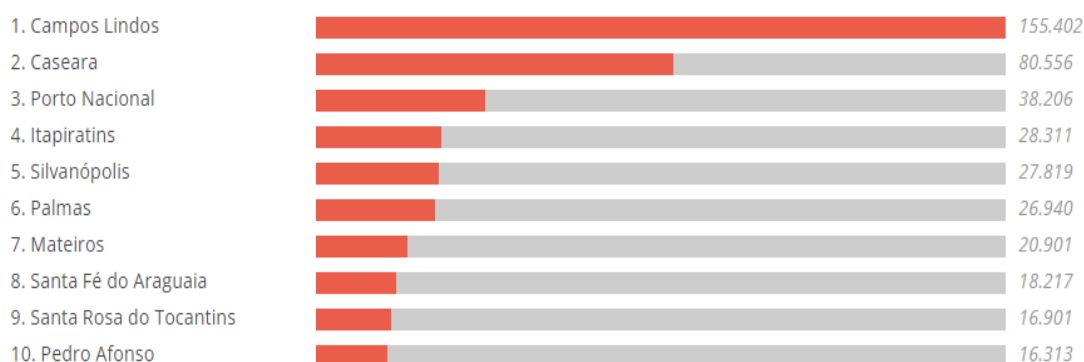
A importância da biomassa está relacionada ao fato de que a biomassa seca é formada por 50% de carbono; e o dióxido de carbono, liberado quando a biomassa queima ou decai, é o gás de efeito estufa mais importante emitido através da atividade

humana. Através do manejo da biomassa, o carbono pode ser liberado ou retirado da atmosfera. Ao contrário da percepção comum, a biomassa não é estática, mas dinâmica: a maioria das florestas está acumulando biomassa (e carbono) como resultado do crescimento (GENOVESE *et al.*, 2016). Esse acúmulo de carbono é aproximadamente compensado pelas emissões de carbono proveniente da perturbação (natural e antropogênica).

### 5.3 Produção de milho no Tocantins Brasil e no mundo

No âmbito do estado do Tocantins, no terceiro lugar na produção estadual de grãos, o cultivo do milho vem superando as estimativas de para as safras de 2017 no Tocantins. Segundo dados do 6º levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2017), o município que mais produz milho no estado é Campos Lindos, com uma produção de aproximadamente 21,20% da produção do estado, o Gráfico 1 apresenta os municípios que mais produzem milho no estado.

**Gráfico 1-** Ranking da produção do milho em toneladas dos municípios do Tocantins.



Fonte: CONAB (2017).

O cultivo de milho no Tocantins representa 1,8% da produção nacional do grão, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE LSPA (2018), esse percentual corresponde a aproximadamente 4 milhões de toneladas de milho produzidas no mês de junho/18 no estado.

A produção de milho no Brasil tem subido em resposta a preços internacionais mais altos, novo maior rendimento em variedades (incluindo a economia de insumos de milho), uma mudança da produção de milho para regiões fronteiriças (particularmente Mato Grosso), mudanças geográficas na alimentação da pecuária, a

capacidade de produzir duas culturas no mesmo ano, e direcionado apoio do governo. Nos últimos anos, a taxa de câmbio do Brasil tem favorecido exportações. Embora o Brasil sempre tenha sido um dos principais produtores mundiais de milho, nos últimos anos ele emergiu como o segundo maior exportador e um grande concorrente para os Estados Unidos.

O milho no Brasil é produzido em ambientes tropicais e subtropicais; apenas 3% da área nacional de milho é irrigada e o estresse da seca é frequente em metade da área total de milho (IBGE, 2014). A estrutura da agricultura brasileira começou a mudar rapidamente na década de 1970, impulsionado pela industrialização e políticas econômicas com foco na substituição de importações. Dentro deste quadro, a autossuficiência e o desenvolvimento da agricultura foram vistos como necessários para garantir uma ampla oferta de alimentos para uma população em crescimento (BRANDÃO *et al.*, 2006). O Brasil também tem procurado, desde a década de 1970, expandir sistemas agrícolas intensivos para o Centro-Oeste do país, em especial por causa dos Cerrados<sup>1</sup>.

O Brasil contém duas áreas distintas para a produção de milho: o Sul tradicional e regiões produtoras agrícolas do Sudeste, principalmente os estados de Minas Gerais e Paraná; e a fronteira agrícola Centro-Oeste, principalmente o estado de Mato Grosso, onde a terra é abundante e menos caras (IBGE, 2014). Nas regiões Sul e Sudeste, a maior parte da primeira safra é plantada em setembro e colhida em março e a produção de milho é tipicamente maior, refletindo melhores variedades de sementes e agricultores altamente capitalizados (IBGE, 2015). Milho de primeira safra é principalmente destinado ao mercado doméstico de ração animal nas proximidades, por isso a flexibilidade de plantio é limitada por locais demanda por ração de produtores de suínos e aves (CONAB, 2013).

A produção brasileira de milho aumentou nas últimas duas décadas por causa do aumento da produção de milho de segunda safra, também conhecida como safrinha, ou "pequena colheita" em português. Nos últimos 20 anos, a segunda safra de milho aumentou treze vezes (CONAB, 2019). Nos últimos anos, uma terceira safra

---

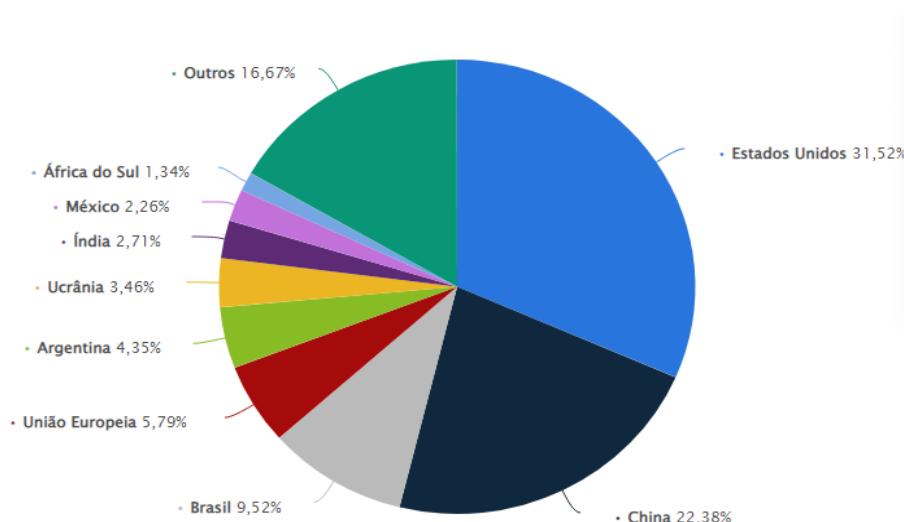
<sup>1</sup> A zona ecológica dos Cerrados, concentrada na região Centro-Oeste, é caracterizada pelo solo, temperatura e padrões de chuva que, com a tecnologia apropriada, são idealmente adequados para a produção de milho de segunda safra de alto rendimento desde 2011/12. (FAO, 2014)



de milho começou a surgir no norte e nordeste do Brasil, o que, provavelmente, o elevou ao país que ocupa o segundo lugar no número de exportações no mundo e o principal concorrente dos Estados Unidos no mercado internacional.

Num panorama internacional, o milho é também é considerado uma das culturas mais importantes. Nos últimos anos, os produtores de milho dos Estados Unidos experimentaram aumentos constantes nas receitas anuais. Em 2016/17, os EUA foram responsáveis por mais de um terço da produção global de milho, conforme pode-se observar no Gráfico 2 (FAO, 2018).

**Gráfico 2** – Gráfico da produção mundial do milho.



Fonte: FAO (2018).

Essa estatística mostra a distribuição da produção total de milho em todo o mundo em 2021/2022, discriminada por país. De acordo com o relatório, os Estados Unidos foram responsáveis por mais de um terço da produção mundial de milho nesse período. A maior parte da produção dos EUA é atribuída ao Cinturão de Milho, que está localizado no Centro-Oeste dos Estados Unidos. Desde a década de 1850, o milho tem sido a cultura predominante nessa área.

Esses dados mostram, ainda, a produção mundial de milho em 2021/2022, por país. Depois dos Estados Unidos, China e Brasil completaram os principais países produtores de milho.

#### **5.4 Degradação termoquímica**

As biomassas residuais são uma importante fonte de energia renovável que surgem como alternativa aos combustíveis fósseis, que através da degradação termoquímica obtém-se o gás, óleo e carvão, elementos de que podem ser utilizados como combustíveis e outros produtos petroquímicos e outras aplicações (ARRUDA *et al.*, 2018).

A pirólise pode ser definida como sendo a degradação termoquímica da matéria orgânica na ausência parcial ou total de oxigênio, comumente empregado em temperaturas que variam de 300 a 1000°C. A degradação termoquímica é uma forma de conversão energética da biomassa, onde os produtos obtidos no processo apresentam um maior valor agregado e potencial energético do que a biomassa empregada inicialmente (PEDROZA *et al.*, 2014).

#### **5.5 Experimentos com pirólise do resíduo do milho**

Segundo Mullen *et al.*, (2010), as alternativas de destinação final das espigas do milho e palha de milho (caule, folha e casca) e os efeitos de se empregar o biocarvão obtido no aproveitamento da biomassa em solo. O processo de degradação termoquímico foi realizado em um reator de leito fluidizado borbulhante de quartzo em temperaturas próximas a 500 °C. Concluíram que o carvão é muito importante para o solo, já que este contém a maior parte dos minerais e nutrientes do milho, ademais, o carvão é um excelente absorvente de nutrientes e produtos químicos agrícolas, ainda podendo sequestrar carbono. Desse modo, sua utilização no solo pode ser uma alternativa para utilização do resíduo agrícola.

Para Catelan *et al.*, (2019), o principal objetivo fazer a utilização a palha de milho para produção de carvão ativado (CA), material adsorvente, e posterior aplicação para remoção do corante azul de metileno, presente em resíduos aquosos gerados nos laboratórios do CEUNES/UFES. A palha de milho foi pirolisada a 400 °C por 30 minutos. Concluíram através da análise dos resultados obtidos, concluiu-se que o carvão ativado foi eficiente para remoção do azul de metileno.

Conforme Nascimento *et al.* (2019), a adsorção de carbendazim em biocarvão produzido da palha de milho foi avaliada baseado em estudos cinéticos e de equilíbrio. Para a produção do biocarvão, a palha de milho foi submetida a pirólise em forno de

aquecimento com fluxo de N<sub>2</sub> na temperatura de 400 °C, durante 6 horas. Foram realizados experimentos de adsorção em sistema fechado e batelada. Através dos resultados pode-se perceber a efetividade do biocarvão ativado de palha de milho na remoção de carbendazim de uma fase líquida. O desempenho deste adsorvente torna promissor na remoção deste pesticida de águas de consumo.

## 5.6 Biocarvão ativado

O biocarvão ativado contém material carbonáceo, produzido por pirólise de materiais orgânicos de origem vegetal. No processo, um material de carbono também é "ativado" por processos que aumentam muito a área superficial do material, permitindo-o capturar (ou "adsorver") uma quantidade maior de moléculas. Esses materiais incluem carvão, cascas de coco e madeira, bagaço de cana-de-açúcar, cascos de soja e casca de nozes (Dias *et al.*, 2007; Paraskeva *et al.*, 2008).

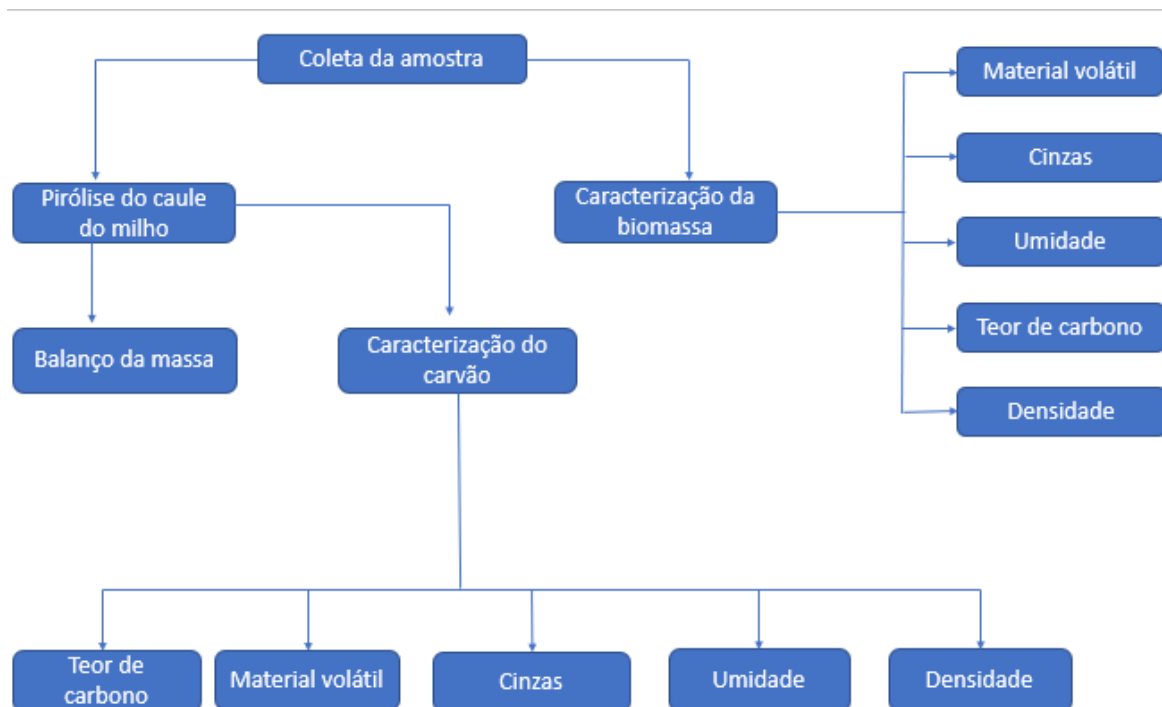
O biocarvão ativado representa uma das aplicações mais atraentes do biocarvão, devido à sua alta área superficial, estabilidade térmica, custo relativamente baixo e uma estrutura porosa com alta reatividade com uma ampla gama de grupos funcionais de superfície (CANALES-FLORES e PRIETO-GARCÍA, 2016). O processo de ativação pode ser químico, físico ou uma combinação de ambos (IOANNIDOU e ZABANIOTOU, 2007). Estudos (YIN *et al.*, 2007; HADI *et al.*, 2015; MOHAMMAD-KHAH e ANSARI, 2009; TAN *et al.*, 2017) mostram a aplicação promissora de biocarvão fisicamente ativado para processos de adsorção.

Tradicionalmente, a adsorção tem sido realizada usando biocarvão ativado, derivado principalmente de recursos fósseis (AHMED, 2016; GOPU *et al.*, 2018). Embora os biocarvões ativados produzidos a partir de recursos fósseis sejam utilizados com sucesso por seu bom desempenho de adsorção (AHMED, 2016; GOPU *et al.*, 2018), o uso desses biocarvões ativados tem duas desvantagens: a limitação dos recursos fósseis e a insustentabilidade do biocarvão ativado. Recentemente, processos de adsorção utilizando biocarvões ativados de recursos alternativos ganharam atenção especial.

## 6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os procedimentos metodológicos que foram utilizados na pesquisa, expondo os materiais que foram ensaiados, a caracterização, preparação e os procedimentos utilizados para a produção do carvão ativado. As atividades que foram desenvolvidas estão apresentadas na Figura 3.

**Figura 3** - Fluxograma esquemático das atividades que foram desenvolvidas na pesquisa.



Fonte: Autor (2022).

### 6.1 Coleta da biomassa

O caule do milho foi coletado na fazenda Jaraguá, localizada a nove quilômetros de Guaraí – TO, e foi armazenado em um saco apropriado e encaminhado até o Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (Larsen), situado no IFTO, *Campus Palmas*, local esse no qual foram realizados todos os ensaios dessa pesquisa.

## 6.2 Caracterização da biomassa

Os resíduos provenientes do milho foram examinados para que seja possível a aquisição de dados da biomassa pertinentes ao material volátil, cinzas, umidade, teor de carbono fixo e densidade. A amostra estava no estado seco e foi triturada com o auxílio de um liquidificador industrial. A parte da amostra que foi utilizada constituiu do material passante na peneira de malha 16 e retido na peneira de malha 20.

### 6.2.1 Material volátil

Segundo o método sugerido por Sanchez *et al.*, (2009), a determinação do teor de material volátil do caule do milho foi obtida em triplicata, pesando cerca de 1g de amostra em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi aquecida em um forno mufla à temperatura de 850° C, na ausência de oxigênio por um período de durante 7 minutos. O teor de material volátil foi obtido conforme apresenta a Equação 1:

$$\text{Material Volátil (\%)} = \left( \frac{A-B}{C} \right) * 100 \quad (\text{Equação 1})$$

A= peso do cadinho vazio + peso da amostra

B= peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento em forno mufla } (g)

C= peso da amostra

### 6.2.2 Cinzas

O teor de cinzas foi calculado segundo o método sugerido por Sanchez *et al.*, (2009), em que uma massa de aproximadamente 1g de resíduo do milho triturado em triplicata é adicionada a cadinhos de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi calcinada a uma temperatura de 710 °C durante 60 minutos em um forno mufla da marca EDG Equipamentos, modelo W-One. Em seguida, os cadinhos foram colocados em um dessecador por 1 hora para esfriar e posteriormente serem pesados. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a

norma ASTM 2415-66/86 e seus resultados foram obtidos através da Equação 2:

$$\text{Cinzas (\%)} = \frac{(A-B)}{(C)} * 100 \quad (\text{Equação.2})$$

A= peso do cadinho + peso amostra após calcinação  
B= peso do cadinho vazio  
C= peso da amostra

} (g)

### 6.2.3 Umidade

A determinação da umidade foi realizada de acordo com a norma ASTM D 3173-85. Foi pesada uma massa de aproximadamente 1g do caule de milho triturado, que foi adicionada a um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Em seguida a amostra foi aquecida em uma estufa à temperatura de 105 °C por um período de 1 hora. Posteriormente, o cadinho foi colocado em um dessecador por 15 minutos e pesado. A análise foi realizada em triplicata e o teor de umidade determinado de acordo com a Equação 3:

$$\text{Umidade (\%)} = \frac{(A-B)}{(C)} * 100 \quad (\text{Equação.3})$$

A= peso do cadinho vazio + peso da amostra  
B= peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento na estufa  
C= peso da amostra

} (g)

### 6.2.4 Teor de carbono fixo

Para determinação do teor de carbono fixo presente no resíduo foi efetuada a diferença descrita de acordo com a Equação 4:

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 - [\text{Umidade(\%)} - \text{Cinzas(\%)} - \text{Material Volátil(\%)}] \quad (\text{Equação 4})$$

### 6.2.5 Densidade

Para a determinação da densidade aparente, foi acoplada a uma balança de precisão uma proveta de 100 mL. Em seguida, foi tarado a balança e adicionado a biomassa do caule do milho previamente seca e triturada. Onde foram as massas (g) nas sucessivas adições dos respectivos volumes de 20, 40, 60, 80 e 100 mL. A densidade aparente foi obtida através da Equação 5:

$$\text{Densidade} \left( \frac{g}{mL} \right) = \left[ \frac{m(g)}{V(mL)} \right] \quad (\text{Equação.5})$$

### 6.3 Teste de pirólise

O ensaio da pirólise ocorreu em um reator de leito fixo tubular de quartzo de aço inox, de 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm. O reator (Figura 4) foi aquecido por forno bipartido reclinável (marca FLYEVER, modelo FE50RPN e linha 05/50), sendo operado em regime de batelada e o gás de arraste empregado na reação foi o vapor d'água aquecida. A biomassa que foi inserida no reator está representada na Figura 5.

O compartimento de quartzo no formato de tubo é onde realizou-se a introdução do caule do milho triturado. O vapor de água atravessou todo o comprimento do tubo, e conduziu os gases obtidos na pirólise para fora do leito. Na extremidade de saída encontra-se um sistema de condensação para que parte dos vapores produzidos na reação sejam transformados em líquidos.

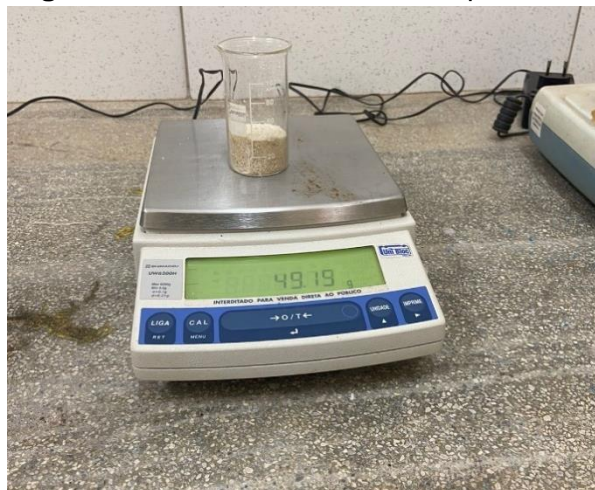
No decorrer da pirólise, foi empregada uma faixa de temperatura de 600 a 700 °C e uma taxa de aquecimento que varia 30 °C min<sup>-1</sup>. O tempo de reação em todos os experimentos foi de 30 minutos. Pode-se observar a parte sólida resultante do processo de pirólise na Figura 6.

**Figura 4 - Reator utilizado no ensaio da Pirólise.**



Fonte: Autor (2022).

**Figura 5 – Biomassa antes de ser pirolisada.**



Fonte: Autor (2022).

**Figura 6 – Carvão ativado gerado.**



Fonte: Autor (2022).



### 6.3.1 Caracterização do Carvão

A caracterização do carvão foi obtida através dos métodos descritos a seguir.

#### a) Densidade

Para determinação da densidade aparente, o método utilizado foi o mesmo definido para a determinação da densidade do caule do milho triturada.

#### b) Teor de cinzas

O teor de cinzas do carvão foi obtido de acordo com o método de Sanchez *et al.*, (2009), descrito anteriormente para a determinação do teor de cinzas do caule do milho triturada.

#### c) Umidade

A umidade do carvão foi obtida segundo a norma ASTM D 3173-85, de acordo com o método descrito anteriormente para a biomassa.

#### d) Material volátil

O teor de material volátil foi obtido ao utilizar o método de Sanchez *et al.*, (2009), descrito anteriormente para a determinação do teor de material volátil da biomassa.

#### e) Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi calculado através da diferença descrita segundo a Equação 5 descrita anteriormente na caracterização da biomassa.

### 6.3.2 Balanço de massa

Por intermédio de Himmelblau (2006), o balanço material retrata o desenvolvimento da lei de conservação das massas, onde se caracteriza que a massa não pode ser nem criada nem destruída. Posto isso, o Balanço de Massa foi obtido de acordo com a massa que entrou e que saiu do reator, no caso, a parte sólida e líquida. Logo, a equação que será utilizada para determinação do Balanço da parte sólida pode ser expressa pela Equação 6:

$$M = M1 - M2$$

**(Equação.6)**

Onde:

M = massa de carvão, em gramas;

M1 = massa final, em gramas;

M2 = massa do recipiente tarado, em gramas.

Para fins de Balanço de Massa, após resfriamento da planta de Pirólise, todos os produtos foram pesados e armazenados. O carvão ativado foi coletado após o sistema de condensação de vapores e o carvão diretamente do reator.

## 7 RESULTADOS

### 7.1 Caracterização da biomassa

A Tabela 2 apresenta os primeiros dados coletados para início dos ensaios de análise Imediata da biomassa.

**Tabela 2** - Dados para o início da análise imediata do caule do milho.

Cadinho	Peso cadinho vazio (g)	Amostra (g)
C1	33,150	2,004
C2	33,423	2,013
C3	33,578	2,006

Fonte: Autor (2023).

#### 7.1.1 Material volátil

O resultado do teor de material volátil está presente na Tabela 3.

**Tabela 3** - Dados para a Equação 1 e teor médio de material volátil.

Cadinho	Peso cadinho a 100°C (g)	Peso cadinho a 850° (g)	C (g)	% material volátil	Teor Médio de Material Volátil (%)
C1	34,938	33,463	2,004	73,603	
C2	35,219	33,755	2,013	72,727	<b>73,137</b>
C3	35,367	33,901	2,006	73,080	

Fonte: Autor (2023).

A facilidade ou não da biomassa de entrar em combustão, submetida à altas temperaturas, representa tanto a quantidade de voláteis como a taxa de matéria orgânica presentes em sua cadeia (KLAUTAU, 2008). Sendo assim, a amostra contendo cerca de 73,13% de material volátil expressa a grande facilidade de entrar em combustão em um curto tempo, um valor bem próximo se comparado ao maior valor obtido por Nakashima *et al.* (2014) que encontraram um valor de 80,73% de voláteis em palha de milho. Dessa forma, se trata de uma biomassa fortemente favorável para a contribuição na geração de energia a partir da queima.

### 7.1.2 Cinzas

Os resultados adquiridos do ensaio de cinzas estão representados na Tabela 4.

**Tabela 4** - Dados para a Equação 2 e teor médio de cinzas.

Cadinho	Peso cadinho a 710°C (g)	Peso cadinho vazio (g)	C (g)	% Cinzas	Teor Médio de Cinzas (%)
C1	33,159	33,150	2,004	0,449	<b>0,465</b>
C2	33,432	33,423	2,013	0,447	
C3	33,588	33,578	2,006	0,498	

Fonte: Autor (2023).

Segundo McKendry (2002), o teor de cinza diminui o poder calorífico superior e prejudica o processo de geração de energia, dessa forma, quanto menor o teor de cinza, melhor será o rendimento energético. Com tudo, após a realização do ensaio do teor de cinzas da biomassa, foi obtido um teor médio de cinzas de 0,46%, valor esse abaixo do encontrado por Vale *et al.* (2013), que obteve 2,08%, e que Casara *et al.* (2017) que encontrou 2,63%, sendo que ambos realizaram o ensaio com a mesma biomassa presente neste estudo. Sendo assim, o valor obtido no ensaio de teor de cinzas da biomassa indica que ela possui um alto rendimento energético.

### 7.1.3 Umidade

Os dados utilizados para o cálculo da umidade assim como seus resultados estão dispostos na Tabela 5.

**Tabela 5** - Dados para a Equação 3 e teor médio de umidade.

Cadinho	Peso cadinho vazio + peso da amostra (g)	Peso cadinho a 100°C (g)	% Umidade	Teor Médio de Umidade (%)
C1	33,150	34,938	10,778	<b>10,792</b>
C2	33,423	35,219	10,779	
C3	33,578	35,367	10,817	

Fonte: Autor (2023).

De acordo com Cunha *et al.* (1989), quanto maior o teor de umidade da biomassa, menor é o seu poder de combustão. Dessa maneira, ao se realizar os

ensaios de teor de umidade da biomassa em questão, obteve-se um valor aproximado de 10,8%, valor esse maior do que o encontrado por Casara *et al.* (2017), que encontrou como resultado do teor médio de umidade 7,46%. Contudo, a biomassa *in natura* utilizada no estudo possui um grande potencial de combustão, visto que apresentou um baixo de teor de umidade.

#### 7.1.4 Teor de Carbono Fixo

Os dados utilizados, obteve-se o teor médio de carbono fixo, representado na Tabela 6.

**Tabela 6** - Dados para a Equação 4 e teor de médio de carbono fixo.

<b>Teor Médio de Umidade (%)</b>	<b>Teor Médio de Material Volátil (%)</b>	<b>Teor Médio de Cinzas (%)</b>	<b>Teor Médio de Carbono Fixo (%)</b>
10,792	73,137	0,465	<b>15,606</b>

Fonte: Autor (2023).

Para Silva *et al.* (2014), o teor de carbono fixo é o que mais influência no poder calorífico da biomassa. Dessa forma, através da Equação 4, pode-se obter o valor médio de carbono fixo de 15,60%, sendo este valor próximo ao encontrado por Vale *et al.* (2013), que encontrou o valor de 13,93%.

#### 7.1.5 Densidade

Após obtidos os demais teores, obteve-se o valor médio da densidade, representado na Tabela 7.

**Tabela 7-** Dados para a Equação 5 e o valor da densidade.

<b>Proveta (46,652 g) (ml)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Densidade (g/ml)</b>
20	1,378	0,07
40	2,673	0,07
60	3,870	0,06
80	5,049	0,06
100	6,314	0,06
<b>Média</b>		<b>0,064</b>

Fonte: Autor (2023).

De acordo com Vale *et al.* (2013), quanto maior a densidade da biomassa, menor será a quantidade de vazios e, assim sendo, menor a quantidade de água que o material pode reter. Através do ensaio de densidade encontrou-se o valor médio de 0,064g/ ml que é um valor abaixo de 0,15g/ ml obtido por Vale *et al.* (2013), que também realizou o ensaio com o caule do milho, além disso, para o sabugo do milho, Vale *et al.* (2013), encontrou 0,22g/ ml, valor um pouco acima ao encontrado no presente estudo.

## 7.2 Teste de Pirólise

### 7.2.1 Balanço de Massa

A Tabela 8 e a Tabela 9 mostram o rendimento do carvão, obtidos após os ensaios de pirólises para as temperaturas de 600 e 700 °C respectivamente.

**Tabela 8 -** Balanço de massa e rendimento do carvão pirolisado a uma temperatura de 600°C.

<b>Recipiente vazio (g)</b>	<b>Massa inicial conjunto (g)</b>	<b>Massa final conjunto (g)</b>	<b>Massa Carvão M (g)</b>	<b>% Carvão</b>
59,603	79,908	63,817	4,214	<b>20,75</b>

Fonte: Autor (2023).

**Tabela 9 -** Balanço de massa e rendimento do carvão pirolisado a uma temperatura de 700°C.

<b>Recipiente vazio (g)</b>	<b>Massa inicial conjunto (g)</b>	<b>Massa final conjunto (g)</b>	<b>Massa Carvão M (g)</b>	<b>% Carvão</b>
59,920	69,910	61,460	1,54	<b>15,40</b>

Fonte: Autor (2023).

Após a realização dos ensaios de pirólise com as temperaturas de 600°C e 700°C, obteve-se um rendimento de aproximadamente 20,75% e 15,40%, respectivamente. Machado (2019), realizou a pirólise da sabugo do milho, utilizando uma temperatura de 600°C e obteve um rendimento de 21,6%, rendimento próximo ao encontrado no presente estudo. Dessa maneira, pode-se analisar que ao se realizar a pirólise de 1000kg dessa biomassa (caule do milho) a 600°C, será obtido 207,5kg de carvão, já se realizada a pirólise do mesmo material a uma temperatura de 700°C, será obtido uma menor quantidade, sendo aproximadamente 154kg de carvão ativado. Com isso, pode-se observar que o rendimento do carvão é inversamente proporcional a temperatura empregada no ensaio, visto que, com a diminuição da temperatura no ensaio maior será o rendimento do carvão. Dessa forma, a aplicação do processo de degradação termoquímica no caule do milho, mostra-se como um estudo relevante a ser desenvolvido e uma importante alternativa de aproveitamento e agregação de valor as cadeias produtivas, pois, transforma uma matéria prima de baixo valor, em bioprodutos de elevado valor agregado (carvão ativado e bio-óleo), visto que, por vezes o preço do carvão ativado encontra-se elevado por conta da origem e do valor da matéria-prima (BACCAR et al., 2009).

### 7.2.2 Caracterização do carvão

Na Tabela 10 são apresentados os primeiros dados coletados para início dos ensaios de análise imediata do carvão obtidos na pirólise de 600° C e a Tabela 11 apresenta o ensaio à 700° C.

**Tabela 10-** Dados para início da análise imediata do carvão a 600° C.

<b>Cadinho</b>	<b>Peso cadinho vazio (g)</b>	<b>Amostra (g)</b>
C1	34,787	0,938
C2	33,104	1,032
C3	33,159	1,013

Fonte: Autor (2023).

**Tabela 11-** Dados para início da análise imediata do carvão a 700° C.

<b>Cadinho</b>	<b>Peso cadinho vazio (g)</b>	<b>Amostra (g)</b>
C1	33,121	0,455
C2	32,144	0,501
C3	33,212	0,499

Fonte: Autor (2023).

#### 7.2.2.1 Densidade do carvão

Na Tabela 12 são apresentados os primeiros dados coletados para início dos ensaios de Análise Imediata do carvão obtidos na pirólise de 600° C.

**Tabela 12-** Dados do valor da densidade.

<b>Proveta (46,712 g) (ml)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Densidade (g/ml)</b>
10	1,229	0,12
20	2,906	0,15
30	4,456	0,15
35	5,082	0,15

Fonte: Autor (2023).

De acordo Tavares (2007), a densidade aparente dos carvões é uma propriedade que depende da natureza da matéria-prima (material precursor) e também do processo de manufatura do carvão ativado. Dessa maneira, através do ensaio de densidade obteve-se o valor médio de 0,14 g/ ml, sendo este um valor bem próximo de 0,10 g/ ml encontrado por Machado (2019), utilizando o sabugo do milho como matéria prima.

#### 7.2.2.2 Teor de cinzas do carvão

Os resultados adquiridos do ensaio de cinzas estão representados na Tabela 13 para a pirólise à uma temperatura de 600 °C e a Tabela 14 apresenta dos dados das cinzas da degradação termoquímica à 700°C.



**Tabela 13** - Dados para do teor médio de cinzas do carvão pirolisado em 600 °C.

Cadinho	Peso cadinho a 710°C (g)	Peso cadinho vazio (g)	C (g)	% Cinzas	Teor Médio de Cinzas (%)
C1	34,902	34,787	0,938	12,260	<b>12,597</b>
C2	33,232	33,104	1,032	12,403	
C3	35,249	35,116	1,013	13,129	

Fonte: Autor (2023).

**Tabela 14** - Dados para do teor médio de cinzas do carvão pirolisado em 700 °C.

Cadinho	Peso cadinho a 710°C (g)	Peso cadinho vazio (g)	C (g)	% Cinzas	Teor Médio de Cinzas (%)
C1	33,201	33,121	0,455	17,582	<b>15,863</b>
C2	32,211	32,144	0,501	13,373	
C3	33,295	33,212	0,499	16,633	

Fonte: Autor (2023).

Segundo Machado (2019), o teor de cinzas é referente ao percentual de compostos inorgânicos presentes na biomassa, como potássio, magnésio, ferro, cálcio, sódio, fósforo, entre outros, dessa forma, o tipo do solo que vem essa biomassa influencia diretamente o valor do seu teor de cinzas. Dessa maneira, foram realizados os ensaios de teores de cinza para os carvões obtidos nas temperaturas de 600°C e 700°C, que obtiveram como resultados 12,59% e 15,86%, respectivamente. Valores esses próximos ao encontrado por Machado (2019), que ao realizar o ensaio com o sabugo do milho encontrou um teor de cinza de 17,09%, o que mostra um valor considerável de teor de matéria inorgânica presente neste carvão.

#### 7.2.2.3 Umidade do carvão

Os dados utilizados para o cálculo da umidade assim como seus resultados estão dispostos na Tabela 15 e Tabela 16 com a especificação de cada temperatura da pirólise de cada carvão.

**Tabela 15** - Dados para teor médio de umidade do carvão pirolisado a uma temperatura de 600°C.

Cadinho	Peso cadinho vazio + peso da amostra (g)	Peso cadinho a 100°C (g)	% Umidade	Teor Médio de Umidade (%)
C1	35,725	35,678	5,010	<b>5,154</b>
C2	34,136	34,076	5,814	
C3	36,129	36,082	4,639	

Fonte: Autor (2023).

**Tabela 16** - Dados para teor médio de umidade do carvão pirolisado a uma temperatura de 700°C.

Cadinho	Peso cadinho vazio + peso da amostra (g)	Peso cadinho a 100°C (g)	% Umidade	Teor Médio de Umidade (%)
C1	33,576	33,569	1,538	<b>1,980</b>
C2	32,645	32,633	2,395	
C3	33,711	33,701	2,004	

Fonte: Autor (2023).

A umidade do carvão é um parâmetro relevante quando se deseja utilizar o material para geração de energia através de sua queima. Dessa forma, pode se observar uma diminuição do teor de umidade do carvão quando se comparado com a biomassa *in natura*. As umidades dos carvões obtidas no presente estudo foram de 5,15% e 1,98%, respectivamente, valores próximos aos encontrados por Machado (2019), que obteve 3,43%, e por Vieira (2012), que obteve 5,4%, com o carvão ativado gerado do sabugo de milho.

#### 7.2.2.4 Material volátil

Os dados utilizados para o cálculo do material volátil assim como seus resultados estão dispostos na Tabela 17 e Tabela 18 com a especificação de cada temperatura da pirólise de cada carvão.

**Tabela 17** - Dados para a determinação do teor médio de material volátil do carvão pirolisado com temperatura de 600°C.

Cadinho	Peso cadinho a 100°C (g)	Peso cadinho a 850° (g)	C (g)	% material volátil	Teor Médio de Material Volátil (%)
C1	35,678	35,294	0,938	40,938	<b>39,861</b>
C2	34,076	33,679	1,032	38,468	
C3	36,082	35,675	1,013	40,177	

Fonte: Autor (2023).

**Tabela 18** - Dados para a determinação do teor médio de material volátil do carvão pirolisado com temperatura de 700°C.

Cadinho	Peso cadinho a 100°C (g)	Peso cadinho a 850° (g)	C (g)	% material volátil	Teor Médio de Material Volátil (%)
C1	33,569	33,410	0,938	34,945	<b>30,044</b>
C2	32,633	32,481	1,032	30,339	
C3	33,701	33,577	1,013	24,849	

Fonte: Autor (2023).

Quando comparado o teor de material volátil da biomassa *in natura* e dos carvões aqui obtidos, percebe-se que os carvões gerados sofrem uma redução bem significativa, o que de acordo com Vieira (2012), garante um melhor aproveitamento do subproduto quando submetido a processos de conversão energética. Dessa maneira, ao se realizar os ensaios de teores de materiais voláteis nos carvões obtidos, foram obtidos 39,86% e 30,04%, respectivamente. Vieira (2012), ao realizar o mesmo ensaio obteve 30,74%, já Padilla (2018) encontrou 39,83%, ambos com carvões obtidos pela pirólise do sabugo do milho, valores bem próximos aos encontrados no presente estudo.

#### 7.2.2.5 Teor de Carbono Fixo

Os dados utilizados para o cálculo do carbono fixo assim como seus resultados estão dispostos na Tabela 19 e Tabela 20 com a especificação de cada temperatura da pirólise de cada carvão.

**Tabela 19** - Dados utilizados para determinação do teor de médio de carbono fixo do carvão pirolisado a 600°C.

<b>Teor Médio de Umidade (%)</b>	<b>Teor Médio de Material Volátil (%)</b>	<b>Teor Médio de Cinzas (%)</b>	<b>Teor Médio de Carbono Fixo (%)</b>
5,154	39,861	12,597	<b>42,386</b>

Fonte: Autor (2023).

**Tabela 20** - Dados utilizados para determinação do teor de médio de carbono fixo do carvão pirolisado a 700°C.

<b>Teor Médio de Umidade (%)</b>	<b>Teor Médio de Material Volátil (%)</b>	<b>Teor Médio de Cinzas (%)</b>	<b>Teor Médio de Carbono Fixo (%)</b>
1,979	30,044	15,863	<b>52,113</b>

Fonte: Autor (2023).

O carbono fixo compreende o percentual de compostos restantes após processo de liberação dos materiais voláteis, retirando-se cinzas e umidade. Dessa forma, os carvões ativados gerados no presente estudo apresentaram teores de carbono fixo de 42,38% e 52,11%, valores próximos aos encontrados por Machado (2019), que obteve 40,8% e Padilla (2018), que obteve 56,17%, ao realizarem os ensaios com o carvão gerado do sabugo de milho.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao se realizar os ensaios de caracterização da biomassa *in natura* (caule do milho), e compara-los com as bibliografias, pode-se observar que a umidade, o teor material volátil, o teor de cinzas e o teor de carbono fixo estão próximos com o encontrado na literatura, entretanto chegou-se a uma densidade um pouco abaixo de outros estudos, entretanto nada fora do habitual.

Dessa maneira, ao se realizar o processo de pirólise com essa biomassa, pode-se perceber um baixo rendimento de sua parte sólida, visto que, na temperatura de 700°C obteve-se um baixo rendimento de carvão (15,40%). Outro fator interessante que deve ser destacado é que ao se realizar a pirólise com uma temperatura menor, o seu rendimento aumenta, com isso, a temperatura tem uma influência direta ao rendimento do carvão ativado.

Realizado os ensaios de caracterização dos carvões ativados, obteve-se um baixo teor de umidade, que já era esperado, pois quanto menor o teor de umidade da biomassa, maior é o seu poder de combustão. Além disso, foram encontrados valores intermediários para os teores de cinza, e valores elevados para os teores de carbono fixo e materiais voláteis.

Com isso, após a realização de todos os ensaios é possível que afirmar que o caule do milho pode ser usado como uma matéria prima renovável para a produção de carvão ativado através do processo de pirólise, gerando assim uma fonte de energia barata. Além disso, ao utilizar essa biomassa com esse devido fim, diminui a seu descarte inadequado ao meio ambiente.

Por fim, como sugestão para futuros trabalhos, tem-se a utilização de outras partes da planta do milho para se realizar o processo de pirólise, como as folhas, a espiga, o sabugo ou até mesmo a borla. Além disso, seria interessante a realização da pirolise em outras temperaturas, bem como os resultado das características no mesmo

## REFERÊNCIAS

AHMED, MJ. **Preparação de Carvões Ativados de Pedras de Tâmara (Phoenix Dactylifera L.) e Aplicação para Tratamentos de Efluentes: Revisão.** Processo Saf. Ambiente. p. 168 -182. 2016.

ARRUDA, M. G. *et al.* **Produção de biocombustíveis a partir da degradação termoquímica de lodo residual.** Artigo (9ª Jornada de iniciação científica e extensão). 2018.

BACCAR, R.; BOUZID, J.; FEKI, M.; MONTIEL, A. **Preparation of activated carbon from Tunisian olive-waste cakes and its application for adsorption of heavy metal ions.** *Journal of Hazardous Materials*. v. 162, p. 1522–1529, 2009.

BRANDÃO, Antônio Salazar; REZENDE, Gervásio Castro de; COSTA, Roberta Wanderley da. **Crescimento agrícola no período 1999-2004: A explosão da soja e da pecuária bovina e seu impacto sobre o meio ambiente.** *Economia Aplicada*, v. 10, p. 249-266, Abril de 2016.

CANALES-FLORES, RA; PRIETO-GARCÍA, F. **Métodos de Ativação de Materiais Carbonáceos Obtidos de Resíduos Agrícolas.** *Química Biodiversidade* 13, 261-268. 2016.

CASARA, V. P. *et al.* **Caracterização Físico-química da Biomassa de Milho. XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica.** São Carlos, 2017.

CATELAN, T. C., & Furlan Mendes, A. N. **PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PALHA DE MILHO E POSTERIOR UTILIZAÇÃO PARA REMOÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO DE EFLUENTES AQUOSOS.** *Brazilian Journal of Production Engineering*, 139–154. 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Perspectivas para a agropecuária** / Companhia Nacional de Abastecimento – v.1 – Brasília: Conab, 2013 - v. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>> Acesso em: 01 out. 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Perspectivas para a agropecuária** / Companhia Nacional de Abastecimento – v.1 – Brasília: Conab, 2013 - v. Disponível em: <MilhoZ-ZAnáliseZMensalZ-ZMaio-junhoZ-Z2019.pdf.> Acesso em: 01 out. 2022.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (14/03/2017). **Destaque da safra de Milho no Tocantins.** Disponível em Agricultura e Pecuária: <<http://www.seagro.to.gov.br>>. Acesso em: 05 out. 2022.

CUNHA, M. P. S. C. *et al.* **Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras.** In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, São Carlos. Anais. São Carlos, 1989.

DAHMEN N.; HENRICH E.; DINJUS E.; WEIRICH F. **O processo de gaseificação bioliq bioslurry para a produção de biocombustíveis, produtos químicos**

**orgânicos e energia. Sustentabilidade Energética Soc.** 2012. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1186/2192-0567-2-3>>. Acesso em: 01 out. 2022.

DANTAS, Vandui Francisco de Siqueira. **Potencial energético dos resíduos da cultura do milho (*Zea mays* L.) e do epicarpo do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.).** 2013. xi, 38 f., il. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

DEMIRAL, I.; ERYAZICI, A.; SENSOZ, S. **Bio-oil production from pyrolysis of corncob (*Zea mays* L.).** Biomass & Bioenergy, 36, p.43-49, 2011.

GENOVESE, Alex Leão; UDAETA, Miguel Edgar Morales; GALVAO, Luiz Cláudio Ribeiro. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. **Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural**, 2006.

GOPU, C.; GAO, L.; VOLPE, M.; FIORI, L.; GOLDFARB, JL. **Valorização de Resíduos Sólidos Municipais: Resíduos para Energia e Carvões Ativado para Tratamento de Água por Pirólise.** J. Anal. Aplic. Pirólise 133, 48-58. 2018.

HADI, P.; XU, M.; NING, C.; SZE KI LIN, C.; MCKAY, G. (2015). **Uma Revisão Crítica sobre Preparação, Caracterização e Utilização de Carvões Ativado Derivados de Lodo para Tratamento de Efluentes**, p 895-906. 2015.

HIMMELBLAU, D. M. **Engenharia Química: Princípios e Cálculos.** 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

IBGE. **Sidra:** banco de tabelas estatísticas: índice nacional de preços ao consumidos amplo – setembro 2020. [Brasília, DF], 9 out. 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/ipca/brasil>. Acesso em: 25 jan. 2023.

IBGE. **Censo Agropecuário de 2006.** 2014. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 02 out. 2022.

IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola.** 2015. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 02 out. 2022.

IOANNIDOU, O., e ZABANIOTOU, A. **Resíduos Agrícolas como Precursores da Produção de Carvão Ativado - Uma Revisão.** Renovar. Sustentar. Energ. Rev. 11, 1966-2005. 2007.

IPNI – BRASIL. **FASES DE DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DO MILHO.** Disponível em: <[http://brasil.ipni.net/ipniweb/region/brasil.nsf/0/81A0BBD6E936445D83257AA0003A892E/\\$FILE/MF3305BP-CornGrowth-portuguese\\_FINAL.pdf](http://brasil.ipni.net/ipniweb/region/brasil.nsf/0/81A0BBD6E936445D83257AA0003A892E/$FILE/MF3305BP-CornGrowth-portuguese_FINAL.pdf)>, acesso em: 02 dez. 2022.

ISTOCKPHOTOS. **Partes da planta.** 2019. Disponível em: <<http://www.istockphoto.com/br/vetor/partes-da-planta-morfologia-da-planta-do-milho-com-folhas-verdes-sistema-da-raiz-gm1147557305-309599059>>. Acesso em: 03 dez. 2022.

MACHADO, P. R. S. **Prospecção de bioprodutos a partir da degradação termoquímica do sabugo de milho visando aplicação industrial.** Palmas-TO, 2019.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; CARNEIRO, N. P.; PAIVA, E. **Fisiologia do Milho.** In: Circular Técnica, Embrapa: Milho e Sorgo. v.22, Ed.1, Sete Lagoas, MG, 2002.

McKENDRY, P. **Energy Production from Biomass: Conversion Technologies.** Bioresource Technology, n. 83, p. 47-54, 2002.

MOHAMMAD-KHAH, A., e ANSARI, R. (2009). **Carvão Ativado: Preparação, Caracterização e Aplicações: Um Artigo de Revisão.**

MULLEN, C. A. *et al.*, Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis, **Biomass & Bioenergy.** 34, p. 67-79, 2010.

NAKASHIMA, G.T.; MARTINS, M.P.; SILVA, D.A da.; CHRISOSTOMO, W.; YAMAJI, F.M.; **Aproveitamento de resíduos vegetais para a produção de briquetes.** Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online), n.34, p.22-29, 2014.

NAVES, P. J. S. **Degradação térmica de bagaço de laranja visando produção de carvão ativado e sua aplicação como adsorvente de corante químico.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, *Campus* Palmas, Palmas, TO, 2022.

NASCIMENTO, C. T. *et al.*, **Estudo da adsorção de carbendanzim em biocarvão ativado de palha de milho.** X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Fortaleza/CE – 04 a 07/11/2019.

OHARA, Monalisa A.; SANTOS, Mayara P. O. **Estudo cinético da pirólise da biomassa palha de milho verde.** 2016. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso Engenharia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - *Campus* – Medianeira. Medianeira, 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). 2014. **Bancos de dados agrícolas da FAOSTAT.** Roma.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). 2018. **Índice de Produção. Bancos de dados agrícolas da FAOSTAT.** Roma. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 03 out. 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). 2019. **Bancos de dados agrícolas da Faostat.** Roma. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 03 out. 2022.

PADILLA, E. R. D. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: caracterização físico – química e produção de carvão para energia.** 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, 2018.



PAES, M.C.D. **Manipulação da composição química do milho: impacto na indústria e na saúde humana.** 2008. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <[http://www.infobibos.com/Artigos/2008\\_4/milho/index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2008_4/milho/index.htm)>. Acesso em: 05 out. de 2022.

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo.** Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

PEDROZA, M. M., SOUSA, J. F., VIEIRA, G. E. G., BEZERRA, M. B. D., **Characterization of the products from the pyrolysis of sewage sludge in 1 kg/h rotating cylinder reactor.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 105, p. 108-115, 2014.

PEDROZA, M. M.; GOMES, M. C. F. de A.; PAZ, E. C. da S.; PEDROSA, A. L.; VIEIRA, G. E. G.; SOARES, J. E. M., **Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos em Processo de Pirólise, Revista Brasileira de Energias Renováveis,** v. 6, n. 2, 2017.

RANZI E.; CUOCI A.; FARAVELLI T. **Cinética química da pirólise de biomassa, Combustíveis Energéticos,** 2008, vol. 22 (pg. 4292-300). Disponível em: <10.1021/ef800551t>. Acesso em: 02 out. 2022.

SILVA, D. A.; ALMEIDA, V. C.; VIANA, L. C.; KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B. **Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR.** Floresta e Ambiente. v. 21, n. 4, p. 561-568, 2014.

SOUZA, A. E. de *et al.* **ESTUDO DA PRODUÇÃO DO MILHO NO BRASIL.** South American Development Society Journal, v. 4, n. 11, p. 182, ago. 2018.

TAN, X. F.; *et al.* **Biochar como potenciais precursores sustentáveis para a produção de carvão ativado: múltiplas aplicações na proteção ambiental e armazenamento de energia.** Biorecurso. Tecnologia 227, 359-372. 2017.

TAVARES, J. K. **Remoção de compostos BTEX de soluções aquosas por adsorção.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina.

VALE, A. T. do; DANTAS, V. F. de S.; ZAMBRZYCKI, G. C. **POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DA CULTURA DO MILHO (Zea mays).** Evidência, Joaçaba v.13 n. 2, p. 153-164, jul./dez. 2013.

VIEIRA, Ana C. **Caracterização da Biomassa Proveniente de Resíduos Agrícolas para Geração de Energia.** Dissertação de Mestrado em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Cascavel, 2012.

VILELA, J. **Biomassa.** Know Net Enciclopédia Temática. 2016. Disponível em:<<http://surl.li/fnpd>>. Acesso em: 02 out. 2022.

YIN, C.; AROUA, M.; DAUD, W. **Revisão de Modificações de Carvão Ativado para Melhorar a Captação de Contaminantes de Soluções Aquosas.** Set. Purif. Tecnologia 52, p. 403-415. 2007.