



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS**

CAMPUS PALMAS

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

FELIPHE ROSA FERREIRA

**PREPARAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PIRÓLISE CATALÍTICA
DO CAPIM ANDROPOGON (*ANDROPOGON GAYANUS KUNTH CV.*
PLANALTINA) PARA FINS INDUSTRIAIS**

PALMAS

2021

FELIPHE ROSA FERREIRA

**PREPARAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PIRÓLISE CATALÍTICA
DO CAPIM ANDROPOGON (*ANDROPOGON GAYANUS KUNTH* CV.
PLANALTINA) PARA FINS INDUSTRIAIS**

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

2021

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

F383p Ferreira, Felipe Rosa
Preparação de carvão ativado a partir da pirólise catalítica do
Capim Andropogon (Andropogon Gayanus Kunth CV. Planaltina)
para fins industriais / Felipe Rosa Ferreira. – Palmas, TO, 2021.
66 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2021.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Pirólise. 2. Capim Andropogon. 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

FELIPHE ROSA FERREIRA

PREPARAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PIRÓLISE CATALÍTICA DO CÁPIM ANDROPOGON (*ANDROPOGON GAYANUS KUNTH CV.* *PLANALTINA*) PARA FINS INDUSTRIAIS

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: 24/ 06/ 2021

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador - IFTO



Prof. Dr. Giulliano Guimarães Silva
Examinador - IFTO



Prof. Me. Antonelli Santos Silva
Examinador – IFAC

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar o suporte necessário em todos os momentos de minha vida. Além de todas bênçãos derramadas sobre mim.

Aos meus pais, Celso e Almerina e minha irmã Rafaela, por sempre me apoiarem e procurarem me proporcionar o melhor. Sendo essenciais para a minha formação como pessoa e como profissional.

A meus demais familiares por serem sempre presentes e apoiadores.

Aos meus amigos Luana, Yan, Henrique, Eduardo, Chrystian, Guilherme e Leonardo por fazerem parte dessa longa caminhada universitária ao meu lado e estarem sempre presentes. Espero estar juntos por muito mais tempo.

A todos os colegas de trabalho que tive a oportunidade de trabalhar e contribuíram com meu crescimento profissional, em especial os engenheiros José Carlos e Saulo; aos mestres Nilson e Fernando, além dos estagiários Pedro, Daniel, Tiago, Renan e Milena.

A todas as empresas palmenses e goianas, como a Concreto Engenharia, Alphaville Palmas 1, Tribunal de Justiça do Tocantins, Elmo Incorporações, Gávea Pavimentações e Mirante do Lago, que abriram as portas para me proporcionar aprendizado e oportunidade de mostrar a qualidade de meus serviços prestados, que se mantiveram em constante evolução ao longo desses 5 anos de formação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza, indiscutivelmente um excelente orientador e amigo, por me acolher e me dar todo o suporte necessário para a conclusão deste trabalho.

Aos professores Dr. Giulliano Guimarães e Me. Antonelli Santos componentes da banca de defesa pelas sugestões e dicas importantes para o bom desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de turma, liga acadêmica e em especial a Atlético Concreta (família) por me proporcionar momentos incríveis e únicos. Jamais esquecerei de todos os momentos de dedicação e alegria que vivemos.

Ao IFTO – Campus Palmas, pelas oportunidades oferecidas e pelas experiências vividas. Instituição que me acolheu durante ininterruptos 8 anos, sempre proporcionando um altíssimo nível de aprendizado, não só acadêmico, mas em toda a minha formação como cidadão.

A todos os demais amigos que direta e indiretamente me apoiaram.

A todos vocês, meus sinceros agradecimentos. Obrigado!

“Um cientista quer compreender os mecanismos.
Um engenheiro quer fazê-los funcionar”

JACK ST. CLAIR KILBY

Prêmio Nobel de Física, 24 de Julio 1958

RESUMO

FERREIRA, Felipe Rosa. **Preparação de carvão ativado a partir da pirólise catalítica do capim Andropogon (*Andropogon Gayanus Kunth cv. Planaltina*) para fins industriais**. 2021. 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2021.

O capim Andropogon (*Andropogon Gayanus Kunth cv. Planaltina*) pode ser facilmente encontrado em abundância em todo o cerrado brasileiro, principalmente no território do estado do Tocantins, onde encontra-se presente desde o ano de 1980. Por apresentar rápido desenvolvimento e considerável abundância na região, o capim Andropogon se apresenta como uma opção sustentável para a realização de um processo de conversão termoquímica para a obtenção de energia. Este projeto propôs o desenvolvimento de uma pesquisa experimental de preparação de carvão ativado a partir da biomassa do capim Andropogon. Deste modo, é avaliado a viabilidade da realização de processo de pirólise catalítica do capim Andropogon na produção do carvão ativado para fins industriais. A biomassa foi caracterizada através das análises imediatas: densidade aparente (0,198 g/mL), material volátil (94,13%), cinzas (5,87%) e não teve porcentagem significativa de carbono fixo. O carvão pirolisado foi obtido e ativado em uma mufla, resultando em um rendimento de 48,85% para 300°C e 34,61% para 500°C da massa inicial da biomassa do capim Andropogon. A caracterização do carvão foi realizada através da análise imediata que apresentou: densidade aparente (0,184 g/mL) material volátil 59,97% para 300°C e 39,78% para 500°C, cinzas 25,95% para 300°C e 27,58% para 500°C e carbono fixo 14,08% para 300°C e 32,64% para 500°C, em sequência realizou-se a avaliação do grau de adsorção de azul de metileno determinada por espectroscopia molecular na região do visível (660 nm), adotando-se as concentrações de corante em 10, 15 e 20 mg L⁻¹ de azul metileno. Notou-se que o carvão ativado do Capim Andropogon atuou removendo 96,10% do corante à uma concentração de 15 mg/L e utilização de 0,5g de carvão ativado com 30 minutos de adsorção por agitação orbital horizontal.

Palavras-chave: Capim Andropogon. Carvão Ativado. Gayanus. Pirólise.

ABSTRACT

FERREIRA, Felipe Rosa. **Preparation of activated carbon from the catalytic pyrolysis of Andropogon grass (*Andropogon Gayanus Kunth cv. Planaltina*) for industrial purposes.** 2021. 66 p. Course Conclusion Paper - Bachelor of Civil Engineering - Federal Institute of Education, Science and Technology of Tocantins. Palmas, 2021.

The Andropogon grass (*Andropogon Gayanus Kunth cv. Planaltina*) can be easily found in abundance throughout the Brazilian cerrado, mainly in the territory of the state of Tocantins, where it has been present since 1980. Due to its rapid development and considerable abundance in the In this region, Andropogon grass is a sustainable option for carrying out a thermochemical conversion process to obtain energy. This project proposed the development of an experimental research on the preparation of activated carbon from Andropogon grass biomass. Thus, the feasibility of carrying out a catalytic pyrolysis process of Andropogon grass in the production of activated carbon for industrial purposes is evaluated. The biomass was characterized through immediate analysis: bulk density (0.198 g/mL), volatile material (94.13%), ash (5.87%) and had no significant percentage of fixed carbon. The pyrolyzed charcoal was obtained and activated in a muffle, resulting in a yield of 48.85% for 300°C and 34.61% for 500°C of the initial mass of the Andropogon grass biomass. Charcoal characterization was carried out through immediate analysis, which presented: bulk density (0.184 g/mL) volatile material 59.97% for 300°C and 39.78% for 500°C, ash 25.95% for 300°C and 27.58% for 500°C and fixed carbon 14.08% for 300°C and 32.64% for 500°C. In sequence, the degree of adsorption of methylene blue was carried out determined by molecular spectroscopy in the visible region (660 nm), adopting the concentrations of dye in 10, 15 and 20 mg L⁻¹ of methylene blue. It was noted that the activated carbon from Capim Andropogon acted by removing 96,10% of the dye at a concentration of 15 mg/L and using 0,5g of activated carbon with 30 minutes of adsorption by horizontal orbital agitation.

Keywords: Andropogon grass. Activated charcoal. Gayanus. Pyrolysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Estágios de crescimento do capim Andropogon.....	20
Figura 02: Diagrama esquemático das etapas do trabalho experimental	22
Figura 03: Material <i>in natura</i> utilizado nos experimentos.....	23
Figura 04: Armazenamento do material para realização de transporte até o LARSEN.....	23
Figura 05: Capim Andropogon após secagem em estufa.....	24
Figura 06: Material retido nas peneiras de 14 e 325 Mesh, respectivamente.....	25
Figura 07: Ensaios de densidade aparente da biomassa, amostras com volume de 10, 20, 30, 40 e 50 mL, respectivamente.....	26
Figura 08: Mufla a ser utilizada para a obtenção do material volátil.....	27
Figura 09: Mufla com cadinhos prontos para ensaio de material volátil.....	27
Figura 10: Dessecador com as amostras para a determinação do material volátil.....	28
Figura 11: Biomassa e carvões após ensaio de material volátil.....	28
Figura 12: Mufla com cadinhos prontos para ensaio de teor de cinzas.....	29
Figura 13: Pirólise de capim Andropogon em mufla.....	31
Figura 14: Informações sobre o catalisador utilizado na pirólise.....	31
Figura 15: Dosagem de 5% (m/m) a ser adicionado a biomassa.....	32
Figura 16: Catalisador e biomassa prontas para homogeneização e posteriormente serem pirolizadas.....	32
Figura 17: Mufla, cadinhos e biomassa pronta para iniciar a pirólise a 500 °C...	33
Figura 18: Mufla, cadinhos e biomassa pronta para iniciar a pirólise a 300 °C...	33
Figura 19: Dessecador com as amostras do carvão ativado a 500 °C.....	34
Figura 20: Dessecador com as amostras do carvão ativado a 300 °C.....	34
Figura 21: Carvão ativado produzido em mufla a 300°C pirolise	35
Figura 22: Carvão ativado produzido em mufla a 500°C.....	35
Figura 23: Ensaios de densidade aparente do carvão ativado, amostras com volume de 10, 20, 30, 40 e 50 mL, respectivamente.....	36
Figura 24: Planejamento experimental adotado no teste de absorção de azul	

metileno.....	37
Figura 25: Soluções de azul metileno, nas diferentes concentrações utilizadas no teste.....	37
Figura 26: Amostras prontas para iniciar agitação orbital horizontal.....	38
Figura 27: Spectrophotometer Model Nova 2000.....	38
Figura 28: Relação entre a massa e o volume da biomassa.....	39
Figura 29: Tendência dos valores de densidade aparente da biomassa.....	40
Figura 30: Dados de rendimento do carvão ativado obtido por pirólise em 300°C.....	43
Figura 31: Dados de rendimento do carvão ativado obtido por pirólise em 500°C.....	43
Figura 32: Relação entre a massa e o volume do carvão ativado.....	46
Figura 33: Tendência dos valores de densidade aparente do carvão ativado.....	46
Figura 34: Representação do Diagrama de Pareto obtido a partir do Delineamento de Faces Centradas (DFC) na remoção de corante através de adsorção por agitação orbital horizontal.....	50
Figura 35: Concentração de azul metileno antes e após a realização do ensaio 6.....	51
Figura 36: Valores observados versus valores previstos, para a remoção de corante azul de metileno.....	53
Figura 37: Superfície de resposta para a adsorção de corante, com os fatores quantidade de carvão ativado e concentração de azul de metileno.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de pirólise e suas variantes: rendimentos dos produtos típicos obtidos por meio de diferentes formas de pirólise de biomassa (base seca)	15
Tabela 2 - Diferenças entre adsorção física e adsorção química	17
Tabela 3 – Resultado de densidade aparente da biomassa e resultados comparativos	40
Tabela 4 - Resultado de análise imediata de biomassa	41
Tabela 5 – Resultado de análise de rendimento do carvão ativado	44
Tabela 6 – Resultados comparativos de rendimento do carvão	45
Tabela 7 – Resultados de análise imediata do carvão ativado de capim andropogon	47
Tabela 8 – Resultados comparativos de análise imediata de carvão ativado de capim andropogon sem a utilização de catalisador	48
Tabela 9 – Resultados dos valores da absorbância obtidos através do ensaio de remoção de corante através de adsorção por agitação orbital horizontal	49
Tabela 10 – Coeficientes de Regressão do Planejamento DFC 2 ² obtidos da remoção de corante, em intervalo de 95% de confiança	51
Tabela 11 – ANOVA para a absorção de corante de azul de metileno através de adsorção por agitação orbital horizontal	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
°C	Graus Celsius
CA	Carvão Ativado
CF	Carbono Fixo
CH ₄	Metano
cm	Centímetros
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
C ₁₆ H ₁₈ ClN ₃ S	Azul de Metileno
C ₂ H ₆	Etano
g	Grama
H ₂	Hidrogênio
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
H ₃ PO ₄	Ácido Fósforico
IFTO	Instituto Federal do Tocantins
LARSEN	Laboratório e Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética
mg/L	Miligrama por litro
mL	Mililitro
mL /min	Mililitro por minuto
mm	Milimetro
NBR	Norma Brasileira
nm	Nanomilimetro
PEL	Parque Estadual do Lajeado
pH	Potencial Hidrogeniônico
%	Porcentagem
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
Th	Thorth
t/ha	Toneladas por hectare
ZnCl ₂	Cloreto de Zinco

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Problema de pesquisa.....	11
1.2 Justificativa.....	12
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo Geral.....	13
1.3.2 Objetivos Específicos.....	13
2- REVISÃO LITERÁRIA.....	14
2.1 Pirolise de biomassa.....	14
2.2 Produção do carvão ativado.....	15
2.3 Adsorção.....	16
2.4 Uso do carvão ativado na indústria.....	18
2.4.1 Tratamento de água.....	18
2.4.2 Tratamento de ar.....	18
2.4.3 Resíduos industriais.....	19
2.4.4 Indústria farmacêutica.....	19
2.4.5 Indústria química.....	19
2.4.6 Adsorção de gases.....	19
2.4.7 Tratamento de efluentes.....	19
2.4.8 Indústria alimentícia.....	19
2.5 Capim andropogon.....	20
2.6 Biomassa.....	20
2.6.1 Biomassa de rejeitos urbanos.....	21
2.6.2 Biomassa de rejeitos florestal.....	21
2.6.3 Biomassa de origem agrícola.....	21
3 - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	22
3.1 Tipo de pesquisa.....	22
3.2 Coleta e preparo da amostra.....	22
3.3 Caracterização da biomassa em estudo.....	25

3.3.1 Análise Imediata da Biomassa.....	25
3.3.1.1 Densidade Aparente.....	25
3.3.1.2 Umidade.....	26
3.3.1.3 Material Volátil.....	26
3.3.1.4 Teor de Cinzas.....	29
3.3.1.5 Teor de Carbono Fixo – CF.....	30
3.4 Pirólise de biomassa.....	30
3.5 Procedimentos analíticos empregados na caracterização do carvão ativado.....	35
3.5.1 Análise Imediata do Carvão Ativado.....	35
3.5.1.1 Densidade Aparente do Carvão.....	35
3.5.1.2 Análise imediata do Carvão.....	36
3.5.2 Teste de Adsorção de Azul de Metileno Através de Espectroscopia..	36
3.5.2.1 Efeito da Quantidade de Material Adsorvente e Concentração de Adsorbato	36
4- RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1 Caracterização da biomassa do Capim Andropogon	39
4.1.1 Densidade Aparente	39
4.1.2 Análise imediata da biomassa do Capim Andropogon	41
4.2 Produção e caracterização do carvão ativado	42
4.2.1 Rendimento de carvão obtido durante a pirólise de biomassa	42
4.2.2 Densidade Aparente do Carvão	45
4.2.3 Análise imediata da biomassa do carvão ativado	47
4.3 Planejamento experimental 2²- Delineamento de faces centradas para o ensaio de adsorção de azul de metileno	48
5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
REFERÊNCIAS	57

1 - INTRODUÇÃO

De acordo Guedes *et al.*, (2010) as fontes de energia renováveis desempenham um fundamental papel no atual contexto energético, ambiental e socioeconômico. As biomassas são exemplos de fontes de energia renováveis, elas são provenientes de madeira, de resíduos urbanos, de culturas agrícolas, de plantas aquáticas, animais, algas, processamento de alimentos e seus resíduos.

O capim *Andropogon* (*Andropogon Gayanus Kunth cv. Planaltina*), presente em todo o cerrado brasileiro, é considerado uma gramínea invasora. Por apresentar boa adaptação às condições de solo e clima do cerrado, intensa facilidade de proliferação, capacidade de combustão elevada, entre outras condições favoráveis ao seu desenvolvimento na região, o mesmo estar acarretando graves problemas à flora, e, em menor escala a fauna dos ambientes em que ele se insere de forma invasora, afirma Miranda *et al.* (2009).

O surgimento de novas tecnologias proporcionou a possibilidade de se aproveitar das propriedades agregados em materiais como as biomassas para a produção de carvão ativado. Tal produção pode trazer grandes benefícios ambientais e econômicos, pois, o carvão ativado é largamente utilizado como meio filtrante em processos industriais, tratamento do ar, indústria farmacêutica, indústria química, adsorção de gases e tratamento de efluentes. Desde modo, uma das alternativas é a produção do carvão ativado a partir de biomassa lignocelulósica, como o capim *Andropogon*.

O carvão ativado é um material carbonoso poroso, microcristalino, não grafitico, que passou por um processo para aumentar sua porosidade interna. Sua utilização é recente e seu uso deve ser adequado as suas características básicas (REIS *et al.*, 2015).

Segundo Moreira (2015), a pirólise é uma das diversas tecnológicas capazes de realizar a conversão termoquímica de biomassas em produtos de alto teor energético. O carvão ativado é produzido a partir desse processo conhecido como pirólise. A realização do processo resultará na geração de um produto sólido, líquido e gasoso, onde o controle de alguns parâmetros envolvidos no processo pode

possibilitar o direcionamento de uma maior produção do produto de maior interesse.

A pirólise catalítica é uma técnica de melhoramento das características do carvão ativado obtido no processo, sendo empregada de forma crescente nas últimas décadas. A utilização de catalisadores durante a pirólise tem gerado produtos (bio-óleos e carvões) com melhores características para aplicação industrial. Desta forma, este trabalho tem como objetivo apresentar o Capim Andropogon como alternativa para a produção de carvão ativado em pirólise catalítica para sua utilização em fins industriais, obtendo assim um produto de alto valor agregado a partir de uma biomassa de grande desenvolvimento e abundância no cerrado brasileiro.

1.1 Problema de pesquisa

A ação antrópica tem colaborado para que um maior número de espécies exóticas alcance mais locais do mundo, encontrando novos habitats e tornando-se espécies exóticas invasoras, afirma Lucn (2000 *apud* ALBURQUERQUE, 2013 p.1)

As espécies invasoras podem de diversas maneiras impactar negativamente os ecossistemas naturais, estabelecendo uma competição com as espécies nativas, miscigenando e interferindo na diversidade genética, além de poder introduzir patógenos e parasitas e promover a diminuição dos nutrientes disponíveis. Desta forma, uma espécie invasora pode desencadear uma completa alteração na composição das espécies nativas, reduzindo as espécies raras, e até mesmo ocorrer mudanças ou degradamento do funcionamento natural do ecossistema (ALBUQUERQUE, 2013).

Dentre a enorme variedade de espécies invasoras presente nos diversos biomas do território brasileiro, o Capim Andropogon se destaca por estar presente, principalmente, no cerrado tropical brasileiro. A gramínea é originária da África Tropical e foi introduzida no cerrado em 1980.

Diante dessa problemática, qual a possibilidade do uso do Capim Andropogon por meio do processo de pirólise para a produção de carvão ativado visando sua utilização para fins industriais?

1.2 Justificativa

Miranda *et al.* (2009) afirma que o Capim Andropogon é a principal gramínea exótica invasiva nas áreas de vegetação do Parque Estadual do Lajeado (PEL). Albuquerque (2013) também relata a presença da gramínea exótica no estado da Paraíba.

O Andropogon Gayanus tem sua proliferação intensa devido à facilidade em que o vento tem em proporcionar a dispersão de suas sementes, que possui uma elevada taxa de germinação. Devido a esse potencial de germinação elevado, a espécie tem a capacidade de suprir a germinação e o crescimento de gramíneas e vegetações arbustiva locais (MIRANDA, 2009).

Outras problemáticas continuam a serem relatadas por Miranda *et al.* (2009), como a capacidade que o Capim Andropogon tem em alterar os regimes de fogo do cerrado brasileiro. Os locais invadidos pelo o Capim Andropogon apresentaram capacidade de combustão elevados em sete (7) vezes acima de locais contendo apenas a presença de capins nativos. Portanto, o Capim Andropogon pode ser considerado uma séria ameaça às vegetações locais, podendo promover a alteração da estrutura da vegetação. Durante o período de seca, quando se tem maiores índices de queimadas, o poder calórico do Andropogon, maior do que das espécies nativas, promove um empobrecimento do solo, pois em decorrência das elevadas temperaturas geradas pela a combustão, dificulta a rebrota das espécies nativas.

Visto tais problemáticas, diversas maneiras de combate e controle da gramínea invasiva são propostas, entre elas são mencionados a aplicação de herbicidas, plantio de árvores nativas em um espaçamento menor entre linhas e o plano de manejo com o pastoreio controlado de bovinos.

Entretanto, em decorrência da grande dificuldade de combate e controle da gramínea invasiva, uma alternativa sustentável e rentável seria a utilização das tecnologias de conversão de biomassa. De acordo Pedroza (2011), a pirólise se destaca em relação as demais tecnologias de conversão de biomassa empregadas atualmente. Essa tecnologia ocorre através de um processo termoquímico que tem como objetivo principal a obtenção de produtos, a partir de resíduos orgânicos, com

densidade energética e propriedades mais elevadas que a biomassa originária do processo. A pirólise irá resultar em produtos líquido (bio-óleo), sólido (carvão) e a uma fração gasosa, onde ambos podem serem empregados no abastecimento energético do próprio processo ou serem comercializados. Tais potenciais tornam esses produtos capazes de atuação em diversas áreas.

Portanto, como futuro profissional da área de engenharia e conhecedor de todas as consequências provocadas pela a gramínea invasora (*Andropogon guayanus*), optou-se por desenvolver uma pesquisa que buscasse minimizar esses problemas e ao mesmo tempo trouxesse uma alternativa para a produção de fontes renováveis, como é o caso do carvão ativado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Utilizar o Capim *Andropogon* para a preparação de carvão ativado através do processo de pirólise catalítica, visando sua utilização em aplicações industriais.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar quimicamente a biomassa empregada no processo;
- Produzir de carvão ativado por meio da pirólise catalítica de Capim *Andropogon*;
- Caracterizar quimicamente o carvão resultante do processo;
- Efetuar teste de adsorção de azul de metileno através de espectroscopia molecular na região do visível (660 nm).

2 – REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Pirolise de biomassa

É possível realizar a conversão da biomassa em combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, que posteriormente podem ser utilizados para a geração de eletricidade, fornecimento de calor, entre outros. Esse processo pode ser realizado através de processos termoquímicos, bioquímicos e mecânicos (BRAGA, 2012). Em relação os processos termoquímicos, podemos encontrar a gaseificação, a combustão e a pirólise (CARMONA et al., 2017).

De acordo Braga (2012) a pirólise é um processo em que se tem o aquecimento da biomassa em temperatura ente 500 e 800 °C em atmosfera não oxidante, dando origem a um resíduo sólido rico em carbono (carvão) e uma fração volátil composta de gases (CO, CO₂, H₂, CH₄, C₂H₆) e vapores orgânicos que após sofrerem condensação originam um líquido, o bio-óleo. Os produtos resultantes, qualidade e rendimentos podem varia conforme o método e os parâmetros da pirólise empregada, além das características dos materiais pirolisado. A pirólise pode receber denominações diferentes, a variar da condição utilizada, assim, na pirólise lenta é empregada temperaturas de aproximadamente 400 °C e longos tempos de residência, tal processo favorece a produção do carvão vegetal.

A Tabela 1 apresenta informações sobre as condições operacionais do processo de conversões térmicas mais empregadas na produção de combustíveis, sejam eles sólidos, líquidos ou gasosos, bem como sua relação com os produtos formados.

Tabela 1 - Métodos de pirólise e suas variantes: rendimentos dos produtos típicos obtidos por meio de diferentes formas de pirólise de biomassa (base eca)

Tecnologia de pirólise	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	T(°C)	Produtos	Bio-óleo	Carvão	Gás
Carbonização	Dias	Muito baixa	400	Carvão	30%	35%	35%
Convencional	5-30min	Baixa	600	Bio-óleo; Gás; finos de carvão	-	-	-
Pirólise rápida	0,5-5s	Muito alta	650	Bio-óleo	75%	12%	13%
Flash líquido	<1s	Alta	<650	Bio-óleo			
Gaseificação	<1s	Alta	600-900	Químicos e Gás	5%	10%	85%
Ultra-gaseificação	<0,5s	Muito Alta	1000	Químicos e Gás	-	-	-
Pirólise a vácuo	2-30s	Média	400	Bio-óleo	-	-	-
Hidro-pirólise	<10s	Alta	<500	Bio-óleo	-	-	-
Metano-pirólise	<10s	Alta	>700	Químicos	-	-	-

FONTE: Santos (2011)

Podemos considerar a pirólise e a combustão como processos de energia renovável, pois nesses processos a biomassa tem a liberação de sua energia em forma de calor, tendo o carbono reoxidado, isto é, transformado em CO₂. Portanto, a realização do processo provocou apenas a liberação para a atmosfera o CO₂ absorvido durante a etapa de crescimento da planta, não contribuindo assim para o efeito estufa e tornando o processo autossustentável (RIBEIRO, 2020)

2.2 Produção do carvão ativado

Frequentemente é visto estudos relacionados ao processo de pirólise lenta de biomassa com o objetivo de se obter um maior rendimento de resultantes sólidos (bio-carvão) (MOREIRA 2015). De acordo com Borges (2003), o mundo moderno segue padrões econômicos que visam o desenvolvimento tecnológico da produção de carvão ativado, buscando a redução de custo e assim proporcionando uma relação de custo benefício

mais atraente agregado ao material produzido.

Borges (2003) relata que a produção do carvão ativado ocorre a partir de duas principais etapas: a carbonização da matéria-prima, acima de 500°C, e a ativação. A carbonização compõe-se da decomposição térmica do material carbonáceo, promovendo a eliminação de espécies não carbônicas e produzindo uma massa de carbono fixa que apresenta estrutura porosa rudimentar, onde poros extremamente finos e fechados são produzidos nesta etapa.

Em subsequente a pirólise, ocorre a ativação. A ativação visa o aumento da área superficial do material resultante do processo anterior. Tal etapa é fundamental para a promoção do aumento da porosidade do carvão e a criação de outros. No processo de ativação pode-se realizar o controle das características básicas do material, afim de obter configurações de maior aproveitamento para a aplicação desejada, afirma Reinoso (2006 *apud* MACÊDO, 2012, p. 38).

De acordo Borges (2003), a ativação pode ser ocorrer de duas formas, sendo elas:

- Física: Onde as moléculas ligam-se fracamente ao adsorvente, não ocorrendo assim alteração em suas características. Durante o processo é utilizado vapores de água, CO₂, ou uma mistura destes dois gases.

- Química: Se tem a ocorrência da ligação de valências livres das moléculas do adsorvente no adsorbato. Tal processo utiliza agentes ativantes, como ZnCl₂, H₂SO₄, H₃PO₄, hidróxidos de metais alcalinos.

2.3 Adsorção

Ao misturar um sólido finamente fracionado a uma solução aquosa com determinada concentração de corante, observa-se a intensidade da coloração diminuir. Nessa situação, o corante é adsorvido pela superfície do sólido. Intensidade do efeito poderá variar conforme temperatura, da composição do adsorbato, do adsorvente, da concentração de corante e entre outros fatores. (CASTELLAN, 1986).

A adsorção é definida como um processo de transferência de massa, onde determinados sólidos apresentam a capacidade de concentrar em sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando assim a separação dos componentes desses fluidos. Quando maior for a desse material, maior será a quantidade de componentes adsorvidos concentrados em sua superfície externa, favorecendo assim a adsorção. Por tal fator, normalmente os adsorventes são sólidos com partículas porosas. Assim, o componente acumulado na interface do material é denominado de adsorvato, a superfície sólida que o adsorvato se acumula é denominado de adsorvente Nascimento et al. (2014).

Cruz Junio (2010) afirma que a adsorção pode ocorrer tanto por mecanismos físicos como químicos. A adsorção física ocorre quando as forças intermoleculares de atração entre as moléculas do fluido e a superfície do sólido são maiores do que as forças de atração entre as próprias moléculas do fluido. Ocorre então uma aderência das moléculas do fluido adsorvido e o restante que permaneceu na fase líquida. Por outro lado, na adsorção química ocorre o envolvimento de interações químicas entre o fluido adsorvido e o material adsorvente, por conta da transferência de elétrons, equivalente à formação de ligações químicas entre o adsorbato e a superfície do sólido. Além disso, na adsorção física pode ocorrer a formação de camadas moleculares sobrepostas, enquanto que na adsorção química irá ocorrer a formação de uma única camada molecular adsorvida (CRUZ JUNIOR, 2010).

As principais diferenças entre a adsorção física e química são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Diferenças entre adsorção física e adsorção química

Adsorção Física	Adsorção Química
Causada por forças eletrostáticas, como de <i>van der Waals</i>	Causada por compartilhamento de elétrons
Não há transferência de elétrons	Há transferência de elétrons
Calor de adsorção = 2 - 6 kcal mol ⁻¹	Calor de adsorção = 10 - 200 kcal mol ⁻¹
Fenômeno geral para qualquer espécie	Fenômeno específico e seletivo
A camada adsorvida pode ser removida por aplicação de vácuo à temperatura de adsorção	A camada adsorvida só é removida por aplicação de vácuo e aquecimento a temperatura acima a de adsorção
Formação de multicamada abaixo da temperatura crítica	Somente há formação de monocamadas
Acontece somente abaixo da temperatura crítica	Acontece também a altas temperaturas
Lenta ou rápida	Instantânea
Adsorvente quase não é afetado	Adsorvente altamente modificado na superfície

FONTE: Duarte (2017)

Os dois métodos consistem em remover diferentes compostos de soluções, mais comumente líquidas e gasosas. Atualmente o carvão ativado é o adsorvente mais utilizado. Após ativação, o carvão apresenta uma porosidade interna comparável a uma rede de túneis que se bifurcam em canais menores e assim sucessivamente. (DEL PIERO, 2018).

2.4 Uso do carvão ativado na indústria

De acordo com Baccar et al. (2009), o carvão ativado tem ganhado destaque por ser um material eficiente e de alta capacidade de adsorção, assim sendo amplamente utilizado no tratamento de água e efluentes.

A indústria tem interesse no carvão ativado devido a seu comportamento de adsorvente, suas aplicações incluem o refino do açúcar, tratamento de água, recuperação de metais preciosos e a desodorização do ar, além de um excelente poder de clarificação, desodorização e purificação de líquidos e gases, afirma Mucciato (2009 *apud* MACÊDO, 2012, p.34).

Silva (2015) destaca exemplos de utilização do carvão ativado na remoção de substâncias de um fluido em diversas situações, processo ocorre através do fenômeno de adsorção.

2.4.1 Tratamento de água

O carvão ativado proporciona a eliminação de cor, odor, mal gosto e remoção de substâncias orgânicas pelo o mecanismo da adsorção, sendo assim, essencial no tratamento e purificação de água para fins industriais e potáveis. O CA também tem a capacidade de remover os compostos orgânicos, fenólicos entre outras substâncias que podem diminuir a qualidade da água, entre eles: micro poluentes, bactérias, vírus e pesticidas. Também podemos destacar a utilização do carvão ativado em pré-tratamentos de águas para as indústrias de alimentos, bebidas, farmacêuticas, entre outras.

2.4.2 Tratamento de ar

O carvão ativado pode ser utilizado como um filtrante de ar, ele tem a capacidade de remover os contaminantes do ar, adsorvendo produtos indesejáveis

contidos no ar, tornando-se um excelente purificador de ar comprimido também, que em consequência é utilizado em diversas atividades.

2.4.3 Resíduos industriais

No tratamento de resíduos industriais o carvão ativado é utilizado para a reciclagem de águas industriais, promovendo a remoção de substâncias como naftaleno, dodecilbenzeno, sofonato, benzeno, fenol entre outros. O CA é capaz ainda de promover a remoção de substâncias orgânicas, redução de espuma, assim otimizando e melhorando a característica do lodo ao ser misturado ao lodo bioativo.

2.4.4 Indústria farmacêutica

O CA é um excelente medicamento para o tratamento de desintoxicação, além disso o mesmo é utilizado para a purificação de substâncias, remoção de cor e impurezas de vitaminas, analgésicos, enzimas, penicilina e soluções intravenosas.

2.4.5 Indústria química

A indústria química utiliza o carvão ativado para a purificação de produtos, remoção de cores residuais, contaminantes, odores, purificação de ácidos, remoção de orgânicos, desodorização e descoloração de produtos químicos.

2.4.6 Adsorção de gases

Utilizando-se da capacidade de adsorção física do CA, ele é utilizado para a recuperação de solventes nas indústrias de adesivos, tintas, têxtil, impressão ou purificação de gás.

2.4.7 Tratamento de efluentes

O carvão ativado é usualmente mais utilizado na fase final de processo biológico em colunas de leito fixo, na fase de polimento e na remoção de cor ou componentes específicos.

2.4.8 Indústria alimentícia

O carvão ativado desempenha o importante papel de adsorver as moléculas de podem causar cor, gosto e odores indesejáveis nos alimentos.

2.5 Capim Andropogon

O Capim Andropogon é um capim originário da África Tropical, pode ser encontra distribuído nem grande parte dos cerrados tropicais. O capim Andropogon trata-se de uma gramínea forrageira perene, cresce de forma ereta, formando touceiras de até 1 (um) metro de diâmetro e apresenta afilhos com até 3 (três) metros de altura (COSTA *et al.*, 2001).

A gramínea apresenta características que a torna altamente adaptativa ao cerrado tropical. Tais características como: adaptação a solos de arenosos ou cascalhados, ácidos e com baixa fertilidade; além de grande resistência ao fogo e cigarrinhas, apresenta uma rápida rebrota ao início das chuvas e uma produção anual de 12 a 14 t/ha de massa seca (PEDROSA *et al.*, 2019).

Na Figura 1 podemos visualizar o crescimento do capim Andropogon em diferentes estágios: a) 3 meses após o plantio; b) 5 meses após o plantio; c) 8 meses e d) 1 ano ou mais. Pode-se ocorrer variações em relação ao estágio de crescimento, podendo variar conforme o tipo de solo, estação do ano, período de chuva/irrigação, entre outras (PEDROSA, 2019).

Figura 01: Estágios de crescimento do capim Andropogon



FONTE: Pedrosa (2019)

2.6 Biomassa

De acordo Cardoso (2012), a biomassa sempre esteve presente na história da civilização como fonte de energia, inicialmente na forma de carvão vegetal ou lenha,

mas somente em meados do século XX a utilização de outras fontes de biomassa ganhou ênfase. Do ponto de vista energético, podemos considerar como biomassa toda matéria que seja de origem vegetal ou animal, onde essa matéria possa ser utilizada como fonte de produção de energia.

Segundo Tsamba (2006 *apud* MOREIRA, 2015, p. 14) a biomassa pode ser definida como toda matéria orgânica que consiste principalmente de oxigênio, nitrogênio, hidrogênio e carbono. Moreira (2015) complementa que podemos incluir a essa categoria os diferentes resíduos orgânicos (incluindo resíduos sólidos urbanos biodegradáveis), agrícolas e de colheita e dejetos animais, as madeiras e seus resíduos derivados, entre outros.

Quando utilizamos a biomassa para fins energéticos, podemos encontra-la em categorias: rejeitos urbanos, florestal e agrícola (CARDOSO, 2012).

2.6.1 Biomassa de rejeitos urbanos

Os rejeitos urbanos podem ser divididos entre rejeitos urbanos sólidos e líquidos. Onde os resíduos urbanos líquidos são provenientes basicamente dos efluentes residenciais, domésticos e industriais. Já os resíduos sólidos são basicamente todos os materiais descartados pelo os setores residenciais e comerciais, comumente considerados como lixo (CARDOSO, 2012).

2.6.2 Biomassa de rejeitos florestal

Os rejeitos florestais são os materiais lenhos e seus subprodutos. Tal material pode ser retirado de florestas cultivadas para fins industriais como a produção de moveis, ou também materiais resultantes de desmatamentos.

2.6.3 Biomassa de origem agrícola

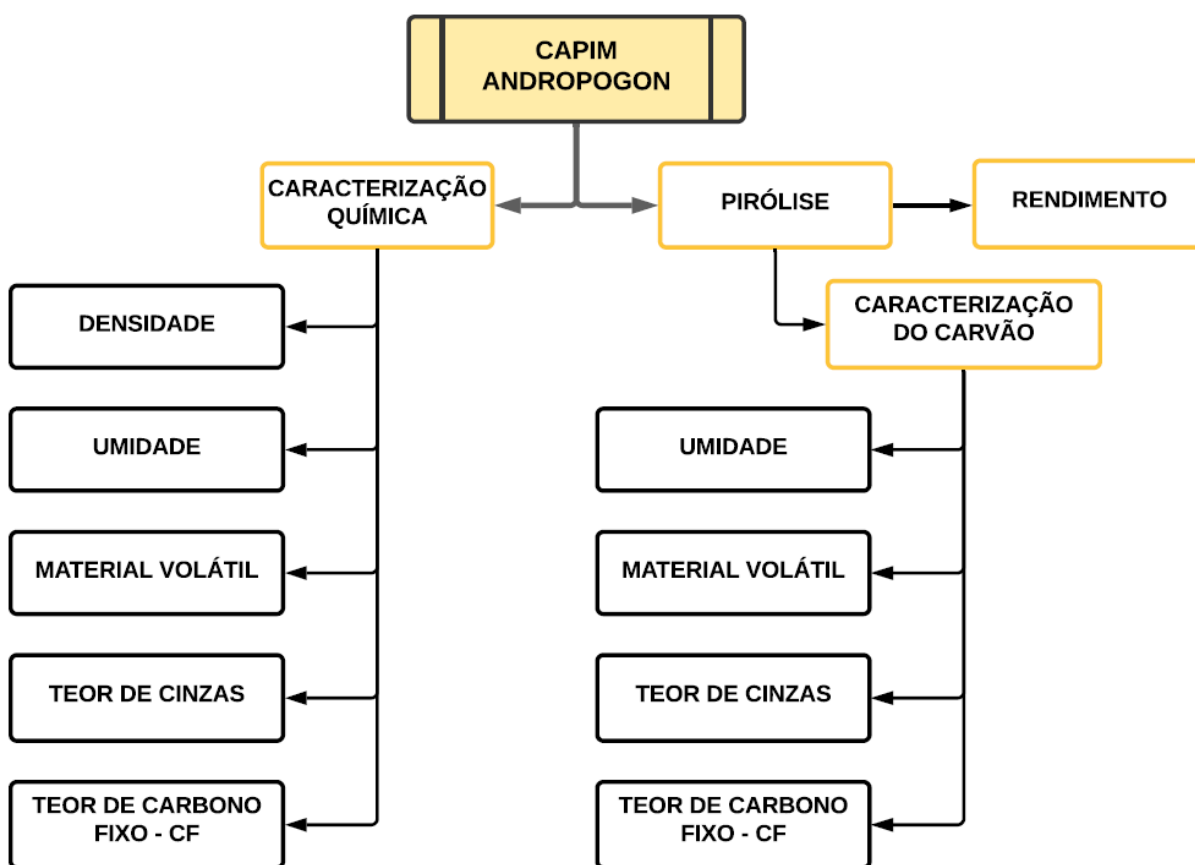
A biomassa de origem agrícola engloba todos os produtos e subprodutos provenientes de plantações não florestais. Essa biomassa pode ser originada do substrato de produtos como a casca do grão de arroz e o bagaço da cana-de-açúcar, entretanto, pode ser originaria também da produção de gramíneas (CARDOSO, 2012).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Tipo de pesquisa

Foi realizada uma pesquisa do tipo experimental. De acordo Tumelero (2019) esse tipo de pesquisa estar relacionada com a manipulação de variáveis relacionadas com o objetivo de estudo, tendo como finalidade realizar testes de hipóteses que dizem respeito à convicção do pesquisado. A pesquisa seguiu algumas etapas, conforme está demonstrado na Figura 2.

Figura 02: Diagrama esquemático das etapas do trabalho experimental



FONTE: Próprio autor (2021)

3.2 Coleta e preparo da amostra

A amostra da pesquisa foi o Capim Andropogon. O material foi coletado no entorno da região do plano diretor sul da cidade de Palmas, Estado do Tocantins. As amostras foram armazenadas em saco plástico e encaminhadas para o laboratório

LARSEN (Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética) do IFTO, Campus Palmas, conforme é demonstrado nas Figuras 03 e 04.

Figura 03: Material *in natura* utilizado nos experimentos



FONTE: Próprio autor (2021)

Figura 04: Armazenamento do material para realização de transporte até o LARSEN



FONTE: Próprio autor (2021)

Para a obtenção da fibra, o capim passou por um processo de fragmentação onde foi dividido em “tiras” de aproximadamente 20cm de comprimento, sendo assim posteriormente submetidas a secagem a 40 °C por 24 horas, em uma estufa de marca Thorth, modelo Th-520-150, e depois triturada em um moinho de facas e peneirada. O material retido entre as peneiras de 14 e 325 Mesh, misturado e utilizado para caracterização e produção do carvão ativado, conforme é demonstrado nas Figuras 05 e 06

Figura 05: Capim Andropogon após secagem em estufa



FONTE: Próprio autor (2021)

Figura 06: Material retido nas peneiras de 14 e 325 Mesh, respectivamente



FONTE: Próprio autor (2021)

3.3 Caracterização da biomassa em estudo

3.3.1 Análise Imediata da Biomassa

As análises do resíduo foram realizadas no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), Campus de Palmas.

3.3.1.1 Densidade Aparente

A densidade aparente foi realizada conforme a metodologia de Rodrigues (2019), com a utilização de proveta de 50 mL e balança analítica.

Para a realização do teste, a balança foi zerada e logo depois adicionado a biomassa para obtenção das massas em gramas nas sucessivas adições nos respectivos volumes de 10, 20, 30, 40 e 50 mL, a cada 10 mL, conforme é demonstrado na Figura 07.

Figura 07: Ensaios de densidade aparente da biomassa, amostras com volume de 10, 20, 30, 40 e 50 mL, respectivamente.



FONTE: Proprio autor (2021)

Com a realização deste processo, foi determinada a densidade, a média e o desvio padrão, partindo do princípio de que a densidade é a relação de massa e o volume da amostra.

3.3.1.2 Umidade

Este trabalho foi desenvolvido com material de biomassa em base seca, ou seja, umidade tendendo a 0%. Tal decisão foi obtida com base na afirmação de Valcarenghi e Ribeiro (2014) que o teor de umidade pode interferir diretamente em outras propriedades, além de apresentar um maior consumo de energia utilizado durante o processo de pirólise, quando presente em maiores porcentagens, sendo assim, pensando em uma maior produtividade da biomassa, a pesquisa utilizou-se de material a base seca.

3.3.1.3 Material Volátil

Para a determinação do teor do material volátil foi utilizado a metodologia de Nogueira e Rendeiro (2008), onde os autores seguiram o que está preconizado na ABNT NBR 8112/86 (Carvão vegetal - Análise imediata - Método de ensaio). O teor de material volátil determina os materiais que evaporam com mais facilidade da biomassa do resíduo da casca da castanha do Pará.

Nessa etapa, os cadinhos a serem empregados no teste de umidade foram submetidos ao aquecimento em mufla a temperatura de 850 °C durante 7 minutos sem presença de oxigênio, com a utilização de tampa para vedação. Logo após os

cadinhos foram colocados em um dessecador por um período de 50 minutos. Posteriormente será anotado a sua massa, conforme Figuras 08, 09, 10 e 11.

Figura 08: Mufla a ser utilizada para a obtenção do material volátil



FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 09: Mufla com cadinhos prontos para ensaio de material volátil



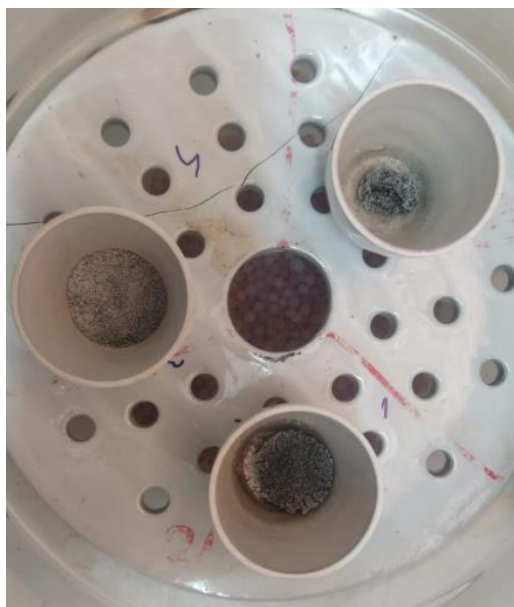
FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 10: Dessecador com as amostras para a determinação do material volátil



FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 11: Biomassa e carvões após ensaio de material volátil



FONTE: Proprio autor (2021)

O teor de material volátil será determinado através da Equação 1.

$$\% \text{Material Volátil} = (((P+P_0)-P_3)/P_0) \times 100$$

Onde:

P= peso do cadinho vazio, g;

P0= peso da amostra inicial, g;

P3= peso do cadinho + amostra final, g.

3.3.1.4 Teor de Cinzas

O ensaio do teor de cinza foi realizado conforme a metodologia aplicada por Nogueira e Rendeiro (2008) que se baseou na ABNT NBR 8112/86 (Carvão vegetal - Análise imediata - Método de ensaio).

Para determinação de cinzas de acordo com o exposto por Nogueira e Rendeiro (2008) e regido pela NBR 8112 (1986), os cadinhos do teste de material volátil foram colocados na mufla a temperatura de 710 °C por 1 hora em atmosfera oxidante, sem a tampa de vedação. Logo após os cadinhos foram colocados em um dessecador por um período de 50 minutos. Posteriormente será anotado a sua massa, conforme é demonstrado na Figura 12.

Figura 12: Mufla com cadinhos prontos para ensaio de teor de cinzas



FONTE: Proprio autor (2021)

O resultado do teor das cinzas será determinado pela Equação 2, conforme descrito abaixo.

Equação 2:

$$\%Cinzas = (A / B) \times 100$$

Onde:

A= peso do cadinho + amostra após o aquecimento, g;

B= peso do cadinho + amostra antes do aquecimento, g.

3.3.1.5 Teor de Carbono Fixo – CF

Para o levantamento do teor de carbono fixo (CF) foi utilizado a metodologia aplicada por Pedroza (2011), onde o autor calculou o CF por meio da porcentagem de material resultante que não evaporou após os ensaios dos teores de umidade, material volátil e cinzas. O valor do teor de CF será determinado por meio da Equação 3, conforme descrito abaixo.

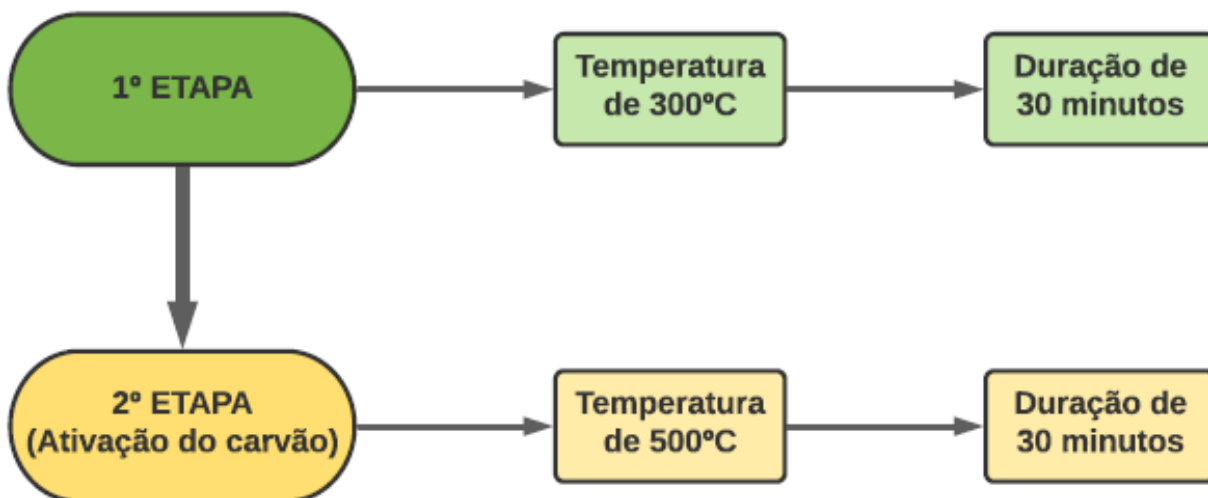
Equação 3:

$$\%Carbono\ Fixo = 100 - (\%Umidade + \%Material\ Volátil + \%Cinzas)$$

3.4 Pirólise de biomassa

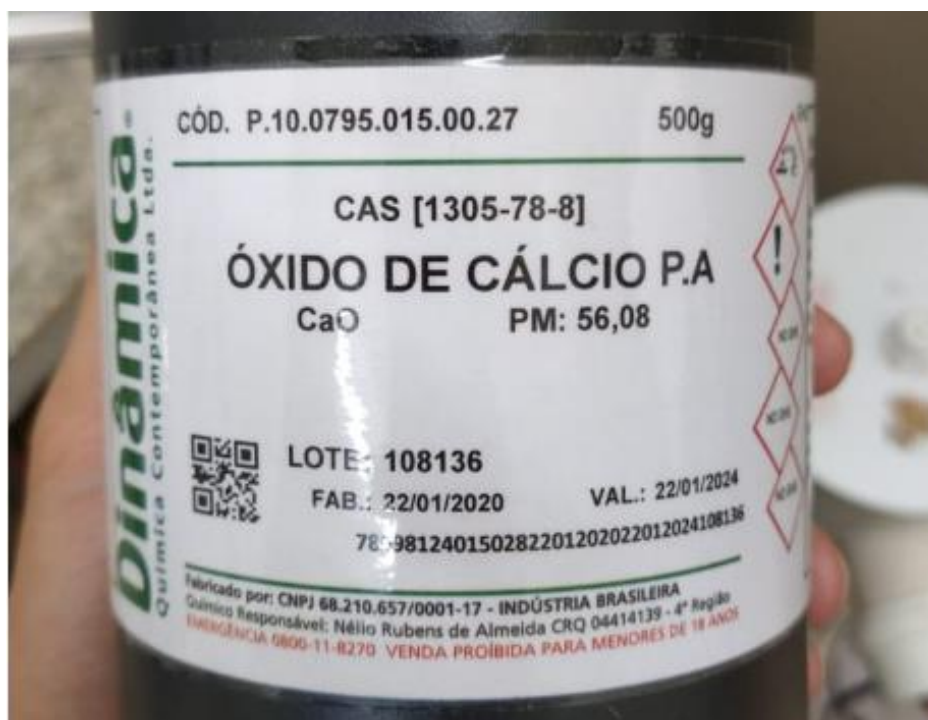
Os experimentos de pirólise da biomassa foram realizados em mufla (marca Coel, modelo Hm), em duas temperaturas diferentes (300 e 500 °C) durante 30 minutos de degradação térmica, conforme Figura 12. A biomassa inicialmente passou por processo de secagem em estufa por tempo suficiente para que boa parte da água seja evaporada, sendo em seguida pirolisada. Foi empregado a utilização de um catalisador durante a pirólise catalítica (CaO) na proporção de 5% (m/m). A Figura 13 mostra as condições de pirólise da biomassa a serem empregadas nessa pesquisa. As Figuras 13, 14, 15 e 16 demonstram sobre o processo de adição do catalisador (óxido de cálcio) utilizado.

Figura 13: Pirólise de capim Andropogon em mufla



FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 14: Informações sobre o catalisador utilizado na pirólise.



FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 15: Dosagem de 5% (m/m) a ser adicionado a biomassa.



FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 16: Catalisador e biomassa prontos para homogeneização e posteriormente serem pirolizadas.



FONTE: Proprio autor (2021)

Os ensaios de pirólise foram realizados nas dependências do Laboratório LARSEN – IFTO, Campus Palmas. Após a reação e o resfriamento do material, o carvão foi coletado, pesado e armazenado. O rendimento do material foi determinado por meio da relação entre a massa final, após a pirólise e a massa inicial da biomassa empregada antes da pirólise. Conforme as Figuras 17, 18, 19, 20 e 21 que demonstram as etapas realizadas durante o processo de pirólise.

Figura 17: Mufla, cadinhos e biomassa pronta para iniciar a pirólise a 500 °C



FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 18: Mufla, cadinhos e biomassa pronta para iniciar a pirólise a 300 °C



FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 19: Dessecador com as amostras do carvão ativado a 500 °C



FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 20: Dessecador com as amostras do carvão ativado a 300 °C



FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 21: Carvão ativado produzido em mufla a 300°C



FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 22: Carvão ativado produzido em mufla a 500°C



FONTE: Proprio autor (2021)

3.5 Procedimentos analíticos empregados na caracterização do carvão ativado

3.5.1 Análise Imediata do Carvão Ativado

A análise imediata do carvão obtido no processo foi realizado no LARSEN – IFTO, Campus Palmas.

3.5.1.1 Densidade Aparente do Carvão

A densidade aparente do carvão foi determinada por meio da relação entre massa e volume de carvão em uma proveta de acordo com o procedimento descrito no item 3.2.1.1. Conforme demonstrado na Figura 23 a seguir.

Figura 23: Ensaios de densidade aparente do carvão ativado, amostras com volume de 10, 20, 30, 40 e 50 mL, respectivamente.



FONTE: Proprio autor (2021)

3.5.1.2 Análise imediata do Carvão

Serão determinados os teores de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo no carvão obtido no processo de pirólise através dos métodos descritos nos itens 3.2.1.2, 3.2.1.3, 3.2.1.4 e 3.2.1.5, respectivamente.

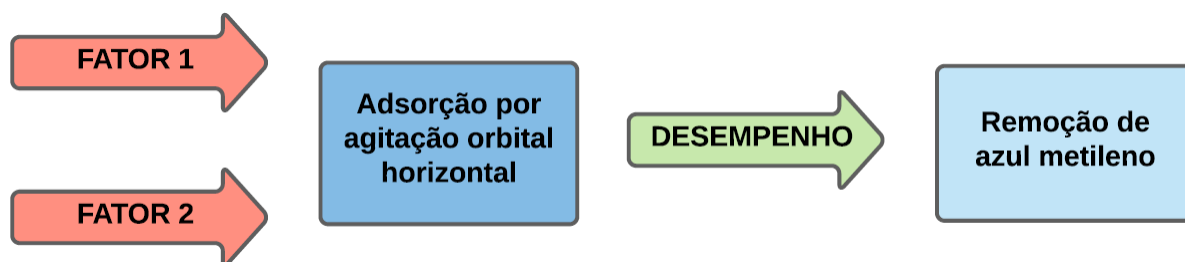
3.5.2 Teste de Adsorção de Azul de Metileno Através de Espectroscopia.

Para a realização dos testes de adsorção foram utilizadas soluções aquosas do corante Azul de Metileno, fórmula química = $C_{16}H_{18}ClN_3S \cdot 3H_2O$, por meio de espectroscopia molecular na região do visível (660 nm). Os testes foram realizados no LARSEN – IFTO, Campus Palmas.

3.5.2.1 Efeito da Quantidade de Material Adsorvente e Concentração de Adsorbato

Foi aplicado um planejamento experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas (DFC), sem repetições, com 11 tipos de combinações entre os fatores. Os fatores estudados foram: Quantidade de carvão ativado e concentração de azul de metileno ($C_{16}H_{18}ClN_3S$), sendo considerado como fator 1 a quantidade de carvão ativado e fator 2 a concentração de azul de metileno, como ilustra a Figura 24.

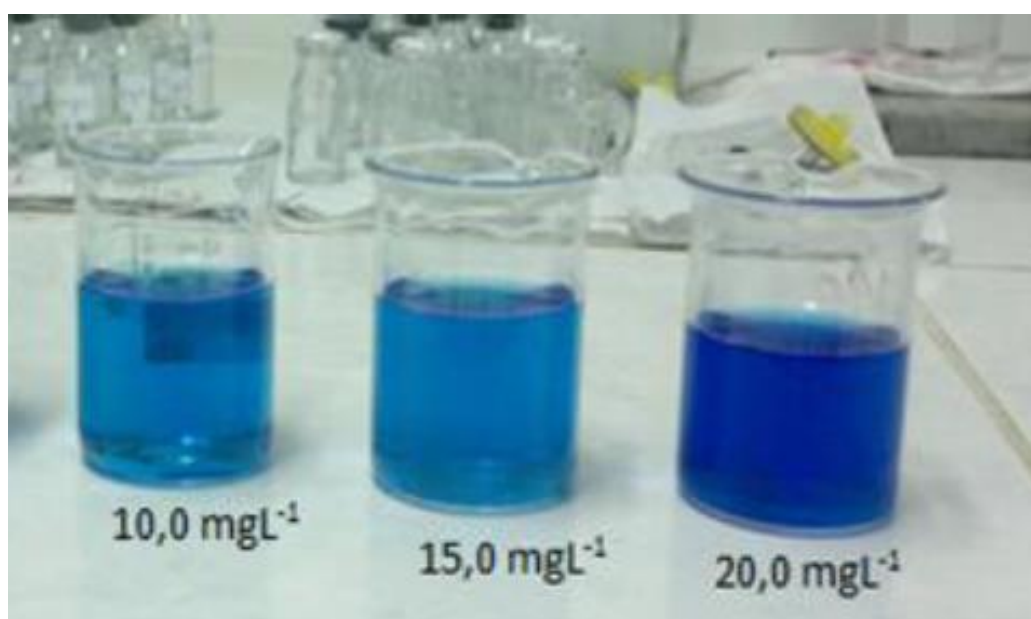
Figura 24: Planejamento experimental adotado no teste de absorção de azul metileno.



FONTE: Proprio autor (2021)

Este teste foi realizado para poder estabelecer o grau de influência da quantidade de carvão ativado e concentração de azul metileno durante o processo de adsorção. Dosagens de 0,50, 0,75 e 1g de material adsorvente foram colocados em contato com uma solução de 30 mL de azul de metileno, na concentração de 10, 15 e 20 mg L⁻¹, e mantidos em agitação durante o tempo de 30 minutos. O procedimento foi realizado em uma Agitador Orbital Horizontal - Tecnal, com velocidade de 60 rpm, e temperatura ambiente. Após a adsorção, as amostras foram filtradas em papel filtro e em sequência realizada a espectroscopia na região do visível (660 nm) para determinar a absorbância, conforme demonstrado nas Figuras 19, 20 e 21.

Figura 25: Soluções de azul metileno, nas diferentes concentrações utilizadas no teste



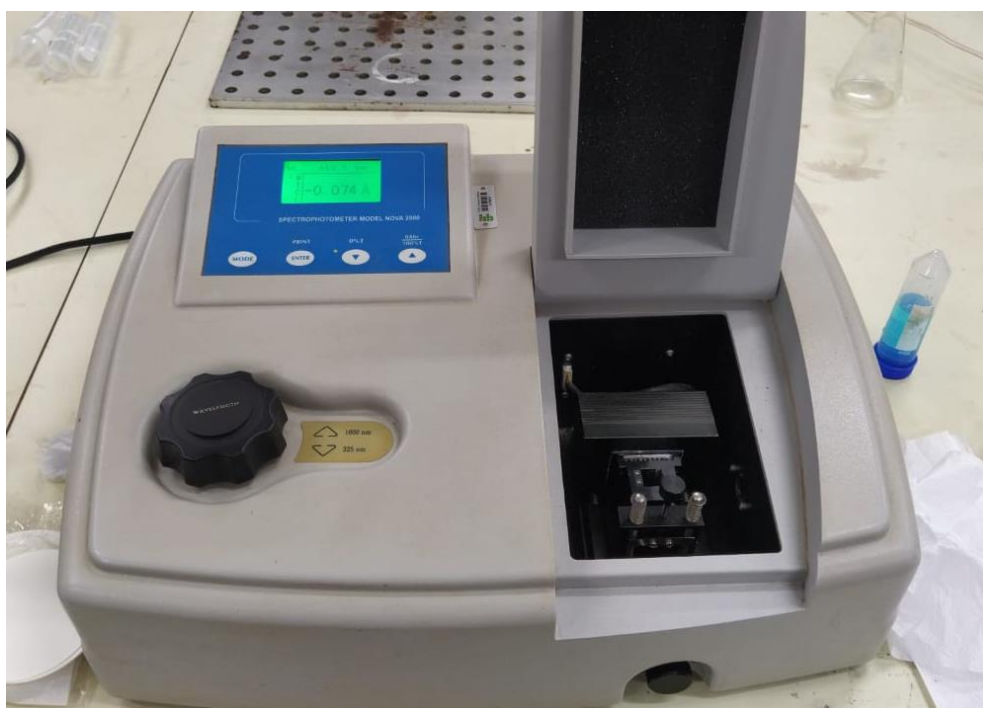
FONTE: Niedersberg (2012) - Adptado

Figura 26: Amostras prontas para iniciar agitação orbital horizontal



FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 27: Spectrophotometer Model Nova 2000



FONTE: Proprio autor (2021)

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

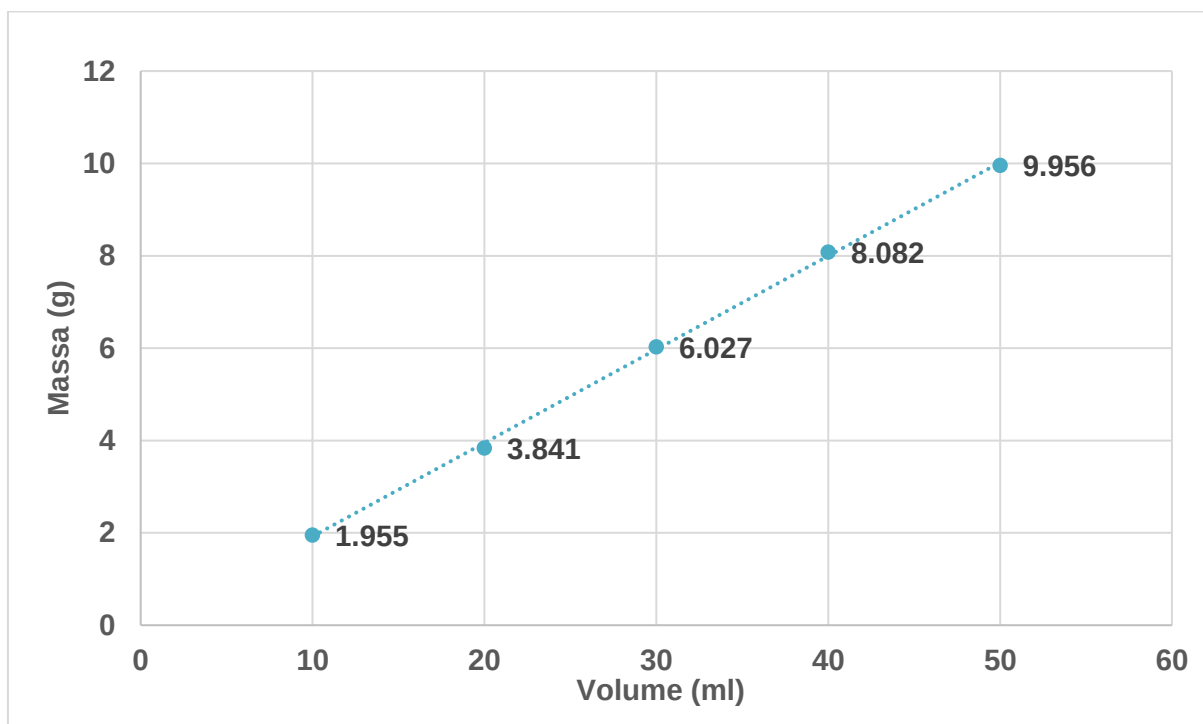
O presente capítulo apresenta os resultados obtidos através da realização de ensaios de caracterização da biomassa e do carvão ativado, em acordo com a metodologia apresentada no capítulo anterior. Os ensaios de caracterização englobam ensaios de densidade aparente, teor de umidade, teor de material volátil, teor de cinzas e teor de carbono fixo. Além do teste de adsorção na concentração de 10, 15 e 20 mg L⁻¹, do corante azul de metileno através de espectroscopia na região do visível (660 nm).

4.1 Caracterização da biomassa do Capim Andropogon

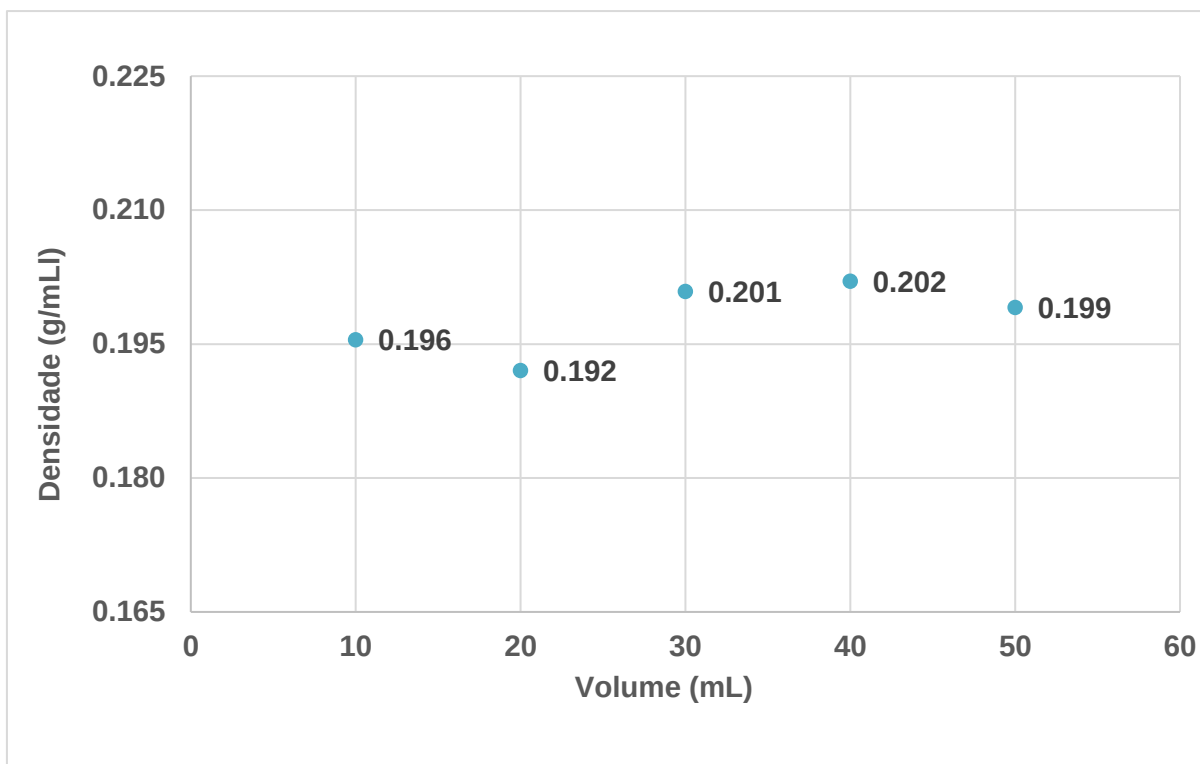
4.1.1 Densidade Aparente

A seguir as Figuras 28 e 29 apresenta os dados obtidos por meio do ensaio de densidade aparente da biomassa, sendo assim possível realizar tal análise.

Figura 28: Relação entre a massa e o volume da biomassa



FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 29: Tendência dos valores de densidade aparente da biomassa

FONTE: Proprio autor (2021)

O valor médio obtido para a densidade aparente do capim Andropogon foi de 0,198 g/mL, apresentando um desvio padrão de 0,0036 e R^2 de 0,9993. Tais parâmetros demonstra confiabilidade na variação dos resultados obtidos. A equação geral da curva de densidade da biomassa pode ser encontrada por: $y = 0,2024x - 0,1007$. A partir da Tabela 3 é possível comparar esse valor com os de outros trabalhos.

Tabela 3 – Resultado de densidade aparente da biomassa e resultados comparativos

		RESULTADOS COMPARATIVOS (g/mL)	
		Pessoa Filho (2013)	Olivares (2002)
PARÂMETRO (g/mL)	Proprio autor (2021)		
	Capim Andropogon	Capim Braquiária	Capim Elefante
Densidade Aparente	0.198	0.277	0.264

FONTE: Proprio autor (2021)

A densidade tem direta influência na qualidade do carvão, tal fator estar

relacionado a presença de mais espaços vazios, ou seja, maior área superficial. Portanto, a menor densidade do Capim Andropogon proporciona maiores vantagens para a sua utilização como um meio filtração em comparação a demais biomassas de maior densidade Nobre et al. (2015).

4.1.2 Análise imediata da biomassa do Capim Andropogon

Os valores dos teores de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo da biomassa do Capim Andropogon, são apresentados na Tabela 4, em conjunto com valores obtidos na literatura para outros tipos de biomassas.

Tabela 4 - Resultado de análise imediata de biomassa

PARÂMETRO (%)	RESULTADOS COMPARATIVOS (%)				
	Próprio autor (2021)	Pedrosa (2019)	Pessoa Filho (2013)	Conto (2016)	Filippeto (2008)
	Capim Andropogon	Capim Andropogon	Capim Braquiária	Capim Elefante	Casca de Arroz
Umidade	0	9.93	10.82	10.63	9.71
Material Volátil	94.13	87.98	72.8	72.54	68.42
Teor de Cinzas	5.87	4.52	7.58	8.26	15.56
Carbono Fixo	0	7.5	19.61	19.2	16.02

FONTE: Proprio autor (2021)

Ao observar a Tabela 4, é perceptível a discrepância entre o valor obtido para a umidade da biomassa em estudo e os demais estudos apresentados, tal variação estar relacionada ao método de ensaio adotado, este trabalho teve-se sua análise imediata ensaiada a parte de uma biomassa em base seca, ou seja, com umidade zero ao iniciar-se o ensaio. Entretanto, podemos observar que segundo Pedrosa (2019) esta mesma biomassa pode apresentar cerca de 9,93% de umidade.

O teor de umidade pode interferir diretamente em outras propriedades, além de apresentar um maior consumo de energia utilizado durante o processo de pirólise, quando presente em maiores porcentagens (VALCARENGHI e RIBEIRO, 2014). Além da do consumo de energia proporcional ao teor de umidade, Gómez (2002) afirma que

o tamanho das partículas da biomassa também poderá influenciar diretamente no processo de pirólise. Segundo Dias *et al.* (2012), uma biomassa pode ser considerada apta à combustão e a pirólise quando sua umidade está caracterizada entre 5 e 10%.

Analisando o valor encontrado para o teor de material volátil, observa-se um maior teor comparado a todos os demais trabalhos, até mesmo ao trabalho desenvolvido por Pedrosa (2019) que apresentou 6,15% a menos de material volátil quando comparado com os resultados encontrado na análise imediata deste trabalho. Tal diferença pode estar ligado ao desenvolvimento da análise utilizando-se a biomassa de Capim Andropogon em base seca. Lewandowski (1997) e Klautau (2008), afirmam que quanto maior o teor de materiais voláteis encontrado, maior será a reatividade e consequentemente, a ignição, facilitando a queima da biomassa.

A biomassa em estudo apresentou teor de cinzas semelhante aos demais trabalhos comparativos, tal teor caracteriza a biomassa como um material de altas características positivas a produção de carvão ativado. Materiais que apresentam um alto teor de cinzas não são consideráveis interessantes para a produção de energia, pois tal presença irá proporcionar uma perda de eficiência do material combustível, que por consequência irá necessitar de uma maior quantidade de oxigênio para derreter as cinzas.

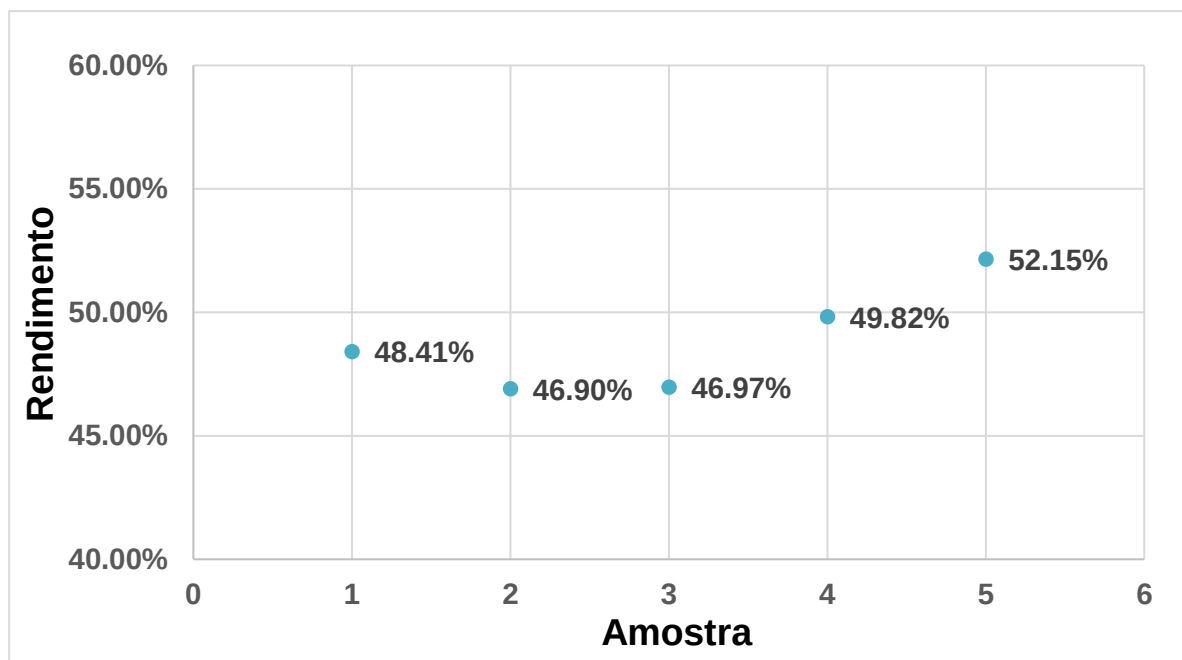
Após a realização de análise imediata da biomassa, foi observado que a mesma não apresentou teores de carbono fixo, diferentemente dos demais estudos em comparação. A realização da análise a partir de uma biomassa com umidade em base seca pode ter contribuído para alcançar tal resultado. Silva (2019) ressalta que materiais que apresentam baixos teores de carbono fixo e maiores taxas de material volátil, mais rápido irão alcançar a combustão, favorecendo assim o processo de pirólise.

4.2 Produção e caracterização do carvão ativado

4.2.1 Rendimento de carvão obtido durante a pirólise de biomassa.

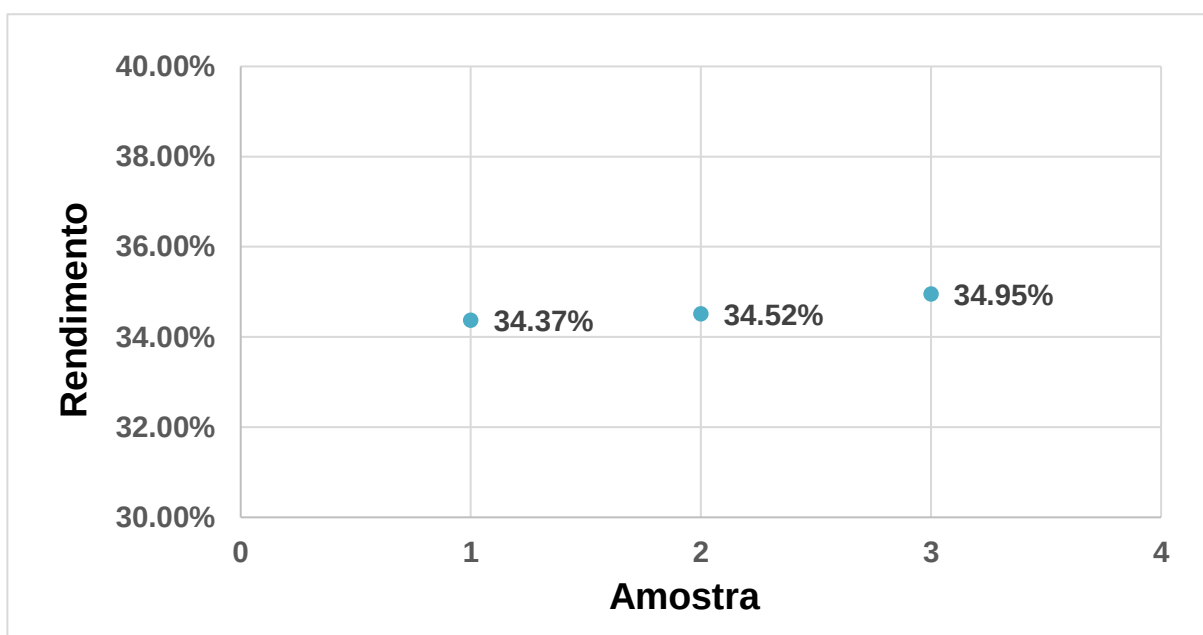
A seguir as Figuras 30 e 31 apresentam os dados obtidos por meio do teste de rendimento do carvão ativado, sendo assim possível realizar tal análise.

Figura 30: Dados de rendimento do carvão ativado obtido por pirólise em 300°C



FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 31: Dados de rendimento do carvão ativado obtido por pirólise em 500°C



FONTE: Proprio autor (2021)

Através da Figura 30, podemos observar que o valor médio de rendimento obtido no processo de pirólise a 300°C foi de 48,85%, apresentando um desvio padrão de 0,019, coeficiente de variação de 0,038 e R^2 de 0,5589. Tais parâmetros demonstra

confiabilidade na variação dos resultados obtidos. A equação geral do rendimento do carvão ativado a 300°C pode ser encontrada por: $y = 0,0104x + 0,4573$.

Através da Figura 31, podemos observar que o valor médio de rendimento obtido no processo de pirolise a 300°C foi de 34,61%, apresentando um desvio padrão de 0,148, coeficiente de variação de 0,42 e R^2 de 0,8619. Tais parâmetros demonstra confiabilidade na variação dos resultados obtidos. A equação geral do rendimento do carvão ativado a 500°C pode ser encontrada por: $y = 0,01488x$.

A Tabela 5 a seguir proporciona uma melhor comparação entre os carvões obtidos nas duas situações testadas.

Tabela 5 – Resultado de análise de rendimento do carvão ativado

RESULTADOS COMPARATIVOS		
PARÂMETRO	Próprio autor (2021)	Próprio autor (2021)
	Pirolise 300°C	Pirolise 500°C
Rendimento (%)	48.850	34.610
Desvio Padrão	0.019	0.148
Coeficiente De Variação	0.038	0.420
R^2	0.558	0.862
Equação geral	$y = 0,0104x + 0,4573$	$y = 0,01488x$

FONTE: Proprio autor (2021)

Ao comparar os dados de rendimento dos carvões ativados produzidos nas duas temperaturas (300 e 500°C), podemos observar um maior rendimento alcançado pelo o carvão produzido em mufla a 300°C. Entretanto, tal observação não leva em conta a análise das características químicas do material.

A temperatura é um parâmetro que interfere diretamente no rendimento de carvão, líquido e gases não condensáveis que a biomassa irá produzir após o processo de pirólise, onde maiores temperaturas irão proporcionar maiores graus de decomposição térmica da biomassa, consequentemente menores taxas de carvão,

afirma Pedroza et al. (2014 *apud* RIBEIRO, 2021 p.43)

Ter o conhecimento do rendimento do material obtido é extremamente importante, pois a partir de tal fator será possível estabelecer a quantidade da biomassa *in natura* (ou em base seca) necessária para a produção de carvão ativado na quantidade desejada. De tal forma, para cada 1 kg de carvão ativado a 300°C será necessário aproximadamente 2,05 kg de biomassa, apresentando rendimento igual a 48,85%.

Raveendran et al. (1996), descreveram os rendimentos obtidos após o processo de pirólise, para outros tipos de biomassas, os quais são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados comparativos de rendimento do carvão

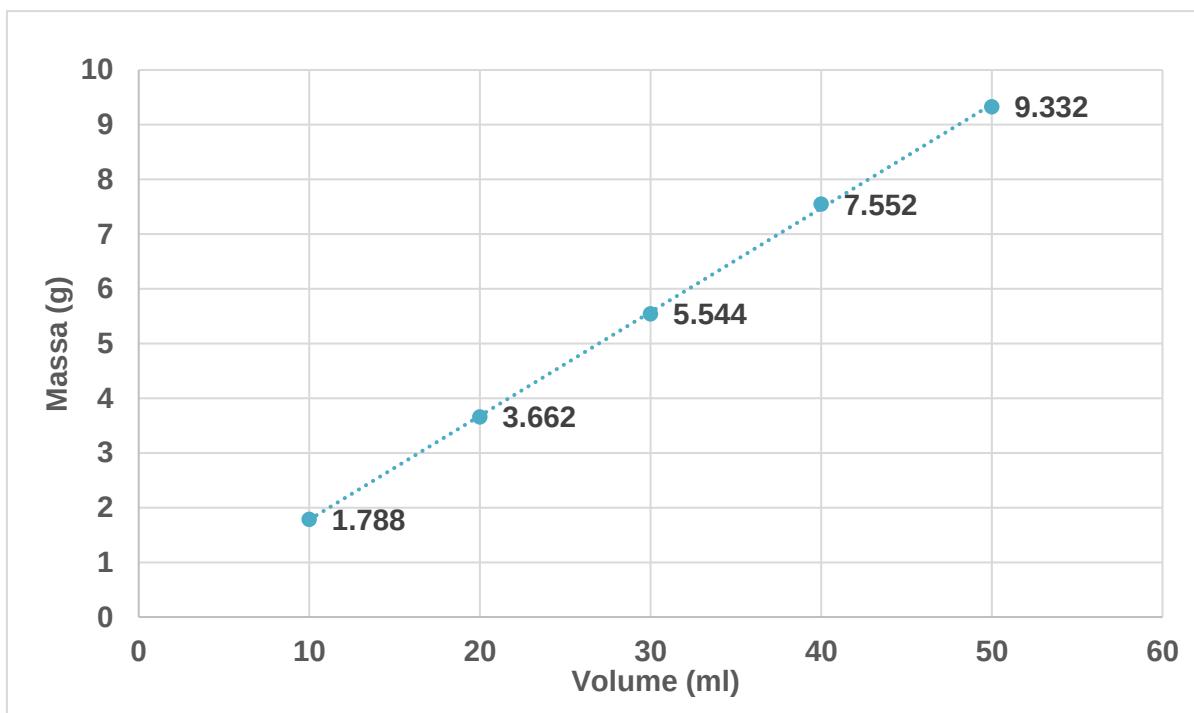
RESULTADOS COMPARATIVOS	
Biomassa	Raveendran et al. (1996)
	Rendimento (%)
Pé de milho	20.10
Casca de amendoim	27.10
Casca de arroz	17.30
Palha de arroz	21.20

FONTE: Raveendran et al. (1996) - Adaptado

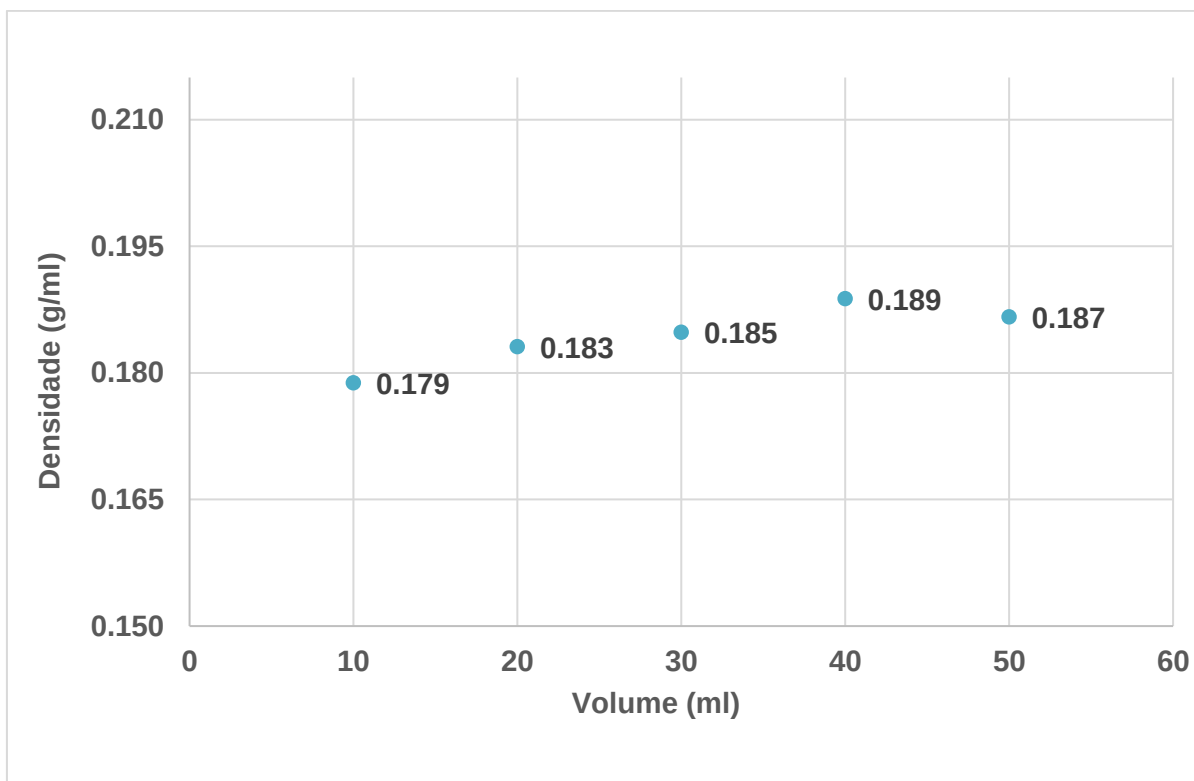
Baseando-se nos resultados comparativos apresentados na Tabela 2, pode-se estabelecer que o rendimento de 48,85% do carvão ativado testado apresenta uma boa taxa de rendimento.

4.2.2 Densidade Aparente do Carvão

A seguir as Figuras 32 e 33 apresentam os dados obtidos por meio do ensaio de densidade aparente do carvão ativado obtido, sendo assim possível realizar tal análise.

Figura 32: Relação entre a massa e o volume do carvão ativado

FONTE: Proprio autor (2021)

Figura 33: Tendência dos valores de densidade aparente do carvão ativado

FONTE: Proprio autor (2021)

O valor médio obtido para a densidade aparente do capim Andropogon foi de 0,184 g/mL, apresentando um desvio padrão de 0,0033 e R^2 de 0,9997. Tais parâmetros demonstra confiabilidade na variação dos resultados obtidos. A equação geral da curva de densidade da biomassa pode ser encontrada por: $y = 0,1898x - 0,1178$.

A baixa densidade do carvão ressalta a qualidade que o mesmo pode apresentar, pois, o mesmo tende a apresentar mais espaços vazios em sua composição e conseqüentemente uma maior área superficial, potencializando sua capacidade de adsorção.

4.2.3 Análise imediata da biomassa do carvão ativado

Os valores dos teores de material volátil, cinzas e carbono fixo do carvão ativado produzido a partir da biomassa do Capim Andropogon, são apresentados na Tabela 7, em sequência a Tabela 8 contendo valores obtidos na literatura para carvões de biomassa de capim andropogon pirolisado em temperaturas variadas e sem a adição de catalisador.

Tabela 7 – Resultados de análise imediata do carvão ativado de capim andropogon

PARÂMETRO (%)	Próprio autor (2021)	Próprio autor (2021)
	Carvão de capim andropogon a 300°C	Carvão de capim andropogon a 500°C
Umidade	-	-
Material Volátil	59.97	39.78
Teor de Cinzas	25.95	27.58
Carbono Fixo	14.08	32.64

FONTE: Proprio autor (2021)

Tabela 8 – Resultados comparativos de análise imediata de carvão ativado de capim andropogon sem a utilização de catalisador

PARÂMETRO (%)	RESULTADOS COMPARATIVOS (%)		
	Pedrosa (2019)	Pedrosa (2019)	Pedrosa (2019)
	Carvão de capim andropogon a 500°C	Carvão de capim andropogon a 450°C	Carvão de capim andropogon a 400°C
Umidade	9.96	9.98	9.92
Material Volátil	42.96	40.88	42.55
Teor de Cinzas	12.6	13.23	13.83
Carbono Fixo	32.77	34.07	31.44

FONTE: Proprio autor (2021)

4.3 Planejamento experimental 2²- Delineamento de faces centradas para o ensaio de adsorção de azul de metileno.

Foram verificados por meio de planejamento multivariável o efeito dos fatores quantidade de carvão ativado (produzido a partir de biomassa de capim andropogon, contendo óxido de cálcio como material catalisador) e concentração de azul de metileno no processo de adsorção, sendo considerado como fator 1 a quantidade de carvão ativado e fator 2 a concentração de azul de metileno ($C_{16}H_{18}ClN_3S$), como ilustra a Figura 24. Esse planejamento teve como finalidade observar o comportamento dos dois fatores durante o processo de adsorção, observando as melhores dosagens a serem aplicadas durante o processo. Os resultados experimentais obtidos no planejamento DFC são apresentados na Tabela 9. A absorbância do corante foi considerada a resposta do planejamento experimental, mostrando o quanto a luz transpassou no recipiente ensaiado indicando as eficiências de remoção, ou seja, valores mais baixos indicam as melhores remoções. Ainda na Tabela 9 podemos observar a eficiência final de cada experimento, mostrando que dos 11 testes realizados, 10 obtiveram resultados acima de 90% de eficiência para a remoção de azul. O destaque em termos de eficiência foi para o experimento 5 (0,50g de carvão ativado e 15 mg/l de azul metileno) que obteve um rendimento de surpreendentes 96,11%.

Tabela 9 – Resultados dos valores da absorvância obtidos através do ensaio de remoção de corante através de adsorção por agitação orbital horizontal.

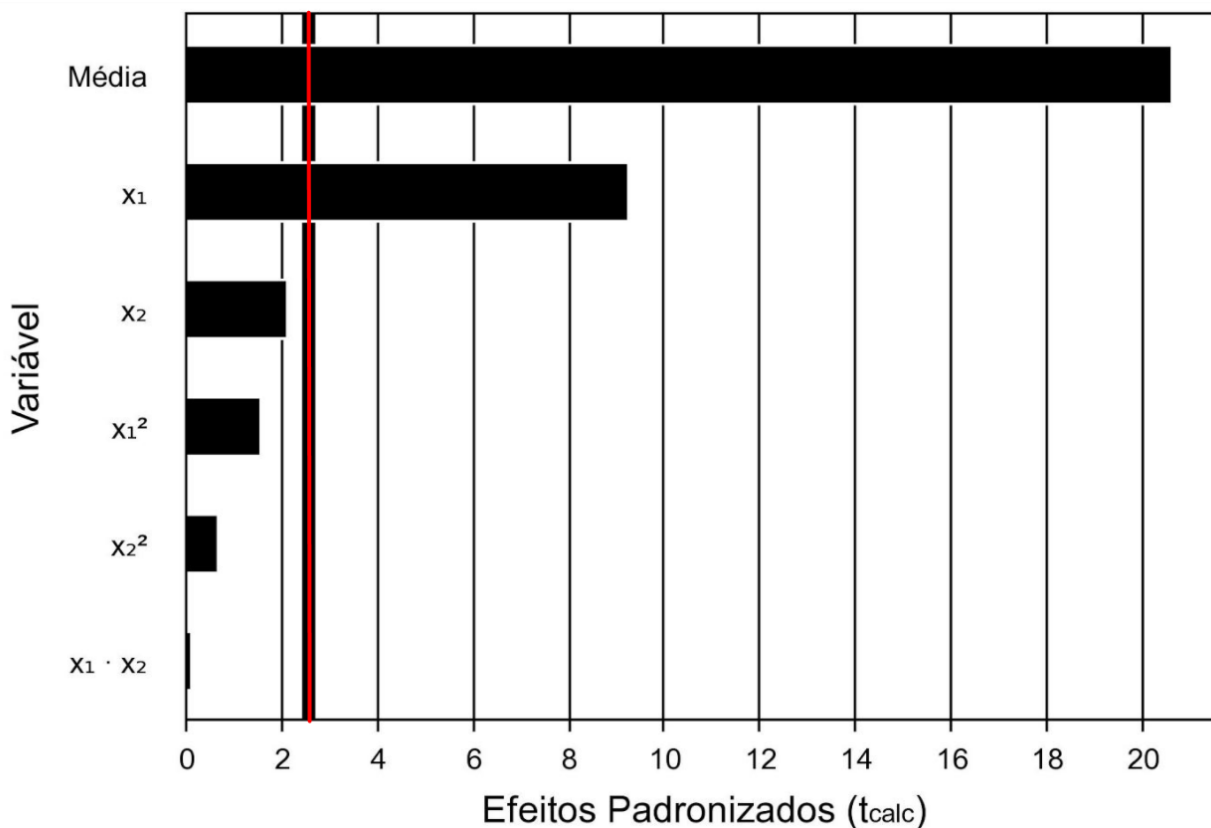
Ordem dos Experimentos	FATORES			
	Carvão Ativado (X1, g)	Azul metileno (X2, mg/L)	Adsorvância (Y1 (-))	Eficiência (%)
1	0.50 (-1)	10 (-1)	0.09	93.43
2	1.00 (+1)	10 (-1)	0.19	87.37
3	0.50 (-1)	20 (+1)	0.12	91.61
4	1.00 (+1)	20 (+1)	0.22	92.78
5	0.50 (-1)	15 (0)	0.11	96.11
6	1.00 (+1)	15 (0)	0.24	92.17
7	0.75 (0)	10 (-1)	0.15	94.90
8	0.75 (0)	20 (+1)	0.16	94.59
9	0.75 (0)	15 (0)	0.14	95.20
10	0.75 (0)	15 (0)	0.15	94.90
11	0.75 (0)	15 (0)	0.15	94.90

FONTE: Proprio autor (2021)

De acordo com os resultados obtidos e considerando as duas variáveis independentes (carvão ativado e azul de metileno) e uma dependente (absorvância), foi possível realizar uma análise estatística, obtendo diversos dados, como o Diagrama de Pareto (Figura 34) gerado a partir dos dados do planejamento fatorial já mencionado indica que o Carvão Ativado (variável 01) teve efeito significativo e a concentração de azul de metileno (variável 02) não teve um efeito significativo durante o processo de adsorção.

De acordo com o Diagrama de Pareto é possível observar que apenas a variável “X1” (Quantidade de Carvão Ativado) está à frente da linha vermelha, ou seja, o que demonstra ser a única variável que teve efeito significativo na adsorção do corante de azul de metileno nas amostras.

Figura 34: Representação do Diagrama de Pareto obtido a partir do Delineamento de Faces Centradas (DFC) na remoção de corante através de adsorção por agitação orbital horizontal.



FONTE: Proprio autor (2021)

A maior redução de corante de azul de metileno foi observada no ensaio 1 (absorbância igual a 0,09), sendo esse experimento operado nas condições: (a) sem ausência de luz (b) temperatura ambiente (c) região visível de 660 nm. A menor remoção de corante (absorbância igual a 0,24) foi obtida no ensaio 6, onde se encontra a dosagem central de azul de metileno e a dosagem superior de carvão ativado. A Figura 35 apresenta o resultado visual do ensaio 1.

Figura 35: Concentração de azul metileno antes e após a realização do ensaio 6.



FONTE: Proprio autor (2021)

A Tabela 10 mostra os coeficientes de regressão das variáveis estudadas na remoção do corante azul de metileno. Foi considerado também o efeito de interação entre as variáveis. Os efeitos significativos foram destacados a um nível de 95% de confiança.

Tabela 10 – Coeficientes de Regressão do Planejamento DFC 2² obtidos da remoção de corante, em intervalo de 95% de confiança.

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	Tcalc	p-valor
Média	0.15	0.01	20.59	0.0000
X1	0.05	0.01	9.22	0.0003
X1 ²	0.01	0.01	1.54	0.1846
X2	0.01	0.01	2.09	0.0905
X2 ²	-0.01	0.01	-0.67	0.5340
X1 . X2	0.00	0.01	-0.14	0.8952

FONTE: Proprio autor (2021)

Com os coeficientes de regressão, obtidos a partir da matriz codificada, foi possível escrever o modelo ajustado que descreve a remoção de corante de azul de

metileno através de adsorção por agitação orbital horizontal, conforme Equação 4.

Remoção de Corante (%):

$$Y_1 = 0,15 + 0,05X_1 + 0,01 X_1^2 + 0,01 X_2 - 0,01X_2^2 + 0 X_1 X_2 \text{ (Equação 4)}$$

Onde:

X_1 = Carvão ativado (g)

X_2 = Azul metileno (mg/L)

A Tabela 11 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a absorção de corante de azul de metileno através de adsorção por agitação orbital horizontal.

Tabela 11 – ANOVA para a absorção de corante de azul de metileno através de adsorção por agitação orbital horizontal.

Fonte de Variação	Soma Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcalculado	p- valor
Regressão	0	5	0	18.4	0.00311
Resíduos	0	5	0		
Falta de ajuste	0	3	0	9.7	0.09449
Erro Puro	0	2	0		
Total	0	10			

$$R^2 = 0.9484; F_{\text{tabelado}} (5; 5; 0.05) = 5.05$$

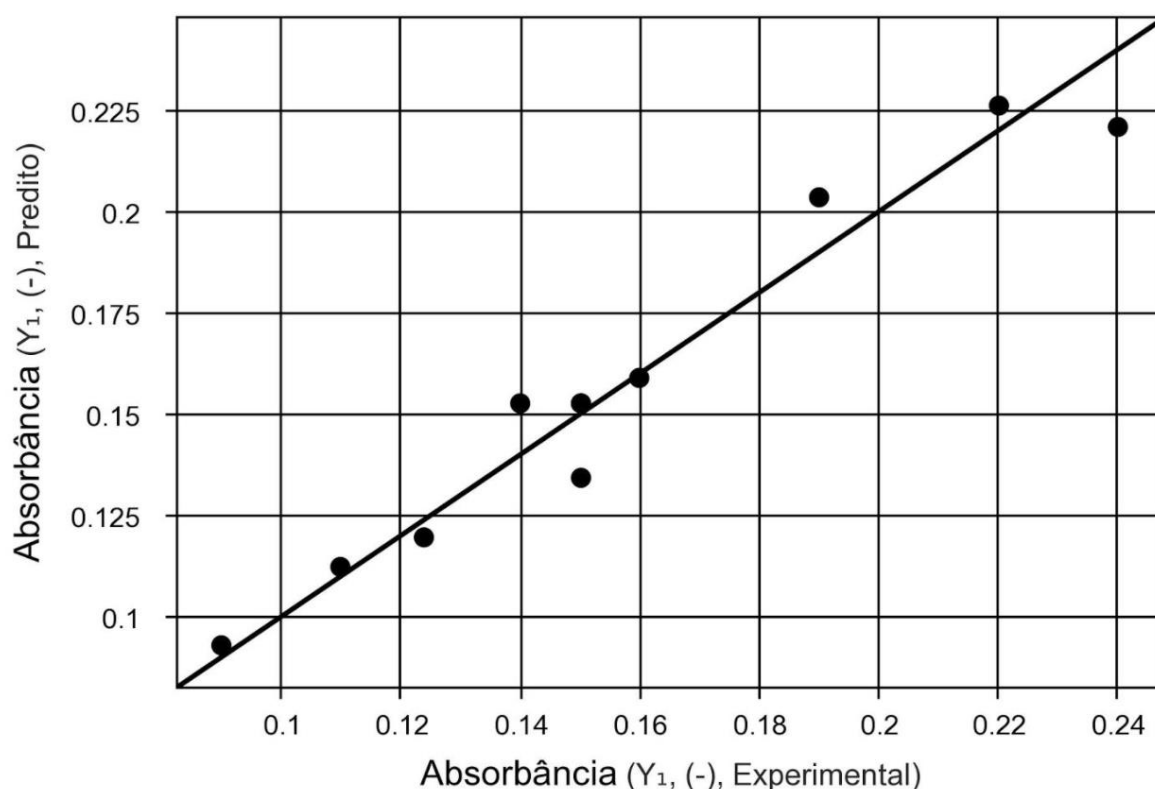
FONTE: Proprio autor (2021)

Verifica-se na Tabela 11 que o coeficiente de determinação (R^2) obtido pela regressão é de 0,9484. A Figura 36 apresenta a comparação entre os valores observados experimentalmente e aqueles preditos pelo modelo ajustado. Observa-se pela análise da Figura 36 um bom ajuste do modelo, justificado pela apreciável aglomeração de pontos próximos da reta representativa.

Para confirmação da significância dos parâmetros do modelo pela análise da ANOVA (Tabela 9), foi realizado o teste F. No teste F para ser significativo

estatisticamente, o valor de F obtido da regressão deve ser maior que o valor de F_{tabelado} (RODRIGUES e LEMMA, 2009). O valor de $F_{\text{calculado}}$ foi determinado pela expressão, $F_{\text{calculado}} = \text{Quadrado médio regressão} / \text{Quadrado médio erro}$. Comparando o valor de $F_{\text{calculado}}$ (18,4) para a regressão com o valor de F_{tabelado} ($F_{\text{tabelado}} = 5,05$), verifica-se uma regressão significativa.

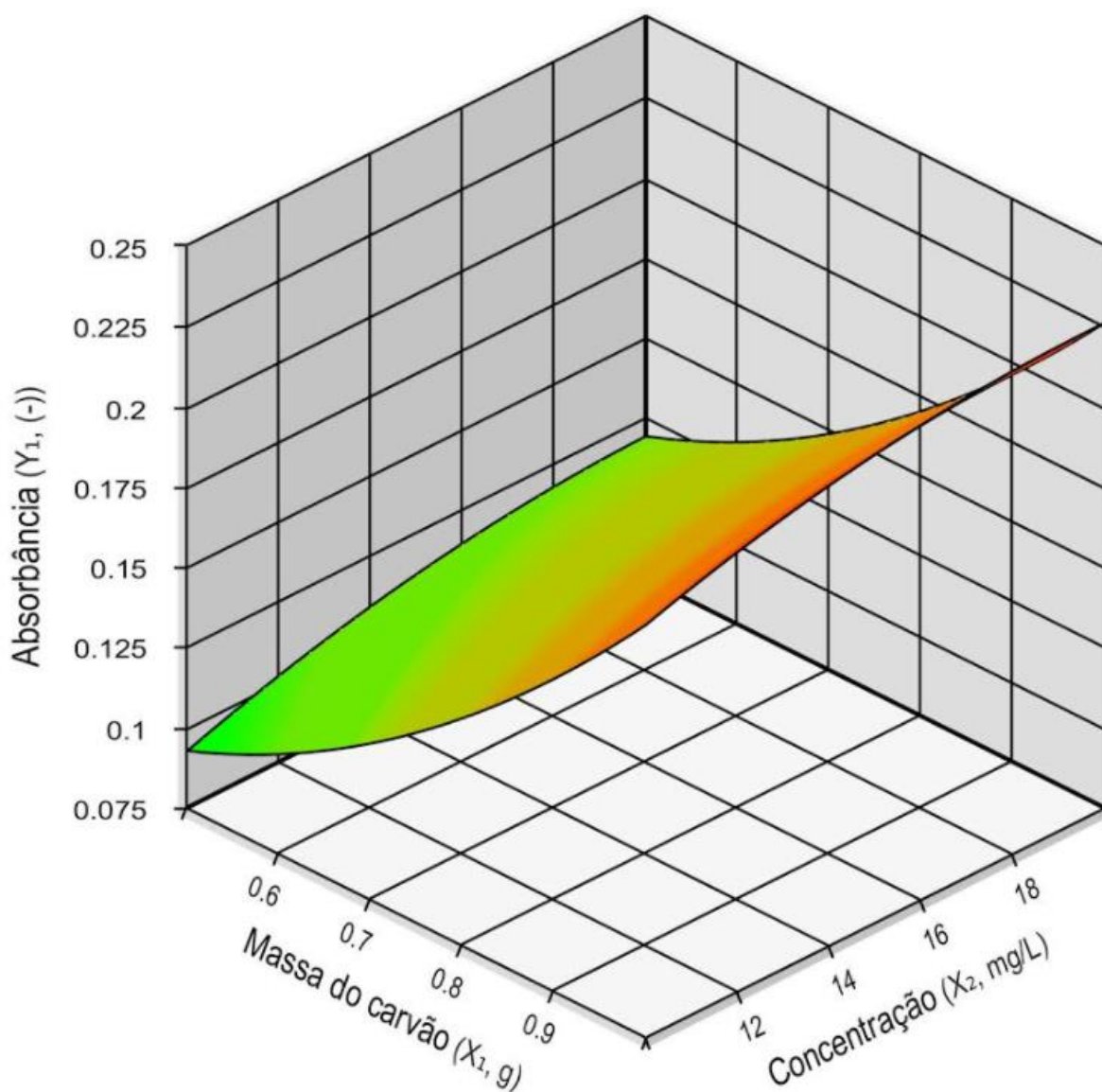
Figura 36: Valores observados versus valores previstos, para a remoção de corante azul de metileno



FONTE: Proprio autor (2021)

Portanto, os dados experimentais são bem representados pelo modelo ajustado, ou seja, o modelo obtido para as variáveis significativas pode ser utilizado para fins preditivos dentro do domínio dos fatores estudados. A mínima quantidade de absorbância foi obtida em condições de baixas quantidades de carvão ativado e concentração de azul de metileno, conforme observado na superfície de resposta gerada pelo modelo da Figura 37.

Figura 37: Superfície de resposta para a adsorção de corante, com os fatores quantidade de carvão ativado e concentração de azul de metileno.



FONTE: Proprio autor (2021)

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi avaliado o potencial do carvão ativado a partir da biomassa do Capim Andropogon, gramínea invasora presente no cerrado brasileira, como material adsorvente na remoção de corante azul de metileno em soluções aquosas.

Ao longo da efetivação dos objetivos específicos apontados nesta pesquisa, atingiu-se as seguintes conclusões:

A densidade aparente do Capim Andropogon (0,198 g/mL) apresentou resultado inferior à outras pesquisas. Biomassas que apresentam baixa densidade se tornam vantajosas como um meio filtrante, devido a presença de mais espaços vazios, ou seja, maior área superficial.

O teor de material volátil resultou em um valor superior em comparação com outras pesquisas, o que aponta para o uso do resíduo em rota térmica para produção de carvão, pois quanto maior o teor de materiais voláteis encontrado, maior será a reatividade e conseqüentemente, a ignição, facilitando a queima da biomassa.

A biomassa em estudo apresentou teor de cinzas semelhante aos demais trabalhos comparativos, tal teor caracteriza a biomassa como um material de altas características positivas a produção de carvão ativado.

A biomassa não apresentou teores de carbono fixo, tornando-a uma excelente fonte de produção de carvão, pois materiais que apresentam baixos teores de carbono fixo e maiores taxas de material volátil, mais rápido irão alcançar a combustão, favorecendo assim o processo de pirólise.

No processo de pirólise do Capim Andropogon e ativação física de carvão em mufla, o material empregado resultou em um rendimento de 48,85% que comparado a outros trabalhos, se encontra superior aos demais resultados adquiridos.

O processo de pirolise realizado em mufla a 300°C apresentou um rendimento de 14,24% superior, quando comparado com a realização a 500°C, ambas utilizando catalisador.

A partir da porcentagem de rendimento obtido pela pirólise, é possível dimensionar a quantidade aproximada de biomassa necessária para a produção de uma determinada quantidade de carvão ativado.

No ensaio de adsorção de azul de metileno foram obtidos ótimos resultados, em que o carvão ativado do Capim Andropogon atuou removendo 96,10% do corante à uma concentração de 15 mg/L e utilização de 0,5g de carvão ativado com 30 minutos de adsorção por agitação orbital horizontal.

Além dos ótimos resultados obtidos, o carvão ativado do Capim Andropogon pode promover economia financeira e um ganho ambiental, pois a biomassa pode ser facilmente encontrada em todo o cerrado brasileiro como uma gramínea invasora.

De forma geral, os resultados apresentados neste trabalho mostraram-se favoráveis quanto à utilização do carvão obtido a partir da biomassa do capim Andropogon, que apresentou características físico-químicas relevantes para o prosseguimento de estudos para sua utilização como meio filtrante.

Recomenda-se para uma futura pesquisa, a adoção de uma metodologia de preparo de amostras de biomassa, contendo algum processo de remoção de contaminantes e afins de maneira minuciosa, para verificar se há divergência considerável na caracterização do material, principalmente, nos teores de material volátil, cinzas e carbono fixo. Além disso, sugere-se realizar a análise termogravimétrica do carvão ativado obtido. Sugere-se também a utilização do Capim Andropogon coletado em diferentes fases de crescimento e períodos do ano.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Janaína Vital de.; **Flora exótica invasora na paraíba: uma análise ecológica e legislativa.** Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade - Vol. 1: Congestas 2013 ISSN. Disponível em: <http://eventos.ecogestaobrasil.net/congestas2013/trabalhos/pdf/congestas2013-et-10-005.pdf>. Acessado em: 29 Mar. 2021.

BACCAR, R. et al. **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. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18653277/>. Acesso em: 02 Abr. 2021.

BORGES, Fábio Morais et al. **Desenvolvimento e criação de uma unidade produtiva de carvão ativado.** In: Encontro Nacional De Engenharia De Produção, 21.out. 2003, Ouro Preto, MG. Anais ... Rio de Janeiro: ABEPRO, 2003. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2003_TR05_02_0601.pdf. Acesso em: 01 Abr. 2021.

BRAGA, Renata Martins. **Pirólise rápida catalítica do capim elefante utilizando materiais mesoporosos e óxidos metálicos para deoxigenação em bio-óleo / Renata Martins Braga.** - Natal, RN, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/13017>. Acessado em: 30 Mar. 2021.

CARDOSO, Bruno Monteiro. **Uso da Biomassa como alternativa Energética.** 2012. Projeto de Graduação – UFRJ – Escola Politécnica – Curso de Engenharia Elétrica, 2012. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005044.pdf>. Acesso em: 04 Abr. 2021.

CASTELLAN, G. **Fundamentos de físico-química.** Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos, São Paulo, 1986. Disponível em: <https://docero.com.br/doc/nx88v8> Acesso em: 09 Jun. 2021

CARMONA, Lara Nobre et al. **Potencial energético da biomassa e carvão vegetal de resíduos de castanha do Pará (Bertholletia excelsa Bonpl.).** III CBCTEM – Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://proceedings.science/cbctem/papers/potencial-energetico-da-biomassa-e-carvao-vegetal-de-residuos-de-castanha-do-para--bertholletia-excelsa-bonpl-->. Acesso em: 01 Abr. 2021.

CONTO. Daniela de. **Conversão termoquímica de capim-elefante em reator rotativo,** 77f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/1239/Dissertacao%20Daniela%20De%20Conto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 Jun. 2021.

CORDEIRO, José Luiz Cordeiro.; FIUZA JUNIOR, R. A. **Produção de Carvões Ativados Derivados de Biomassa e sua Aplicação em Processos de Adsorção.**

Cadernos de Prospecção – Salvador, v. 12, n. 5, p. 1584-1597, dezembro, 2019. Disponível em: <https://portalseer.ufba.br/index.php/nit/article/view/29050>. Acesso em: 26 Mar. 2021.

CLARK, H. L. M. **Remoção de fenilalanina por adsorvente produzido a partir da torta prensada de grãos defeituosos de café**. Dissertação em Ciência dos Alimentos. Faculdade de Farmácia, UFMG, Belo Horizonte. 115 p. 2010.

COSTA, Newton de Lucena et al. **Formação e manejo de pastagens de Capim-Andropogon em Rondônia**. 200. Recomendações técnicas – EMBRAPA. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/100790/1/RT-25-pastagem.pdf>. Acesso em: 03 Abr. 2021.

CRUZ JUNIOR, O. F. **Produção de carvão ativado a partir de produtos residuais de espécies nativas da região Amazônica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp148880.pdf>. Acesso em: 06 Jun. 2021.

DEL PIERO, I. R. A. **Produção de carvão a partir do ouriço e casca da Castanha do Pará**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Educação e Meio Ambiente, Ariquemes, 2018. Disponível em: <http://repositorio.faema.edu.br/handle/123456789/2124>. Acesso em: 06 Jun. 2021.

DUARTE, R. V. de L. **Preparação de compósitos de óxido de ferro e carvão ativado do ouriço (mesocarpo) da Castanha do Brasil para remoção de corante azul de metileno em meio aquoso**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas, 2017. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/7252>. Acesso em: 15 jun. 2021.

FILIPPETO, D. **Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado**. Dissertação de Mestrado (Faculdade de Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas. SP, 2008. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264782> Acesso em: 15 Jun. 2021.

FONTOURA, C. F., BRANDÃO, L. E., & GOMES, L. L. **Elephant grass biorefineries: towards a cleaner Brazilian energy matrix?**. J. Clean Prod., 2015.

GUEDES, Carmen L. B. et al. **Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina**. Química Nova, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 781-786, 2010. Disponível em: http://quimicanova.sbq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=5122 Acesso em: 26 Mar. 2021.

LEWANDOWSKI, I; KICHERER, A. **Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of Miscanthus x giganteus**. European Journal of Agronomy, v. 6, p. 163 – 177, 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1161030196020448>. Acesso em: 15 Jun. 2021.

MACÊDO, Lúcia Paula Martins Prado de. **Viabilidade da produção de carvão ativado a partir de resíduos alternativos**. 2012. 92 f. Dissertação (Mestrado em

Desenvolvimento de Processos Ambientais) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2012. Disponível em: <http://tede2.unicap.br:8080/handle/tede/624>. Acesso em: 02 Abr. 2021.

MIRANDA, C.; **Análise de áreas degradadas no parque estadual do Iajé**. 2009. Trabalho de curso – Tecnologia em Gestão Ambiental - Faculdade Católica do Tocantins, Palmas. Disponível em: http://gesto.to.gov.br/site_media/upload/gestao/documentos/Projeto_Catolica-TO_Analise_de_areas_degradadas_no_PEL.pdf. Acessado em: 30 Mar. 2021.

MOREIRA, Renata. **Estudo da pirólise lenta da casca da castanha de caju**. Dissertação (Mestrado) – IPEN, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, 2015. Disponível em: http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Renata%20Moreira_M.pdf Acesso em: 29 Mar. 2021.

NASCIMENTO, R. F. et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/10267/1/2014_liv_rfdnascimento.pdf. Acesso em: 11 Jun. 2021.

NOBRE et al., **Produção e Qualidade do carvão ativado de resíduos madeireiros de espécies do Estado do Pará**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2015.

OLIVARES GOMEZ, Edgardo. **Estudo da pirolise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão**. 2002. 369p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/257210>. Acesso em: 12 Jun. 2021.

PEDROSA, Argemiro Lima. **Utilização do carvão produzido a partir do capim Andropogon (*Andropogon Gayanus Kunt cv. Planaltina*) para o pós-tratamento de efluente de indústria de tinta por filtração**. 2019. 113f. Dissertação (Mestrado em Química Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Química Ambiental, Gurupi, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11612/1284> Acesso em: 03 Abr 2021.

PEDROZA, Marcelo Mendes. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15915>. Acesso em: 30 Mar. 2021.

PESSOA FILHO, J.S. **ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DE BRIQUETES DE CAPIM BRAQUIÁRIA**. 2013. 85p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. Disponível em: <http://clyde.dr.ufu.br/handle/123456789/14926>. Acesso em: 15 Jun. 2021.

REIS, Amanda Da Silva; SILVA, Niléia Cristina Da; NEVES, U. M. **Produção do Carvão ativado a partir de casca de arroz**. Revista Interdisciplinar da UFT, v. 13, n. 1984, p. 89–103, 2015.

RAVEENDRAN, K.; GANESH, A.; KHILAR, K.C. **Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components.** *Fuel*, v. 75, n. 8, p. 987–998, 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0016236196000300> Acesso em: 17 Jun. 2021.

RIBEIRO, Fabricio Borges. **Pirólise da casca de castanha do Pará visando a produção de carvão para fins industriais.** 2020. 34 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2020.

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos.** 2. ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009. 358 p.

SANTOS, K. G. **Aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: fluidodinâmica e cinética do processo.** Tese (Doutorado)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15058/1/TeseParte1.pdf>. Acesso em: 01 Jun. 2021

SILVA, F. T. M. - **Valorização da madeira Eucalyptus sp. via pirólise [recurso eletrônico]: caracterização e rendimentos dos produtos.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24524> Acesso em: 18 Jun. 2021.

VALCARENGHI, G.; RIBEIRO, L. F. P. **Adsorção de azul de metileno de solução aquosa com utilização. de pó de serragem de mdf e madeirite e carvão ativado granular.** XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis, Brasil. DOI: 10.5151/chemeng-cobeq2014-1174-20660-181424. 2014. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8414> Acesso em: 16 Jun. 2021.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma fornalha a lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grãos.** Dissertação. 192f. (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba: 2008. Disponível em: <https://www.acervodigital.ufpr.br/handle/1884/17778> Acesso em: 15 Jun. 2021.